

126-56

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

( B A W )

Untersuchung

der Sedimentationsverhältnisse in der Unterems und im Dollart

nach einer geplanten Emsumleitung

Aufgestellt von: Außenstelle Küste  
Fachgruppe  
Seebaugrundlagen

Hamburg, im Oktober 1977

<u>Inhaltsübersicht</u>	<u>Seite</u>
1. Einführung .....	3
2. Die Ermittlung der Komponente des Feststoffhaushalts .....	8
2.1 Der Antransport von Feststoffen mit dem Oberwasser .....	10
2.2 Die Sedimentation im Emdener Fahrwasser...	20
2.2.1 Der Vergleich der Sediment- und Baggermengen .....	23
2.2.2 Die Sedimentation im Seehafen Emden..	27
2.2.3 Die Abhängigkeit der Menge des im Emdener Fahrwasser und im Hafen Emden abgelagerten Sediments von der Tiefe der Ausbaggerungen und der Oberwassermenge .....	31
2.2.4 Die Sedimentation im Emdener Fahrwasser nach 1964/65 .....	41
2.2.5 Der flutseitig überwiegende Feststofftransport .....	51
2.2.5.1 Die allgemeine Tide- und Transportdynamik .....	51
2.2.5.2 Die Dichteströmung .....	64
2.2.5.3 Beobachtungsbeispiele über Stromauftransport in der Ems .....	77
2.2.5.4 Das Auftreten von Schlammfließen in der Ems .....	86
2.2.5.4.1 Die Feststoffverteilung in der Brackwasserzone .....	87
2.2.5.4.2 Das Schlammfließen .....	95
2.3 Die Sedimentation im Dollart .....	106
2.3.1 Die Wiederverlandung des Dollart und ihre unterschiedliche Wertung .....	107
2.3.2 Die Sedimentationsgeschwindigkeit im Dollart .....	111
2.3.3 Die örtliche Verteilung der Auflandung im Dollart .....	119
2.3.4 Die Entwicklung der Rinnen des Dollart .....	125
2.3.5 Die Kornzusammensetzung der Dollart-Sedimente .....	144
2.3.6 Die Auswirkung einer Umleitung der Ems durch den nördlichen Dollart auf die Sedimentation im Dollart .....	149

<u>Inhaltsübersicht, Fortsetzung</u>		<u>Seite</u>
3.	Die Geiserinne .....	152
3.1	Die Ermittlung stabiler Querschnitte ...	153
3.1.1	Die Größe der Scherspannung für Stabilität des Durchflußquer- schnitts im Dollartmund .....	158
3.1.2	Die Bemessung des Durchflußquer- schnitts im Dollartmund .....	162
3.2	Die Stabilität der Grundrißlage der Geiserinne .....	170
3.3	Der Feststoffgehalt im Tidewasser der Geiserinne.....	174
4.	Der tideoffene Seekanal .....	179
4.1	Der Feststoffgehalt des Flutwassers im tideoffenen Seekanal .....	180
4.2	Der Einfluß der Bewegungen der Brack- wasserzone auf den Feststoffgehalt im Wasser des Seekanals .....	191
4.3	Die Flutwassermenge und ihr Einlaufen in den tideoffenen Seekanal .....	199
4.4	Die Sedimentation im tideoffenen Seekanal .....	203
4.5	Die erforderlichen Unterhaltungs- baggerungen im tideoffenen Seekanal ....	207
4.6	Die Dichteströmung im tideoffenen See- kanal und die Unterhaltungsbaggerungen bei weiterer Vertiefung .....	211
4.7	Die Baggerungen auf der Zufahrt zum tideoffenen Seekanal .....	227
4.8	Die Diskussion der Ermittlung des Er- fordernisses an Unterhaltungsbaggerun- gen im tideoffenen Seekanal und Beur- teilung der Auswirkung einer Abschleu- sung (Dollarthafen) .....	231
5.	Zusammenfassung .....	239
6.	Verzeichnis der zitierten Literatur .....	251

## 1. Einführung

In der Emsmündung und im Seehafen Emden werden zur Zeit (1976) rd. 11,5 Mio m<sup>3</sup> pro Jahr zur Unterhaltung des Fahrwasser und der Wassertiefe in den Häfen gebaggert. Der Aufwand für solche Unterhaltungsbaggerungen hat seit dem Beginn der Baggerungen zur Vergrößerung der für die Schifffahrt vorgehaltenen Tiefen entsprechend der jeweils neu hergestellten größeren Wassertiefe zugenommen.

Zurückzuführen ist das Anwachsen des Unterhaltungsaufwands einmal darauf, daß mit den größeren Ansprüchen an die Fahrwassertiefe jene Strecken an Länge zunehmen, welche die gewünschte Tiefe nicht von Natur aus aufweisen. Die Erfahrung zeigte darüber hinaus aber auch, daß sich durch ein tieferes Ausbaggern von Fahrwasserabschnitten der Ems das Baggerbedürfnis über den bisher auf diesen Strecken erbrachten Aufwand hinaus vergrößerte. Hier wurde durch das Ausbaggern das natürliche Gleichgewicht zwischen der Dynamik der Tidebewegung und der Querschnittsgröße am Ort der Vertiefung gestört. Als natürliche Reaktion wird der Querschnitt durch verstärkte Sedimentation gegenwärtig eingeschränkt.

Dieser Tendenz kann durch Errichtung von Bauwerken wie Buhnen oder Leitwerken entgegengewirkt werden. Durch die Bauwerke wird der Durchflußquerschnitt über der Sohlenbreite, welche nicht von der vertiefenden Ausbaggerung betroffen ist, in einem die Sohlenvertiefung ausgleichenden Maße eingeschränkt oder es wird die evtl. ungünstig über den Querschnitt verteilte Strömung in der ausgetieften Rinne konzentriert.

Diesem Regelungsgedanken folgend sind in den zurückliegenden Jahren in einigen Abschnitten der Tideems die Unterhaltungsbaggerungen durch den Bau von Regelungswerken unterstützt worden. Die letzte durchgeführte Maßnahme dieser Art war der Ausbau des Emders Fahrwassers in den Jahren 1960 bis 1964 mit beiderseitigen Buhnenreihen. Für andere Fahrwasserstrecken, welche bisher ausschließlich durch Baggerungen auf der gewünschten Tiefe

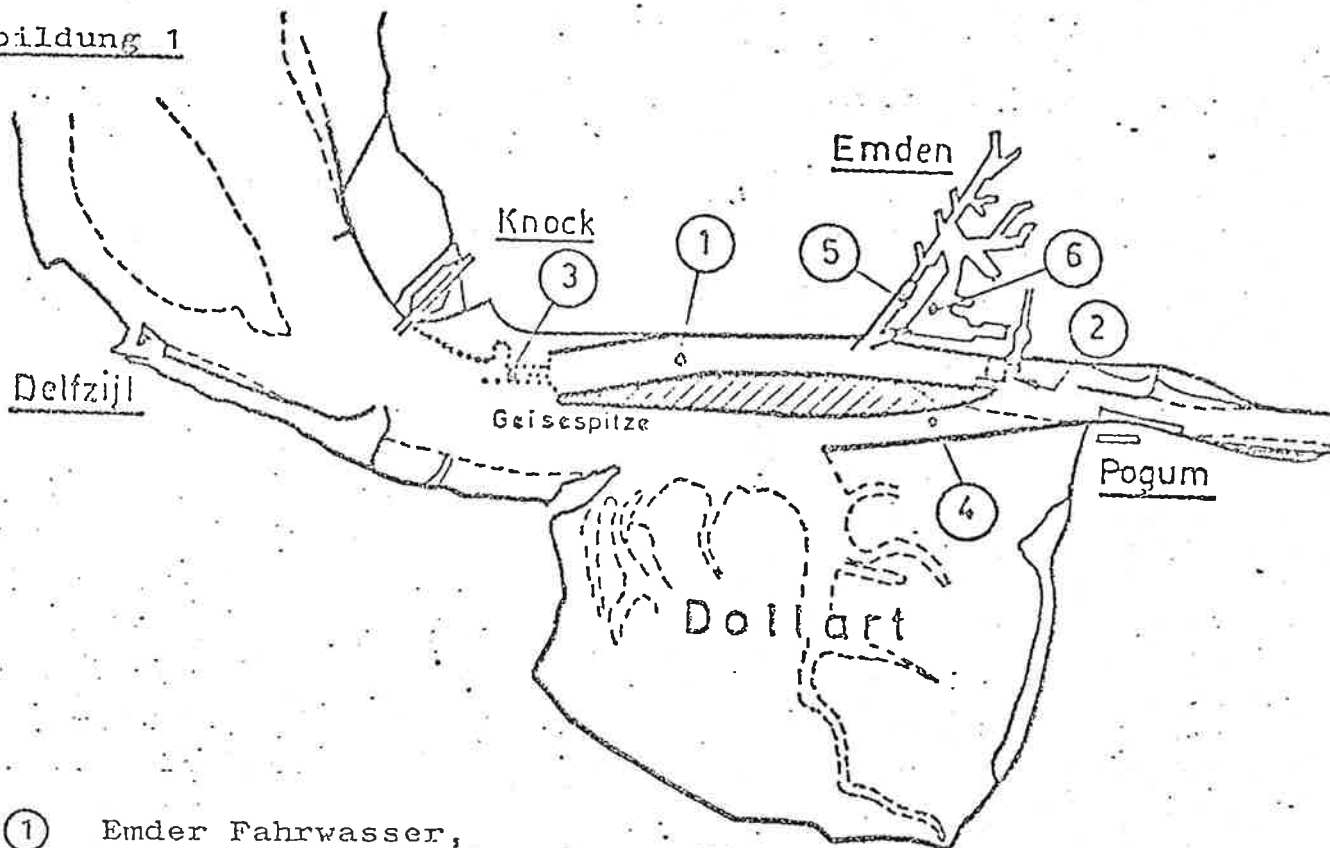
gehalten wurden, ist in Modelluntersuchungen bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Hamburg-Rissen in Einzelversuchen zwischen 1966 und 1969 überprüft worden, in wieweit auch dort durch begleitende Baumaßnahmen die Unterhaltung erleichtert werden kann und die nautischen Bedingungen zu verbessern sind. Mit der großen Anzahl von 11 Versuchsreihen und zum Teil mehreren Ausbauprodukten erfüllen diese Untersuchungen eine der Vereinbarungen des deutsch-niederländischen Vertrages vom 8.4. 1960 (Ems-Dollart-Vertrag). Nach Art. 3 dieses Vertrages ist ein gemeinsamer Plan zur großzügigen Verbesserung der bestehenden und ggfs. der neuen Fahrwasser der Ems aufzustellen.

Die hierfür im Modell überprüften Regelungsvarianten für Fahrwasserfehlstellen im Ostfriesischen Gatje, dem Gatjebogen und zum Teil auch jene im Emdener Fahrwasser/Dollart-Bereich haben sich als unterschiedlich wirksam erwiesen. In den meisten Fällen deutete sich an, daß der zu erwartende Erfolg den erforderlichen großen Bauaufwand nicht voll rechtfertigen würde.

Günstig bewertet wurde jedoch ein Vorschlag, nach welchem die Unterhaltung des Emdener Fahrwassers durch eine Umleitung der Ems durch den Dollart erleichtert und die nautischen Verhältnisse im Gatjebogen verbessert werden können.

In die Modelluntersuchungen ist auch der Bereich des Emdener Fahrwassers wieder mit aufgenommen worden. Im Emdener Fahrwasser wurde bei dem oben genannten Bühnenausbau 1960 - 1964 bereits die Möglichkeit erschöpft, durch Querschnittseinschränkungen eine weitere Vertiefung der Gewässersohle auszugleichen. Es bieten sich jedoch Regelungsmaßnahmen durch Veränderung der Abfluß- und Wassermengenverteilung an. Der entsprechende Vorschlag sieht eine Umleitung der Ems durch den nördlichen Dollart mit einem Durchstich der Geise und einer Abdämmung der Ems dicht oberhalb der Einfahrt zum Seehafen Emden vor (Abb. 1). Durch diese Maßnahme werden das Oberwasser der Ems und die Tidewassermenge der oberen Ems mit der Tidewassermenge des Dollart vereinigt. Das Emdener Fahrwasser erhält den Charakter eines tideoffenen Seekanals und kann in einer zweiten Ausbaustufe durch Abschleusen der seeseitigen Zufahrt zu einem Binnenhafenbecken umgewandelt werden.

Abbildung 1



- ① Ems Fahrwasser,  
nach Bau von ② und ④ : Tideoffener Seekanal,  
nach Bau von ③ : Binnenhafen
- ② Abdämmung der Ems oberhalb von Emden
- ③ Schleuse zur Absperrung des Seekanals
- ④ Geiserinne zur Umleitung der Ems
- ⑤ derzeitiger Außenhafen Emden
- ⑥ derzeitiger Binnenhafen Emden

Abb. 1 : Übersichtsskizze

Die Umgestaltung des Emders Fahrwassers in einen tideoffenen See-kanal und seine Abschleusung nach einer Umleitung der Ems sind in Modellversuchen seit 1974 bei der BAW eingehend untersucht worden. Die Modellergebnisse bestätigen die Erwartungen, die in diese Untersuchungsvariante gesetzt wurden. In den Versuchen werden über die bereits beantworteten allgemeinen hydrodynamischen Fragen und diejenigen nach den zukünftigen Aufwendungen für die Unterhaltung der Wassertiefen hinaus die bestmöglichen Lösungen für bauliche Einzelheiten erarbeitet.

Bei einer Umleitung der Ems durch den Dollart wird der Gatjebogen aus dem Dollartmund heraus konzentriert und in einer einheitlichen Nordwestrichtung angeströmt. Es entfällt die z.Zt. für die Unterhaltung so störende Querkomponente aus dem Emders Fahrwasser. Nach den Ergebnissen der Modellversuche wird es danach möglich sein, der z.Zt. unvorteilhaft starken Krümmung des Gatjebogens eine mehr gestreckte Linienführung zu geben. Sie erfüllt die nautischen Anforderungen weit besser als die heutige und ist mit wesentlich geringerem Baggeraufwand zu unterhalten. Auch auf der aus dem Gatjebogen abzweigenden Zufahrt zum Hafen Delfzijl, welche wegen des untiefen Rückens zwischen Hauptfahrwasser und der Bucht von Watum \*) durch Baggerungen offengehalten werden muß, verspricht diese Lösung stabile Verhältnisse. Maßgebend für die Wirtschaftlichkeit dieses Projekts der Fahrwasserverbesserung ist die fast völlige Einsparung der Baggerungen im heutigen Emders Fahrwasser.

Die Maßnahme stellt einen bedeutenden Eingriff in den Feststoffhaushalt der inneren Emsmündung dar. Soweit es die örtlichen Sandbewegungen betrifft, ist deren zukünftiges Verhalten im Modell mit beweglichem Sohlenmaterial bei der BAW untersucht worden. Ergänzend dazu sollen die allgemeinen Transport- und Sedimentationsvorgänge der Feststoffe einschließlich des Schlicks

---

\*) Zur allgemeinen Orientierung ist dieser Untersuchung eine Übersicht über die Emsmündung nachgeheftet.

untersucht werden. Im Gegensatz zur Tidebewegung entziehen sie sich in ihrer Vielfältigkeit bisher den Versuchen einer Vorausberechnung.

Auf Veranlassung der Emskommissare ist die Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste - daher 1974 beauftragt worden, die Wirkung der Emsumleitung auf die Sedimentationsverhältnisse aufgrund der allgemeinen wissenschaftlichen Erkenntnisse, der örtlichen wasserbaulichen Erfahrungen und der Naturmessungen in der Emsmündung darzustellen.

Die Bearbeitung wird als Zusammenfassung und Wertung der Beobachtungen der örtlichen deutschen und niederländischen Dienststellen durchgeführt. In erster Linie wurden die Ergebnisse bereits ausgeführter Messungen der einzelnen hydrologischen Faktoren herangezogen und im Hinblick auf die künftigen Veränderungen interpretiert. Daneben wurden im Rahmen des Meßprogramms "Erfassung der Umweltfaktoren in der Unterems und im Dollart" einige spezielle Untersuchungen durchgeführt.

Es ist das Ziel der folgenden Darlegungen, die nach einer Emsumleitung in gewissem Grade geänderten Sedimentationsverhältnisse voraussagend zu beschreiben. Dabei ist wegen der Kompliziertheit der Vorgänge notwendigerweise ein Vorbehalt hinsichtlich der möglichen Aussageschärfe zu machen. Dem wird nachfolgend dadurch Rechnung getragen, daß die Schilderungen der Ausgangszustände auf die maßgebenden Komponenten beschränkt und die Darstellung der Abläufe für den Zustand nach erfolgter Emsumleitung auf die abschätzbaren Details vereinfacht wird.



2. Die Ermittlung der Komponenten des Feststoffhaushalts

Eine Aussage über den Feststoffhaushalt läßt sich durch Bilanzmessungen in den Durchflußquerschnitten nur für die jeweilige Meßtide gewinnen. Wegen der Abhängigkeit von den unregelmäßigen meteorologischen Bedingungen ist dieses Ergebnis nicht repräsentativ für den durchschnittlichen Jahresgang. Für die hier anzustellenden Betrachtungen ist es jedoch erforderlich, mittlere Verhältnisse des Feststoffhaushalts mit langzeitiger Gültigkeit zu kennen, welche eine Extrapolation in die Zukunft zulassen. Statt aus den Transportmengen werden solche Kenntnisse aus den Sedimentmengen im Bilanzgebiet gewonnen, welche sich aus den häufig durchgeführten Sohlenhöhenaufnahmen errechnen lassen. Zusammen mit der Feststoffanfuhr durch das Oberwasser ermöglicht die Kenntnis des Sedimentvorgangs einen geschlossenen Überblick über den Gesamthaushalt der Feststoffe im Bereich von Dollart und Ender Fahrwasser.

Der Feststoffhaushalt läßt sich durch Messen des Transports durch die das Bilanzgebiet begrenzenden Durchflußquerschnitte eindeutig bestimmen. Es werden die eintreibenden Mengen an sedimentierbarem Material erfaßt und diejenigen Stoffe, welche nach chemischer oder biologischer Umsetzung zum Sediment beitragen können. Die Differenz gegenüber den im Ausflußquerschnitt gemessenen Größen ergibt die im Bilanzgebiet zurückgehaltene Feststoffmenge.

Messungen der vorgenannten Art sind auch im Emsmündungsgebiet durchgeführt worden. Abgesehen von der Unzulänglichkeit des bei solchen Messungen im allgemeinen betriebenen Aufwands ( zu großer Abstand der Meßpunkte im Querprofil (Schnoor, 1959), ist ihr Ergebnis nur zutreffend für die gerade erfaßte Meßtide. Die ausgeführten Messungen waren daher in keinem Falle in der Lage, z.B. die bekannte Größe der durch die Baggerungen zu entfernenden Sedimentmenge zu repräsentieren. Bei den in ihren jeweiligen Auswirkungen stark schwankenden meteorologischen Bedingungen wäre es ein Zufall, wenn die beim Messen während einer Einzeltide erfaßten Größen den Mittelwert des Jahrganges wiedergeben würden.

Die in der vorliegenden Stellungnahme anzustellende Betrachtung soll auf zukünftige und gegenüber den heutigen Verhältnissen geänderte Umstände extrapoliert werden. Sie kann sich daher nur auf durchschnittliche Werte beziehen. Solche sind für den Feststofftransport jedoch nicht durch Einzelmessungen zu gewinnen. Die Ausführung von aussagefähigen Dauermessungen überstiege im Tidegebiet jedoch den üblicherweise für vertretbar gehaltenen Aufwand.

Als langfristig gültige Ermittlungsgrößen (mittlere Werte) lassen sich dagegen aus dem Feststoffhaushalt die in der Emsmündung durch häufig wiederholte Messungen der Höhenlage der Gewässersohle (Nivellements, Lotungen, "Peilungen") in entsprechenden Kartierungen (Karten, Lotungspläne, "Peilpläne") festgehaltenen Änderungen der Sedimentmenge ermitteln (2.2.). Oberhalb

der Tidegrenze werden zudem in neuerer Zeit regelmäßig die Menge der mitgeführten Feststoffe und teilweise die gelöst mit dem Oberwasser in das Tidegebiet einfließenden Stoffe gemessen (2.1). So kann aus Eintrieb und Sedimentmenge die Größe des aus dem Tidegebiet bzw. dem hier zu betrachtenden engeren Bilanzgebiet nach See zu abgeführten Feststoffanteils berechnet werden. Das Ergebnis solcher Berechnungen wird nachfolgend dargelegt (2.3.). Vorgreifend sei bereits angeführt, daß nach den Untersuchungen mehrerer Wissenschaftler (van Voorthuysen, 1960) (siehe 2.2.5.3) in die Emsmündung hinein auch von See her Feststoffe in erheblichen Mengen mit der Flut landeinwärts transportiert werden.

## 2.1 Der Antransport von Feststoffen mit dem Oberwasser

Über die Konzentration verschiedener gelöster oder suspendierter Stoffe im Emswasser in der Nachbarschaft der oberen Tidegrenze liegen Meßergebnisse vor. Aus ihnen und der Größe des Oberwasserabflusses werden die Transportmengen an Feststoffen oder wahrscheinlich zu Feststoffen umgesetzten Inhaltsstoffe bestimmt, welche im Flußquerschnitt bei Pogum in das Bilanzgebiet von Emden Fahrwasser und Dollart eintreten.

Messungen über Inhaltsstoffe liegen nur sehr vereinzelt vor. Das Ergebnis der nachstehend dargestellten Ermittlung wird daher nur die Größenordnung des Feststoffeintriebs mit dem Oberwasser wiedergeben können. Die Transportmenge ist mit rd. 0,3 Mio t/Jahr anzunehmen.

Der Sedimenthaushalt von Emden Fahrwasser und Dollart kann nicht durch Messungen des Feststofftransports an den unmittelbaren Grenzen des Bilanzgebiets erfaßt werden (2.). Daher wird nachstehend der Transport durch den stromauf begrenzenden Querschnitt bei Pogum aus der Anfuhr der Feststoffe und gelösten Stoffe durch das Oberwasser ermittelt. Dieser Ermittlungsweg hat den Vorteil, daß die tideströmungsbedingten Feststoffbewegungen (2.2.5) aus der Betrachtung herausfallen. Erschwerend ist dagegen für eine möglichst genaue Ermittlung die große Entfernung der Meßstellen, in denen die Inhaltsstoffe des Oberwassers gemessen werden, vom Bilanzquerschnitt. Einmal müssen Stoffumsetzungen durch chemische oder biologische Prozesse auf dem Transportwege als wahrscheinlich angenommen werden. Ihre Auswir-

kungen sind nur grob abschätzbar. Zum anderen ist sogar schon die Größe des Abflusses den Wassermengen nach nicht durch direkte Messungen belegt.

Zu rd.  $1/3$  seines Beitrages muß der Oberwasseranteil am Durchfluß bei Pogum proportional zum Verhältnis der Größen der Einzugsgebiete überschläglich ermittelt werden. Es ist also die vereinfachende Annahme zu treffen, daß seewärts der Meßstelle für den Oberwasserabfluß das Einzugsgebiet die gleiche Abflußspende je Flächeneinheit erbringt wie das durch die Meßstelle erfaßte Gebiet oberhalb.

Die Meßstelle für den Abfluß der Ems bei Versen, Wehrdurchstich, liegt dem Tidegebiet der Ems am nächsten. Die Beobachtungen dieser Meßstelle werden daher allen Betrachtungen über Abhängigkeiten vom Oberwasser der Ems zugrunde gelegt. Die Meßstelle Versen liegt jedoch noch rd. 50 km oberhalb der Tidegrenze und fast 100 km entfernt vom Bezugsquerschnitt bei Pogum. So ist das Einzugsgebiet der Ems bis Pogum um 47 % größer als das oberhalb von Versen. Für Ermittlungen, welche die durch das Oberwasser bestimmten Verhältnisse bei Pogum betreffen, ist also in diesem Verhältnis zu extrapolieren.

Der mögliche Fehler beim Extrapolieren der Abflußmengen dürfte für die hier anzustellenden langjährigen Betrachtungen nicht allzu groß sein. Schwieriger abzuschätzen ist dagegen die Zutreffenswahrscheinlichkeit der Annahme, daß in der so in ihrer Größe bestimmten Oberwassermenge auch der gleiche Prozentsatz an Inhaltsstoffen antransportiert wird, wie er an den örtlich vereinzelt oberhalb gelegenen Meßstellen erfaßt wurde. Solche Messungen über den Gehalt an mitgeführten Stoffen sind außerdem meist nur wenige Male und zu willkürlichen Zeiten durchgeführt worden. Das Ergebnis der nachstehend dargestellten Ermittlung dürfte daher nur die Größenordnung des Feststofftransports mit dem Oberwasser in etwa richtig erkennen lassen.

Der mittlere Oberwasserabfluß in Versen MQ (1941/1975) = 78,6m<sup>3</sup>/s erbrachte im Mittel der genannten Jahresreihe eine Abflußsumme von 2477 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/Jahr ( D.Gew.Jb.1975). Diese Abflußmenge vergrößert sich bis Pogum durch die Emszuflüsse aus dem zwischen Versen und Pogum hinzutretenden Einzugsgebiet näherungsweise im Verhältnis der Größen der Einzugsgebiete:

$$\begin{aligned}\sum MQ_{\text{pogum}} &\approx \sum MQ_{\text{Versen}} \times \left( \frac{F_N \text{ Pogum}}{F_N \text{ Versen}} \right) \\ &= 2\,477 \times 10^6 \left( \frac{12\,480}{8\,469} \right) \\ &= 3\,650 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{Jahr}\end{aligned}$$

Bei der folgenden Veranschlagung der pro Jahr vom Oberwasser herangeführten Feststoffmenge wird dieser mittlere Jahresabfluß als konstante transportierende Wassermenge angenommen. Umrechnungen von anderen Bezugsorten erfolgen ebenfalls im Verhältnis der Flächengrößen der Einzugsgebiete (siehe Tabelle 1; Spalte 6).

Die im Wasser in Suspension mitgeführte Feststoffmenge wird seit 1967 in Versen täglich gemessen. Der mittlere Schwebstoffgehalt der Jahre 1967/1975 von 25 g/m<sup>3</sup> erbrachte für Versen eine Schwebstofffracht von 65 700 t/Jahr (D.Gew.Jb.1975) und, wie oben umgerechnet, eine solche von 96 800 t / Jahr für Pogum.

Die Verteilung der Meßergebnisse der Schwebstofffracht am Meßort Versen auf die bisherigen Beobachtungsjahre ist in Abb. 2 dargestellt. Für die hier anzustellende Untersuchung kann danach und mit den bereits genannten Einschränkungen die Abhängigkeit von der Jahresabflußmenge als hinreichend linear angesehen werden. Es ist also erlaubt, auch für anschließende Betrachtungen (2.2) einen linearen Zusammenhang der Feststoffanfuhr des Oberwassers von der Größe der Oberwassermenge vorauszusetzen. (Hinrich, 1974) weist jedoch für die Ems und die Meßstelle Versen nach, daß für Einzelereignisse kein einfach zu beschreibender Zusammenhang zu erkennen ist.

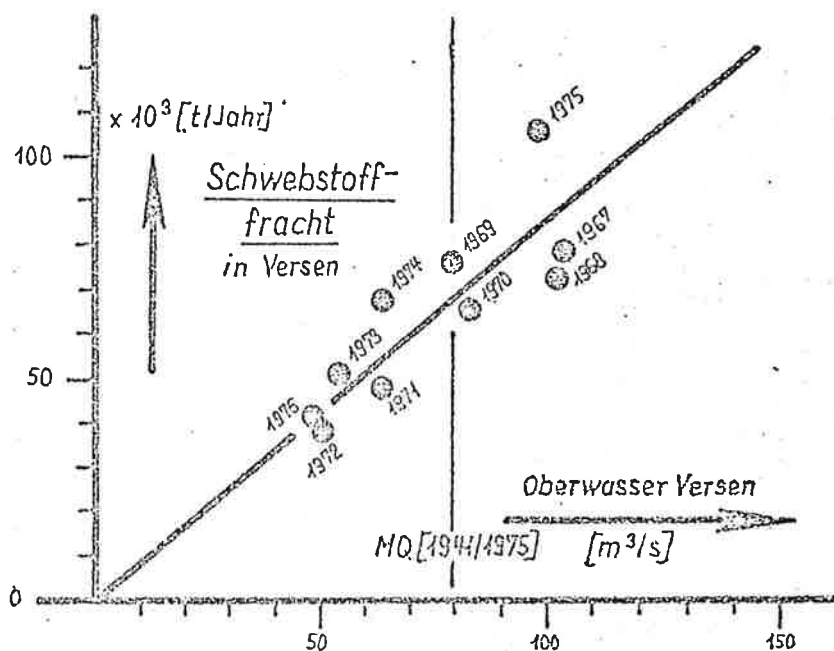


Abb.2 : Die Abhängigkeit der Schwebstofffracht in Versen von der Größe des mittleren Oberwasserabflusses des Bezugsjahres

Nach (Hinrich, 1975 - Sonderheft) macht der Schwebstofftransport in den deutschen Flachlandflüssen den Hauptteil des gesamten Feststofftransports, nämlich schätzungsweise 85 % im mehrjährigen Durchschnitt, aus. Etwa 10 % entfallen auf das Geschiebe, das sich auf der Flußsohle bewegt, und rd. 5 % auf Schwimmstoffe. In der Ems dürften diese beiden NebenkompONENTEN wegen der häufig eingeschalteten Staubereiche hinter den Schiffahrtsschleusen für die vorliegende Betrachtung keine erheblichen Beträge annehmen.

Der Anteil an organischer Substanz wie auch die Korngrößenzusammensetzung werden bisher in Versen nicht gesondert untersucht. Jedoch sind in den Schwebstoff-Fangergebnissen bei Versen die organischen Feststoffe mit erfaßt wie z.B. Pflanzenteile und deren Zerfallprodukte, pflanzliche und tierische Kleinlebewesen und dazu auch chemisch bedingte Ausfällungen. Über die gelöst im Wasser mitgeführten Stoffe liegen dagegen von der Meßstelle Versen keine Untersuchungen vor. Hier muß auf gelegentlich ausgeführte Messungen an den verschiedensten Orten zurückgegriffen werden. Alle verfügbaren Meßdaten werden zu diesem Zweck in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Bei den in Tabelle 1 aufgeführten Meßergebnissen über den Gehalt an gelösten Stoffen im Emswasser wächst in allen Fällen die Konzentration mit dem Fortschreiten in Fließrichtung des Oberwassers, d.h. in der Folge der Angaben der Tabelle 1 von oben nach unten. Das dürfte jedoch ein rein zufälliges Zusammentreffen sein.

(Kühl und Mann, 1954) führten mehrere Längsfahrten mit Probenentnahmen auf der Ems durch. Sie weisen im Bericht über die Ergebnisse dieser Erkundungen darauf hin, daß nach ihren Beobachtungen z.B. der Siliziumgehalt vom Süßwasser zur See hin abnimmt. Die von den Verfassern veröffentlichten Längsprofile weisen den stärksten Abfall gerade im Bereich der in Tabelle 1 zusammengestellten Beobachtungsorte nach. Weiter stellen die genannten Verfasser fest, daß die von ihnen bestimmten Stick-

Meßort	Stickstoff (NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> ) mg/l t/Jahr	Phosphate mg/l t/Jahr	Si O <sub>2</sub> mg/l t/Jahr	Kalzium und Magnesium (CaO + MgO) mg/l t/Jahr	<del>FN Pogum</del> FN Meßort
1	2	3	4	5	6
Bokeloh (Hase)	1.0 <sup>1)</sup> 910	0.4 <sup>1)</sup> 365			4.205
Rühle (Ems)	0.8 <sup>1)</sup> 1 160	0.8 <sup>1)</sup> 1 160			2.444
Raede			6.4 <sup>2)</sup> 17 450		1.341
Mark			8.4 <sup>2)</sup> 23 310		1.315
Weener				72.2 <sup>3)</sup> 200 360	1.315
Leerort	6.05 <sup>4)</sup> 20 330		13.2 <sup>4)</sup> 44 370		1.081
Bingum			16.8 <sup>2)</sup> 56 460		1.081
Jingerechnet auf Pogum	min 2 800 max 22 000	1 500 2 800	23 400 61 000	263 500	1.000

Gelöste Stoffe : max. 85 800

+ Feststoffe : + 96 800

182 600

131 800 = 314 400 t/Jahr

=====

1) Gewässerkd. Jahrbuch , Jahresmittel 1973 / 75

2) Lüttmer , 1952

3) Rijksuniversiteit Groningen , 1971

4) Kühl und Mann , 1951, 1952, 1953



stoff- und Phosphorverbindungen ähnlich wie das Silizium ebenfalls flußabwärts in der Konzentration abnehmen.

Die Konzentrationen zeigen in allen vorgenannten Fällen also eine andere Längsverteilung, als sie nach den in Tabelle 1 aufgeführten Einzelmessungen gegeben erscheint. Es zeigen also die Größenunterschiede der in Tabelle 1 zusammengestellten Werte bestimmter gelöster Stoffe keinen den örtlichen Umständen entsprechenden Zusammenhang an, sondern eine willkürliche Streuung. Die Meßwerte wurden daher in Tabelle 1 als Streuwerte behandelt und mit ihren Maximalmengen und Minimalmengen angeführt.

In Tabelle 1 sind die gemessenen Konzentrationen der gelösten Stoffe mit der mittleren Abflußmenge am Meßort zur Jahresfracht multipliziert worden. Diese wurde dann im Verhältnis der Größen der Einzugsgebiete, d.h. im angenommenen Verhältnis der Jahresabflüsse, auf ihre vermutete Größe in der Ems bei Pogum umgerechnet. Die Ergebnisse seien nachfolgend diskutiert.

(Kühl und Mann, 1968) fanden bei den Längsfahrten in allen von ihnen untersuchten Flüssen im Chemismus gewisser Beobachtungswerte einen örtlich gleichen Ablauf. So zeigt der Gehalt an anorganischen Stickstoffverbindungen (Spalte 2 in Tabelle 1) den Zusammenhang mit dem Abbau der dem Fluß zugeführten häuslichen Abwässer. Beim natürlichen Abbau der Eiweißstoffe entsteht als anorganisches Endprodukt Ammoniak, das dann im weiteren Verlauf zu Nitrit und Nitrat mineralisiert wird. So fanden die Autoren bei Längsfahrten in der Fließrichtung der Flüsse immer erst ein Ansteigen der Nitratwerte, wenn die Ammoniakwerte schon ihren Größtwert überschritten hatten. Entsprechend diesen zu verallgemeinernden Beobachtungen können in der hier anzustellenden Untersuchung alle anorganischen Stickstoffverbindungen zusammengefaßt betrachtet und als mineralisiert angenommen werden, wenn das transportierende Oberwasser bei Pogum in das Bilanzgebiet eintritt.

Die bedeutenden Quellen für den Gehalt an Stickstoffverbindungen im Flußwasser sind die Einleitungen häuslicher Abwässer und die Düngung mit Stalldung. Stickstoffdüngung durch Handelsdünger trägt nur wenig zur Anreicherung der Stickstoffverbindungen in den Gewässern bei. Jeder Landwirt strebt danach, aus Kostengründen den Zeitpunkt der Düngergabe und die Düngermenge so zu bemessen, daß sie von den Pflanzen aufgenommen wird (Vetter, Lufa, 1977). Durch den Bau von Kläranlagen dürfte daher die Einleitung von Fäkalien in die Fluß - Ems seit der Zeit der Untersuchungen von Kühl und Mann und damit die Zufuhr von Stickstoffverbindungen zurückgegangen sein. Die neueren Ergebnisse von den weiter oberhalb gelegenen Meßpunkten (Bokeloh, Rühle, siehe Tabelle 1) sprechen dafür. Der nach Tabelle 1 errechnete Beitrag zur Sedimentmenge aus der Anfuhr an Stickstoffverbindungen wird daher in der richtigen Größenordnung liegen.

1974 und 1975 sind Messungen bei Terborg (10 km oberhalb von Pogum) durchgeführt worden. Es wurden an 5 über das Jahr verteilten Tagen und während der Tide in regelmäßigem Zeitabstand wiederholt Proben entnommen und chemisch untersucht.

Gesamt gelöster Stickstoff (Kjedahl-Stickstoff)

Messungen bei <u>Terborg</u>	<u>Niedrigster Wert</u>	<u>Höchster Wert</u>
26.9.1974		
18.3.1975	oben 2,25	3,55 g/m <sup>3</sup>
13.5.1975	unten 2,91	6,49 "
19.8.1975		
30.9.1975		
Tidemittel	Mittelwert 2,58	5,02 g/m <sup>3</sup>

(WSA Emden, Meet- en Adviesdienst Delfzijl, BfG Koblenz, Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater, Sappemmer, 1976).

Die Ergebnisse bestätigen die Größenordnung der in Tabelle 1 extrapolierten Werte. Sie zeigen, daß die dort berücksichtigten Mengen Maximalmengen darstellen.

Die deutliche Zunahme der Konzentration an gelöstem Stickstoff mit der Wassertiefe scheint darauf hinzuweisen, daß die Lösungen an suspendierte feste Teilchen adsorbiert sind. Sie sind damit der Wirkung der Schwerkraft unterworfen. Eine Konzentration im Kopf der Brackwasserzone durch deren besondere Strömungsdynamik (2.2.5.2) ist denkbar. Aus diesem Grunde sind Werte, welche gleichzeitig weiter seewärts innerhalb der Brackwasserzone gemessen wurden, für die hier durchzuführende Berechnung nicht verwendet worden.

Die Phosphate (Spalte 3 der Tabelle 1) stammen wie die Stickstoffverbindungen überwiegend auch aus menschlichen Fäkalien, daneben aus Waschmitteln. Ihre in Tabelle 1 angegebenen Werte wurden aus neueren Beobachtungen an den Meßstellen Rühle und Bokeloh gewonnen. Da die Siedlungsdichte in dem durch diese Meßstellen erfaßten Einzugsgebiet sich nicht wesentlich von derjenigen im vergrößerten Gebiet bis Pogum unterscheidet, kann die formal vorgenommene proportionale Vergrößerung der gemessenen Jahresfracht als zutreffend angenommen werden.

Auch diese Annahmen werden durch Messungen in neuerer Zeit bestätigt:

		<u>Gesamt-Phosphat</u>	
		<u>Niedrigster Wert</u>	<u>Höchster Wert</u>
Messungen bei <u>Terborg</u>			
26.9.1974			
18.3.1975	oben	0,52	0,89 g/m <sup>3</sup>
13.5.1975			
19.8.1975	unten	0,58	1,81 "
30.9.1975			
Tidemittel	Mittelwert	0,55	1,35 g/m <sup>3</sup>
		=====	

(Quelle: Wie oben bei den Stickstoff-Angaben)

Der Gehalt an Siliziumdioxid (Spalte 4 der Tabelle 1) wurde errechnet aus Untersuchungen über die Konzentration an gelöstem Silizium. Nach Längsmessungen (Kühl, Mann, 1968) nimmt dessen

Konzentration nach dem Eintreten des Oberwassers in das Tidegebiet der Ems schnell ab. Es ist anzunehmen, daß das Silizium hier von Süßwasserdiatomeen inkorporiert wird. Beim Verdriften in den Brackwasserbereich der Ems, welcher bereits oberhalb von Pogum beginnt, werden diese Diatomeen absterben und ihre  $\text{SiO}_2$  - Skelette in das Sediment einbringen. In erster Näherung kann damit die gesamte Menge des Siliziums in Form des Siliziumdioxid als Beitrag zum Sediment gerechnet werden. Nach Schätzungen für die Nordsee dürften dort jedoch nur etwa 10 % des organisch eingebauten  $\text{SiO}_2$  zur Ablagerung kommen (Mc Cave, 1972). Neuere Messungen des Siliziumgehalts des Emswassers als die in der Tabelle 1 angeführten von 1952/53 liegen nicht vor. Eine eventuelle Zunahme der Konzentration seit dieser Zeit wird aber durch die vermutlich hier zu hoch getroffene Annahme über die Umsetzung in sedimentierbare Form weitgehend berücksichtigt.

Der Gehalt an Kalium und Magnesium nach den Untersuchungen der Rijksuniversiteit Groningen aus 1971 wurde in Kalziumoxid umgerechnet (Spalte 5 der Tabelle 1). Hier hinzu wurde das Magnesium, dem Kalkwert entsprechend, nach den Forderungen der DIN 8103/4 addiert. Dieser damit errechnete Gesamtgehalt an den sogenannten Härtebildnern von weniger als 80 mg/l CaO würde das Emswasser als "weiches" Wasser ansprechen lassen. Dem steht ein mehrfach höherer CaO-Gehalt im Brackwasser und Seewasser gegenüber.

Der Kalkgehalt im Brackwasser kann ohne chemische Untersuchung praktisch nach dem Prozentanteil an Seewasser im Süßwasser - Salzwasser-Gemisch vorhergesagt werden (Kühl, Mann 1968). Bei dieser Beständigkeit der Lösung im Wasser und dem hohen Überschuß an Kalziumverbindungen im Brackwasser wird von der Kalkanfuhr mit dem Süßwasser nur ein kleiner Teil in das Sediment übergehen können. Dabei wäre weniger als 50 % der nach Tabelle 1 berechneten Kalziumanfuhr in Pogum erforderlich, um als Kalziumkarbonat den gesamten Kalkgehalt im Sediment des Emders

Fahrwassers und des Hafens Emden zu decken. 50 % sollen daher als Maximalmenge des Kalzium- und Magnesiumtransports mit dem Oberwasser nach Tabelle 1 als möglicherweise im Bilanzraum sedimentbildend angesehen werden. Dieser Wert ist weitgehend spekulativ und muß als sehr hoch angesetzt gelten. Kleinere Mengen anderer gelöster Stoffe wie Eisenverbindungen, Mangan usw. brauchen daher nicht besonders berücksichtigt zu werden.

Alle in Tabelle 1 zusammengestellten Komponenten der gelöst antransportierten und vermutlich auf dem Transportwege mineralisierten Stoffe berücksichtigt, ist ihr Beitrag zum Sediment im Raum Emders Fahrwasser und Dollart zusammen mit der vorstehend im Besprechungstext genannten, 96800 t/Jahr betragenden Schwebstoffanfuhr durch das Oberwasser im Querschnitt bei Pogum auf rd. 0,3 Mio t/Jahr zu veranschlagen; hierin sind auch die aus Abwassereinleitungen herrührenden Feststoffe enthalten.

## 2.2. Die Sedimentation im Emders Fahrwasser

Die Anfuhr von 0,3 Mio t/Jahr an Feststoffen durch das Oberwasser der Ems kann nicht die im Dollart deponierte oder im Emders Fahrwasser und im Seehafen Emden durch Baggerungen beseitigte Sedimentmenge erzeugen. Besondere Aufmerksamkeit zieht auch der Umstand auf sich, daß die Menge des durch Baggern zu entfernenden Sediments in den zurückliegenden Jahren der Baggertätigkeit fortgesetzt zugenommen hat.

Hierzu wird in 2.2.3 nachgewiesen, daß sich die Sedimentmenge (Baggermenge) proportional zur Tiefe der Ausbaggerung vergrößerte. Die Erfahrungen der Kriegsjahre, in welchen nicht gebaggert wurde, zeigen, daß diese Entwicklung auch in umgekehrten Sinne nach der gleichen Gesetzmäßigkeit verläuft: Nach dem Einstellen der Baggerungen höhlt sich die Sohle des Flußlaufs auf, bis sich eine Gleichgewichtstiefe eingestellt hat. In diesem Zustand wird nur noch in den etwa vom Fluß abzweigenden Nebenbecken, in welchen keine starke Strömung herrscht, wie z.B. im Hafen Emden, sedimentiert. Die Sedimentmenge entspricht dann der mit dem Oberwasser herangeführten Feststoffmenge.

Dieser Darlegung in 2.2.3 wird eine Unterrichtung über die Behandlung des Beobachtungsmaterials (2.2.1) und über die Einordnung des Sediments des Hafens Emden (2.2.2) vorausgeschickt.

In 2.2.5 wird der Vorgang des (flutseitigen) Transports der Feststoffe dargestellt.

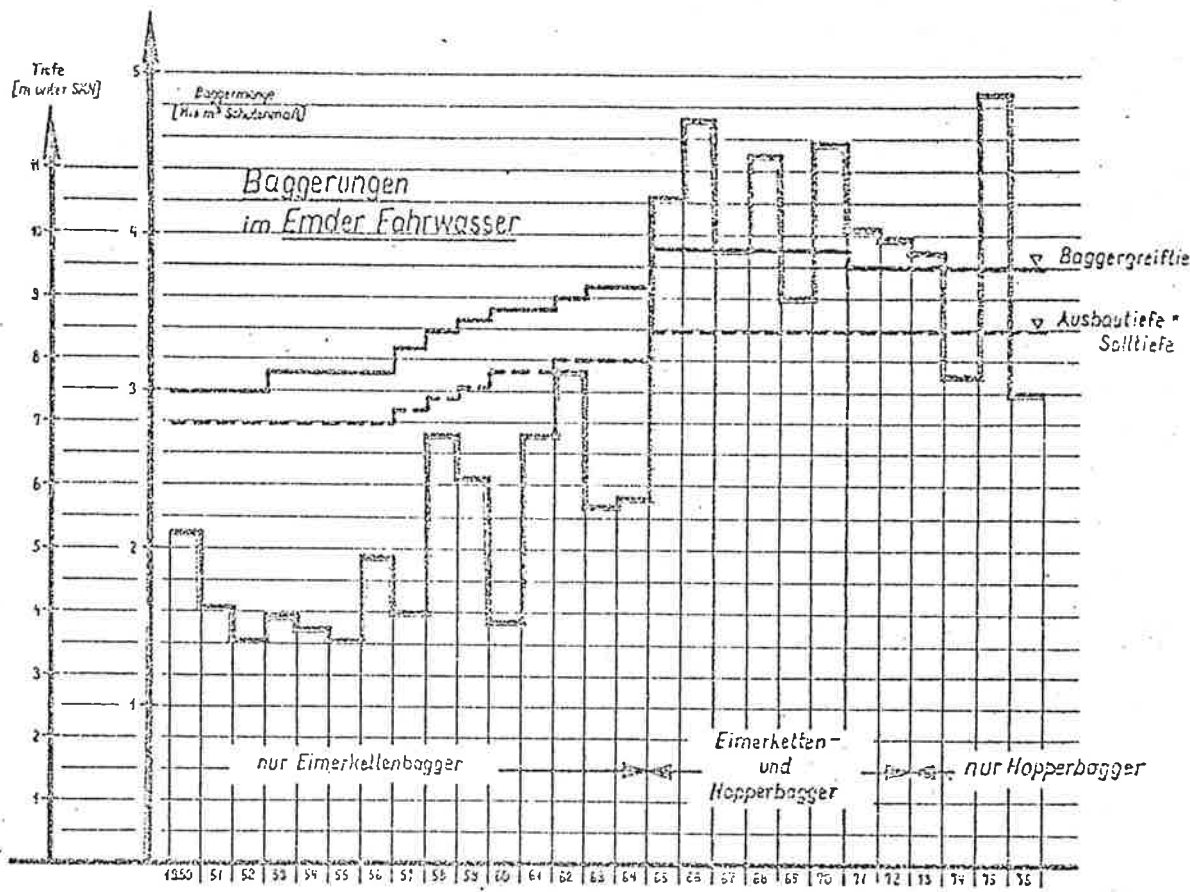


Abb. 3 : Baggerungen im Emder Fahrwasser

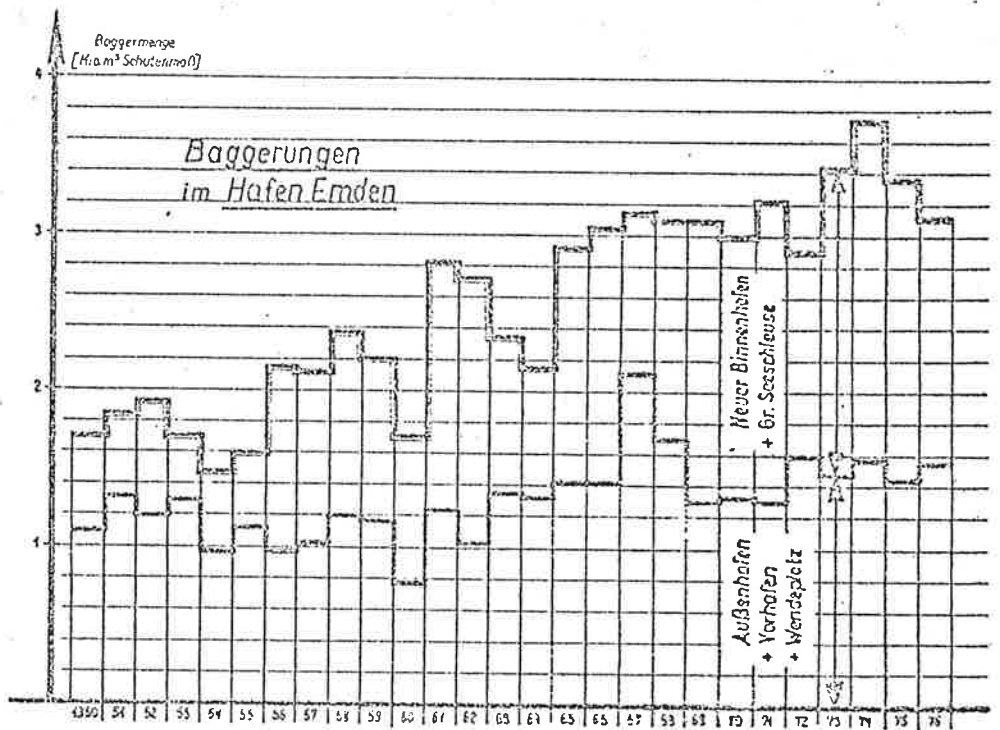


Abb. 4 : Baggerungen im Hafen Emden

Der Blick auf die Darstellung der Baggermengen im Emdener Fahrwasser (Abb. 3) und im Seehafen Emden (Abb. 4) läßt bereits in überschläglicher Abschätzung erkennen, daß die jährlichen Baggerungen in diesen beiden Gebieten bei weitem mehr an Sedimentmenge aus dem Feststoffhaushalt entnehmen, als nach der vorstehenden Ermittlung durch das Oberwasser antransportiert wird. Es besteht auch bei der geringen Größe der Feststoffanfuhr durch das Oberwasser kein Spielraum, mit welchem sich die von Jahr zu Jahr unterschiedlich großen Baggermengen zur Unterhaltung der Wassertiefe auf der Zufahrt und im Hafen Emden erklären lassen, ganz abgesehen von deren fortgesetzter Zunahme im Laufe der zurückliegenden Jahre der Baggertätigkeit (siehe Abb. 3 und 4). Die hierfür verantwortlichen Umstände werden nachfolgend geschildert.

Das Emdener Fahrwasser ist der Teil des Emslaufs, für welchen bei der geplanten Umleitung der Ems durch den Dollart die stärkste Änderung seiner Sedimentationsverhältnisse gegenüber dem heutigen Zustand zu erwarten ist. Seine heutige Tiefe als seeschiffstiefe Zufahrt zum Hafen Emden erhält das Emdener Fahrwasser durch dauernde Unterhaltungsbaggerungen (Abb. 3). Nach einer Umleitung wird statt des Emdener Fahrwassers die Geiserinne, welche in einer einmaligen Neubaubaggerung durch den nördlichen Dollart etwa parallel zum Emdener Fahrwasser hergestellt werden soll (Abb. 1), die Wassermengen der oberen Ems abzuführen haben. Die Schifffahrt zu den Häfen der oberen Ems erfordert nur eine Wassertiefe, wie sie sich in der neuen Rinne ohne zusätzliche Unterhaltungsbaggerungen von Natur aus einstellt ( 3. ). Dieses nach Süden in den Dollart verlegte "Emdener Fahrwasser", dann "Geiserinne" genannt, wird im Zustand des natürlichen Gleichgewichts zwischen Feststofftransport und Strömungsdynamik belassen werden. Die Frage nach dem Verbleib der heute dort regelmäßig zu beseitigenden Feststoffmengen, welche nach der Umleitung nicht mehr im Stromabschnitt Emdener Fahrwasser/Geiserinne durch Baggerung entfernt werden müssen, soll durch eine Untersuchung der Herkunft der Feststoffmengen

in den heutigen Baggerungen beantwortet werden (2.2.3). Den Darlegungen ist eine Erläuterung über die Behandlung des Beobachtungsmaterials (2.2.1) vorzuschicken.

### 2.2.1 Der Vergleich der Sediment- und Baggermengen

Nachstehend werden Angaben gemacht, in welcher Weise aus der Höhenänderung der Gewässersohle und den Baggermengen die Sedimentmenge bestimmt wurde. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Zusammensetzung und Konsistenz von Sediment und Baggergut sind dazu die Angaben einheitlich auf ihr Feststoffgewicht umgerechnet worden.

Bei dem hier einzuschlagenden Weg der Berechnung soll der Feststoffhaushalt aus der Menge der sedimentierten Feststoffe und ihrem Antransport mit dem Oberwasser bestimmt werden. Es sind dabei also Größen miteinander zu verbinden, welche üblicherweise je nach der Art ihrer Ermittlung mit unterschiedlichen Maßeinheiten benannt werden. Sie sind demzufolge auch nicht ohne weiteres miteinander zu vergleichen.

In der Statistik der ausgeführten Baggerungen werden diese mit der Anzahl der Kubikmeter aufgeführt, mit welcher der Laderaum der Transportschuten oder der selbstfahrenden Bagger (Hopperbagger) beim Transport des Baggergutes zum Verspülen an Land oder zum Verklappen gefüllt war ( $m^3$  Schutenmaß,  $m^3$  Laderaummaß).

Gegenüber der Sedimentmenge an der Gewässersohle ist das Baggergut durch den Lösungsvorgang aufgelockert und mit Wasser versetzt worden. Das Sediment und das am gleichen Ort aufgebaggerte Gut unterscheiden sich also in ihrem Feststoffinhalt je Kubikmeter. Sie sind daher, um vergleichbare Angaben zu gewinnen, auf ihren Feststoffinhalt umzurechnen. Dieses Verfahren, das Feststoffgewicht als Maßstab zu wählen, liegt nahe, da auch die Angaben über die im fließenden Wasser mitgeführten Feststoffe als Gewichtsmenge durch Trocknen und Auswiegen des in Wasserproben geschöpften Feststoffinhalts gewonnen werden.



Bei einer solchen Umrechnung auf den Feststoffinhalt ist zu berücksichtigen, daß beim Baggern in Sedimentarten mit unterschiedlicher Kornzusammensetzung der Boden auch merkbar unterschiedlich stark durch das Baggern aufgelockert wird. Beim Aufbaggern von jungen Sedimenten, von welchen hier immer außer bei Neubaubaggerungen die Rede ist, wachsen der Auflockerungsgrad und die Wasseraufnahme gleichsinnig mit der Zunahme des Anteils an Feinkorn (Schluff bis Ton) in der Sedimentzusammensetzung. Mit zunehmendem Sandanteil dagegen (hier Feinsand bis Mittelsand) wächst die zum Lösen des Bodens aufzuwendende Kraft. In der Schute oder im Laderaum konsolidiert sich das gebaggerte Sediment dann auch sehr schnell wieder zu fast seiner ursprünglichen Konsistenz.

In der nachstehenden Tabelle sind die Durchschnittswerte der Zusammensetzung und Konsistenz des Baggergutes zusammengestellt. Sie wurden bei vielen Untersuchungen während der langjährigen Baggertätigkeit im Emdener Fahrwasser und im Hafen Emden gefunden. Abweichungen von diesen Werten sind in beiden Richtungen möglich. Die Beträge der Streuung können teilweise sehr hoch sein. Hier spielen das Alter der Sedimente, die Art des zum Lösen eingesetzten Baggergeräts und die Bagbertechnik eine Rolle.

Die Vorziegeschwindigkeit beim Eimerkettenbagger und die Fahrgeschwindigkeit sowie die Erfahrung des Rohrführers beim Hopperbagger können die Menge des geförderten und abgefahrenen Feststoffs in der Laderaumfüllung wesentlich beeinflussen. Beim Hopperbagger, bei welchem das Sediment schon durch einen Strom von Zusatzwasser nach dem Lösen in den Laderaum gefördert wird, muß mit einem ständigen Rücklauf des "Überschußwassers" durch die Überläufe des Laderaums gebaggert werden. Dabei wird auch ein großer Teil der schwer absetzbaren Feststoffe wieder in den Fluß zurückgetragen. Es hängt vom Geschick und der Erfahrung des Baggerkapitäns ab, inwieweit eine wirtschaftliche Füllung des Laderaums erreicht wird, d.h. wann die zum Füllen des Laderaums aufgewandte Zeit zu derjenigen für die Fahrt zur Klapp-

Fahrwasserabschnitt

<u>Gatjebogen</u>	<u>Under Fahrwasser</u>	<u>Seehafen Emden</u>
Tonne 24 - Tonne 27	Tonne 28 - Tonne 31	Außenhafen, Vorhafen Große Seeschleuse Neuer Binnenhafen
1.66	2.45	3.51

Unterhaltungsbaggerungen im Durchschnitt der Jahre 1967 - 1976 [Mio. m<sup>3</sup> / Jahr in Schutenmaß]

0.59      1.05      2.45

4.09 Mio. m<sup>3</sup> / Jahr in Schutenmaß

Trockengewicht des Baggergutes [t / m<sup>3</sup>]

0.99      0.95      0.86      0.71      0.30

Erfahrungssatz der Auflockerung

10 %      10 %      20 %      30 % bis 50 %      200 % \*)  
(im Mittel 40 %)

Gebaggerte Bodenart

Mittelsandiger Feinsand	Feinsand	stark sandiger Schluff	tonig sandiger Schluff
Feinsand	(schwach tonig)	(schwach tonig bis tonig)	

Durchschnittlicher Anteil an Sand  $\geq 0.05$  mm Korndurchmesser im Baggergut

99 %      95 %      78 %      72 %      28 %

\*) Auflockerung je nach Konsolidierungsgrad 120 bis 200 %

stelle oder zum Spülgerüst und zum Leichtern des Baggers in einem günstigen Verhältnis steht. Die Fülldauer bestimmt besonders bei feinkörnigem Sediment erheblich den effektiven Feststoffgehalt des Baggergutes im Laderaum. Die Länge der Füllzeit wird jedoch nach dem Vorstehenden durch wirtschaftliche Gesichtspunkte beeinflusst. So ist auch aus diesem Grunde mit Streuungen des realen Baggerergebnisses zu rechnen.

Die Kornzusammensetzung des Sediments hängt stark von den meteorologischen Verhältnissen zur Zeit der Sedimentbildung ab. Hierbei bestimmt die Lage der Brackwasserzone zum Sedimentationsgebiet, welche von der Stärke des Oberwasserabflusses, d.h. von den Niederschlägen, abhängt, die Größe des Anteils an Feinkorn (2.2.5.2). Mit dem Feinkornanteil wächst sehr schnell der Wassergehalt des Sediments und nimmt entsprechend der Feststoffinhalt in der Volumeneinheit ab. Dieses Verhalten zeigt sehr deutlich ein Vergleich der Sedimenteigenschaften des Emders Fahrwassers mit denen des Hafens Emden (siehe die vorstehende Tabelle 2).

Das Sediment des Hafens Emden ist in seiner Korngrößenzusammensetzung zwar sehr verschieden von dem des Emders Fahrwassers. Es sind aber die Kornkomponenten beider Sedimentationsgebiete vom gleichen Ursprung. Der Hafen Emden ist für den hier zu betrachtenden Feststoffhaushalt ein Seitenbecken des Emsflusses. Für die tideoffenen Teile des Hafens, den Außenhafen, Vorhafen und Wendeplatz, ist diese Abhängigkeit ohne weiteres deutlich. Für den abgeschleusten Hafenteil wird dieser Umstand nachstehend erläutert (2.2.2).

In 2.2.3 werden der Feststoffhaushalt des Emders Fahrwasser und des Hafens Emden in ihrer Sedimentssumme zusammengefaßt besprochen. Es wird die Abhängigkeit der in den einzelnen Jahren von 1941 bis 1976 sedimentierten Feststoffmengen von der Tiefe der ausgeführten Baggerungen und der Größe des Oberwasserabflusses dargestellt, und dafür sind die in diese Betrachtung eingehenden Sedimentmengen der genannten Jahre aus der Änderung der Hö-

henlage der Sohle im Emden Fahrwasser und im Hafen berechnet worden. Es wurde hierzu aus den Peilplänen zu Anfang und zu Ende des Baggerjahres (1. April bis 31. März des folgenden Jahres) die Volumenzu- oder -abnahme des Sediments ermittelt und mit den Angaben der vorstehenden Tabelle in Feststoffmengen umgerechnet. Hierbei wurden der Feinkornanteil und der Sandanteil getrennt registriert. Auf der gleichen Grundlage sind auch die Baggermengen der einzelnen Jahre in Feststoffmengen und Korngrößengruppen umgerechnet und zu den Beträgen der wie vorstehend ermittelten (Rest-) Sedimentation addiert worden.

### 2.2.2 Die Sedimentation im Seehafen Emden

Der Hafen Emden mündet mit dem tideoffenen Außenhafen in das obere Emden Fahrwasser. Die nicht abgeschleusten Hafenbecken werden mit der Flut vom Wasser der Ems gefüllt. In ihren fast strömungsfreien Wasserräumen kann der größte Teil der im Emswasser mitgeführten Feststoffe sedimentiert werden. Das Sediment ist wegen seines hohen Feinkorngehalts über lange Zeit dünnflüssig. In diesem Zustand wird es durch Dichteströmungen während der Schleusungen in die Kammer der Großen Seeschleuse getragen und von dort in den Binnenhafen. Aus solchen Eintreibungen besteht fast ausschließlich die Sedimentmenge in den abgeschleusten Hafenbecken. Es werden die Beobachtungen besprochen, welche den Transportvorgang erkennen lassen. Der Herkunft des Sediments nach ist das Hafensediment ein Teil desjenigen des Emden Fahrwassers. Es werden daher bei den folgenden Betrachtungen das Sediment des Emden Fahrwassers und das des Hafens Emden in der Menge zusammengefaßt.

Der Seehafen Emden bildet mit seinem für die Tidebewegung offenen Außenhafen einen bevorzugten Ort für die Feststoffsedimentation. Die Hafeneinfahrt liegt im Zentrum der Brackwasserzone. Vor ihr wechselt der Salzgehalt des Emswassers dadurch während einer Tide um bis zu 15 ‰. Demzufolge wird das Wasser des Außenhafens nicht nur durch Walzenbildung aus dem Vorbeiströmen des Wassers vor der Einfahrt und dem Füllvorgang der Wasserspiegelhebung ausgewechselt, es wird auch mehrmals zusätzlich durch Dichteausgleichsströmungen erneuert. Von dem in diesem Teil der Brackwasserzone extrem feststoffhaltigen Tidewasser passiert

also eine erhebliche Menge langsam und wenig turbulent den Außenhafen und setzt dort einen Teil der mitgeführten Feststoffe ab.

Über der 8,5 m unter MSPTnw tiefen Sohle steht im Außenhafen ständig eine rd. 2 m dicke Schicht hochkonzentrierter Feststoffsuspension. Sie spiegelt sich mit diesem Niveau in den Vorhafen der Großen Seeschleuse und vor das Tor der Schleuse ein. Wie Messungen des WSA Emden zeigen, setzen beim Öffnen des Schleusentores Dichteausgleichsströmungen ein, welche an der Sohle die hochkonzentrierte Feststoffsuspension in die Schleusenkammer tragen. Beim Öffnen des Binnentors der Schleuse werden die Feststoffe weiter in den Binnenhafen transportiert.

Die im Binnenhafen des Hafens Emden zu baggernden Mengen stammen vorzugsweise aus solchen Eintreibungen durch die Große Seeschleuse, wie die Sohlenhöhenaufnahmen zeigen. Nach ihnen liegen die Orte gleicher Sohlenhöhenzunahmen etwa konzentrisch um das Binnentor der Großen Seeschleuse, das Maximum liegt in der Umgebung des Binnentors. Gleichsinnig verläuft auch die Salzgehaltsverteilung im Hafenwasser. Das Erscheinungsbild der Salzgehaltsverteilung ist seit Inbetriebnahme des Hafenspumpwerks an der Nesserlander Schleuse etwas verwischt worden. Es bleibt jedoch die Tatsache, daß die Feststoffe in den Baggerungen im Seehafen Emden aus der Tide-Ems eingetragen werden und in einer Bilanz zu diesen gerechnet werden müssen.

Die in den Hafen Emden durch den Ems-Jade-Kanal eingeleiteten Abflüsse des Hinterlandes sind für die Feststoffzufuhr unbedeutend. Das gleiche gilt für die biologische Eigenproduktion, die für den Hafen weniger als 1 % der Feststoffmenge beträgt. Für die biologischen und chemischen Umsetzungen im Hafen muß das Grundmaterial aus außerhalb des Hafens liegenden Quellen herangeschafft werden. Das Ergebnis aus früheren Untersuchungen, daß das Hafensediment zu einem sehr hohen Prozentsatz aus Diatomeen-Resten (Kieselalgen) besteht, spricht für die Herkunft der Eintreibungen aus dem Salzwasser. Diesem Milieu sind die hier gefundenen Diatomeen zuzuordnen.

Das Salzgehalt des Wassers im abgeschleustern Binnenhafen folgt in seiner Größe im Jahresgang demjenigen im Außenhafen, d.h. demjenigen der Ems. Das ist nur möglich, wenn regelmäßig Hafenwasser gegen Emswasser ausgewechselt wird. Ein Teil dieses Austausches erfolgt mit Hilfe des Hafenspumpwerks sowie der Flutschleuse. Hierdurch werden im Jahresdurchschnitt rd. 100 000 m<sup>3</sup>/Tide Wasser aus dem Außenhafen in den Binnenhafen gepumpt bzw. zugewässert. Dadurch werden die Wasserverluste des Binnenhafens durch Schleusenbetrieb, Schleusenundichtigkeit, Versickerung und Verdunstung ersetzt.

Eine Nachrechnung von über längere Zeit im Hafen gemessenen Salzgehaltswerten hat jedoch ergeben, daß dem Binnenhafen mindestens noch einmal die vierfache Menge von Emswasser zugeführt werden muß, wie sie bereits zur Auffüllung der Hafenwasserverluste gepumpt wird. Nur wenn diese Menge vom Wasser des Binnenhafens gegen Wasser aus dem Außenhafen mit dem dort während einer Tide etwa um die Hochwasserzeit höchsten Salzgehalt ausgewechselt wird, lassen sich die im Binnenhafen gemessenen Salzgehaltsänderungen erklären.

Die vorgenannte Nachrechnung des Salzgehaltsganges im Binnenhafen ist in ihrem Ergebnis nicht voll eindeutig. Anstelle des erstgenannten Ergebnisses, daß etwa 400 000 m<sup>3</sup>/Tide mit einem etwa um 1 % unter dem Maximalwert des Wassers im Außenhafen liegenden Salzgehalt auszuwechseln sind, ist das gleiche Ergebnis für den Salzgehalt des Binnenhafens zu erreichen, wenn 600 000 m<sup>3</sup> / Tide mit einem um 1,3 % unter dem Maximalwert liegenden Salzgehalt ausgetauscht wird. Weitere Kombinationen in ähnlichem Sinne sind möglich.

Für einen Wasseraustausch in einer Größenordnung von 600 000 m<sup>3</sup> / Tide bestehen gar keine Schwierigkeiten, da diese Menge nur dem fünffachen Inhalt der Kammer der Großen Seeschleuse entspricht (Kammerinhalt bei mittlerem Hochwasserstand etwa 125 000 m<sup>3</sup>). Bei fünfmaligem Schleusen pro Tide und dem in der Großen Seeschleuse beobachteten Süßwasser - Salzwasser-Austausch

durch Dichteströmung wird also dem Binnenhafen eine Salzwassermenge von rd.  $600\ 000\ \text{m}^3$  / Tide zugeführt.

Im Wasser des Vorhafens der Großen Seeschleuse sind im Mittel der Wassertiefe rd.  $1\ 000\ \text{g}/\text{m}^3$  Feststoffe in Suspension enthalten. Bei dem vorstehend veranschlagten Wasseraustausch werden somit

$600\ 000\ \text{m}^3/\text{Tide} \times 1\ 000\ \text{g}/\text{m}^3 = 600 \times 10^6\ \text{g}/\text{Tide} = 600\ \text{t}/\text{Tide}$   
an Feststoffen in den Binnenhafen transportiert. Das sind in den 705 Tiden eines Jahres  $0,423 \times 10^6\ \text{t}/\text{Jahr}$  und bei der im gebaggerten Schlick des Binnenhafens enthaltenen Feststoffmenge von  $0,3\ \text{t}/\text{m}^3$  eine Baggermenge von  $1,4\ \text{Mio}\ \text{m}^3$  in Schutenmaß je Jahr. Zuzüglich der Feststoffe, welche mit dem vom Hafenspumpwerk eingepumpten Wassermenge in den Binnenhafen getragen werden, ist das die Größenordnung, welche im Durchschnitt der letzten zehn Jahre im Binnenhafen zu baggern war.

Die vorstehende Überschlagsrechnung vereinfacht etwas den Prozeß des Feststofftransports. Sie läßt jedoch erkennen, daß ein relativ geringer Wasseraustausch genügt, um die starken Verschlickungen des Binnenhafens herbeizuführen. Genauer ist der Transportvorgang so zu beschreiben: In der unteren Hälfte der Wassertiefe des Vorhafens zur Großen Seeschleuse ist die Dichteausgleichsströmung mit dem Maximum in Sohlennähe in die Schleusen-  
kammer gerichtet. In diesen Tiefen beträgt der Feststoffgehalt in der Suspension und im dünnflüssigen Schlick ein Mehrfaches der vorstehend in die Berechnung eingesetzten Konzentration. Nach der letzten Beobachtung im Frühjahr 1976 lag der Feststoffgehalt 1 m über der Sohle bei  $40\ 000\ \text{g}/\text{m}^3$ .

Der Wasseraustausch braucht bei so hohen Feststoffkonzentrationen in Sohlennähe nicht während aller Tiden eines Jahres im angenommenen Maß zu erfolgen. Er tut dies auch nicht in Zeiten mit schnellem Zunehmen des Oberwasserabflusses. Dann überwiegt aber auch nur für wenige Wochen des Jahres der Salzgehalt im Binnenhafen denjenigen des Vorhafens. Wegen der dann verstärkt im Vor-

hafen angesammelten Feststoffmengen sind unmittelbar nach dieser Zeit der Oberwasseranschwellung die Eintreibung und Sedi-  
mentbildung im Binnenhafen besonders stark.

Die im Hafen sedimentierten Feststoffmengen werden regelmä-  
ßig durch Eimerkettenbagger abgebaggert und im Hinterland ver-  
spült. Der Wassergehalt und die Auflockerung des Baggergutes  
sind je nach dem Alter der Ablagerungen sehr ungleichmäßig und  
sehr hoch (siehe Tabelle 2). Die Rückrechnung auf eine middle-  
re Konsistenz des Sediments nach ungestörter Konsolidierung  
war jedoch durch die Aufmessungen der im Hinterland aufgespül-  
ten Bodennengen möglich. Es muß aber einschränkend bemerkt  
werden, daß der aufgespülte Boden dort an der Luft und nicht  
unter Wasser konsolidiert ist.

### 2.2.3 Die Abhängigkeit der Menge des im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden abgelagerten Sediments von der Tiefe der Ausbaggerungen und der Oberwassermenge

Die jährlich im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden sedi-  
mentierten Feststoffmengen zeigen eine Abhängigkeit von  
der Größe des Oberwasserabflusses. Zum zweiten wird die  
Menge des Sediments durch die Tiefe der Ausbaggerung be-  
stimmt.

Die letztgenannte, aus der Beobachtung der zurückliegenden  
Jahre der Unterhaltung der Wassertiefe im Emden Fahrwas-  
ser und im Hafen Emden abzuleitende Erfahrung ist umkehr-  
bar. Nach einem Einstellen der Baggerungen im Emden Fahr-  
wasser stellt sich dort eine von Natur aus geringere Was-  
sertiefe ein, als sie heute durch Baggern erhalten wird.  
Bei dieser Sohlenlage erfolgt dann keine bleibende Sedi-  
mentation mehr im durchströmten Querschnitt dieses Ems-  
abschnitts. Diese Schlußfolgerung gilt sinngemäß auch für  
die Geiserinne. In den etwa von der Hauptrinne abzwei-  
genden Nebenbecken wie Einfahrten zum Emden Hafen usw.  
kann die Sedimentmenge in der Größe der von Oberwasser mit-  
geführten Feststoffmenge liegen.



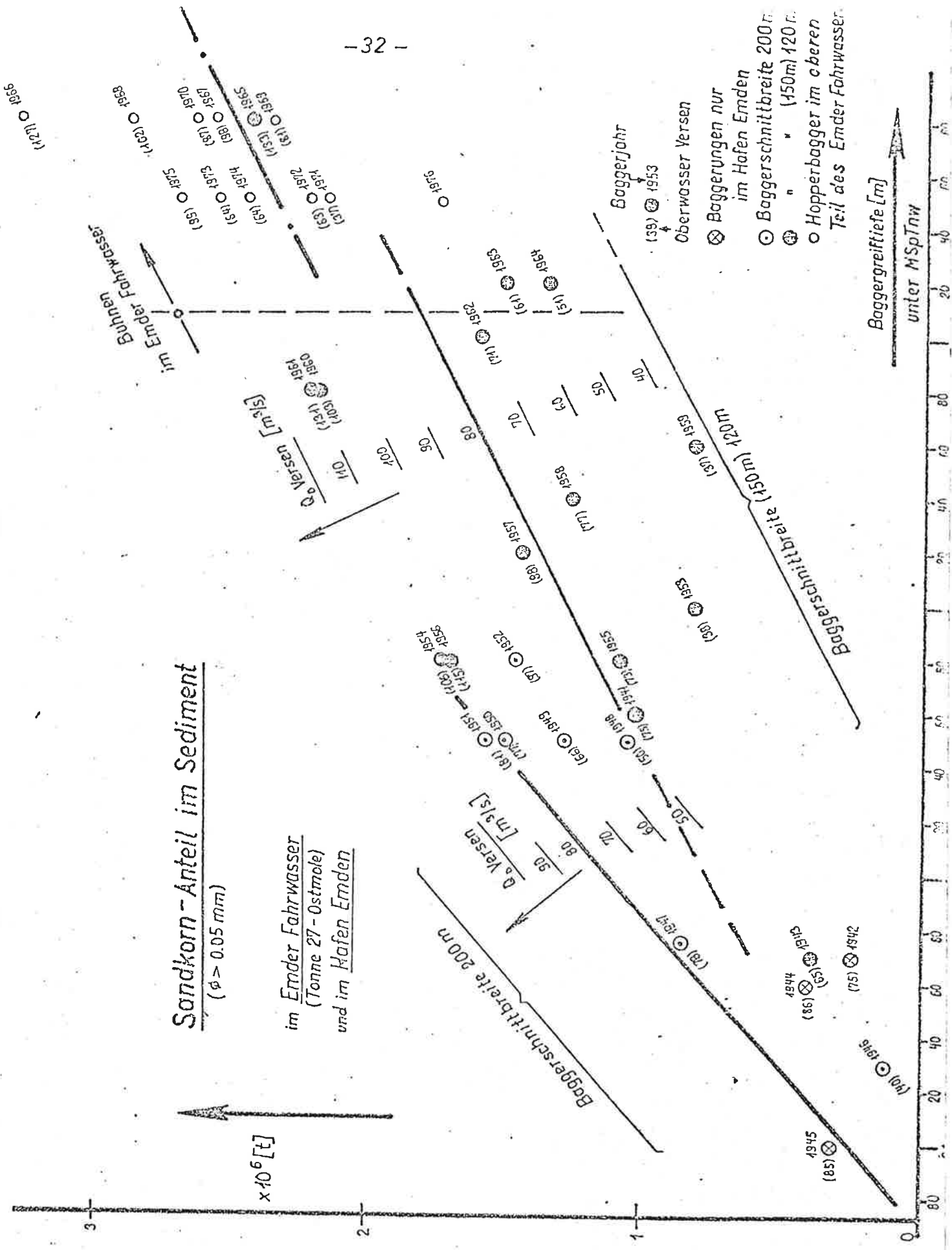


Abb.5: Jährliche Sedimentation im Emder Fahrwasser und im Hafen Emden; nur Sandkornanteil (Feinkornanteil siehe Abb. (Erläuterung S. 33).

Die nach 2.2.1 berechneten Jahresmengen der Sedimentation im Emdener Fahrwasser und im Hafen Emden sind in Abb. 5 als Funktion der Tiefe der Ausbaggerung des Emdener Fahrwassers (Baggergreiftiefe) dargestellt. Bereits die allgemeine Verteilung der Beobachtungswerte zeigt die Zunahme ihrer Größe mit wachsender Greiftiefe. Die Anordnung im einzelnen läßt dazu noch einige bezeichnende Umstände erkennen.

Mit einer Vergrößerung der Greiftiefe der Bagger ist in erster Linie eine Vergrößerung des durchströmten Flußquerschnitts verbunden. Die daraus resultierende Verkleinerung der Stromgeschwindigkeit, d.h. der Transportgeschwindigkeit, führt zu stärkerer Sedimentation (2.2.5). Bei gleicher Greiftiefe der Bagger wird aber der Querschnitt umso mehr vergrößert, je breiter die vom Bagger hergestellte übertiefe Rinne ausgeführt wird. Entsprechend größer ist jedoch auch die danach zu erwartende Sedimentation.

Vor dem zweiten Weltkrieg und ebenso bei Wiederaufnahme der Erzschiffahrt nach Kriegsende bis etwa zum Jahre 1955 beförderte das Regelschiff des Erzverkehrs, welches die erforderliche Wassertiefe der Zufahrt zum Hafen Emden auch im Emdener Fahrwasser bestimmte, 7 - 10 000 t äußerstenfalls 10 - 14 000 t Ladung. Es hatte damals einen maximalen Tiefgang von 28 - 29', also von nicht einmal 9 m. Bei Ausnutzung des Tidehubs von 3 m über MSpTnw bot die damalige Fahrwassertiefe von 7,0 m unter MSpTnw genügend Kielfreiheit und Spielraum bezüglich der Ankunftszeit vor oder nach dem Eintreten des Hochwassers.

Bis zum Kriegsbeginn wurde eine Fahrrinnenbreite von 200 m für erforderlich gehalten. Die Baggerkapazität ließ einen entsprechenden Aufwand zu. Als jedoch Schiffe des genannten Tiefgangs in den fünfziger Jahren den Hafen Emden in zunehmender Anzahl anliefen, stellte es sich als hinderlich heraus, daß die angestrebte Fahrwassertiefe nicht während des ganzen Jahres sichergestellt werden konnte. Soweit eine zweite Baggerung im Jahre erforderlich wurde, blieb sie auf eine geringere Breite beschränkt (etwa 150 m). Ab 1957 wird im Emdener Fahrwasser nur noch in einer Breite von 120 m gebaggert.

Da die unterschiedlichen Schnittbreiten bei gleicher Greiftiefenzunahme zu verschieden starker Sedimentation führen, ordnen sich die Beobachtungswerte in Abb. 5 (mindestens) zwei zu unterscheidenden Ausgleichslinien zu. Die Streuung um diese Ausgleichslinien herum wird offensichtlich durch die in den Beobachtungsjahren wechselnde Größe des Oberwasserabflusses verursacht. Die Größe des Oberwasserabflusses ist in Abb. 5 links vom Beobachtungswert vermerkt. Eine Skala für die Abhängigkeit vom Oberwasser wurde versuchsweise eingezeichnet. Die Ausgleichsgeraden wurden am mittleren Oberwasserabfluß von rd.  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  orientiert.

Abweichungen der Beobachtungswerte von der Zuordnung zu Greiftiefe und Oberwasserabfluß sind in Abb. 5 zu bemerken. Es gibt dafür verschiedene Gründe. Über die Schwierigkeit, Sedimentmengen auf ihr Feststoffgewicht umzurechnen, wurde bereits gesprochen. Eine weitere mögliche Ungenauigkeit liegt in der Angabe des Oberwasserabflusses. So sind nur rd. 70 % des Einzugsgebietes durch die Meßstelle Versen erfaßt. Aber selbst die Angaben des Abflusses in Versen dürfen nicht immer als gesichert gelten. Nach der letzten Überprüfung der Abflußkurve waren z.B. die Abflußmengen ab 1960 beim gleichen Wasserstand um etwa  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  höher anzugeben als in den Jahren vorher. Von welchem Jahr an diese Korrektur aber wirklich erforderlich wurde, kann nachträglich nicht festgestellt werden. Auch in früherer Zeit haben Änderungen der Abflußverhältnisse stattgefunden. Ob ihnen rechtzeitig Neufestsetzungen der Abflußkurve gefolgt sind, ist nicht sicher angebar. Vor 1941 sind keine Beobachtungswerte über die Sedimentation in die Abb. 5 aufgenommen worden, da für diese Jahre keine Oberwasserangaben greifbar waren.

Bedauerlich ist in Abb. 5 die Unschärfe der Zuordnung bei kleinen Werten der Greiftiefe. Es wäre aufschlußreich, hier exakte Angaben über die Verhältnisse im Zustand des Sohlengleichgewichts machen zu können. In den Jahren, in denen sich durch Aufsandung des Fahrwassers die geringen Tiefen einstellten, wurde jedoch nur im Hafen Emden gebaggert. Die Bezugsgröße "Greiftiefe"

welche beim Einsatz von Baggern an einem Bezugsort im Fahrwasser höchstens zweimal im Jahr kurzzeitig vorhanden ist, war dagegen während der Jahre der langsamen Aufsandung als "mittlere Fahrwassertiefe" während vieler Monate gegeben. Da außerdem wegen des in diesen Jahren eingestellten Spülfeldbetriebs die gebaggerten Mengen an unterschiedlichen Orten deponiert und zum großen Teil in der Nähe des Fahrwassers verklappt wurden, ist die Sedimentmenge durch mindestens diese beiden Umstände in nicht angebbarem Umfang gegenüber dem natürlichen Antransport verfälscht. Auch späterhin bis 1949 wurden Baggermengen trotz des wieder benutzbaren Spülfeldes zum Schutze des Seedeichs Emden - Knock im westlichen Teil vor diesem verklappt.

Änderungen im Sedimentationsverhalten sind auch nach dem Bau der Bühnen beidseits des Emders Fahrwassers 1961 und 1963 und der Absperrung der Überströmung der Geise zu erwarten. Die Grenze zu den betroffenen Beobachtungswerten ist in Abb. 5 eingezeichnet. Durch den Bühnenbau wurde die Größe des durchströmten Querschnitts verkleinert. Dieser Effekt müßte die Ausgleichsgerade zu kleineren Sedimentationswerten hinverlagern. Das Absperrn der Geiseüberströmung verringert dagegen das Transportvermögen der Ebbe stärker als das der Flut. Die Eintreibungen nehmen dadurch trotz der verringerten Querschnittsgröße wieder zu. Das wahre Ergebnis der einander ganz oder teilweise aufhebenden Regulationsmaßnahmen ist wegen der wenigen verwendbaren Beobachtungswerte in Abb. 5 nicht auszumachen. Es scheint aber keine große Änderung in der Sedimentmenge eingetreten zu sein.

Bei der Ermittlung der Sedimentation in diesen Jahren wurde nicht berücksichtigt, daß nach dem Bühnenbau 1961 - 1963 eine starke Verschlickung der Bühnenfelder stattgefunden hat. Die Bühnenfelder werden bei den Aufnahmen der Fahrwassertiefe nicht mit eingemessen. So konnte für die in Frage kommenden Jahre die zwischen den Bühnen sedimentierte Menge nicht errechnet werden.

Ein gänzlich geändertes Sedimentationsverhalten scheint nach Abb. 5 in den Jahren ab 1966 eingetreten zu sein. Die dem mittleren Oberwasserabfluß zuzuordnende Ausgleichsgerade liegt zu

größeren Sedimentationswerten hin verschoben. Es gibt dafür jedoch Gründe, welche außerhalb der hier darzulegenden einfachen Zusammenhänge liegen. Sie werden in 2.2.4 besprochen. Die ohne Berücksichtigung der Jahre ab 1966 aus den Abb. 5 und 6 zu ziehenden Schlüsse werden durch sie nicht berührt.

Die in Abb. 5 eingezeichnete Ausgleichsgerade für die Stärke der Sedimentation als Funktion der Tiefe der Ausbaggerung des Emders Fahrwassers bzw. der dortigen Fahrwassertiefe in baggerfreien Zeiten gibt an, daß bei einer Tiefe der Fahrrinne von rd. 5,7 m unter MSpTnw keine bleibende Sedimentation von Feststoffen der Sandkornfraktion mehr stattfindet. Die hydrodynamischen Gründe hierfür werden in 2.2.5 besprochen. Hier wird in einer graphischen Darstellung die Erfahrung der letzten Kriegsjahre nachvollzogen, in welchen nach dem Einstellen der Baggerungen sich die Fahrwassersohle bis zum Frühjahr 1946 auf eine Tiefe von rd. 6 m unter MSpTnw aufgehöhht hatte. In den Jahren vorher waren im Emders Fahrwasser oberhalb des Geise-Weststeerts mit ständig, aber nur noch langsam abnehmenden Mengen sedimentiert worden:

1943	rd	0,57 Mio m <sup>3</sup>
1944	"	0,37 Mio m <sup>3</sup>
1945	"	0,23 Mio m <sup>3</sup> .

Die Gleichgewichtslage scheint danach zu Anfang des Jahres 1946 noch nicht ganz erreicht worden zu sein. Das endgültige Eintreten dieses Zustandes wurde jedoch nicht abgewartet. Im Frühjahr 1946 setzte der Baggerbetrieb wieder ein.

Zu der Aussage der Abb. 5, daß ein Gleichgewichtszustand für die Sandsedimentation bei einer Sohlentiefe von 5,7 m unter MSpTnw zu erwarten ist, tritt die Auskunft der Abb. 6 über das Verhalten der Feinkornfraktionen. Auch bei ihnen zeigt die sedimentierte Menge die Abhängigkeit von der Tiefe der Ausbaggerung des Emders Fahrwassers und von der Größe des Oberwasserabflusses. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß sowohl bei der Sandfraktion wie bei den Feinkornanteilen die Sedimentmengen des Emders Fahrwas

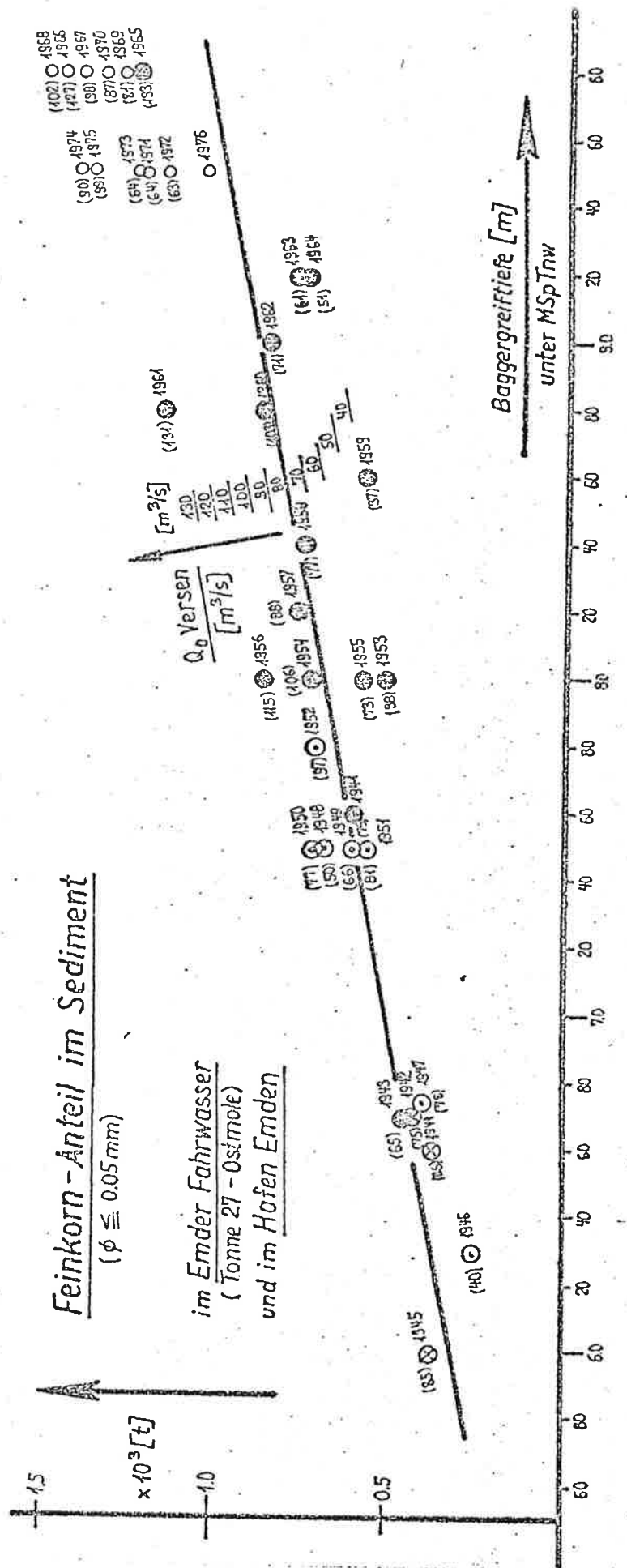


Abb. 6: Jährliche Sedimentation im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden; nur Feinkornanteil (Sandkornanteil siehe Abb. 5 (Erläuterung S. 38)).

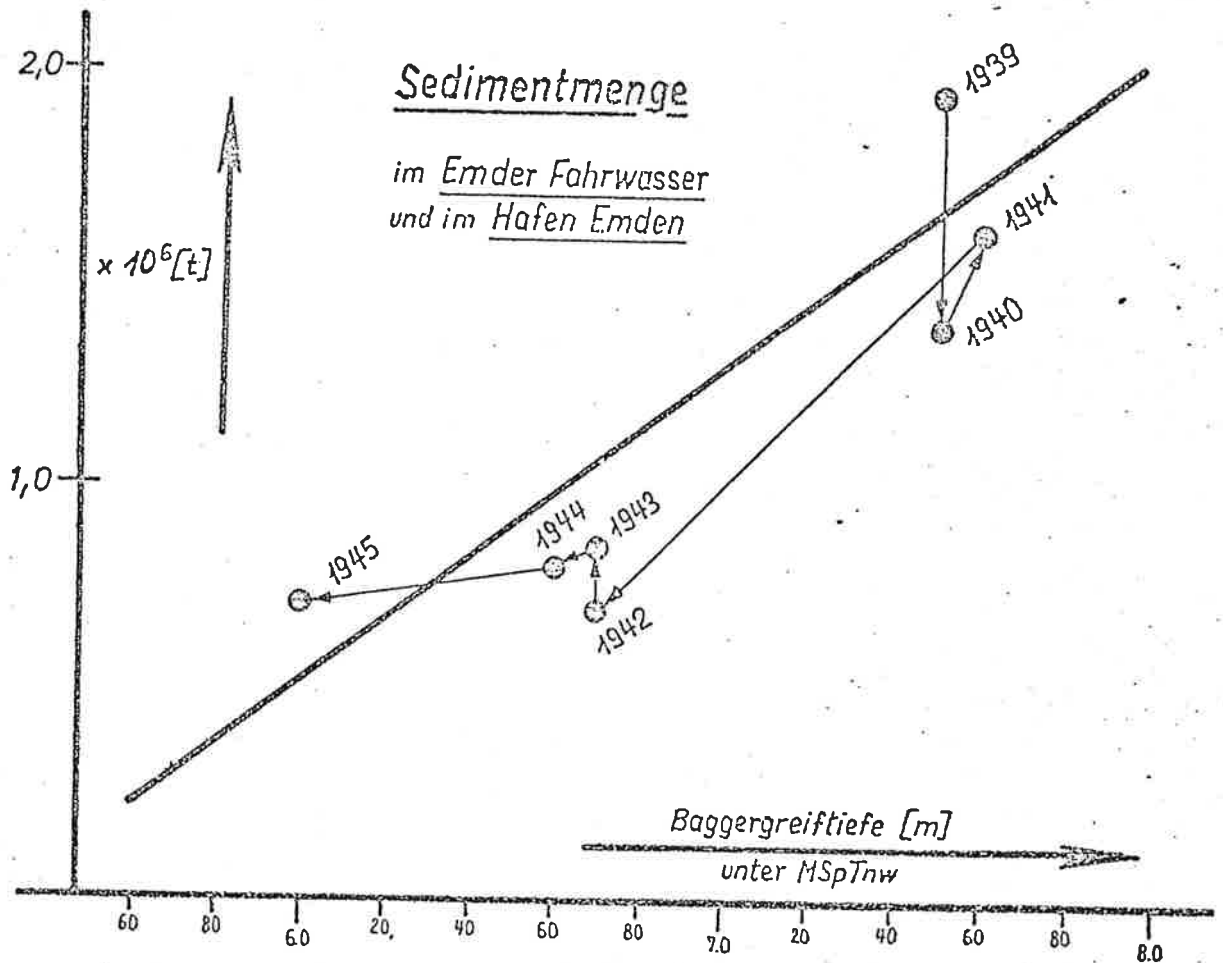
sers mit denen des Hafens Emden zusammengefaßt worden sind.

Sandkorn wird im Hafen Emden nur in geringem Prozentsatz sedimentiert. Die Feinkornmenge fällt dagegen zu rd.  $2/3$  in den Hafenbecken aus und dort wieder zum überwiegenden Teil im abgeschleusten Binnenhafen (Abb. 4). Der durch Abb. 6 belegte Umstand, daß sich die Menge an Feinkornsediment den Parametern Fahrwassertiefe und Oberwasser wie beim Sandanteil im Emden Fahrwasser zuordnen läßt, bestätigt die Aussage von 2.2.2, daß das Sediment von Emden Fahrwasser und Hafen Emden den gleichen Ursprüngen entstammt. Wegen der kleineren Unregelmäßigkeiten in der Verteilung der Beobachtungswerte der Abb. 6 wird auf die entsprechenden Auslassungen zu Abb. 5 verwiesen.

Während die Sandablagerung bei einer Fahrwassertiefe von 5,7 m unter MSPTnw zum Stillstand kommt (Abb. 5), ist nach Abb. 6 dann noch mit einer Sedimentation von Feinkorn in einer Menge von rd. 0,3 Mio t/Jahr zu rechnen. Das entspricht wieder der Erfahrung der "baggerfreien" Kriegsjahre. Es wurde in dieser Zeit im Emden Fahrwasser nicht gebaggert. Dagegen mußte selbst für die Versorgungsschiffe mit ihren geringen Ansprüchen an Tiefe der Hafen weiterhin ausgebagert werden. Hieraus ist der zusätzliche Hinweis zu der graphischen Darstellung der Abb. 6 abzuleiten, daß die dort angezeigte Restsedimentation (Feinkorn) zu ihrem Zustandekommen besondere Verhältnisse erfordert. Die Feinkornmenge von rd. 0,3 Mio t/Jahr braucht zu ihrer Ablagerung ähnlich ruhig durchströmte Nebenbecken wie den Emden Hafen. In 2.1 wurde dargelegt, daß die genannte Feinkornmenge der Größe der mit dem Oberwasser antransportierten Feststoffmenge entspricht.

Abb. 7 gibt hinsichtlich der berücksichtigten Jahre einen Auszug aus Abb. 5 und 6 wieder, vermehrt um einige zurückliegende Jahre.

Die in ihr aufgezeichneten Sedimentmengen fassen dagegen die Sandkomponente mit den Feinkornfraktionen zusammen. Als Aus-



- Abb. 7 : Der zeitliche Ablauf der Sedimentablagerung im Emdener Fahrwasser und im Hafen Emden nach dem Einstellen der Baggerungen im Emdener Fahrwasser nach 1941



gleichsgerade ist diejenige bei 200 m Sohlenbreite der Abb. 5 eingetragen, wie es den Baggerungen der dargestellten Jahresreihe entspricht.

Abb. 7 zeigt den zeitlichen Ablauf des Rückgangs der Sedimentation nach dem Einstellen der Baggerungen im Emden Fahrwasser ab 1942. 1943 ist in geringem Umfang gebaggert worden, aber nur auf einer Fahrwasserseite und nur auf 665 m Länge. 1945 wurde dagegen ein Teil der Hafengebaggerungen am Geise-Weststeert und oberhalb der Hafeneinfahrt (Tonne L/C) verklappt.

Aus Abb. 7 läßt sich die Tendenz der Sohlenaufhöhung im Emden Fahrwasser nach dem Aufhöhen der Baggerungen erkennen. Es läßt sich dadurch nun auch das Sedimentationsverhalten der Geiserinne voraussagen, welche nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart die Wasserführung anstelle des Emden Fahrwassers übernimmt. Die Geiserinne soll, wie bereits erwähnt, durch eine nur einmalige Ausbaggerung einen Querschnitt erhalten, welcher der Größe des Emden Fahrwassers in dem 1946 erkennbaren Gleichgewichtszustand entspricht ( 4. ). In einem solchen Fall sind in der Geiserinne nach den vorstehend gewonnenen Erkenntnissen keine bleibenden Ablagerungen zu erwarten. Feinkörnige schlackige Sedimente werden dagegen in ruhigen Nebenräumen dieses Flußabschnitts, z.B. in Sielausmündungen, Einfahrten und Vorhäfen zum Hafen Emden, in der Größenordnung der mit dem Oberwasser herangeführten Feststoffe ausfallen können. Eine weitgehend turbulenzfreie Strömung ist aber Voraussetzung für diese Sedimentation.

#### 2.2.4 Die Sedimentation im Emden Fahrwasser nach 1964/65

Nach 1964/65 scheint die Sedimentation im Emden Fahrwasser zugenommen zu haben. Es konnte bisher aber nicht abschließend geklärt werden, ob seit dieser Zeit der Feststoffanfall tatsächlich vermehrt worden ist und in welchem Maße. Zu einer scheinbaren Vergrößerung des Sedimentanfalls kann der Einsatz von Hopperbaggern im oberen Emden Fahrwasser seit 1964 geführt haben. Bei nominell gleicher Kubikmeterleistung erbaggert nicht in allen Fällen ein Hopperbagger die gleiche Feststoffmenge wie ein Eimerkettenbagger. Unterschiede entstehen besonders beim Arbeiten in feinkörnigem Sediment wie dem des oberen Emden Fahrwassers. In gewissem Umfang kann dieser Effekt eine Zunahme an Sedimentmenge vorgetäuscht haben. Daneben gibt es Hinweise für eine Umlagerung von Feststoffen im Gebiet von Dollart und Emden Fahrwasser zu Lasten des Emden Fahrwassers. Dieses Vorgangs wegen sollte davon abgesehen werden, Baggermengen im Dollartmund zu verklappen.

In Abb. 5 und 6 sind die Sedimentmengen der Jahre 1941 bis 1976 in Abhängigkeit von der Tiefe der Ausbaggerung des Emden Fahrwassers und der Größe des Oberwasserabflusses dargestellt worden. Bei der Besprechung dieser Abbildungen in 2.2.3 wurde darauf hingewiesen, daß die Beobachtungswerte in ihrer Zuordnung zu Greiftiefe und Oberwasser in der großen Mehrzahl aller Fälle erkennbar einer Regelmäßigkeit gehorchen, daß diese Zuordnung aber bei den Werten ab 1965 offensichtlich einem anderen Grundsatz folgt. Es bedarf für diese zumindest aber eines anderen Maßstabsfaktors.

Für dieses Verhalten sind mehrere Gründe anzuführen. Diese reichen in Summe aus, um auch die Beobachtungswerte ab 1966 in die Regelmäßigkeit derjenigen vor dieser Zeit einzufügen. Von einer Umrechnung wird jedoch Abstand genommen; denn ohne zusätzliche Untersuchungen wäre diese "Korrektur" nur willkürlich durchführbar. Für klärende weitere Untersuchungen war jedoch bisher keine Gelegenheit gegeben. Es werden daher nachfolgend nur die Gründe für die angesprochenen Abweichungen dargelegt.

Im Jahre 1965 wurde eine für die hier anzustellende Betrachtung belangreiche Änderung eingeführt. Von diesem Zeitpunkt an wurden mit jährlich zunehmendem Anteil am Baggeraufkommen neben den Eimerkettenbaggern auch Hopperbagger im oberen Emden Fahrwasser eingesetzt. Über die damit aufgeworfenen Schwierigkeiten bei der Mengenumrechnung vom Sediment an der Gewässerschle zur Baggermenge und umgekehrt wurde bereits in 2.2.1 gesprochen.

Besonders beim Baggern in stark feinkornhaltigem Sediment wie dem des oberen Emden Fahrwassers sind die Schwankungen der effektiv erbrachten Baggerleistung beim Hopperbagger groß. Die Leistungsermittlungen des WSA Emden haben ergeben, daß bei solchen Schlickbaggerungen der Feststoffinhalt im Baggergut eines Hopperbaggers nicht selten um rd. 40 % niedriger liegt als beim Baggern mit einem Eimerkettenbagger <sup>x)</sup>.

---

x) Dieses Ergebnis ist weniger abwertend als es auf den ersten Blick erscheint: Beim Baggern im feinkörnigen Sediment (Schlick) von welchem hier die Rede ist, wird ein Boden aufgebaggert, welcher in der Regel einen Wassergehalt um etwa 80 % hat (auf diese Konsistenz ist das besondere Lot (Schlicklot) eingestellt, welches bei Handlotungen in dieser Sedimentart benutzt wird). Feststoffe sind in jedem Kubikmeter dieses Sediments nur zu 20 % enthalten und nach dem Aufbaggern durch einen Eimerkettenbagger (Auflockerung etwa 1,4-fach) nur  $20/1,4 = 14,3\%$ . Bei einem Feststoffanteil von demgegenüber 8,6 % im Laderaum eines Hopperbaggers weist das Baggergut dieses Baggers einen nur um weniger als 6 % größeren Wassergehalt als das des Eimerkettenbaggers auf. Die rechnerische Effektivleistung an gefördertem Feststoff des Hopperbaggers liegt jedoch um 40 % unter derjenigen des Eimerkettenbaggers.

Da nicht alle Baggerungen auf ihre Effektivleistung kontrolliert werden (z.B. die bundeseigenen Bagger), ist nicht sichergestellt, daß die Angaben über die Menge der im Emden Fahrwasser gebaggerten Kubikmeter für Eimerkettenbagger (vor 1964) mit dem der Hopperbagger (ab 1964) voll vergleichbar sind. Wenn dieser Umstand nicht durch eine Korrektur ausreichend berücksichtigt wird, kann das in der Größe der in Abb. 5 und 6 dargestellten Sedimentationswerte zu Unregelmäßigkeiten führen.

Auch der Bezug der Abb. 5 und 6 auf die Baggergreiftiefe macht beim Einsatz von Hopperbaggern gegebenenfalls eine Änderung der Definition dieser Größe erforderlich. Für die Darstellung in Abb. 5 und 6 ist als Baggergreiftiefe die Wassertiefe eingesetzt worden, welche unmittelbar nach Ausführung der Baggerung zu kartieren ist, d.h. welche von der Schifffahrt genutzt werden kann. Die Eigenart der Baggertechnik des Hopperbaggers macht es jedoch erforderlich, über dieses Maß hinaus eine gewisse, wenn auch geringe Übertiefe zu baggern. Zwischen den einzelnen längsverlaufenden Schnitten des Baggers bleiben in der Regel Längsrippen erhalten (Abb. 8). Sie sind nautisch als Hindernis anzusehen. Hydrodynamisch ist dagegen die Wassertiefe bis zur Tiefe des Baggerschnittes wirksam. Diese um rd. 0,5 bis 0,8 m größere Wassertiefe ist daher wahrscheinlich bestimmend für die Stärke der Sedimentation. Es sollte daher vermutlich ab etwa 1964 besser diese Größe dem in Abb. 5 und 6 dargestellten Zusammenhang unterlegt werden. Da jedoch noch bis 1972 neben den Hopperbaggern auch Eimerkettenbagger im oberen Emden Fahrwasser eingesetzt wurden, bestehen hierfür einige formale Schwierigkeiten. Sie könnten nur durch die Annahme wahrscheinlicher Proportionen ausgeräumt werden. Wegen der darin liegenden Willkür ist dieser Weg bisher nicht besritten worden.

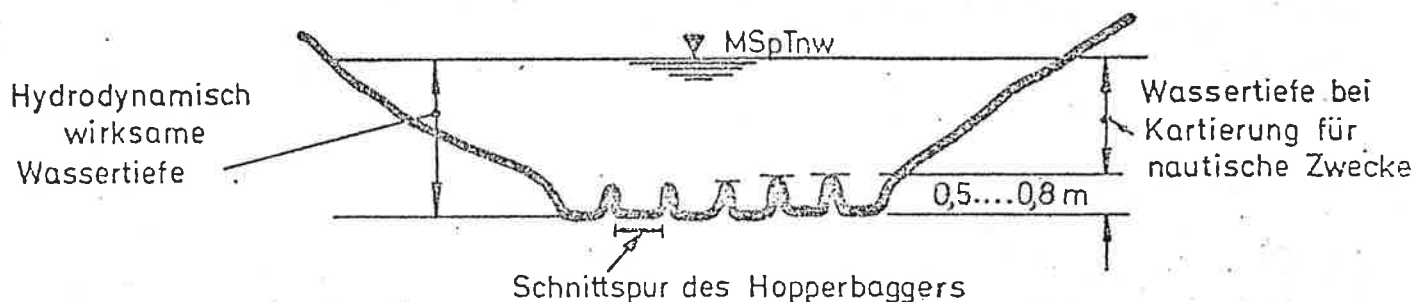


Abb. 8 : Gewässersohle nach dem Einsatz eines Saugbaggers

In der hydrodynamischen Wirkung unklar ist darüber hinaus auch der bereits angesprochene Umstand, daß beim Einsatz von Hopperbaggern deren erbaggerte Tiefe fast das ganze Baggerjahr über als ausnutzbare Tiefe vorhanden und transportdynamisch wirksam ist. Demgegenüber stellt beim Eimerkettenbagger die durch seine Greiftiefe bezeichnete Wassertiefe den Maximalwert der verfügbaren Querschnittstiefe dar. Er wird während der übrigen Zeit des Baggerjahres immer unterschritten (Abb. 9). Die Auswirkung dieses Umstands auf die Stärke der Sedimentation kann zahlenmäßig kaum ausgedrückt werden. Es ist daher davon abgesehen worden, sie bei der Bewertung der Sedimentationsmengen nach 1964 zu berücksichtigen.

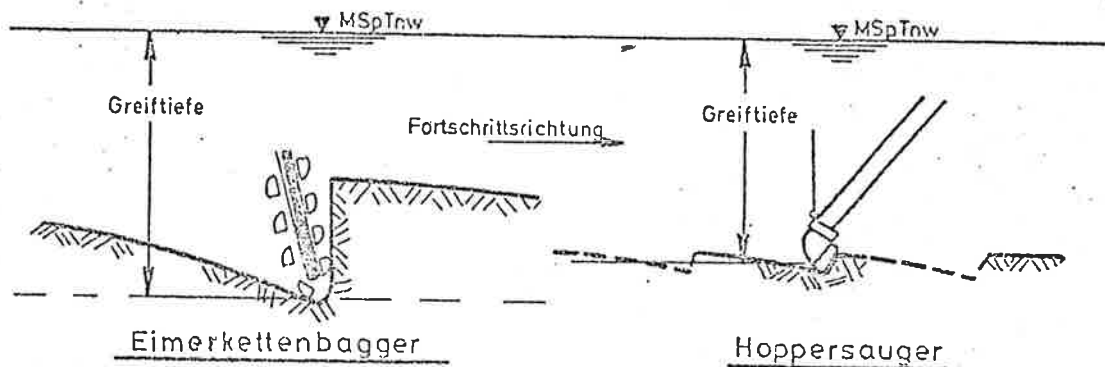


Abb. 9 : Erfolg des Einsatzes eines Eimerkettenbagger im Vergleich zu dem eines Hoppersaugers  
(Der Maßstab der Skizze ist in Baggerfortschrittsrichtung übermäßig verzerrt)

Den beiden vorstehend angesprochenen Bezugsgrößen, dem Sedimentinhalt in den Baggermengen und der Baggergreiftiefe, ist also durch eine wohl zu begründende Umwertung ein Bewegungsfreiraum gegeben. In diesem lassen sich die Sedimentmengen der Jahre nach 1964 in die gleiche Proportion zur Baggertiefe bringen, welcher sich diejenigen der vorhergehenden Jahre unterordnen. Die in den Abb. 5 und 6 dargestellte etwa lineare gegenseitige Abhängigkeit ließe sich damit für alle verfügbaren Beobachtungswerte verwirklichen. Es wurde jedoch davon abgesehen, durch ein formales Errechnen passender Werte einen scheinbaren Zusammenhang für die letztgenannten Werte zu erzwingen. Gegen ein solches Vorgehen sprechen auch die folgenden Beobachtungen.

Bei einem Vergleich der Größe des Baggeraufwands in verschiedenen Abschnitten des Emsfahrwassers zeigt sich für gewisse Zeiten ein Gleichlauf der Entwicklungstendenz. In Abb. 10 ist das für den Gatjebogen (Tonne 24 - 27) und das Ender Fahrwasser

(Tonne 27 - Ostmole) durch den Gang der je Meter Fahrwasserlänge (Baggerschnittlänge) gebaggerten Menge dargestellt. Danach erhöhte sich seit dem Beginn der kontinuierlichen Vertiefung des Fahrwassers ab 1957 (siehe den Gang der Baggreiftiefen oben in Abb. 10) der Baggeraufwand in allen Abschnitten etwa linear mit der zunehmenden Fahrwassertiefe.

Nach der letzten und stärksten Vertiefung im Jahre 1965 vergrößerte sich der Baggeraufwand im oberen Teil des Emders Fahrwassers, Tonne 31 bis Ostmole (Abb. 10), in besonders auffälligen Maße. Bemerkenswert ist demgegenüber der gleichzeitig einsetzende Rückgang des Baggererfordernisses im Fahrwasserabschnitt von Tonne 27 bis Tonne 28. Hier hat ab 1965 eine Umlagerung eingesetzt. Es wird offenbar der seeseitige Teil (Tonne 27 - Tonne 28) zu Ungunsten des oberen Emders Fahrwassers entlastet, und es scheint sich darüber hinaus die insgesamt sedimentierte Menge vergrößert zu haben. Das ist aus dem Umstand zu schließen, daß bei zwar etwa gleichgroßen Beträgen der Entlastung und Belastung der Abschnitt Tonne 31 - Ostmole etwa 2,3-fach länger, die Baggermenge also entsprechend größer ist als diejenige von Tonne 27 bis Tonne 28.

Die vorgenannten Beobachtungen werden durch die Änderung des Sedimentationsverhaltens, wie es sich aus der Folge der Sohlenhöhenaufnahmen (Peilungen) ableiten läßt, bestätigt. In diesen Messungen der Höhenlagen der Gewässersohle stellt sich das unterschiedliche Verhalten im seeseitigen und oberen Emders Fahrwasser eindeutig dar; denn die Aussage ist frei von dem Erfordernis, Sedimentmengen mit Baggermengen rechnerisch vergleichen zu müssen. So liegt die Aufhöhungsgeschwindigkeit im oberen Emders Fahrwasser ab Beginn des Baggerjahres 1964 beständig höher als bei allen Beobachtungen vor dieser Zeit (Abb. 30, S. ). Demgegenüber geht das Sedimentationstempo im Abschnitt Tonne 27 - Tonne 28 unter die früher zu beobachtenden Werte zurück. (Die Beobachtungswerte ab 1964 sind deswegen in die entsprechende Abb. 18, Seite 68 nicht eingetragen).

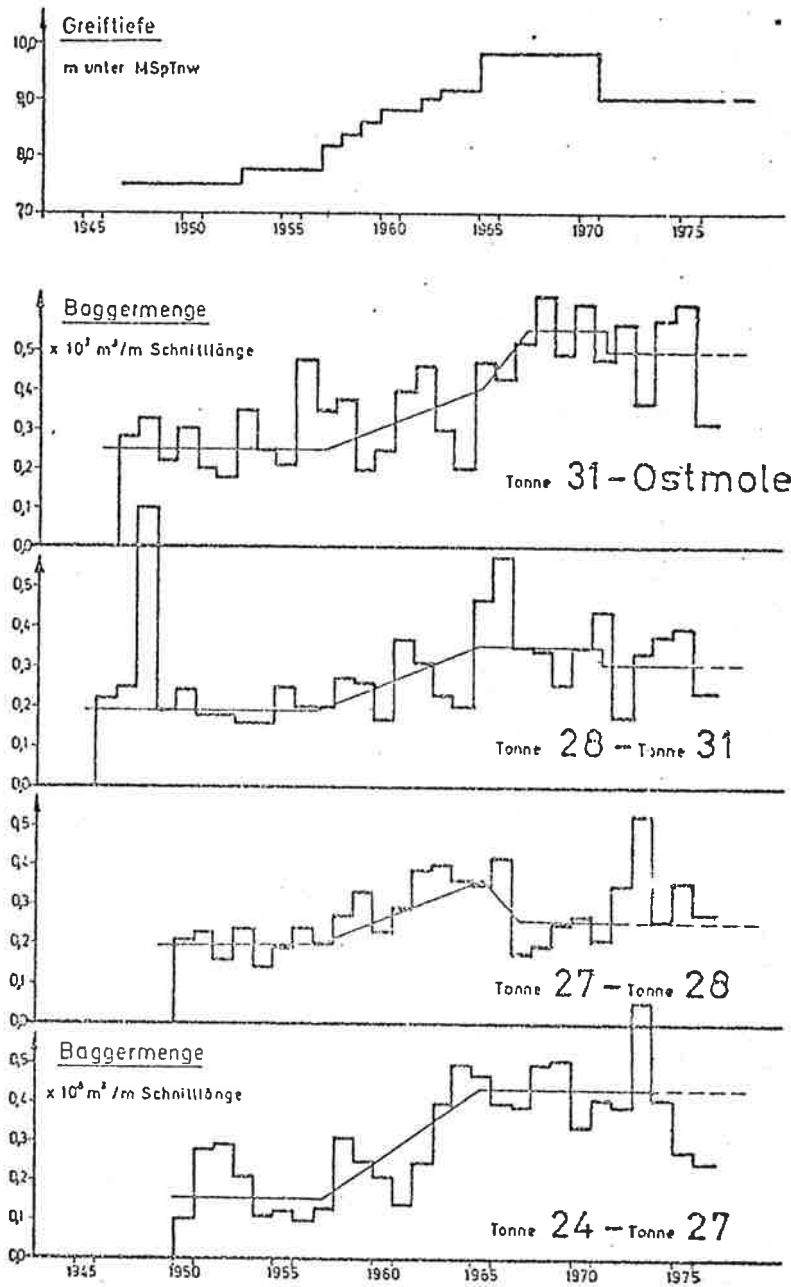


Abb. 10 : Baggerungen im Ender Fahrwasser und im Gatjebogen in  $m^3$  je Meter Baggerschnittlänge



Ein Hinweis auf die Ursache der angesprochenen Vorgänge wird im niederländischen Bericht über die Entwicklung des Dollart, 1972, (von der Meulen, 1972) gegeben. Nach der dortigen Darstellung der Änderungen der Größe des Durchflußquerschnitts im Dollartmund hat sich dieser ab 1965 fast sprunghaft erweitert. Diese Entwicklung ist auch in Abb. 40, S. 135 zu sehen, welche mit dem gleichen, zeitlich etwas erweiterten Inhalt nach deutschen Sohlenaufnahmen erstellt wurde. Im niederländischen Bericht wird die Querschnittserweiterung auf die Vergrößerung der Ebbwassermenge des Dollart zurückgeführt, welche nach dem Bau des Sperrdamms auf der Geise 1961 und der dadurch bewirkten Absperrung der Geiseüberströmung eingetreten ist. Eine andere Begründung dafür ist bisher auch nicht gefunden worden.

Den niederländischen Darstellungen (von der Meulen, 1972) ist zu entnehmen, daß im Dollartmund besonders das nördliche Ufer seit 1965 zunehmend zurückgewichen ist. Parallel dazu läuft zusätzlich eine Austiefung der nördlichen Querschnittshälfte, und diese Erosion setzt sich nordwestlich des Dollardmunds jenseits des Emsfahrwassers auf der Mittelplate fort. Die Erosion auf der Mittelplate macht sich bereits mit dem ersten Einriß seit 1961 bemerkbar.

Aus der Erosionstätigkeit ist abzuleiten, daß seit ihrem Beginn die Ebbströmung besonders intensiv den seeseitigen Teil des Fahrwasserabschnitts Tonne 27 - Tonne 28 kreuzt (Abb. 11). Die turbulente Unruhe hält dann an der Kreuzungsstelle offensichtlich die Sedimentation im Baggerschnitt niedriger als in der vorhergehenden Zeit. Von der in der Ebbströmung aus dem Dollart mitgeführten Feststoffmenge wird jedoch ein Teil über die Wasserscheide hinweg in jenen Wasserkörper hineingetragen, welcher mit der nächsten Flut in das Emders Fahrwasser einläuft. Diese Materialumlagerung vom Dollartmund in das Emders Fahrwasser nimmt erkennbare Ausmaße erst nach dem Beginn der Erosion im Dollartmund, also nach 1965 an (Abb. 10, S. 47 ; Abb. 40, S. 135

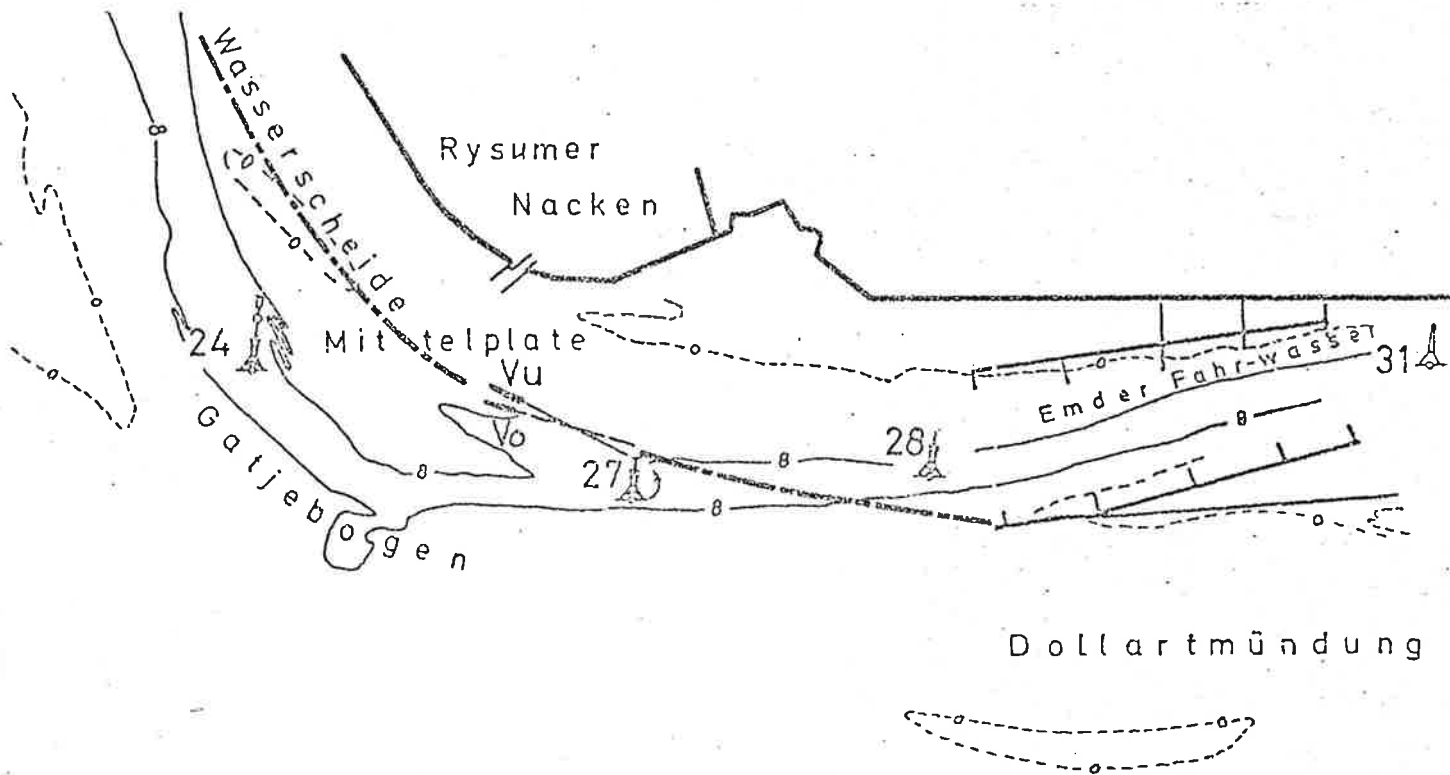


Abb. 11: Wasserscheide zwischen Emswasser und Dollartwasser und Komponenten der sie überschreitenden Strömung

Ein Wasseraustausch zwischen der Strömung aus dem Dollart und der aus dem Ender Fahrwasser, welcher zu dem angesprochenen Feststofftransport führt, findet über die "Wasserscheide" hinweg besonders während der Ebbströmung statt. Wie Strömungsmessungen zeigen, läuft die oberflächennahe Strömung mit einer Komponente vom Ender Fahrwasser zum Dollartwasser. In Schlen- nenne ist die Strömung auf das Ender Fahrwasser gerichtet. Ein Grund für diese Erscheinung ist die Zentrifugalbeschleunigung, derzufolge die Oberflächenströmung in der Krümmung von unterem Ender Fahrwasser und Gatjebogen wegen ihrer wesentlich höheren Fließgeschwindigkeit auf einer gestreckteren Bogenbahn fließt als die langsamere Sohlenströmung. Hierzu addiert sich die Wirkung der Coriolisbeschleunigung mit gleichgerichtetem Effekt. Bei Flutstrom wirkt sich die Zentrifugalbeschleunigung weniger ausgeprägt aus. Sowohl bei Flut- wie bei Ebbstrom ist dagegen eine sohlennahe Dichtestromkomponente aus dem in der Regel wesentlich salzigeren Dollartwasser auf den durch das Oberwasser der Ems ausgesüßten Strom aus dem Ender Fahrwasser gerichtet.

Da in Sohlennähe die Feststoffkonzentration wesentlich größer ist als in der Wassersäule darüber, bewirkt die sohlennahe, auf das Emders Fahrwasser gerichtete Stromkomponente einen in dieser Richtung resultierenden Feststoffstrom. Abb. 21, Seite 72 zeigt, daß dementsprechend im unteren Emders Fahrwasser die höhere Feststoffkonzentration auf der Südseite des Querschnitts anzutreffen ist. Im Gatjebogen, aus welchem das Emders Fahrwasser angeströmt wird, liegen dagegen die hohen Konzentrationen zum Nordufer. Sie nehmen nach Süden hin kontinuierlich ab. Es muß also auf dem Fließwege vom Gatjebogen zum Emders Fahrwasser die Komponente einer feststoffhaltigen Strömung vom Süden hinzutreten, um die Feststoffverteilung nach Abb. 21 zu erzeugen.

Der Feststoffaustausch vom Dollartwasser zum Emders Fahrwasser nimmt nach den hier geschilderten Erfahrungen eine merkbare Größenordnung erst dann an, wenn durch Störung des Sohlengleichgewichts im Dollartausgang zusätzliche Feststoffe in Suspension gebracht werden. Das kann durch außergewöhnliche Tideereignisse bewirkt werden, aber auch durch Verklappen von Baggergut. Es sollte daher davon abgesehen werden, gebaggerten Boden im Dollartmund abzusetzen.

Die Beeinflussung der Sedimentation des Emders Fahrwassers durch Vorgänge im Dollartmund ist hier angesprochen worden, weil ein beispielhafter Fall dieser Art zufällig zeitlich mit einer Änderung der Bagbertechnik im oberen Emders Fahrwasser zusammenfällt. Beide Vorgänge haben die Sedimentation im Emders Fahrwasser beeinflusst. Es bestand aber bisher nicht die Möglichkeit, durch entsprechende Untersuchungen und gegebenenfalls durch Messungen die Anteile zu trennen, die von dem einen oder dem anderen Ereignis ausgegangen sind. Demzufolge lassen sich auch die Unstimmigkeiten bei der Einordnung der Beobachtungen über die Sedimentation im Emders Fahrwasser ab 1965 in den Darstellungen der Abb. 5 und 6 nicht ohne Willkür beheben. Es wird daher von einer Umrechnung abgesehen, zumal dadurch die Aussage der Darstellungen, wie sie in der vorliegenden Stellungnahme gewonnen werden soll, nicht berührt wird.

## 2.2.5 Der flutseitig überwiegende Feststofftransport

Die Menge der im Emdener Fahrwasser und im Hafen Emden sedimentierten Feststoffe hat mit fortschreitender Vertiefung des Fahrwassers zugenommen. Es ist jedoch keine Vergrößerung der Feststoffanfuhr mit dem Oberwasser registriert worden, welche die zunehmende Sedimentation verursacht haben könnte. Die Feststoffe müssen daher von der Seeseite herangeführt worden sein und zwar in der Menge zunehmend mit zunehmender Vertiefung des Fahrwassers. In 2.2.5.1 werden hierfür die Gründe angeführt, welche sich aus der allgemeinen Tide- und Transportdynamik ergeben. Die zusätzliche, überlagerte Wirkung der Dichteströmung infolge des Salzgehaltsgefälles wird in 2.2.5.2 besprochen.

### 2.2.5.1 Die allgemeine Tide- und Transportdynamik

In einem Tideflußabschnitt, welcher sich im Sohlengleichgewicht befindet, bleiben aus flutseitigem und ebbseitigem Feststofftransport keine Ablagerungen zurück. Das stärkere Transportvermögen der Ebbe wegen der zusätzlich abzuführenden Oberwassermenge wird durch dynamische Besonderheiten der Fluttide nur soweit kompensiert, daß die mit dem Oberwasser herangeführte Feststoffmenge abtransportiert wird. Dieses dynamische und labile Gleichgewicht wird durch Baggerungen in einer Weise gestört, daß nunmehr ein Feststofftransport beginnt, welcher resultierend auf die Baggerstelle gerichtet ist. Aus den bisher bekannten Gesetzmäßigkeiten des Sandtransportes läßt sich ableiten, daß der durch die Baggerung aktivierte Feststofftransport linear mit der Größe der Querschnittserweiterung durch die Baggerung zunimmt. Das Einzugsgebiet, aus welchem die Feststoffeintreibungen in das Emdener Fahrwasser gespeist werden, liegt auf der Mittelplate, dem Rysumer und dem Manslagter Nacken.

In 2.2.3 wurde dargelegt, daß sich die Sedimentation im Emdener Fahrwasser und im Hafen Emden mit der fortschreitenden Vertiefung des Fahrwassers fortlaufend verstärkt hat. Dabei ist die Sedimentmenge von anfänglich der Größenordnung der Feststoffanfuhr des Oberwassers bis heute auf über das 10-fache dieses Wertes angestiegen. Wie in 2.1 abgeschätzt wurde, kann diese Steigerung nicht auf eine Zunahme der Sedimentanfuhr mit dem Oberwasser aus dem Binnenland zurückgeführt werden. Es müssen daher in zunehmendem Maße Feststoffe von der Seeseite antransportiert worden sein und zwar mengenmäßig in enger Proportion zum Maß der Vertiefung des Emdener Fahrwassers (2.2.3). Die Gründe hierfür werden nachstehend dargelegt.

Im Tidegebiet setzt sich der Transportvorgang der Feststoffe aus demjenigen der Flut und dem der Ebbe zusammen. Im Gleichgewichtszustand eines Tideflußabschnittes werden zwar Feststoffe in den Stauwasserzeiten, während sich die Richtung der Strömung umkehrt, vorübergehend an der Gewässersohle abgesetzt, es wird jedoch kein Sediment auf Dauer deponiert. Durch ein gewisses Überwiegen des Ebbtransports ist auch der Weitertransport der vom Oberwasser in das Tidegebiet eingebrachten Feststoffe nach See zu sichergestellt.

Ein Übergewicht an Transportvermögen ist der Ebbe dadurch gegeben, daß zusätzlich zu der mit der Flut aufgelaufenen Tidewassermenge die während der gesamten Tidedauer in das Tidegebiet eingeflossene Oberwassermenge abgeführt werden muss. Der daraus resultierende Dynamiküberschuß wird im Zustand des Sohlengleichgewichts durch folgende Besonderheiten der Fluttide kompensiert:

Es ist bei der Fluttide die

- Flutgeschwindigkeit vergrößert durch verkürzte Flutdauer infolge Verformung der Tidewelle durch Reflexion beim Einlaufen in die Tideflußmündung (Hensen, 1955),

- Flutgeschwindigkeit in Sohlennähe vergrößert und diejenige der Ebbe verkleinert durch Dichteströmung (2.2.5.2),
- Transportdauer und damit der Transportweg der Flut verlängert und derjenige der Ebbe verkürzt durch unterschiedliche Sedimentationsbedingungen in den Stauwasserzeiten (Postma, 1954; van Straaten, 1957 und 1958).

Die beiden letztgenannten Umstände haben besonders Bedeutung für den Feststofftransport nach einer Baggerung. Sie sollen daher ausführlicher besprochen werden. Das geschieht für die Dichteströmung in 2.2.5.2. Die Sedimentation um die Stauwasserzeit und die diesen Vorgang bestimmenden Gesetzmäßigkeiten des Absetzens von suspendierten Feststoffen bzw. des Übergehens von Feststoffen aus dem Sediment in Suspension, hier des Sandes, werden nachstehend besprochen.

In einer Strömung mit von Null anwachsender Geschwindigkeit, also z.B. nach der Stauwasserzeit einer Tide, kommt das Sohlenmaterial erst nach Überschreiten einer Grenzggeschwindigkeit in Bewegung. Während des weiteren Ansteigens der Strömungsgeschwindigkeit bleibt die Sandkonzentration im Wasser immer unter dem zur Augenblicksgeschwindigkeit proportionalen Wert, welchen sie in einer Strömung mit konstanter gleichgroßer Geschwindigkeit haben würde. Umgekehrt ist bei abnehmender Strömungsgeschwindigkeit die Konzentration des Sandes größer, als sie der Augenblicksgeschwindigkeit entspricht (Dillo, 1960). Bei der in den Tideflußmündungen wie der Ems gegenüber einer Sinusschwingung stark verformten Tide ist nun die Stauwasserzeit am Ende der Ebbe sehr kurz. Die Flutströmung setzt sehr schnell und stark ein. Der zu Ende der Ebbströmung in Suspension getragene Sand wird nur zu einem geringen Teil sedimentiert. Ein großer Teil wird aus dem suspendierten Zustand gleich wieder von der Flutströmung stromauf getragen. Im Gegensatz dazu ist während der längerdauernden Stauwasserzeit nach Ende der Flut Gelegenheit, den meisten Sand an der Sohle abzusetzen. Darüberhinaus steigen die Ebbstromgeschwindigkeiten relativ langsam an und überschreiten somit später die für Erosion erforderliche Mindestgeschwindigkeit, als das zu Beginn der Flut der Fall ist.

Van Straaten und Kuenen (1960) bezeichnen die Tatsache, daß für die Erosion eines Sediments die Stromstärke größer sein muß als die Geschwindigkeit, in der die Sedimentation des gleichen Materials aus einer Suspension anfängt, als "scour lag" und den daraus resultierenden Transport als "scour lag effect". Unter "setling lag" verstehen sie die Tatsache, daß einige Zeit verläuft zwischen dem Augenblick, in dem ein Strom mit abnehmender Geschwindigkeit nicht länger imstande ist, die Teilchen in Suspension zu halten, und dem, in dem die Teilchen den Boden erreichen. Hierauf wies Postma (1954) zuerst hin. Der aus letzterem resultierende Transport wird "setling lag effect" genannt.

Die vorstehend angesprochenen Effekte begünstigen den Feststofftransport der Flut. Sie werden jedoch bei Gleichgewicht in einem Flußabschnitt vom Transportvermögen der Ebbströmung übertroffen, und zwar in dem Maß, welches zur Abfuhr der mit dem Oberwasser in das Tidegebiet getragenen Feststoffmenge erforderlich ist. Dieses dynamische und dadurch sehr labile Gleichgewicht wird durch Baggerungen im betrachteten Flußabschnitt gestört. Die Transportverhältnisse werden dann durch eine veränderte Strömungsdynamik in einer Weise umgestaltet, daß nunmehr ein Feststofftransport, resultierend auf die Baggerstelle hin gerichtet, in Gang gesetzt wird.

Durch eine Baggerung wird der Durchflußquerschnitt im ausgebaggerten Stromabschnitt vergrößert. Diese Erweiterung des Querschnitts hält sich aber in der Regel in solchen Grenzen, daß dadurch die Größe der Tidewassermenge nicht merklich geändert wird (Wittmer, 1958). So geht bei gleichbleibender Größe des Durchflusses die Stromgeschwindigkeit im vergrößerten Querschnitt linear mit der Vergrößerung zurück. Entsprechend nimmt, aber nach einer höheren Potenz der Geschwindigkeitsverringerung, das Transportvermögen der Strömung ab. Feststoffe, welche vor der Baggerung über die im Gleichgewicht mit der Strömungsdynamik befindliche Gewässersohle weitergetragen wurden, werden nun am Ort der Vertiefung sedimentiert.

Primäre Folge der Ausbaggerung ist der Rückgang der Stromgeschwindigkeit am Ort der Baggerung. Den Zusammenhang zwischen der Stromgeschwindigkeit und dem Sandtransport gibt Niebuhr (1955) als Abhängigkeit von der dritten oder vierten Potenz der Geschwindigkeit an. Er fand diesen Wert aus Naturmessungen in der Ems. Eine engere Festlegung war bei der Streuung der Meßwerte nicht möglich. Untersuchungen mit Ems sand in einer Versuchsrinne des Franzius-Instituts der TU Hannover (1958) zeigten eine starke Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen, hier der Wassertiefe der Versuchsrinne, und nachfolgende Versuche in der gleichen Rinne mit Sand aus anderen Flußmündungen und daher anderer Kornzusammensetzung (Dillo, 1960) ließen erkennen, daß die Gesetzmäßigkeit des Transportes von der jeweiligen Zusammensetzung des transportierten Korngemisches abhängen. Eine für die hier anzustellende Untersuchung wünschenswerte Nachberechnung der Sedimentmengen im Emders Fahrwasser aus den durchaus gewinnbaren Angaben über die Strömungsverhältnisse scheitert daher an der Unsicherheit bei der Festlegung der Parameter für den Feststofftransport. Die weiteren Betrachtungen werden demzufolge auf die Darlegung der grundsätzlichen Umstände und gesichert beobachteten Gesetzmäßigkeiten abgestellt.

Abb. 12 gibt skizzenhaft die Anfangsbedingungen nach einer Baggerung im Emders Fahrwasser hinsichtlich des Geschwindigkeitsverlaufs im Baggerschnitt und in seiner Nachbarschaft wieder. Danach zeigen die in den Baggerschnitt hineinlaufenden Strömungen eine in der Größe abnehmende Geschwindigkeit. Bei den aus dem Baggerschnitt herauslaufenden Strömungen muß deren Geschwindigkeit erst ansteigen, um die Größe derjenigen im nicht ausgebagerten Nachbarbereich zu erreichen. Nach dem oben geschilderten settling lag - Effekt trägt nun die Strömung die in ihr suspendierten Feststoffe auch noch einige Zeit, d.h. eine Strecke ihres Fließwegs über den Ort hinaus, an welchem die Geschwindigkeitsabnahme beginnt, in Richtung auf den Baggerschnitt zu. Aus dem Baggerschnitt heraus ist dagegen die entgegengesetzt gerichtete Strömung nicht in der Lage, eine auch nur ihrer verminderten Größe proportionale Feststoffmenge mitzuführen (scour lag-Effekt). Es wird also



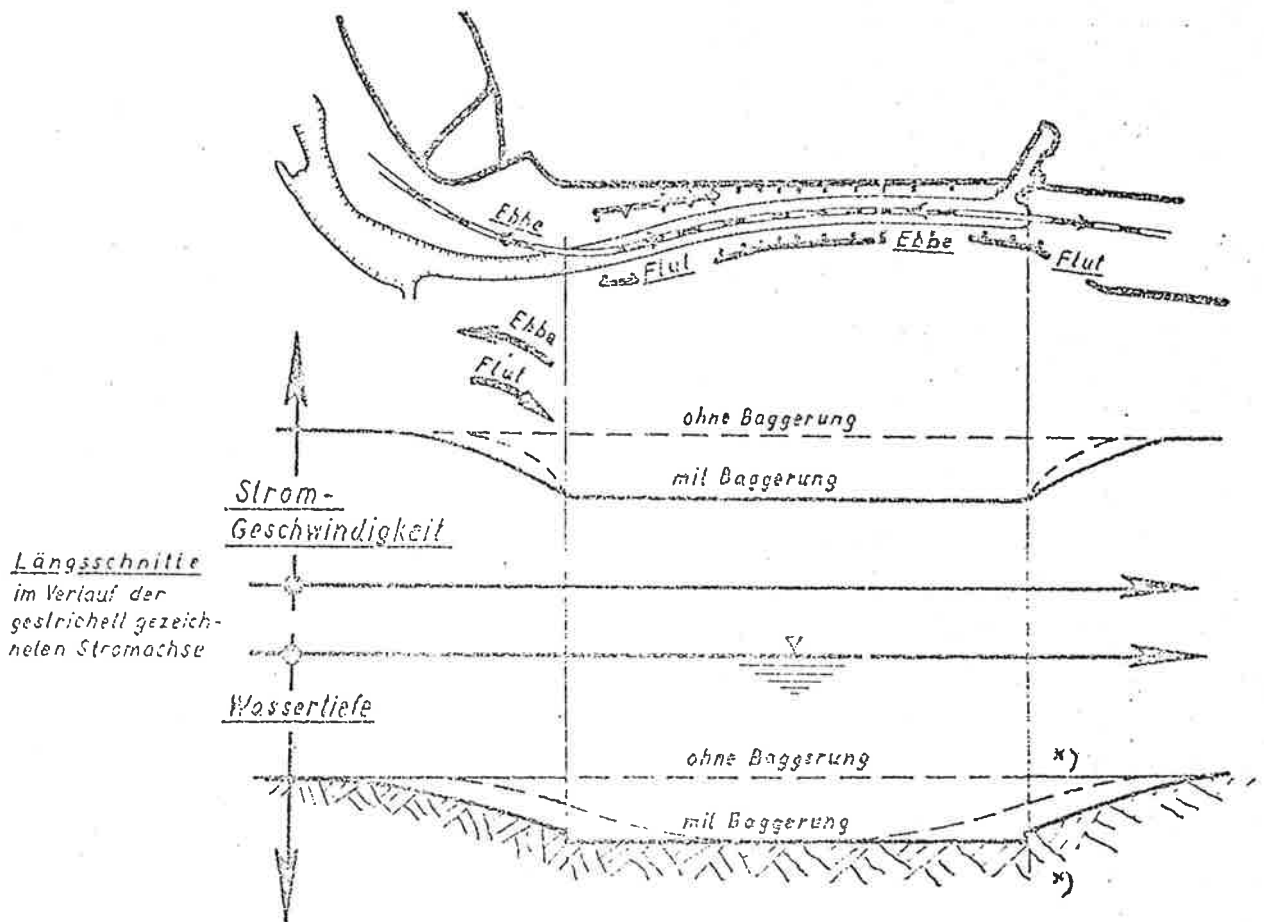


Abb. 12: Änderung der Größe der Stromgeschwindigkeit durch Tieferbaggern einer Tiderflußstrecke.

x) Hier erosionsresistente Sohle

eine geringere Menge an Feststoffen vom Baggerschnitt weggetragen, als in Richtung auf ihn hin transportiert worden ist.

Im Nachbarbereich, in welchem nicht gebaggert wurde, haben nun die Strömungen eine gewisse Menge Sohlenmaterial aufgenommen und es in Richtung auf den Baggerschnitt resultierend versetzt. So entsteht in den der Baggerstelle in Stromrichtung benachbart liegenden Flußabschnitten eine Sohlenvertiefung. Nunmehr steht auch diese Fehlstelle gegenüber einem noch weiter entfernten Querschnitt in gestörtem Gleichgewicht. Auch zwischen diesen beiden Orten wird demzufolge eine Materialversetzung stattfinden, welche resultierend in Richtung auf die Baggerstelle verläuft. Es entsteht in fortschreitender Erosion eine Anrampung der Sohle und ein Sandtransport auf die Baggerstelle zu. Dieser Sandtransport ist bei ungestörtem Sohlengleichgewicht nicht vorhanden gewesen. Er ist erst durch das Baggern mobilisiert worden.

Erosionsrampen bilden sich in der Regel, von der Baggerstelle ausgehend, sowohl nach stromauf wie auch in seewärtiger Richtung aus. Am oberen Ende des Baggerschnitts des Emders Fahrwassers ist die Emssohle jedoch so widerstandsfähig, daß es dort zu keinen merkbareren Erosionen gekommen ist, wohl aber nach See zu.

Die seeseitige Erosionsrampe für die Baggerungen im Emders Fahrwasser liegt im Bereich der Bahnen der auf das Emders Fahrwasser zufließenden Strömungen. Das Erosionsgebiet ist daher durch die Wasserscheide zwischen Dollartwasser und Emswasser angebbar.

In Abb. 13 ist dargestellt, wie sich der angesprochene Bereich des Emswassers nach Schwimmermessungen abgrenzt. Er liegt am Innenufer des Gatjebogens auf der Mittelplate und weiter seewärts praktisch immer außerhalb des Fahrwassers des Ostfriesischen Gatje auf dem Rysumer Nacken und dem Manslagter Nacken. In diesem Gebiet ist nach einem Einstellen der Baggerungen im Emders Fahrwasser mit einer Aufsandung zu rechnen, wenn die dortige Erosionsrampe wieder aufgefüllt wird. Der Umfang der Unterhaltungsbaggerungen im Fahrwasser parallel zu diesem Bereich wird dadurch jedoch nicht vergrößert, und die zu erwar-

tende Aufhöhung des östlichen Watts wird nach Erreichen des natürlichen Gleichgewichtsniveaus enden, soweit die Watthöhe hier durch die Baggererosion tiefgehalten worden ist.

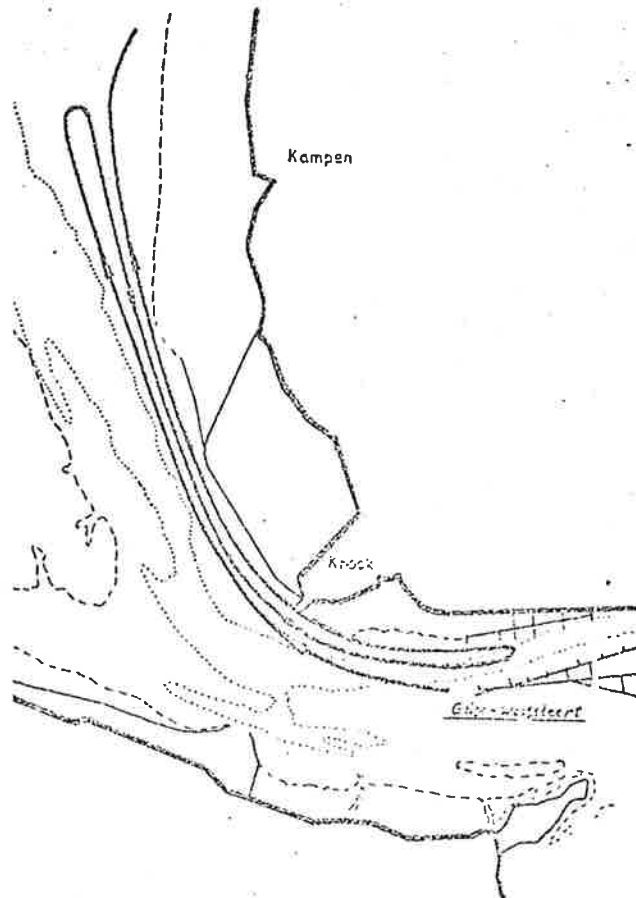


Abb. 13: Bahn eines Schwimmers (1 m Wassertiefe),  
eingesetzt am Geise-Weststeer (Wasserscheide)  
(Messung vom 12./13.12.72, Wind S-SW 3-4)

Für die Größe des auf die Baggerstelle gerichteten Sand-  
transports und damit die Größe der Sedimentation im Bagger-  
schnitt ist folgende Eigenheit der Tidedynamik mitbestimmend.  
Bei jeder Wellenbewegung (außer der stehenden Welle) und so-  
mit auch in einer Tidewelle findet der Wassertransport in der  
Fortschrittsrichtung der Welle bei höheren Wasserständen statt  
als bei der Rückströmung. Im Emden Fahrwasser beträgt der

Höhenunterschied zwischen dem mittleren Wasserstand während der Flutstromdauer ( $T_{mw_f}$ ) und dem während der Ebbstromdauer ( $T_{mw_e}$ ) zwischen 0,85 und 1,1 m (siehe Abb. 14).

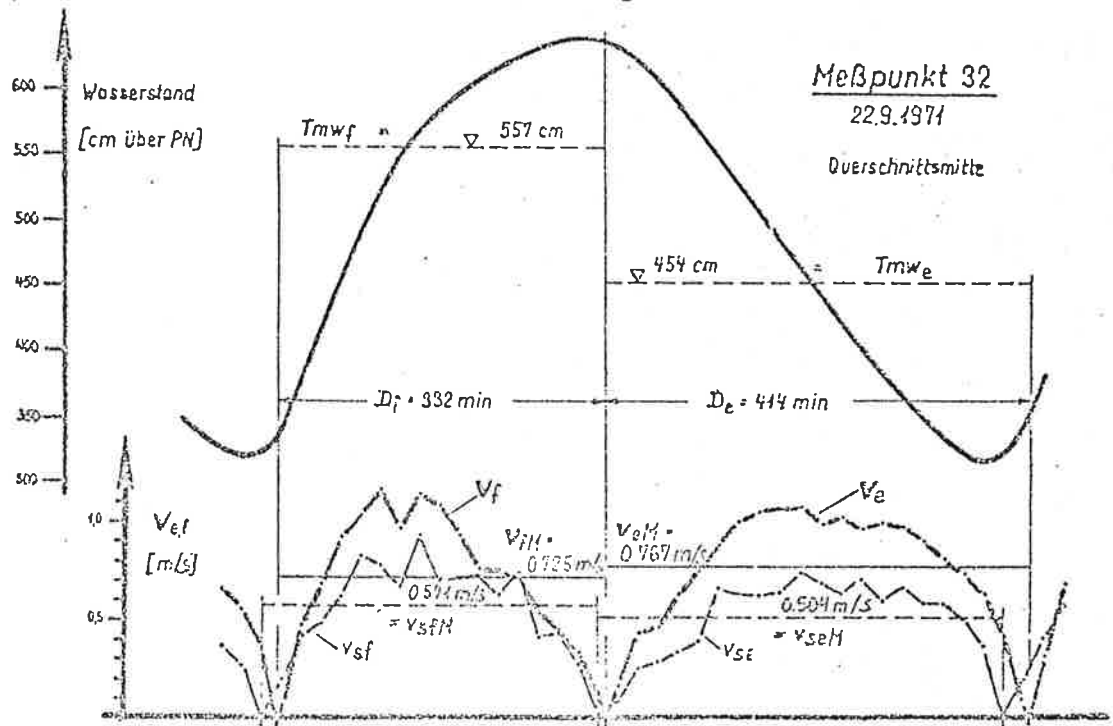


Abb. 14 : Wasserstands- und Strömungsgeschwindigkeitsverlauf im Ender Fahrwasser während einer Tide

Der mittlere Durchflußquerschnitt der Flut ist daher größer als derjenige der Ebbe. Eine Baggerung vergrößert infolgedessen den Durchflußquerschnitt der Ebbe um einen höheren Prozentanteil als den der Flut. Mit fortschreitender Vertiefung des Fahrwassers geht somit die Ebbgeschwindigkeit schneller zurück als die Flutgeschwindigkeit. Da das Transportver-

mögen der Strömung von einer höheren Potenz der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, wird bei diesem unterschiedlichen Rückgang von Ebbe- und Flutgeschwindigkeit die Differenz zwischen den Transportmengen entsprechend vergrößert. Es wächst der Überschuß des flutseitigen Transports.

Abb. 15 zeigt das Ergebnis einer Beispielrechnung für diesen Zusammenhang. Es ist die dem Überschuß des Transportvermögens proportionale Größe  $v_f^n - v_e^n$  in Abhängigkeit von der Vertiefung des Querschnitts dargestellt. In der Umgebung des Transportgleichgewichts wächst die Transportresultante als Überschuß des Fluttransports quasilinear mit der Zunahme der Wassertiefe. Dieses theoretisch gewonnene Ergebnis wird durch die Erfahrung über die Zunahme der Sedimentation im Emder Fahrwasser (Abb. 5) bestätigt. Bei weiterer Vertiefung müßte nach Abb. 15 die Zunahme der Sedimentmenge einmal ein Ende finden. Dieser Grenzzustand wird jedoch erst erreicht, wenn der Querschnitt auf etwa das 1,4-fache seiner Gleichgewichtsgröße erweitert worden ist. Das entspräche im Emder Fahrwasser einer völlig unrealistischen Vertiefung auf etwa 20 m Wassertiefe. Erst bei einer dann noch weitergetriebenen Vertiefung ist jeder weitere Meter Wassertiefe ohne weitere Steigerung des Unterhaltungsaufwands zu erreichen. Diese Kalkulation zeigt, daß sich wale Baumaßnahmen mit ihren Folgen im linearen Bereich der Abb. 15 bewegen.

Die vorstehend gegebene theoretische Analyse beschreibt nur die Transportvorgänge der Sandkornfraktion in der Feststoffbewegung. Die feinkörnigen Anteile werden wegen ihrer sehr geringen Sinkgeschwindigkeit fast ausschließlich in Suspension im Wasser getragen. Sie werden in der Zeit des Stauwassers nur zu einem kleinen Teil sedimentiert und im allgemeinen mit der Geschwindigkeit des strömenden Wassers bewegt. Die dafür zu berücksichtigenden Transportbedingungen werden in 2.2.5.2 angesprochen. Die gleiche Linearität der Zunahme des Feinkornanteils des Sediments (Abb. 6) wie der des Sandanteils (Abb. 5) weist jedoch bereits auf den gleichen Ursprungsort beider

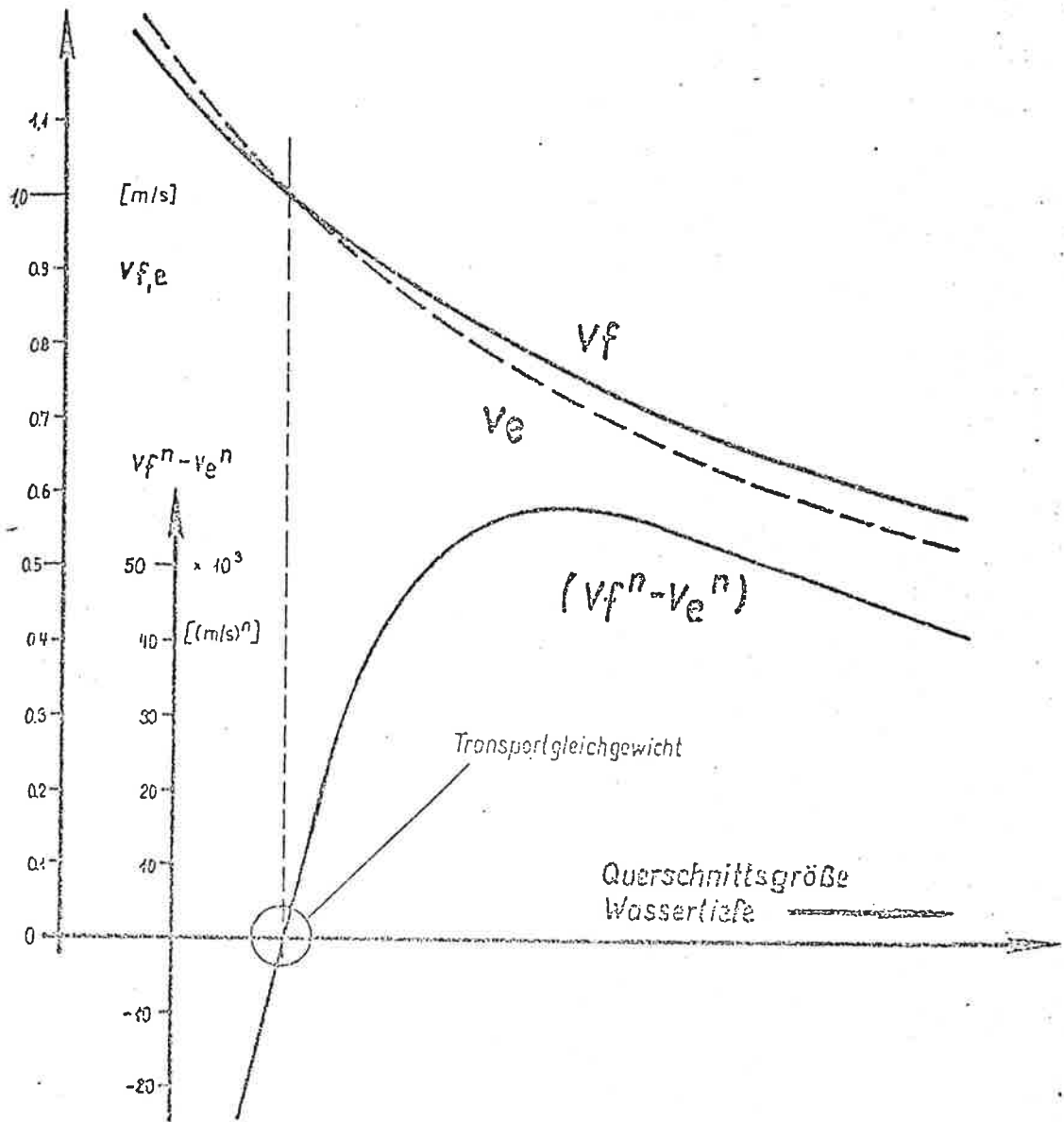


Abb. 15 : Überschuß des Transportvermögens der Flut über das der Ebbe in Abhängigkeit von der Vertiefung des durchströmten Querschnitts ( Darstellung des Prinzips )

Fraktionen hin. Aus der Steigerung der Ausgleichsgeraden der Abb. 5 und 6 ist zu errechnen, daß in jedem Kubikmeter der Zunahme der Sedimentmenge im Emdener Fahrwasser 16 % Feinkorn enthalten waren. Ein solcher Feinkornprozentsatz ist im Boden, aus welchem das Watt des Rysumer Nackens und des Manslagter Nackens aufgebaut ist, durchaus vorhanden. Die aus den vorstehenden Betrachtungen gefolgerte Erosion in diesem Gebiet ist damit durchaus geeignet, die die Oberwasseranfuhr überschreitende Feinkornmenge im Sediment des Emdener Fahrwassers und des Hafens Emden mitzuliefern.

Aus den Kornanalysen des im Spülfeld des Rysumer Nackens anzufindenden Bodens, des ehemaligen Baggergutes, und aus Untersuchungen des Ablaufwassers aus den Aufspülungen ist zu erkennen, daß in früheren Jahren etwa 10 bis 15 % der aufgespülten Feststoffmengen wieder mit dem Ablauf in die Ems zurückgeflossen sind und daß es sich dabei um die feinkörnigen Anteile gehandelt hat.

Nach diesem Untersuchungsergebnis ist ab 1974 der Spülfeldbetrieb so eingerichtet worden, daß ein solcher Rückfluß der Feststoffe im Ablaufwasser unterbleibt. Für die früheren Jahre ist jedoch zu folgern, daß nur rd.  $\frac{2}{3}$  der Feinkornanteile im Baggergut im Emdener Fahrwasser aus frisch erodiertem Boden herrühren. Der übrige Teil ist im ständigen Kreislauf zwischen Baggerstelle und Spülfeld bewegt worden.

Abb. 16 gibt die nach den letztgenannten Erkenntnissen berichtete Größenordnung der Feinkornanteile des Sediments wieder, welche der jährlichen Neuanfuhr entspricht. Danach genügt ein Anteil von rd. 10 % an Feinkorn im neu erodierten Boden, um diese Menge zu decken. Von dem auf dem Rysumer Nacken und dem Manslagter Nacken erodierten Bodenkorngefüge mit einem Feinkorngehalt von mehr als 10 % kann also durchaus ein Teil des Feinkorns nach See abgetrieben sein. Diese Hypothese entspricht gut den theoretischen Vorstellungen.

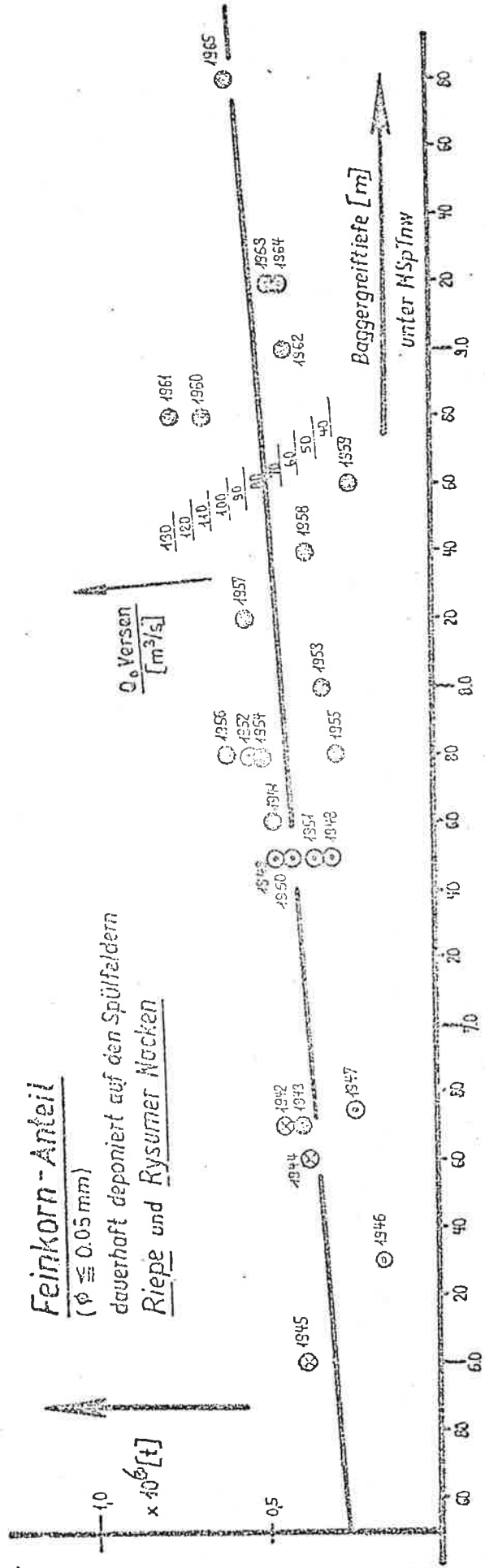


Abb. 16 : Feinkornanteil im Sediment des Ender Fahrwassers und des Hafens Emden nach Abzug des Feinkornrücklaufs vom Rysumer Nacken ( Spülwasser-Verluste )



#### 2.2.5.2 Die Dichteströmung

Die Sedimentmenge im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden zeigt in ihrer Größe eine starke Abhängigkeit von der Menge des Oberwasserabflusses. Grund dafür ist nur zum kleineren Teil die zur Oberwassermenge proportionale Feststoffanfuhr mit dem Oberwasser. Von größerer Bedeutung ist die Aktivierung des flutseitigen Transports durch die oberwasserabhängige Dichteströmung.

Wie bereits erwähnt, wird die für den Sandtransport maßgebende Geschwindigkeit in Sohlennähe durch Dichteströmung beeinflusst. Es wird die Geschwindigkeit beim Flutstrom verstärkt, die des Ebbstroms vermindert. Abb. 14, Seite unten, zeigt diesen Effekt durch den Vergleich der Geschwindigkeitsmittelwerte  $v_{sfM} > v_{seM}$  einer Messung im Emden Fahrwasser. Stärker noch als beim Sandtransport bestimmt bei der Bewegung der feinkörnigen Feststoffe die Dichteströmung die Größe und Richtung.

Die Dichteströmung ist eine Folge des Abfalls des Salzgehalts vom hohen Salzgehalt der See zum Süßwasser. In der Emsmündung liegt hierbei der stärkste Gradient im Bereich des Emden Fahrwassers und der flußartigen Ems oberhalb davon (Abb. 17). Der Gradient bestimmt die Stärke der Dichteströmung

Die Größe des Längsabfalls des Salzgehalts ändert sich mit der Menge der Süßwasseranfuhr durch das Oberwasser. Einige Extremzustände der Salzgehaltsverteilung in Abhängigkeit vom Oberwasser sind in Abb. 17 skizziert. Man sieht dort, daß bei geringen Oberwasserabflüssen seewärts des Emden Fahrwassers praktisch kein Salzgehaltsabfall vorhanden und demzufolge auch keine Dichteströmung wirksam ist. Das ändert sich mit der Zunahme des Oberwassers. Es nimmt dann nicht nur der Salzgehaltsgradient zu. Der Salzgehaltsabfall reicht auch zunehmend weiter nach See und im Extremfall bis zum seewärtigen Ende des Ostfriesischen Gatje. Die Verstärkung der Flutströmung und ihres Transportvermögens sowie die Schwächung des Ebbtransports durch die Dichteströmung führen damit zu einer erhöhten, stromauf gerichteten Anfuhr von Feststoffen. Hierbei wird bei zunehmendem Oberwasserabfluß das Einzugsgebiet für die Fest-

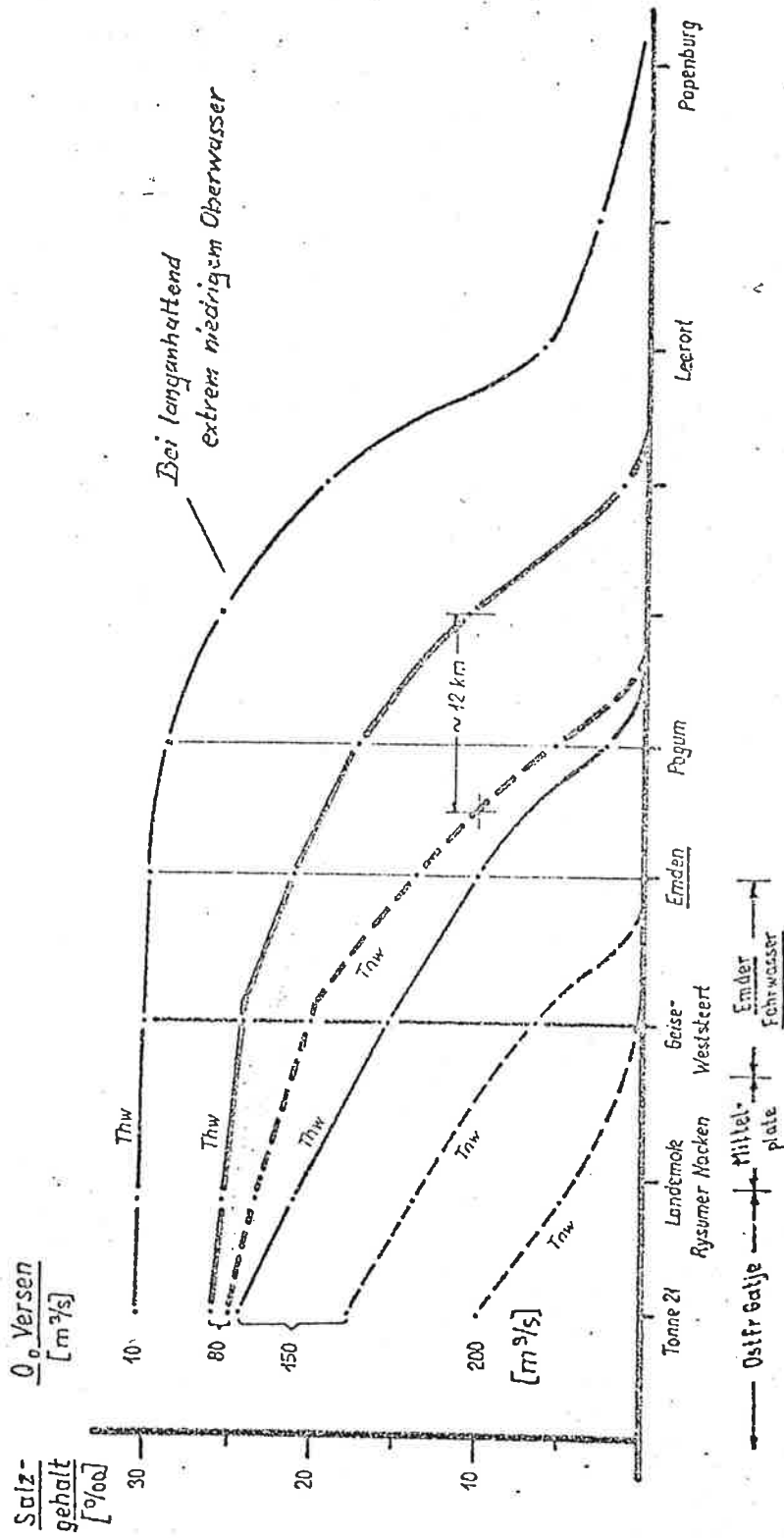


Abb. 17 : Längsverteilung des Salzgehalts in der inneren Emsmündung bei unterschiedlichen Oberwasserabflüssen

stoffe proportional zur Oberwassermenge vergrößert.

Eine in der Emsmündung bekannte Wirkung der Änderung der Transportverhältnisse bei einer Zunahme des Oberwasserabflusses ist die Umwandlung der Form der Unterwasserbänke im Ostfriesischen Gatje (Niebuhr, 1950). Bei stärkeren Oberwasserabflüssen werden die dortigen Großriffel von Ebbriffeln in Gleichgewichtsriffel bis zu Flutriffeln umgeformt. Das Übergreifen der Transportumstellung in die Rinnenteile des Ostfriesischen Gatje erfolgt durch die Aufsüßung auch des Dollartwassers nach längerem stärkeren Oberwasserabfluß. Daraus läßt sich die Reichweite des Oberwassereinflusses gut erkennen.

Die starke Reaktion des flutseitigen Feststofftransportes auf eine Zunahme des Oberwasserabflusses, wie sie im Anwachsen der Sedimentmenge im Emden Fahrwasser zu bemerken ist (Abb. 5 und 6), hat ihre Ursachen in den besonderen Bedingungen der inneren Emsmündung. Beim Anschwellen des Oberwasserabflusses wird nicht nur der Salzgehaltslängsgradient seewärts des Emden Fahrwassers verstärkt. Es wird auch die quergerichtete Dichteströmung vom Dollartwasser zum Emswasser seewärts des Geise-Veststeert aktiviert. Der Salzgehalts- und Dichtequergradient nimmt hier Beträge von der Größenordnung von etwa 10 ‰ auf 100 m an. Das ist rd. das Hundertfache des Längsgradienten. Entsprechend kräftig fallen der Dichteausgleichsstrom und die damit verbundene sohlennahe Feststoffzufuhr in den Einzugsbereich des Emden Fahrwassers aus.

Die dem zugrunde liegenden Salzgehaltsunterschiede in Querrichtung lassen sich nach Abb. 17 abschätzen. Nach einer längeren Zeit gleichbleibenden Oberwasserabflusses hat auch das Dollartwasser im Gatjebogen etwa den Salzgehalt des diesseits der Wasserscheide fließenden Emswassers angenommen. Während der folgenden Oberwasseranschwellung behält das Dollartwasser noch für einige Zeit diesen Salzgehalt. Das Emswasser jedoch hat den der Oberwasseranschwellung entsprechenden niedrigen Salzgehalt. Zur Veranschaulichung des dann gegebenen Zustands vergleiche man in Abb. 17 den unterschiedlichen Verlauf der Salz

gehaltsverteilung seewärts des Geise-Weststeert zwischen zwei Zuständen bei unterschiedlichem Oberwasserabfluß.

In Zeiten mit stark zunehmendem Oberwasserabfluß, verursacht durch starke Niederschläge, hat die zugrunde liegende Tiefdruckwetterlage meist auch stärkere Winde zur Folge. Die damit verbundene Wellenunruhe trägt erheblich zur Erhöhung des Suspensionsgehalts im Wasser bei. Eine evtl. nur langsame Dichteströmung kann dann trotzdem erhebliche Feststoffmengen versetzen. Die starke Zunahme der Sedimentation im Emden Fahrwasser in oberwasserreichen Jahren, wie sie Abb. 5 und 6 zeigen, ist damit erklärbar.

Abb. 18 zeigt die Abhängigkeit der Sedimentationsgeschwindigkeit von der Größe des Oberwasserabflusses in einem Querschnitt des Emden Fahrwassers unmittelbar am Geise-Weststeert. Deutlich ist auch die Zunahme der Sedimentationsgeschwindigkeit mit der Größe der Vertiefung des Fahrwassers zu sehen. Da das Sediment in diesem Querschnitt praktisch ausschließlich aus Seesand besteht, kann die in Abb. 18 dargestellte Sohlenaufhöhung nur durch flutseitig wirksamen Sandtransport verursacht sein.

Die Zunahme der Sedimentationsgeschwindigkeit mit der fortschreitenden Vertiefung des Fahrwassers erklärt sich auf folgende Weise. Der Transport der Feststoffe erfolgt vornehmlich in den sohlennahen Wasserschichten. Dort ist die Konzentration der Feststoffe in Suspension am höchsten (Niebuhr, 1955). Eine Änderung der Stromgeschwindigkeit in Sohlennähe verändert die transportierende Wassermenge und damit die mit diesem Wasser verfrachtete Menge an Feststoffen. Außerdem ist die Konzentration der Feststoffe in der Suspension proportional zur Sohlengeschwindigkeit.

Die Stromgeschwindigkeit in Sohlennähe wird nun merkbar beeinflusst durch den Salzgehaltslängsgradienten. Infolge des durch ihn verursachten Dichtelängsgradienten addiert sich zu dem die Größe der Fließgeschwindigkeit bestimmenden Spiegelgefälle ein zusätzliches Druckpotential aus dem Dichtegefälle.

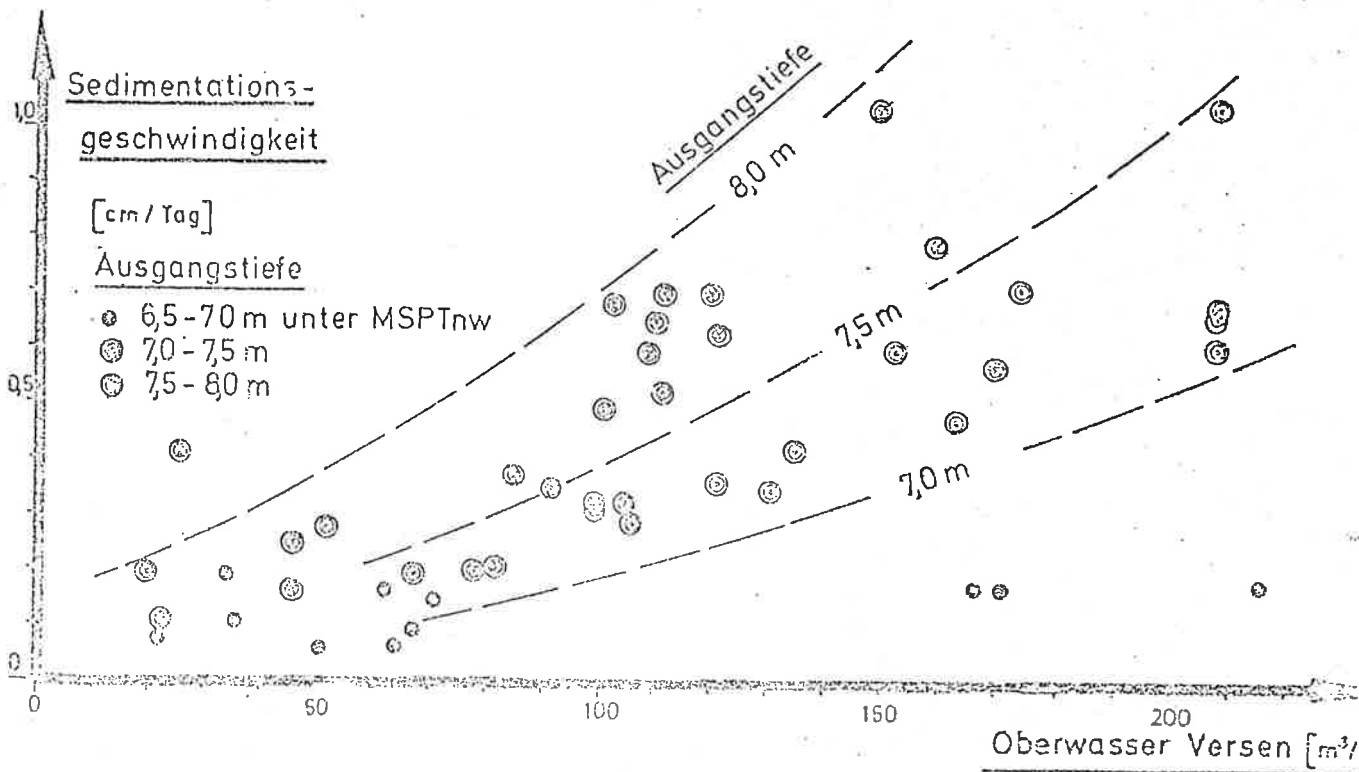


Abb. 18: Abhängigkeit der Sedimentationsgeschwindigkeit von der Oberwassermenge und der Fahrwassertiefe.  
Ender Fahrwasser, km 48,8 (600 m westl. Geise-Weststeert)

Abb. 19 läßt in einer Prinzipskizze erkennen, daß dieses zusätzliche Potential sich linear mit der Vergrößerung der Wassertiefe erhöht. Entsprechend wachsen die Größe der sohlennahen Geschwindigkeit und die transportierte Feststoffmenge. Da die Dichteabnahme gleichgerichtet mit der Richtung der Flutströmung erfolgt, wird diese durch den Dichtelängsgradienten vergrößert und damit der von ihr bewirkte Feststofftransport. Entsprechend wird derjenige der Ebbe verkleinert. Welche Größenordnung der Dichteeffekt in der Emsmündung annimmt, sei nachstehend in einem Berechnungsbeispiel dargelegt.

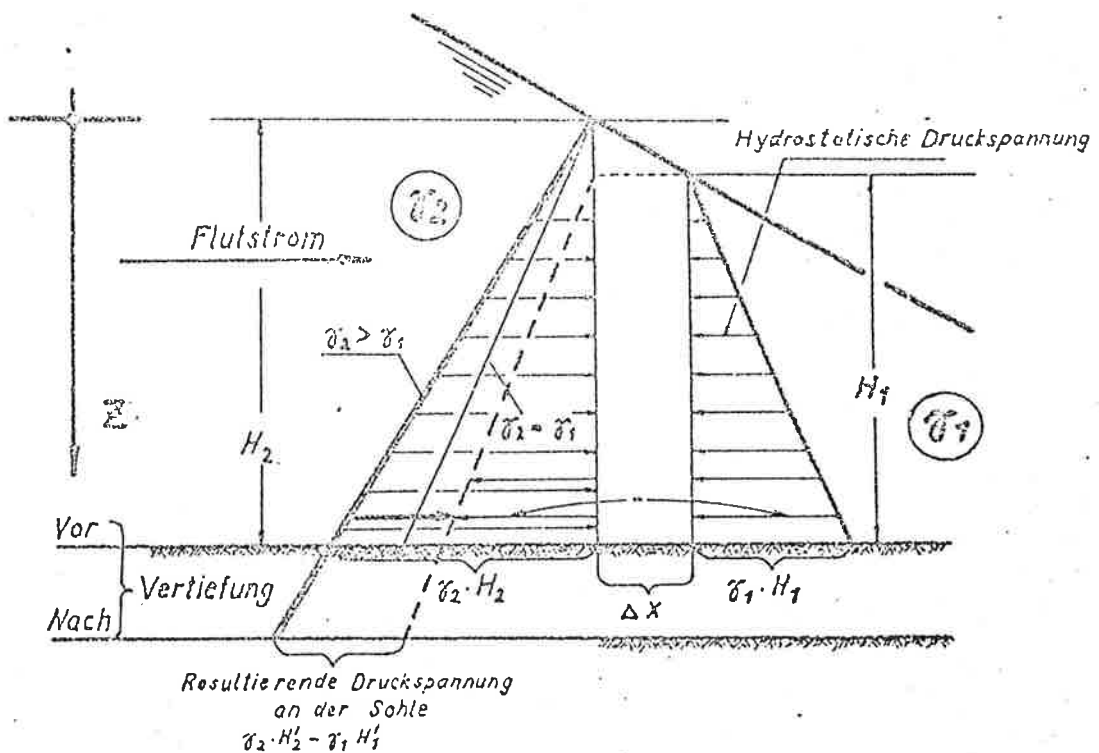


Abb. 19: Änderung der Verteilung des hydrostatischen Druckes durch einen Dichtegradienten

Im Emdener Fahrwasser steht die hydrostatische Druckspannungskomponente aus dem Spiegelgefälle in folgendem Verhältnis zu derjenigen aus dem Dichtegefälle:

Das maximale (!) Spiegelgefälle beträgt bei einer mittleren Tide

$$\Delta w = 0.035 \times 10^{-3} .$$

Die hydrostatische Druckspannungskomponente infolge des Spiegelgefälles ist demzufolge

$$\Delta w \times \gamma_{\text{Brackwasser}} = 0.035 \times 10^{-3} \times 1.01 = \underline{\underline{0.0354 \times 10^{-3} \text{ Mp/m}^3/\text{m}}}$$

Bei dem Salzgehaltslängsgradienten von rd. 1 ‰/km ist das Dichtegefälle im Emdener Fahrwasser

$$\Delta \gamma = 0.00075 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{t}}{\text{m}^3/\text{m}} \right] .$$

und die hydrostatische Druckspannung infolge des Dichtegefälles

$$\Delta \gamma \times z = 0.00075 \times 10^{-3} \times z \left[ \frac{\text{Mp}}{\text{m}^2/\text{m}} \right] ,$$

worin  $z$  die Wassertiefe unter der Oberfläche ist.

Bis zum Jahre 1956 war nach einer Neubaggerung des Emdener Fahrwassers die Wassertiefe bei halber Tide

7.75 m Greiftiefe unter NSpTnw + 1.75 m bis T1/2w = 9.5 m.

Es verhielten sich zu der Zeit die Druckspannungskomponente an der Sohle infolge des Salzgehaltslängsgradienten zu derjenigen aus dem maximalen Spiegelgefälle wie

$$\frac{0.00075 \times 10^{-3} \times 9.5}{0.0354 \times 10^{-3}} = 0.201 .$$

An der Sohle wurde also die Druckspannung der Flut um 20 % durch diejenige infolge des Salzgehaltslängsgradienten vergrößert, die der Ebbe um 20 % vermindert.

Nach Vergrößerung der Baggergreiftiefe 1965 betrug die Wassertiefe bei halber Tide

9.75 m Greiftiefe + 1.75 m bis T1/2w = 11.5 m.

Nunmehr stellte sich das Verhältnis aus Dichtespannung zu Spiegelgefällespannung dar wie

$$\frac{0.00075 \times 10^{-3} \times 11.5}{0.0354 \times 10^{-3}} = 0.244.$$

Der Anteil aus dem Salzgehaltslängsgefälle hat sich durch das um 2 m tiefere Ausbaggern um 20 % gegenüber seinem Ausgangswert von 1956 vergrößert.

Die Zunahme des stromauf gerichteten Transports bei einem Anwachsen des Oberwasserabflusses zeigt sich auch in den Ergebnissen von Strömungsmessungen. Wird von solchen Messungen nur die Größe der mittleren Fließgeschwindigkeit in einem Querschnittspunkt angegeben, so kann das hinsichtlich des Transportgeschehens oft ein falsches Bild geben. In Abb. 20 ist deswegen die Länge des Flutstromweges  $S_f = \int_{D_f} v_f dt$  mit demjenigen des Ebbstroms  $S_e = \int_{D_e} v_e dt$  verglichen worden. Diese Größen stellen die Länge des<sup>e</sup> Stromfadens dar, welcher im Meßpunkt den Querschnitt während der Fluttide bzw. der Ebbtide passiert hat. Die in Abb. 20 angegebene Differenz  $S_f - S_e$  kann also als die Überschussmenge an Wasser  $[m^3/m^2 \cdot Tide]$  angesehen werden, welche entweder in Flut- oder in Ebbrichtung den Querschnitt durchflossen hat.

Die Lage der Meßpunkte der in Abb. 20 dargestellten Ergebnisse im Querschnitt des Eider Fahrwassers bei km 46,4 (rd. 2 km oberhalb vom Geise-Weststeert) ist zusammen mit den Mittelwerten der Feststoffkonzentration (Messung vom 22.9.71) in Abb. 21 angegeben. Man erkennt in Abb. 21, daß südlich der Meßvertikalen "Mitte" mehr als die Hälfte des durchströmten Querschnitts liegt und daß in diesem Querschnittsteil die höheren Feststoffkonzentrationen im Wasser mitgeführt werden.

Für diese Südseite des Querschnitts zeigt Abb. 20 nun mit den Ergebnissen der ab 1965 in diesem Querschnitt ausgeführten Messungen, daß hier fast ausnahmslos die stromaufgehende Wassermenge diejenige der Ebbe überwiegt. Es wird damit auf der Südseite ein ständiger Überschuss an Feststoffen stromauf transportiert. In den Querschnittsteilen mit überwiegendem Ebbdurch-



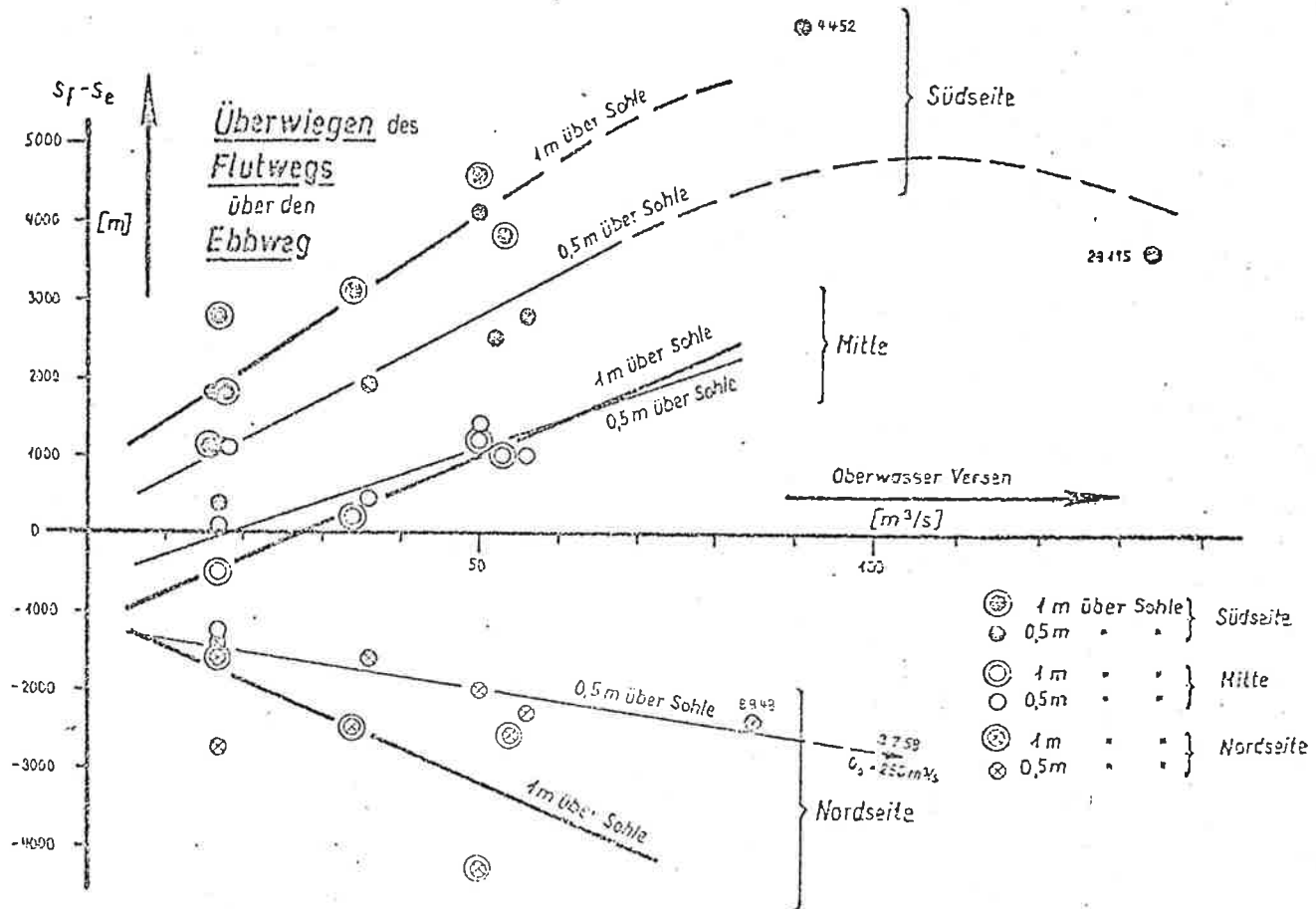


Abb. 20 : Überwiegen des Flutwegs über den Ebbweg in Abhängigkeit von der Größe des Oberwasserabflusses  
( Messungen bei km 46,4 im Emden Fahrwasser 1965 - 1975 )

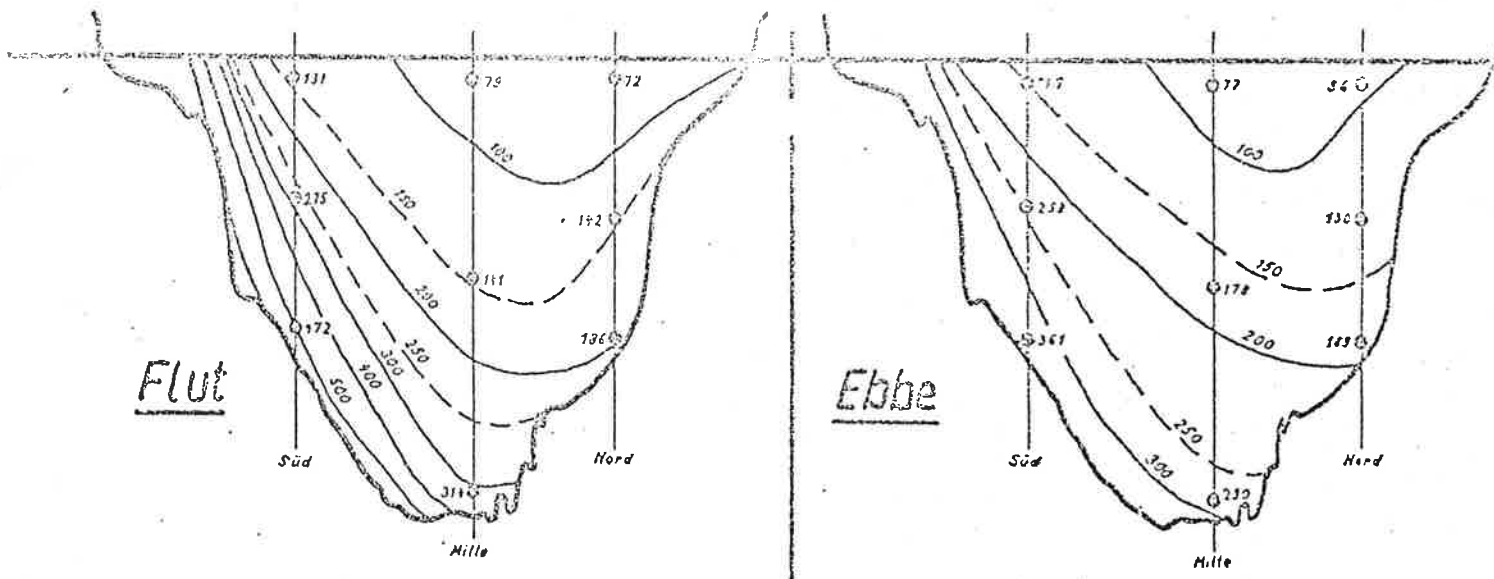


Abb. 21 : Querschnitt im Emden Fahrwasser mit Feststoffverteilung  
( Tidenittel der Messung vom 22.9.1971 )

fluß ist gegenüber dem vorbetrachteten Querschnitt eine so wesentlich geringere Feststoffkonzentration im Wasser enthalten, daß in der Summe des Gesamtquerschnitts der flutseitige Transport überwiegt.

Abb. 20 läßt eine deutliche Zunahme des Flutüberschusses auf der Querschnitts-Südseite beim Anwachsen des Oberwassers erkennen. Sie kann nur durch Zunahme der Dichteströmung erzeugt sein. Diesem Anwachsen ist jedoch mit Sicherheit eine Grenze gesetzt. Von einer gewissen Oberwassermenge an muß allgemein ein Ebbtransport einsetzen. Das Verhalten der Strömung bei höheren Abflüssen ist bisher aber nicht durch neuere Messungen erfaßt. Es wurden daher einige ältere Messungen mit Angabe des Meßdatums in die Abb. 20 aufgenommen, da diese bei etwas höheren Abflüssen ausgeführt worden sind.

Die Messungen früherer Jahre zeigen im Bereich der niedrigen Oberwasserabflüsse keine erkennbar anderen Werte als die neueren der Abb. 20. Das dürfte die Einbeziehung der obengenannten Einzelmessungen älteren Datums in die Abb. 20 rechtfertigen. Alle älteren Messungen sind jedoch in einem rd. 2 km weiter seewärts gelegenen Querschnitt durchgeführt worden. Das müßte eigentlich dazu führen, daß die neueren Messungen mit ihren Werten deutlich unter denen der älteren liegen. Stromauf nimmt der Prozentanteil des Oberwassers am Gesamtdurchfluß zu. Demzufolge wächst stromauf der Ebbüberschuß. Weiter nimmt stromauf in der Regel die Stärke der Dichteströmung ab (Abb. 22, Seite 75 ). Wenn trotzdem die Werte der neueren Messungen nach Abb. 20 in der gleichen Größenordnung liegen wie die der älteren, so kann das als Beweis für die Zunahme der Dichteströmung infolge der Vertiefung des Fahrwassers gewertet werden, wie sie obenstehend theoretisch angenommen wurde.

Die flutseitig resultierend transportierte Menge an feinkörnigen Feststoffen ist direkt proportional zum vorstehend besprochenen Flutwasserüberschuß. Dieser Flutwasserüberschuß verdankt sein Entstehen der Wirksamkeit der Dichteströmung. Eine Dichteströmung ist jedoch nur bis zur Obergrenze des Vordringens des Salzwassers möglich. In diesem Kopf der von da an seewärts

liegenden Brackwasserzone sammeln sich daher die feinkörnigen Feststoffe aus dem Stromauftransport zu einem Konzentrationsmaximum. Auch für die Eintreibungen mit dem Oberwasser bildet der Kopf der Brackwasserzone eine "Sinkstoff-Falle".

Die Feststoffkonzentration im Kopf der Brackwasserzone wächst jedoch nicht unbegrenzt. Durch turbulente vertikale Durchmischung gelangen sowohl Wasser der aufwärtsdringenden sohlennahen Salzzunge wie die darin enthaltenen Feststoffe in die oberen Wasserschichten, welche überschießend seewärts fließen. Abb. 22 zeigt die bekannte Zweischichten-Strömung im Kopf der Brackwasserzone aus einer Synchronmessung im oberen Emden Fahrwasser (Messung vom 4.4.52). Der Austausch zwischen unterer und oberer Schicht führt zu einem teilweisen Abtransport der im Kopf der Brackwasserzone akkumulierten Feststoffsuspension. Da jedoch die Feststoffteilchen relativ zum transportierenden Wasser absinken, kehrt auch von den seewärts abtransportierten Feststoffen ein Teil wieder mit der Unterströmung in einem vertikalen Kreislauf in den Kopf der Brackwasserzone zurück.

Die Konzentration der Feststoffe im Kopf der Brackwasserzone nimmt umso höhere Werte an, je stärker der stromaufgerichtete Dichtestrom wirksam ist. Wie angesprochen, nimmt dessen Wirksamkeit zu, je tiefer die Stromrinne ausgebaggert wird. Eine dementsprechende Zunahme der Feststoffmenge in Suspension ist auch im Emden Fahrwasser nach der Vertiefung 1957 - 1965 zu bemerken.

Noch kurze Zeit über die zuletzt vorgenommene Vertiefung hinaus bis 1966 wurden Dauermessungen des Salzgehalts und Feststoffgehalts bei Pogum ausgeführt. Diese Messungen lassen in den Feststoffwerten um Thw eine Zunahme erkennen und zwar von denen der Zeit vor der Vertiefung bis 1956 über diejenigen der Jahresreihe 1957 - 1964 zu denen von 1965/66 um rd.  $25 \text{ g/m}^3$ . Nicht zugenommen haben dagegen die Feststoffkonzentrationen bei Thw. Das Wasser, aus welchem die Proben bei Thw in Pogum entnommen wurden, ist das des Wasserkörpers,

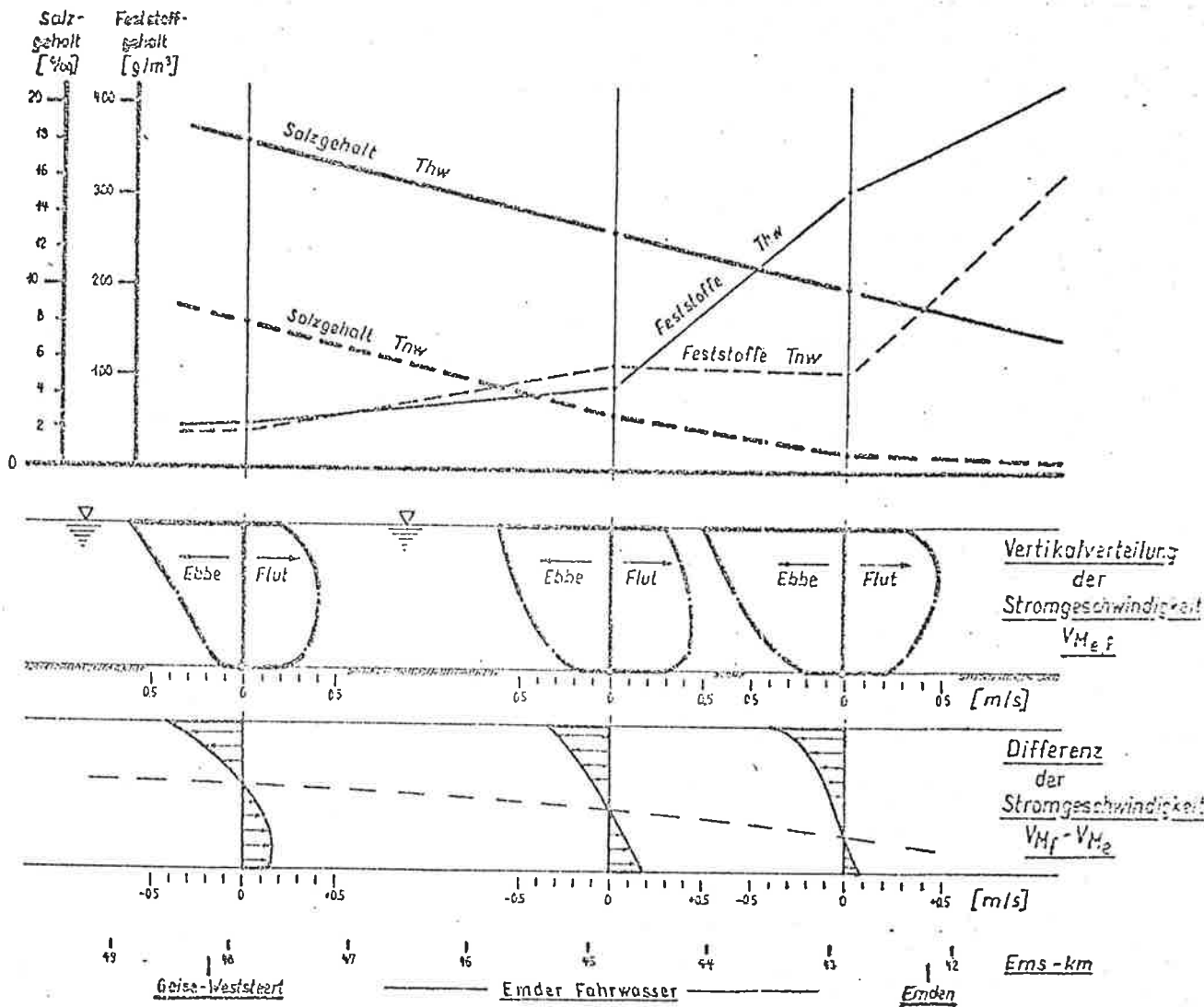


Abb. 22 : Strömungsverteilung im Kopf der Brackwasserzone im Emders Fahrwasser ( Messung vom 4.4.52 , Südseite )

welcher mit der Ebbe aus der oberen Ems herabkommt. Da dessen Feststoffgehalt nach diesen Beobachtungen also nicht größer geworden ist, muß die Erhöhung des Feststoffgehalts im Wasserkörper seewärts von Pogum durch stärkeren stromaufgerichteten Transport verursacht sein. Der Wasserkörper seewärts von Pogum etwa aus dem Bereich des unteren Emders Fahrwassers ist derjenige, welcher bei Thw in Pogum auf seinen Feststoffgehalt untersucht wurde.

Die Jahresreihe der Untersuchungen bei Pogum liefert zu wenige Werte aus der Zeit nach der Durchführung der Vertiefung des Emders Fahrwassers, als daß daraus über die Tendenz der Entwicklung hinaus abgesicherte Erkenntnisse über die Auswirkungen der Emsvertiefung auf den Feststoffhaushalt gezogen werden könnten. Der Beobachtungsort liegt außerdem um etwa eine halbe Flutstromlänge vom oberen Ende der Vertiefungsstrecke entfernt. Es zeigen aber auch Querschnittsmessungen im Emders Fahrwasser und Messungen auf Längsfahrten, daß die Feststoffkonzentration im Emswasser im Bereich des Emders Fahrwassers mit der Vertiefung merkbar zugenommen hat. Die letzterwähnten Messungen sind bisher zu gering an Zahl, als daß eine Größenordnung oder gar Gesetzmäßigkeit aus den stark streuenden Werten erarbeitet werden konnte. Es muß auch damit gerechnet werden, daß durch den Einsatz von Hopperbaggern im Feinkornsediment des oberen Emders Fahrwassers eine Anreicherung des Feinkornanteils erfolgt. Im Überlauf der Hopperbagger geht ein erheblicher Teil des gebaggerten Feinkorns wieder in die Ems zurück. In der Zusammensetzung des Sediments im Emders Fahrwasser ist diese Zunahme des Feinkorns bereits seit einiger Zeit zu bemerken.

Die letztgenannten Erscheinungen der Zunahme des Feststoffgehalts im Tidewasser des Emders Fahrwassers sind wegen der Kürze der Beobachtungszeit nicht mit Größenangaben zu belegen. In ihrer Tendenz sind sie jedoch deutlich und als im Einklang mit der Theorie zu erkennen. Es ist daher aus den bisherigen, wenn auch ungefestigten Beobachtungen (siehe auch 2.2.4) der Schluß zu ziehen, daß aus den derzeitigen Gegebenheiten im Feststoffhaushalt des Emders Fahrwassers keine Folgerungen über

die Vorgänge nach einer Umleitung der Ems abgeleitet werden sollten. Die nachstehend gezogenen Schlüsse werden daher auf Messungen vor der 1953 beginnenden Emsvertiefung gegründet.

### 2.2.5.3 Beobachtungsbeispiele über Stromauftransport in der Ems

In granulometrischen, petrographischen, chemischen und biologischen Untersuchungen wurde Materie marinen Ursprungs in der Ems bis etwa zur Einmündung der Leda hinaus angetroffen. Direkte Beobachtungen über den Sandtransport wurden 1976 mit radioaktiv markiertem Sand auf der Mittelplate durchgeführt. Erfahrungen bei Baumaßnahmen auf der Mittelplate in früheren Jahren lassen erkennen, daß dort Feststoffmengen in der Größenordnung sedimentiert und wieder erodiert werden, wie sie zur Unterhaltung des Emders Fahrwassers zu baggern sind.

In 2.2.5.1 wurde theoretisch abgeleitet, daß durch die Baggerungen im Emders Fahrwasser ein Feststofftransport in Bewegung gesetzt worden ist, für den das Kornmaterial aus dem Einzugsgebiet der Tidewassermenge erodiert wird, welche dem Emders Fahrwasser zufließt. Durch Schwimmermessungen war belegt worden, daß dieser Einzugsbereich seeseitig auf der Mittelplate und dem Rysumer und Manslagter Nacken gelegen ist. Dieser theoretisch gefolgerte Bodenmengenverlust läßt sich durch einen Vergleich der Tiefenkarten der genannten Gebiete auch deutlich nachweisen. So haben auf dem Rysumer und dem südlichen Manslagter Nacken die Wassertiefen zwischen der Niedrigwasserlinie und der tiefen Rinne des Ostfriesischen Gatte in der Nachkriegszeit um mehr als einen Meter zugenommen. Die hier nur selten ausgeführten Höhenaufnahmen im Flachwasserbereich lassen keine weitere Aussage zu, als daß hier in der genannten Zeit eine Bodenmenge von überschläglich 20 Mio. m<sup>3</sup> erodiert wurde.

Für das südlich anschließende Watt auf der Mittelplate lassen sich dagegen in den Tiefenaufnahmen sehr schnell verlaufende Massenumlagerungen erkennen. Erodierete Mengen werden ebenso schnell durch neu herangeführtes Material ersetzt. Auf der Mittelplate herrschen Stromgeschwindigkeiten von 2 m/s und mehr

Dementsprechend erhebliches Ausmaß haben auch die Materialbewegungen. So wurden von der östlichen, rd. 3 Mio. m<sup>2</sup> großen Wattfläche zwischen den Jahren 1960 und 1962 in der Zeit mit reichen Oberwasserabflüssen 2,8 Mio. m<sup>3</sup> abgetragen. Hiervon waren im trockenen Jahr davor 1,2 Mio. m<sup>3</sup> neu angelagert worden.

Bewegungen mit so schnellem Ablauf und in dieser Größenordnung lassen sich bereits für den Watteil ermitteln, welcher im Osten der Mittelplate vom Wasser der Ems überströmt wird. Die genannten Mengen entsprechen in ihrer Größe den Unterschieden in den Baggerungen der genannten Jahre, welche zur Erhaltung der Wassertiefe im Emdener Fahrwasser geleistet werden mußten. Der Abbau des Platenteils westlich der Wasserscheide, welcher vom Dollartwasser überströmt wird, war in den 60er Jahren ähnlich bedeutend.

Die vorstehend genannten Größen der Sedimentation und des Abtrags auf der Mittelplate erfassen die aus dem Längstransport vorübergehend deponierten Feststoffmengen. Aus einem Fall, bei welchem der Längstransport durch Errichten eines Bauwerks künstlich unterbrochen wurde, ist auch die Größenordnung der insgesamt bewegten Feststoffmenge gut zu erkennen. So wurde zwischen 1930 und 1934 der ursprünglich als Leitdamm geplante Nordwest-Südost-Teil des Umfassungsdammes des heutigen Spülfelds auf dem Rysumer Nacken mit einem niedrigen und überströmten Querdamm an den Landesschutzdeich angeschlossen. Die Sedimentation beiderseits dieses Damms war dann so hoch, daß man sich entschloß, den Leitdamm im Südteil mit dem Deich zu verbinden und die Verbindung auf MThw hochzuführen.

Bereits mit dem Beginn der Bauarbeiten lagerten sich östlich des Leitdamms erhebliche Feststoffmengen ab und zwar südlich des Querdamms von schlickigem Sand, nördlich von sandigem Schlick, nach Norden in Sand übergehend. Etwa 5/6 der Gesamtmenge wurden nördlich des Querdamms deponiert. Insgesamt wurden von 1930 bis 1937 10,9 Mio. m<sup>3</sup> hinter dem "Leitdamm" festgehalten (Hirsch, 1938). Das sind 1,56 Mio. m<sup>3</sup> je Jahr der Beobachtungszeit und eine Größenordnung, welche den Unterhaltungs-

Baggerungen der damaligen Zeit im Emdener Fahrwasser entspricht. So geht auch in den Jahren der natürlichen Auffüllung des Beckens hinter dem Leitdamm der Unterhaltungsaufwand im Emdener Fahrwasser merkbar zurück. In manchen Jahren sind zur Unterhaltung gar keine Baggerungen erforderlich. Es mußte jedoch die Strömung auf der Mittelplate wegen des durch das neue Bauwerk eingeschränkten Querschnitts ein neues Bett austiefen. Die dabei erodierten Mengen wurden vertrieben und fielen den Fahrwasserbaggerungen zur Last.

Die Richtung des Transports und die Wandergeschwindigkeit des Sandes auf der Mittelplate in heutiger Zeit ist aus dem Ergebnis einer Beobachtung mit radioaktiv markiertem Sand im Jahre 1976 (Abb. 23) zu ersehen. Das gekennzeichnete Material wurde am 18.8.76 in einer Zeit mit Oberwasserabflüssen unter  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  in Versen ( $MQ \approx 80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ausgebracht. Seit rd. 4 Monaten unterschritt der Abfluß bereits  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dementsprechend lag die Brackwasserzone so weit nach stromauf verschoben, daß im Untersuchungsgebiet nur sehr geringe Dichteströmungen wirksam sein konnten.

Das Ergebnis der Transportuntersuchung ist unter diesen Bedingungen besonders aufschlußreich. Der ausgebrachte markierte Sand wurde in seewärtiger Richtung maximal nur rd. 2 km von der Ausbringestelle weggetragen. Der Befund bei der Nachsuche am zweiten Tag nach dem Ausbringen zeigt, daß diese Entfernung vermutlich bereits während der ersten Ebbitide der Untersuchungszeit zurückgelegt wurde. Die weiteren Tiden haben dann in der Hauptsache wieder stromauf verdriftet.

Von der Einbringestelle stromauf ist die Wanderung des markierten Sandes wesentlich schneller und weiter als seine seewärtige Bewegung. Nach Verlassen der Mittelplate beträgt die Wandergeschwindigkeit der Obergrenze des Feldes des markierten Sandes sehr konstant etwa 1 km in 5 Tagen. Von der Mitte des Emdener Fahrwassers ab, etwa 3 km unterhalb der Einfahrt zum Hafen Emden, verlangsamt sich jedoch die Stromaufwanderung. Hier beginnt der Fahrwasserabschnitt mit besonders schlickiger Sohle.



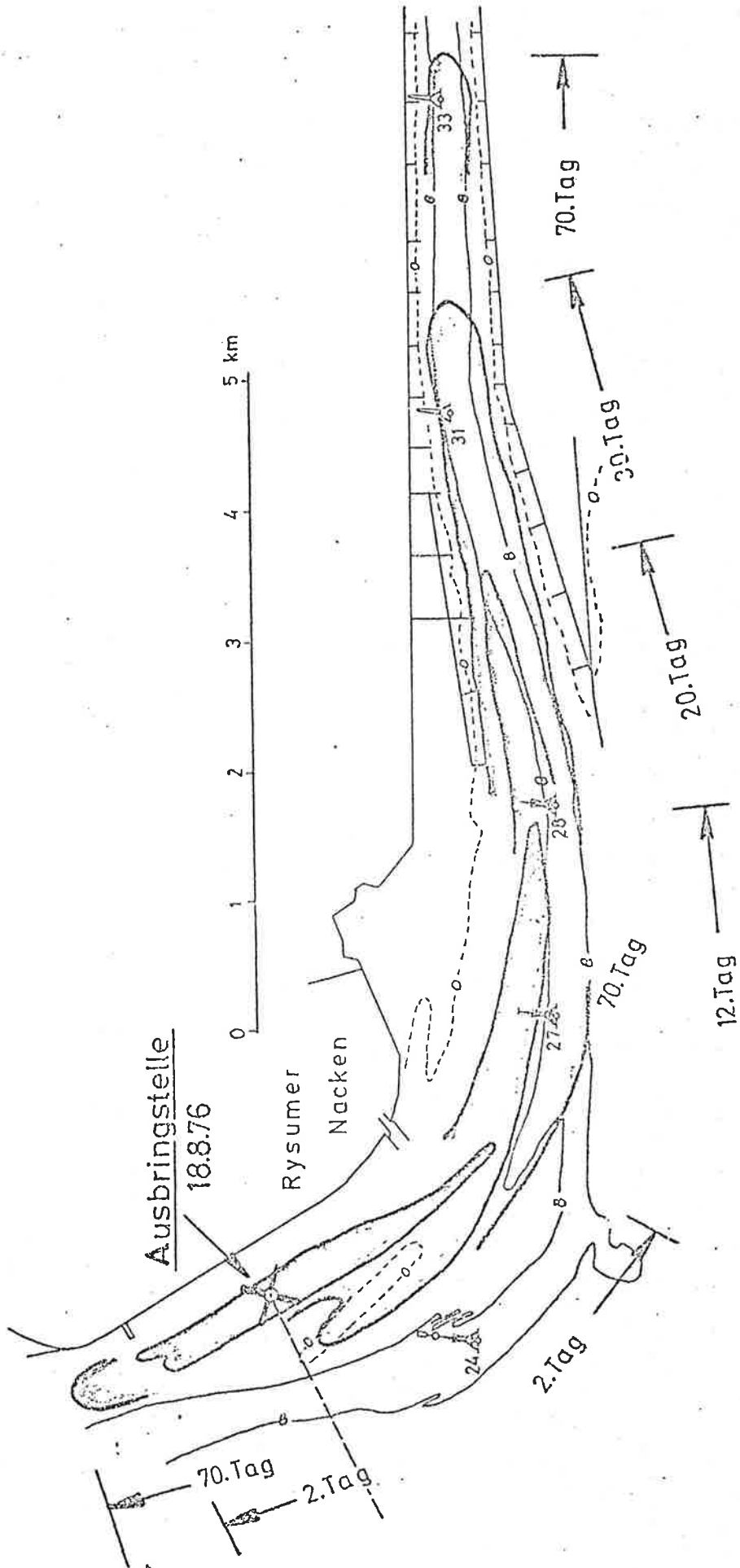


Abb. 23 : Wanderung von radioaktiv markiertem Sand  
( August - November 1976 )

Bei der fehlenden Dichteströmung macht sich ab hier die zunehmende Wirkung der Ebbströmung bemerkbar. Die Untersuchung zeigt jedoch, daß auch bei fehlender Dichteströmung ein ausgesprochen stromaufgerichteter Sandtransport über die Mittelplate hinweg in das Emders Fahrwasser hinein wirksam ist. Für die Wanderung des Sandes von der Mittelplate bis über die halbe Länge des Emders Fahrwassers wird dabei nur rd. 1 Monat benötigt.

Auch die Ergebnisse von Untersuchungen der Transportbewegung durch Verfolgung naturgegebener Merkmale des Sandes lassen die Tendenz zur flutseitig resultierenden Bewegung erkennen. So ordnete Crommelin (Crommelin, 1940 und 1960) die Vergesellschaftung der Minerale der Sandkornfraktion

$> 0,05$  mm und  $0,105$  bis  $0,210$  mm Durchmesser aus den Rinnen des Dollart und der Ems "östlich von Emden" eindeutig der sogenannten A-Provinz zu, welche für den an die Emsmündung angrenzenden Teil der Nordsee typisch ist. Die  $> 0,05$  mm-Fraktion des Dollartgebietes unterscheidet sich nicht im Wesen von derjenigen des benachbarten Wattenmeeres. Die Leichtminerale von  $0,03 - 0,05$  mm im Dollart zeigen zwar einen geringeren Glimmergehalt als diejenigen der Wattensee, aber nach Crommelin ist das darauf zurückzuführen, daß im Wattenmeer eine gleichmäßigere und ruhigere Sedimentation erfolgt als im Dollart. Für den Bereich seewärts von Emden und das Dollartgebiet besteht zwar ein Unterschied in der Verteilung der leichten gegenüber dem der Schwerminerale, doch sind beide Fraktionen eindeutig abzugrenzen gegen diejenigen der Flußsohle oberhalb von Emden. In den Oberflächensedimenten ist nach dem vorstehend Gesagten hinsichtlich der Sandkorngrößen und des Schluffs keine direkte mineralogische Beteiligung der Flußems am Aufbau des Dollartgebietes zu erkennen. Wohl aber muß aus dem Befund von Crommelin geschlossen werden, daß der Sand, welcher im Dollartsediment gefunden wird und welcher im Emders Fahrwasser gebaggert werden muß, von der Seeseite antransportiert wird. Die von Crommelin nach intensiver Analyse gefundene Einsicht bestätigt sich für den im Emders Fahrwasser gebaggerten Sand bereits durch den Augenschein. Hier findet man beim Auswaschen des Baggerguts über einem Sieb mit  $0,05/0,06$  mm Maschenweite einen Sand, wel-

cher an seiner weißlich-hellen Färbung als Seesand zu erkennen ist. Nur unmittelbar vor der Einfahrt zum Hafen Emden, also am oberen Ende des Baggerschnitts, sind nach starken Oberwasseranschwellungen dünne Schichten des braunen Flußsand der Ems im Sediment zu finden.

Wagner (1960) untersuchte die Ostracodenfauna des Emsmündungsgebietes. Er fand, daß marine Schalen als Teile des Sediments aus der Nordsee in das Ästuarium transportiert wurden. Dies bringt ihn zu dem Schluß, "daß der Dollartsand sicher z.T. aus der Nordsee stammt". Auch Krause (1954) folgert aus den Ergebnissen seiner 1951 und 1952 durchgeführten Schilluntersuchungen in der Emsmündung, daß nach der Verteilung des verdrifteten Muschelbruchs bevorzugte Transportwege angegeben werden können, welche für die Seemuscheln bis in Dollart und Emders Fahrwasser führen. Für den grobkörnigen und Sandanteil im Sediment des Dollart und des Emders Fahrwassers läßt sich danach eindeutig angeben, daß er von der Seeseite in das Bilanzgebiet eingetragen wird.

Wiggers (1960) stellte bei einer Untersuchung der prozentualen Verteilung der Feinstkornanteile in den Sedimenten zwischen Rottumeroog und dem inneren Dollart fest, daß für sie der gleiche enge Zusammenhang gegeben ist, wie er von Douglas (1955) u.a. als normale Eigenschaft mariner Sedimente ermittelt wurde.

Von Voorthuysen (1960) fand bei der Untersuchung der Foraminiferen des Emsmündungsgebiets, daß die in relativ hohem Gehalt in den Wattsedimenten vorhandenen aufgearbeiteten fossilen Foraminiferen der Oberkreide von See her antransportiert werden. Für seine ursprüngliche Arbeitshypothese, daß sie aus dem Kreidegebiet des Münsterbeckens durch die Ems antransportiert werden, konnte er kein Argument finden.

Von der Werf (1960) untersuchte die Diatomeen des Emsmündungsgebietes. Der Vergleich zwischen den Orten, an denen abgestorbene Diatomeen im Sediment zu finden sind, und ihren durch den Salzgehalt des Wassers bestimmten Lebensräumen führt ihn zu dem Schluß, daß das im inneren Ems-Dollart-Bereich abgelagerte

Sediment aus dem Wattenmeer stammt. Hierin stimmt er mit Brockmann überein, der 1935 einen solchen Befund für die Jade veröffentlichte. Die vielen marinen Diatomeen im Flußsediment, hauptsächlich leere Schalen, sind durch die Gezeitenströme aufwärts getragen worden. Die im Mündungsgebiet der Ems angetroffenen Diatomeen und niederen Algenarten zeigten, daß diese Erscheinung hier regelmäßig auftritt.

Hustedt (1939) bearbeitete eingehend die Beteiligung von Diatomeen in den Sedimenten der Außenems sowie des brackisch-limnischen Bereichs der Ems bis Papenburg. Er fand, daß die Diatomeen an der Zusammensetzung der Schlickablagerung in der unteren Ems hervorragend beteiligt sind. Die Hauptmasse wird jedoch von Vertretern der Wattflora gestellt. Größere und zartere Formen kommen jedoch nur als Bruchstücke in den Ablagerungen vor. Er schließt daher auf einen Antransport aus dem Küstengebiet. Eine unmittelbare Einwirkung des örtlichen Planktons schließt er jedoch nicht aus. Nach seinen Schlickanalysen reicht die marine Beteiligung in der Ems bis oberhalb von Leer, nimmt von hier aus merklich ab, ist aber in Papenburg noch mit 25,6 % an der Individuenzahl vertreten.

Favejee (1960) analysierte Proben von den Watten der Ems von der Groninger Küste bis hinauf in den Süßwasserbereich der Ems bei Hüntel. Es wurde röntgenologisch ihre Mineralzusammensetzung und granulometrisch die Kornverteilung ermittelt. Suspendiertes Feinkorn aus Flußwasserproben der Ems wurde den gleichen Untersuchungsängern unterworfen. Mit diesen Untersuchungen wurde nachgewiesen, daß die Feinkornanteile in den Wattsedimenten der Emsmündung bis in den oberen Brackwasserbereich hinein die gleiche charakteristische Zusammensetzung haben, wie sie aus anderen Untersuchungen von den Küstenwatten bekannt ist. Letztere wieder stimmen mit denen von Sedimenten der benachbarten Nordsee überein. Typisch davon unterscheiden sich jedoch die Sedimente im Süßwasserbereich der Ems und die Suspensionen im Flußwasser. Im Süßwassersediment der Ems fehlt z.B. völlig der Kaolinit. Beobachtungen aus Rhein, Weser und Elbe zeigten auch für deren feinkörnige Sedimente des Süßwasserbereichs wesentliche

mineralogische Unterschiede gegenüber dem Wattenschlick der Küste.

Mit einiger Verwunderung wurde bei den Untersuchungen in der Emsmündung registriert, daß die Eigenschaften des Feinmaterials auf den Watten bis hinauf nach Leerort für marinen Ursprung sprechen. Das stand in Gegensatz zu den Ergebnissen der Untersuchung von sandigen Sedimenten des dortigen Flußbetts (Crommelin, 1960). Eine daraufhin angestellte Untersuchung auf die Art der Zusammensetzung der Schwermineralanteile des Wattsediments bestätigen jedoch dessen marinen Charakter. Den niederländischen Untersuchern war nicht bekannt, daß relativ häufig und für längere Zeit die Brackwasserzone der Ems auch in diese Bereiche vordringt.

Postma (1960) verfolgte durch Untersuchung von Wasserproben den Gehalt an Phosphor und Chlorophyll im Sinkstoff zwischen Borkum und etwa Leerort. Aus der Beobachtung, daß bei seinen Probereihen der Sinkstoff- und dessen Phosphorgehalt je  $m^3$  im Süßwasser des Emsflusses höher waren als an der Seeseite, schloß er auf eine überwiegende Zufuhr von Material mit dem Süßwasser. Von Straaten (1960) weist zu dieser Schlußfolgerung jedoch darauf hin, daß ungleich viel mehr Kubikmeter Tidewasser von der Seeseite her in die Emsmündung einlaufen als Süßwasser aus der Flußems. Dadurch überwiegt trotz des geringen Gehalts je  $m^3$  die Gesamtmenge der Zufuhr von See diejenige durch das Oberwasser. De Smeet und Wiggers (1960) berechnen dazu, daß die Gesamtmenge der abschlämbaren Feinanteile im Dollartsediment 15 bis 20 mal größer ist als die Anfuhr der Ems an diesem Material. Die in den übrigen Sedimenten und Baggerungen enthaltene Menge ist hierbei noch gar nicht berücksichtigt.

Nach dem vorstehend Gesagten wird auch das Feinkorn in den Sedimenten, welche zu den Baggerungen in der inneren Emsmündung führen, in ihrem hauptsächlichlichen Anteil von der Seeseite her in das Bilanzgebiet eingetragen. Die Herkunft des Feinstkorns  $< 0,016 \text{ mm}$  ist nicht völlig geklärt. Alle bisher von verschiedenen Untersuchern verfolgten Indikatoren sprechen jedoch gegen

die Annahme, daß es in den Mengen, in denen es im Sediment der Emsmündung auftritt, mit dem Süßwasser antransportiert wird. Die Zufuhr von der Flußseite ist nach niederländischen Kornanalysen mit rd. 0,06 Mio t/Jahr zu veranschlagen. Sie deckt nur 5 % dieses Kornanteils in der Sedimentmenge des Dollart (De Smeet, Wiggers, 1960). Aus Korngrößen dieser Fraktion bestehen auch zu fast 50 % die Baggermengen aus dem Seehafen Emden, d.h. weitere rd. 0,5 Mio t/Jahr werden von diesem Sedimentationsgebiet aufgenommen. Es spricht z.Z. also in der Hauptsache die Größe des Defizits dieses Kornanteils in den eindeutig einer Herkunftsrichtung zuzuordnenden Mengen für einen Antransport von der Seeseite her.

#### 2.2.5.4 Das Auftreten von Schlammfließen in der Ems

Zu den mit dem Oberwasser herangeführten Feststoffen treten in der oberen Ems diejenigen, welche von der hochrückenden Salzzunge (Brackwasserzone) mitgeführt werden (2.2.5.3). In Zeiten mit aufwärtsverschobener Salzzunge wird die Abfuhr der vom Oberwasser getragenen Feststoffe behindert. Beide angesprochenen Feststoffanteile müssen in den Zeiten mit stärkerer Oberwasseranfuhr und dadurch seewärts verschobener Salzzunge aus der oberen Ems heraus abgeführt werden. Das geschieht je nach der Stärke der Oberwasseranschwellung in einem oder mehreren Schüben mit mehr oder weniger konzentrierter Feststoffsuspension. Die stärkste Form dieser Abfuhr kann man als "Schlammfließen" bezeichnen.

Wie der Name "Schlammfließen" andeutet, wird in diesem Fall die hochkonzentrierte Feststoffsuspension in Sohlnähe von der darübergelenden Strömung bewegt. Die Feststoffe im Schlammfluß sind in einem solchen Maße koaguliert und verflocht, daß auch die feinsten Körnungen sehr schnell zur Gewässersohle herabsinken, wenn sich nach einem Aufwirbeln die Strömung beruhigt. Der Schlammfluß bewegt sich daher, durch die Schwerkraft konzentriert, immer im tieferen Teil der Stromrinne. Hierdurch wird er daran gehindert, in Nebenrinnen und Hafenbecken einzudringen, wenn deren Sohle genügend hoch über derjenigen des schlammführenden Hauptstromes liegt.

Damit die Besonderheit des Vorgangs des Schlammfließens herausgestellt werden kann (2.2.5.4.2), wird eine Darstellung der Feststoffbewegung in der oberen Ems bei hochgerückter Salzzunge vorausgeschickt (2.2.5.4.1).

Im vorhergehenden Abschnitt 2.2.5.3 wurden Beobachtungen mitgeteilt, nach denen Feststoffe marinen Ursprungs bis weit in den oberen Tidebereich des Emsflusses hinein an der Sedimentbildung beteiligt sind. Ihr Stromauftransport erfolgt mit dem Aufwärtsrücken der Salzzunge (Brackwasserzone) in der sohlennahen Dichteströmung (2.2.5.2). Auf diese Weise können Feststoffe aus dem unteren Bereich des Tidegebietes der Ems überall dahin mitgeführt werden, wohin auch Salzwasser gelangt. Stromauftransport und Sedimentation aus dem Brackwasserkörper erfolgen in der oberen Ems jedoch nur, wenn die abzuführende Oberwassermenge gering ist. Beim Wiederanstieg des Oberwassers wird die Brackwas-

serzone zurückgedrängt. Es werden aber auch die aus ihr sedimentierten Feststoffe zum größten Teil wieder erodiert und seewärts abtransportiert. Danach ist Material marinen Charakters wohl auf den Flußwatten aber in der Regel nicht in den tieferen Rinnen anzutreffen (Crommelin, 1960, Favejee, 1960).

Der Rücktransport der Feststoffe aus der oberen Ems soll nachfolgend eingehender beleuchtet werden. Er folgt in unterschiedlicher Weise je nach der Dauer der Periode, während welcher die Brackwasserzone in der oberen Ems gelegen hat. Ebenso von Einfluß auf die Art der Abfuhr der Feststoffe aus der oberen Ems ist die Stärke der Oberwasseranschwellung, welche den Abtransport seewärts bewirkt. Um die in solchen Unterschieden liegende Wirkung verdeutlichen zu können, wird nachstehend ein allgemeiner Überblick über die Feststoffbewegung in der oberen Ems bei hochgerückter Brackwasserzone gegeben (2.2.5.4.1). Ihm folgt die Darstellung der Vorgänge bei der Abfuhr der Feststoffe (2.2.5.4.2.)

#### 2.2.5.4.1 Die Feststoffverteilung in der Brackwasserzone

Die Konzentration der Feststoffe in der Brackwasserzone folgt einer gewissen Regelmäßigkeit. So läßt sich die jeweilige (relative) Größe des Feststoffgehalts einem Ort in der Brackwasserzone zuordnen. Dieser Ort ist durch seinen Abstand vom Kopf der Salzzunge (seewärts) zu beschreiben. Der darin liegenden Regelmäßigkeit liegt zugrunde, daß der Entfernung vom Kopf der Salzzunge (Brackwasserzone) ein bestimmter Salzgehalt entspricht.

In der Brackwasserzone wird der örtlich unterschiedliche Salzgehalt durch Mischen von Seewasser und Süßwasser erzeugt. Bei dieser Durchmischung finden chemische, physikalische und biologische Prozesse statt, welche zu Umsetzungen im Feststoffhaushalt führen. Einige dieser Prozesse sind an eine bestimmte Höhe des Salzgehalts gebunden. Sie finden daher bevorzugt an den Orten in der Brackwasserzone statt, wo dieser Salzgehalt gegeben ist. Auf diese Weise entstehen örtlich definierte Feststoffmaxima in angegebener Regelmäßigkeit.



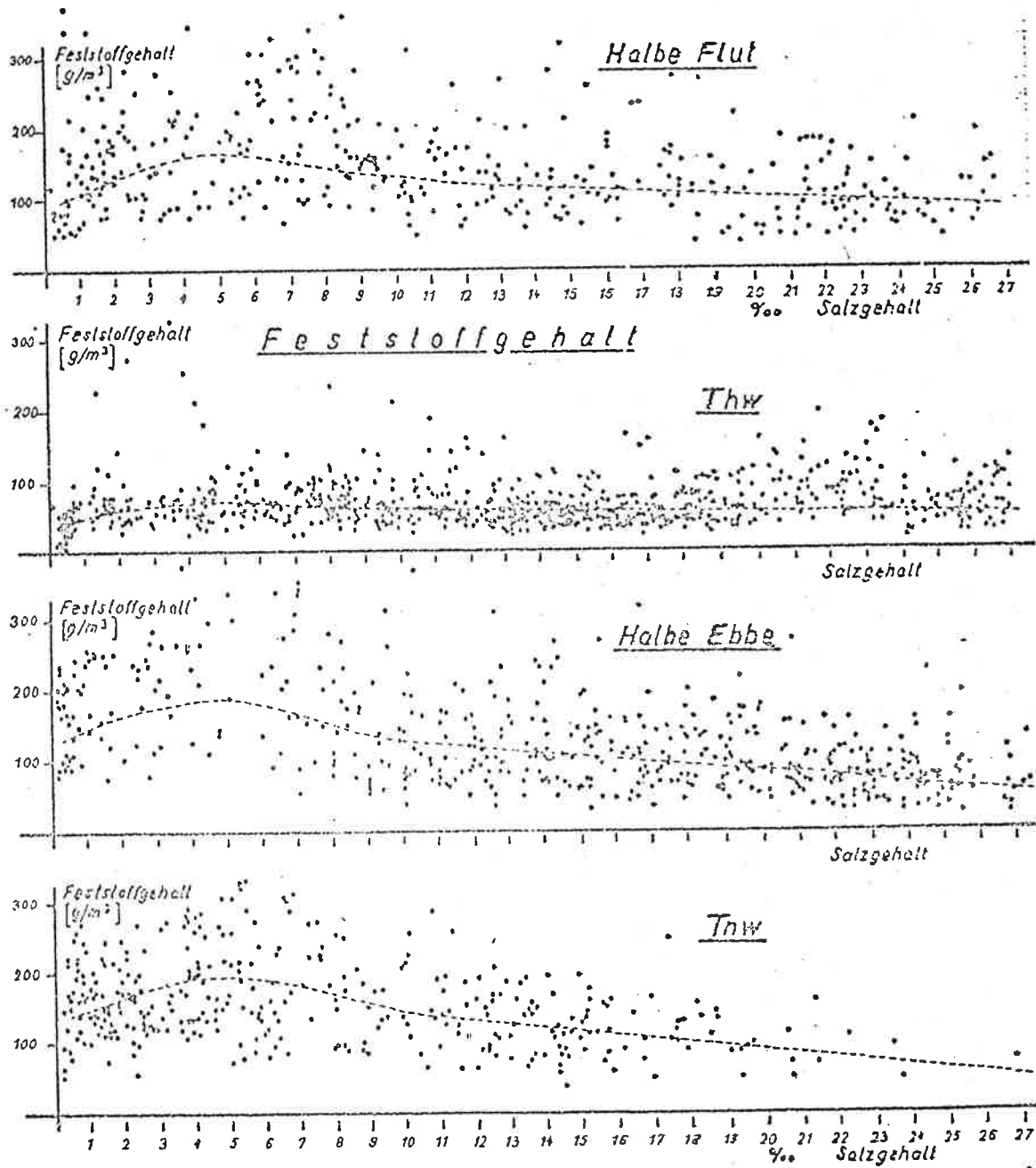


Abb.24 : Feststoffgehalt der hochrückenden Brackwasserzone  
(Mittelwerte in der Vertikalen an der Dauermeßstelle  
bei Pogum )

Wie bereits erwähnt, wurden von 1951 bis 1966 in der Ems bei Pogum Wasserproben entnommen und auf den Salz- und Feststoffgehalt untersucht. Die Proben wurden aus drei Tiefenstufen zur Eintrittszeit von Tnw, halber Flut, Thw und halber Ebbe während der Tagestiden geschöpft. An Hand der Ergebnisse dieser Untersuchungen ist es möglich, grundsätzliche Aussagen über die Art der Feststoffbewegung in der Brackwasserzone der oberen Ems zu machen. So ist in Abb 24 die normale Verteilung der Feststoffkonzentration über die Länge der Brackwasserzone dargestellt, wie sie während des Vorbeigangs der Salzzunge am Beobachtungsort bei Pogum zu beobachten ist. In dieser Darstellung ist die Größe des Feststoffgehalts in Beziehung zum gleichzeitig gemessenen Salzgehalt gesetzt.

Es hat sich bei anderen Untersuchungen gezeigt, daß sich mit dem Salzgehalt als Parameter bezüglich der Größe der Feststoffkonzentration gewisse Zuordnungen verbinden lassen. So liegt in der Ems in der Regel das Maximum der Feststoffkonzentration bei einem Salzgehaltswert von 5 - 6 ‰. Bis 12 ‰ erfolgt dann ein schneller Abfall des Feststoffgehalts. Mit höheren Werten geht der Feststoffwert zwar noch weiter zurück. Dann aber nur noch langsam.

Die Lage des Feststoffmaximums bei einem gewissen Salzgehalt ist theoretisch von Fachleuten verschiedener naturwissenschaftlicher Zweige aus ihrer jeweiligen Sicht begründet worden. So wird als chemischer Aspekt angeführt ( Jirgensons-Starmanis, 1949; Köppen, 1950; Lüttner, 1953; Postma, Kalle, 1955), daß die mit dem Süßwasser herantransportierten kolloidal gelösten organischen und anorganischen Bestandteile beim Zusammentreffen mit dem Salzwasser koagulieren und ausflocken. Dabei wächst die koagulierende Wirkung vom ersten Zusammentreffen mit dem Salzwasser bis zu einem Maximum bei 1,5 bis 2 ‰. Bei einem weiteren Ansteigen des Salzgehalts tritt zunächst keine weitere Steigerung der Ausflockung ein. Es erfolgt sogar ein Rückgang. Erst bei einem Salzgehalt von 8 ‰ nimmt die Koagulation wieder zu. Es entsteht ein zweites Maximum.

In der Elbe z.B. ist dieses Doppelmaximum deutlich ausgebildet (Lucht, 1953). Dagegen tritt in der Ems nur ein einziges Maximum hervor. In der Ems ist der Längsgradient des Salzgehalts etwa doppelt so hoch wie der der Elbe. Dadurch rücken die Orte mit starker Koagulation in der Ems auf den halben, in der Elbe beobachteten Abstand zusammen.

Es endet außerdem in der Ems bei etwa 3 ‰ das starke Längsgefälle des Salzgehalts und damit der starke Dichtestrom. Als hydrodynamische Komponente beim Entstehen eines Feststoffmaximums akkumuliert daher in der Ems zwischen den Koagulationsscheiteln noch der sohlennahe Stromauftransport die suspendierten Feststoffe.

Biologen weisen zu den genannten Vorgängen noch auf die Letalgrenzen für gewisse Kleinstlebewesen im Übergangsbereich vom Süßwasser zum Salzwasser hin. Dieser Kleinflora und Fauna werden mit dem Eintritt in das Salzwasser oder dem Übergang in die Süßwasserumwelt die notwendigen Lebensbedingungen entzogen. Die Individuen sterben ab und vergrößern nach ihrer Zersetzung den Gehalt an mineralischer Suspension.

Die oben andeutungsweise geschilderten chemischen Vorgänge sind sehr vielfältig und dadurch sehr kompliziert. Neben kolloidchemischen Prozessen finden auch solche molekularchemischer Art und Adsorptions- wie Adhäsionsvorgänge im Wechsel von Süßwasser/Salzwasser statt. Die unter Laborbedingungen bekannten Vorgänge lassen sich nicht immer mit voller Eindeutigkeit in den Naturvorgängen analysieren. Mit örtlich unterschiedlichen Anteilen tragen jedoch alle vorstehend genannten Umstände zum Auftreten eines Maximums der Feststoffsuspension im Kopf der Brackwasserzone ("Trübungsmaximum", "Sinkstoffpfropfen", "mud plug", "bouchon vaseaux") bei. In der Ems tritt dieses Maximum bei einem Salzgehalt von 5 - 6 ‰ auf.

Nach Abb. 24 ist der Feststoffgehalt bei T<sub>nw</sub> merkbar größer als der bei T<sub>hw</sub>. Dieses Verhältnis ist allgemein Regel in der Brackwasserzone. Abb. 25 verdeutlicht das am Ergebnis einer Fest-

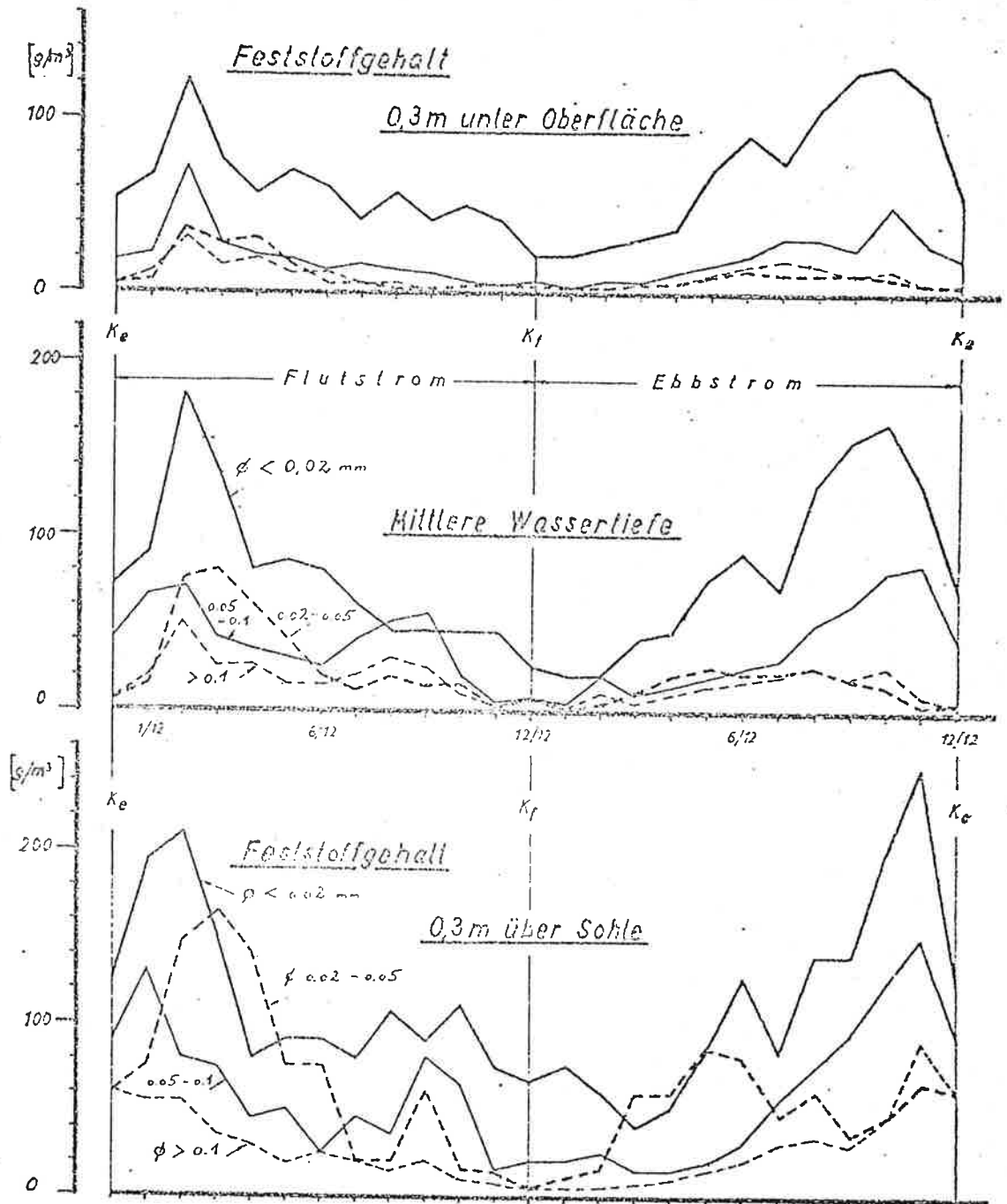


Abb. 25 : Gang der Feststoffkonzentration während der Tide ( Messung im Querschnitt der Dauermeßstelle bei Pogum, 20.-26.6.52, Mittelwerte )

stoffmessung, ausgedehnt über die Dauer von 7 Tiden (Mittelwerte) im Beobachtungsquerschnitt bei Pogum.

Der Feststoffgehalt im Wasser steigt nach dem Ende der Ebbe ( $K_e$ ) mit der Turbulenz infolge des schnellen Anstiegs der Flutgeschwindigkeit auf einen Maximalwert und fällt von da an fast kontinuierlich bis zum Ende der Flut ab. Das Minimum wird mit dem Ende der Flutstromdauer ( $K_f$ ) erreicht. Von diesem Zeitpunkt an steigt während der Ebbe der Feststoffgehalt beständig und beinahe linear bis zum Ende der Ebbe. Erst kurz vor dem merkbaren Rückgang der Ebbgeschwindigkeiten gegen die Stauwasserzeit wird der Maximalwert erreicht. Der Abfall von diesem hohen Feststoffgehalt über die Kenterzeit ( $K_e$ ) zum kurzzeitigen Wiederanstieg nach der Kenterung ist nur gering. Der Feststoffgehalt um  $K_e$  liegt merklich über dem zur Zeit von  $K_f$ .

Diese erste Beschreibung unter Bezug auf bekannte Verhältnisse im Ablauf der Stromgeschwindigkeiten während einer Tide ist etwas zu korrigieren. Am Zustandekommen der Feststoffverteilung nach Abb. 25 ist noch ein anderer Umstand beteiligt. Wird nämlich eine Feststoffmessung an einem Ort seewärts des Feststoffmaximums im Kopf der Brackwasserzone durchgeführt, so wird mit der Ebbe das Feststoffmaximum auf den Beobachtungsort hingetragen. Demzufolge wächst am Bezugsort der Feststoffgehalt mit fortschreitender Ebbe. Im Falle der Messung nach Abb. 25 liegt z.Zt. von  $K_e$  das Feststoffmaximum seewärts vom Meßquerschnitt. Das Maximum hat also kurz vor dem Eintritt von  $K_e$  den Meßort passiert und wird kurz nach  $K_e$  wieder an ihm vorbeilaufen. Dementsprechend erscheint in Abb. 25 jeweils ein Maximum im Feststoffgehalt zu Ende der Ebbe und zu Anfang der Flut. Die Abb. 25 gibt also zweimal eine Längsverteilung des Feststoffgehalts vom Kopf der Brackwasserzone ( $K_e$ ) bis etwa 12 - 14 km seewärts von ihm wieder. In der Abbildung ist dieses Bild bei  $K_f$  gespiegelt. Diese Messung zeigt daher durch die Darstellung des Grenzfalls, bei welchem die Regel durchbrochen wird, einen Grund für das Auftreten einer höheren Feststoffkonzentration um Tnw.

Das Erscheinen des Doppelmaximums zeitlich symmetrisch zu  $K_e$  in Abb. 25 ist nach der vorstehend gegebenen Erklärung keine Folge der Abnahme und Wiederzunahme der Stromgeschwindigkeit. Es ist also in diesem Tidegang der Feststoffkonzentration kein primärer Zusammenhang mit der Größe der Stromgeschwindigkeit zu erkennen. Bei den Messungen in der oberen Ems unter Brackwasserwirkung wie bei der vorliegenden ist das sogar die Regel. Es fehlt diese Abhängigkeit sogar bei den Siebkorngrößen 0,1 - 2,0 mm in Sohlennähe (siehe Abb. 25). Ausdrücklich für diese, d.h. nur für Korngrößen über 0,05 mm und in den unteren Wasserschichten hat (Niebuhr 1955) im Emden Fahrwasser und im Gattjebogen eine Gesetzmäßigkeit zwischen Strömung und Feststoffgehalt ermitteln können. Im Feststofftransport der oberen Ems ist das nicht möglich, da hier die Siebrückstände mit den angesprochenen Korngrößen zu einem sehr hohen Anteil aus organischem Material, meist stark zerkleinerten Resten höherer Pflanzen, bestehen. Diese folgen nicht den Transportgesetzen mineralischer Bestandteile. Nur für die letztgenannten ist jedoch die Abhängigkeit der Konzentration von einer höheren Potenz der Stromgeschwindigkeit gesichert. Auch in der oberen Ems besteht natürlich diese Abhängigkeit der Konzentration der Mineralkörner von der Stromgeschwindigkeit. Sie geht aber in der überlagerten ungeordneten Bewegung der organischen Stoffteilchen weitgehend unter.

Bei der Uneinheitlichkeit der Zusammensetzung der Feststoffe erklärt sich die starke Streuung der Meßwerte der Abb. 24 aus der wolkenartigen Verteilung des Feststoffgehalts im Wasserkörper und einer später noch zu besprechenden Abhängigkeit von der Tendenz der Änderung des mittleren Salzgehalts der Tide gegenüber dem der Vortiden. Die kurzzeitige Änderung des Feststoffgehalts innerhalb einer Tide ist im Beobachtungsquerschnitt bei Pogum sehr hoch, wie Vergleichsmessungen zwischen integrierender Entnahme und Augenblicksproben (Kramer, Meth, 1955) gezeigt haben. Die aus Einzelschöpfproben gewonnenen Meßergebnisse der Abb. 24 streuen dementsprechend. Sicher spielt bei der jeweiligen Meßtide auch deren Turbulenz eine Rolle, welche von der

Schnelligkeit des Auflaufens der Tide abhängt. Jedoch ist in der oberen Ems dieser Zusammenhang nicht so regelmäßig nachzuweisen wie bei Messungen im Emden Fahrwasser (siehe Abb. 59 und deren Erläuterung im Besprechungstext).

Die absolute Größe der Werte im Bereich des Feststoffmaximums wird durch die Stärke des Längsgradienten des Salzgehalts bestimmt. So werden bei einer Vergrößerung des Gradienten die aus chemischen oder biologischen Gründen an bestimmte Salzgehaltswerte gebundenen Einzelmaxima örtlich enger zusammengedrückt. Durch gegenseitige Überlagerung vergrößert sich damit das aus der Addition mehrerer Einflüsse gebildete Feststoffmaximum. Entscheidend für die Höhe der Konzentration im Kopf der Brackwasserzone ist jedoch die mit dem Längsgradienten zunehmende Größe des stromaufgerichteten Dichtestromes.

Mit dem Hinaufrücken in die obere Ems nimmt der Dichtelängsgradient fast kontinuierlich zu. Im Endstadium ist er oft gegenüber seinem Wert bei einer Lage der Brackwasserzone im Emden Fahrwasser auf das Doppelte angewachsen. (Abb. 17). Die demzufolge anwachsende stromaufwärts gerichtete Dichteströmung vergrößert ihrerseits den flutseitigen sohlennahen Feststofftransport. Sie verzögert ebenso den ebbseitigen Abtransport der mit dem Oberwasser herangeführten Feststoffe. Entsprechend nimmt die Konzentration im Kopf der Brackwasserzone höhere Werte an.

Abgebaut wird dieser Feststoffstau beim Rückgang der Salzgehaltsschwelle mit dem Anwachsen des Oberwasserabflusses. Beim Abwärtsrücken der Brackwasserzone verringert sich die Größe des Salzgehaltslängsgradienten. Die Effekte, welche bei seiner Aufsteilung zum Feststoffaufstau führten, lassen in ihrer Wirksamkeit nach. So kommt es zum Abfließen der Feststoffe stromab, und ihre Konzentration im Kopf der Brackwasserzone geht zurück.

#### 2.2.5.4.2 Das Schlammfließen.

Feststoffansammlungen in der oberen Ems werden durch das Oberwasser mit der zurückgehenden Brackwasserzone teils in mäßig konzentrierter Suspension, teils als Schlammfluß abgeführt. Die jeweilige Einstufung zwischen diesen Extremen wird durch die Größe der abzuführenden Feststoffmenge und die Stärke des Oberwassers bestimmt.

Während des Ablaufens einer solchen feststoff-führenden Oberwassermenge aus der oberen Ems ist das Wasser des Dollart, d.h. das der westlichen inneren Emsmündung, hoch salzhaltig. Die dann vom Dollartwasser gegen das Emswasser gerichtete Dichtestromkomponente behindert ein Ausbreiten der sohlennahen erhöhten Feststoffkonzentration in den Bereich des Dollartwassers.

Bei einem langsamen Zurückweichen der Brackwasserzone aus der oberen Ems geht eine Erscheinung, ihrer dann geringen Bedeutung wegen, in den übrigen Einflüssen unter, welche die Größe der Feststoffkonzentration im Kopf der Brackwasserzone bestimmen. Der hier anzusprechende Vorgang erhält aber hervorragende Bedeutung, wenn die Salzzunge durch eine plötzliche Oberwasseranschwellung schnell und weit stromab zurückgedrängt wird. Dann erscheint plötzlich in dem nun vom Süßwasser gefüllten Flußabschnitt eine bodennahe Wolke hochkonzentrierter Feststoffsuspension. Sie folgt gedämpft der Tidebewegung, wird aber mit dem Süßwasserstrom kontinuierlich stromab getragen.

Über ein plötzliches Auftauchen von Feststoffen in hochkonzentrierter Suspension nach gewissen, offenbar auslösenden Ereignissen wird in der Literatur über verschiedene Mündungsflüsse berichtet, z.b. der Gironde, der Loire u.a.. Man hat die Erscheinung mit den Namen "crème de vase", "fluid-mud" oder "mud layer" belegt. Als deutsche Bezeichnung wäre ihre Kennzeichnung als "Schlammfließen" vorzuschlagen.

Es ist bisher nicht bekannt, welche womöglich vielfältigen Umstände zu einem Schlammfließen führen können. Die Beobachtungen in der oberen Ems sprechen dafür, daß dort der entscheidende Umstand das Zurückweichen der Salzzunge ist. Die



Sedimente auf der Flußsohle und dem Uferwatt haben als Porenwasser ein Salzwasser mit dem Salzgehalt des Tidewassers, aus welchem es bei der Sedimentation ausgeschieden wurde. Wird über dieses Sediment ein Wasser mit geringerem Salzgehalt gebracht, so entsteht ein osmotischer Druck vom Porenwasser gegen das übergeschichtete Wasser. Er lockert das Sedimentgefüge auf oder bringt im Extremfall die Feststoffe wieder in Suspension. Eine solche Lockerung des Sediments erfolgt bereits in jeder Ebbtide. Bis zu einem Teil kann dadurch also auch die Zunahme der Feststoffkonzentration während der Ebbe gefördert werden. Der abnehmende Widerstand von Sedimenten gegen Erosion unter den genannten Umständen ist experimentell nachgewiesen (Kandiah Arulanandan, 1975). Zusätzliche Bedingung für das Auftreten von Schlammfließen ist die Einwirkung einer kräftigen Strömung auf das Sediment. Eine solche tritt neben der Änderung der Salzgehaltsverhältnisse bei einer starken Anschwellung des Oberwassers auf.

Völlig ungeklärt ist noch, wie den in einem Schlammfließen mitgeführten Teilchenaggregaten ihre besonderen Eigenschaften vermittelt worden sind. Bisher ist der Zustand dieser Feststoffzusammenschlüsse anscheinend noch nicht umfassend zu beschreiben. Es können jedoch folgende Eigenheiten ihres Verhaltens im Wasser angegeben werden. Die vermutlich flockenartigen Verbindungen von feineren und gröberen Korngrößen haben im Wasser eine Sinkgeschwindigkeit, welche bisher noch keinem Parameter ihrer sonstigen Eigenschaften zuzuordnen ist, welche jedoch derjenigen von Sandkorn entspricht. Die Wirkung der Schwerkraft bestimmt daher weitgehend das Fließverhalten der Suspension.

Die Feststoffe werden, sind sie in Suspension gebracht worden, sehr schnell wieder sedimentiert. Das Sediment entwässert und konsolidiert dann sehr langsam. Es wird zwar nach etwa 4 Wochen im Echogramm bereits als "scheinbar feste Masse" angezeigt. In eine Sedimentschicht von gut einem Meter Dicke sank bei einer

Peilung in der Ems das Schlicklot jedoch noch etwa 4 dm tief ein, obwohl bereits 6 Monate seit dem Sedimentieren vergangen waren.

Frisches und in diesem Zustand ausgesprochen dünnflüssiges Sediment bildet eine scharf ausgebildete Grenzschicht gegenüber dem darüber fließenden Wasser aus. Selbst größere Stromgeschwindigkeiten führen nicht zu einer Erosion, wenn nicht noch weitere Umstände die Wiederauflockerung fördern. In der Regel genügt die Strömungsruhe einer Kenterzeit, um einen in Suspension gebrachten Schlammfluß vollständig sedimentieren zu lassen.

Abb. 26 zeigt den Körper eines Schlammflusses in der Ems in einer Echolotaufnahme. Die Oberfläche wird dabei deutlich markiert.

Im Zweitecho erscheint die feste Gewässerschle. Der Inhalt des in Abb. 26 dargestellten Schlammflusses beträgt in seiner ganzen Länge von 1,6 km etwa  $120\ 000\ m^3$  mit 35 000 t Feststoffen. Dies ist die Größenordnung, in welcher diese Erscheinung in der Ems auftritt, wenn die Brackwasserzone nach länger anhaltender hoher Lage durch eine Oberwasseranschwellung völlig aus der oberen Ems herausgeschoben wird. Das ist jedoch nicht immer der Fall. Bei dem letzten beobachteten Schlammfließen im Jahre 1974 reichte die damalige Oberwasseranschwellung nicht aus, um die Feststoffwolke aus der oberen Ems abzuführen. Die Erscheinung kann bei noch geringeren Oberwasserzunahmen in noch kleine Schübe aufgelöst sein. Abb. 27 zeigt einen solchen Vorgang.

Abb. 27 gibt den Gang des Salzgehalts und des Feststoffgehalts an der Meßstelle bei Pogum nach einer mäßigen Oberwasseranschwellung im Februar 1953 wieder. Die Brackwasserzone wandert bis zum 10. Mai wegen des geringen Oberwasserabflusses ( unten in Abb. 27) flußaufwärts. Entsprechend wachsen die an der Beobachtungsstelle registrierten Werte des Salzgehalts ( oben in Abb. 27). Während des Aufwärtswanderns schiebt Anfang April

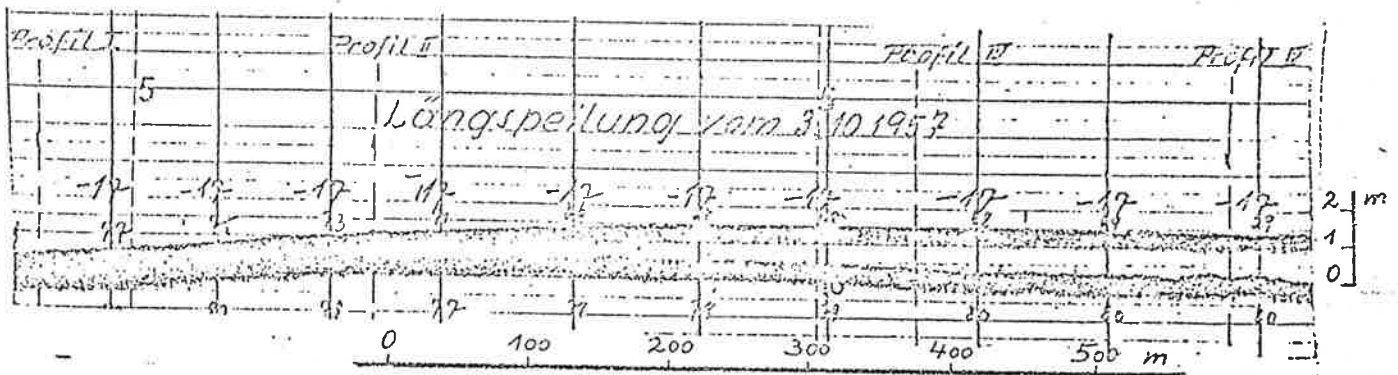


Abb. 26 : Schlammfließen im Emders Fahrwasser  
( Peilung vom 23.9. und 3.10.57 )

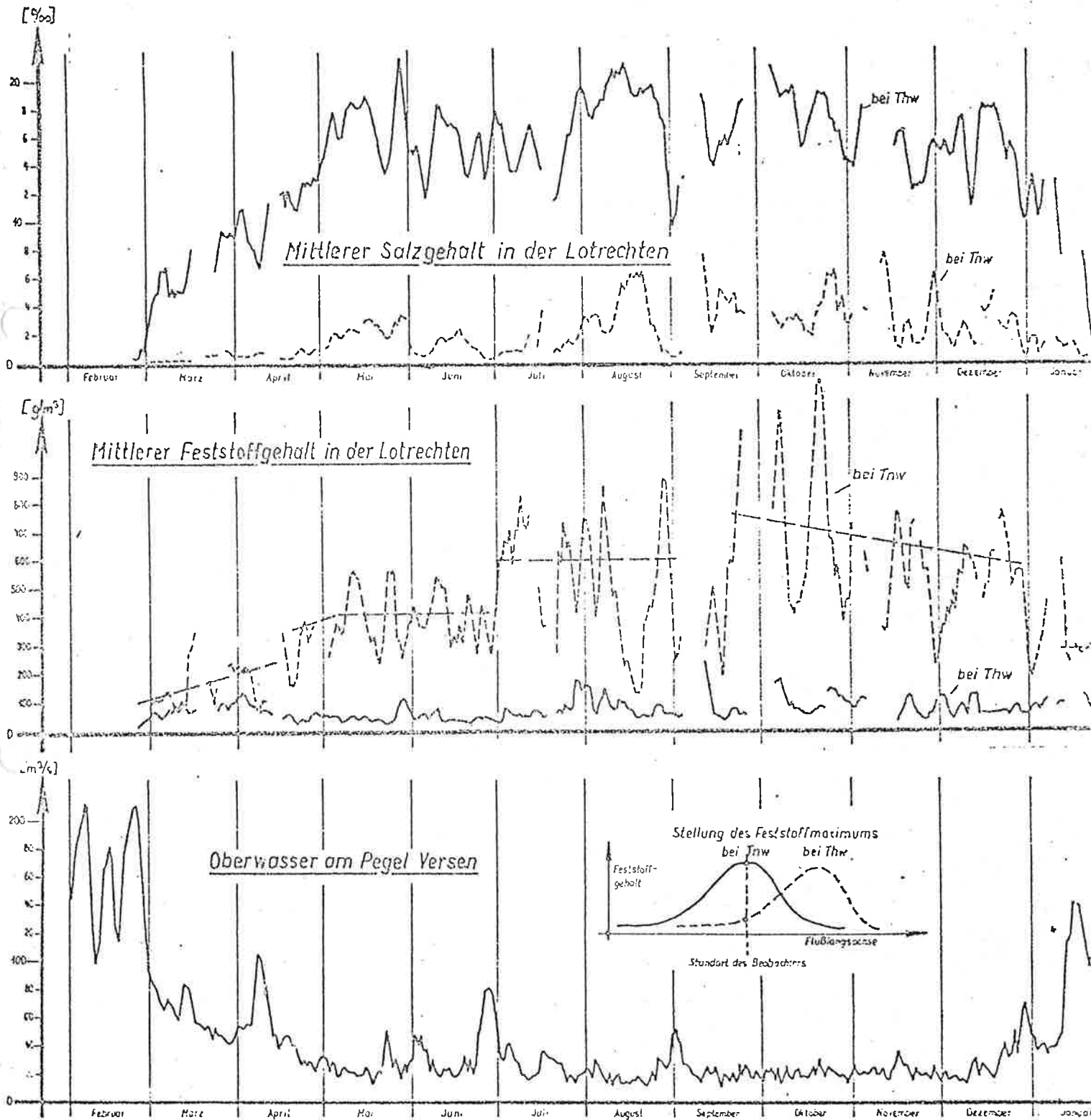


Abb. 27 : Erhöhung des Feststoffmaximums im Kopf der Brackwasserzone durch Schlammfließen ( Beobachtungen der Dauermeßstelle bei Pogum 1953/54 )

eine kleine Oberwasseranschwellung die Brackwasserzone vorübergehend zurück. Der Salzgehalt stellt sich nach dieser Anschwellung schnell wieder in der alten Höhe ein. Das zeigt, daß sich die Brackwasserzone wieder in der gleichen Lage befindet wie vor dem Durchgang des etwas erhöhten Oberwassers. Nun aber hat sich die Feststoffkonzentration im Kopf der Brackwasserzone plötzlich um rd.  $150 \text{ g/m}^3$  erhöht. Der gleiche Vorgang läuft noch einmal Ende Juni und Anfang September ab, und in beiden Fällen erhöht sich die Feststoffkonzentration um etwa den gleichen Betrag. Nach dem stärkeren Oberwasserabfluß im Frühjahr 1957 ist jedoch der Anfangszustand wie zu Beginn des geschilderten Ablaufs im Vorjahr wieder hergestellt.

Die in Abb. 27 in ihren Ganglinien dargestellten Vorgänge erklären sich wie folgt. Aus ihrer Anfangslage rückt die Brackwasserzone mit der dem dortigen Gleichgewichtszustand entsprechenden Feststoffkonzentration stromauf. Eine Gleichgewichtshöhe der Feststoffkonzentration im Kopf der Brackwasserzone stellt sich zwischen der Menge der stromauf durch die sohlennahe Dichteströmung herangeschafften Feststoffe und dem Rückstrom in den höheren Wasserschichten ein. Hierbei bestimmt die Stärke der Dichteströmung entsprechend der Größe des Salzgehaltslängsgradienten die Größe der Feststoffkonzentration.

Eine in die obere Ems vorrückende Brackwasserzone hat in ihrem Kopf keine dem dortigen höheren Salzgehaltslängsgradienten entsprechende Konzentration der Feststoffe. Die Feststoffkonzentration, welche den neuen Gegebenheiten entspricht, muß erst aufgebaut werden. Das geschieht entweder durch längerdauerndes Zurückhalten der mit dem Oberwasser herangeführten Feststoffe oder, wie im vorliegenden Beispiel, durch einen oder mehrere Schlammflüsse, gespeist aus den von dem mäßigen Frühjahrshochwasser nicht völlig ausgeräumten Sedimentvorräten der oberen Ems.

Das Sediment wird durch die kleine Oberwasseranschwellung von der stabilisierenden Überlagerung durch das Salzwasser entlastet,

und es gehen Feststoffmengen im Süßwasser in Suspension. Sie werden mit dem Süßwasserstrom stromab mitgeführt. Gerät dabei die Feststoffsuspension in den Bereich, welcher von der zurückgegangenen Brackwasserzone eingenommen wird, oder rückt die Salzzunge wie im Fall der Abb. 27 wieder aufwärts, so wird die Suspension in den Kopf der Brackwasserzone aufgenommen. Die dortige Feststoffkonzentration erhöht sich entsprechend. Abb. 28 gibt als Skizze diesen Vorgang wieder.

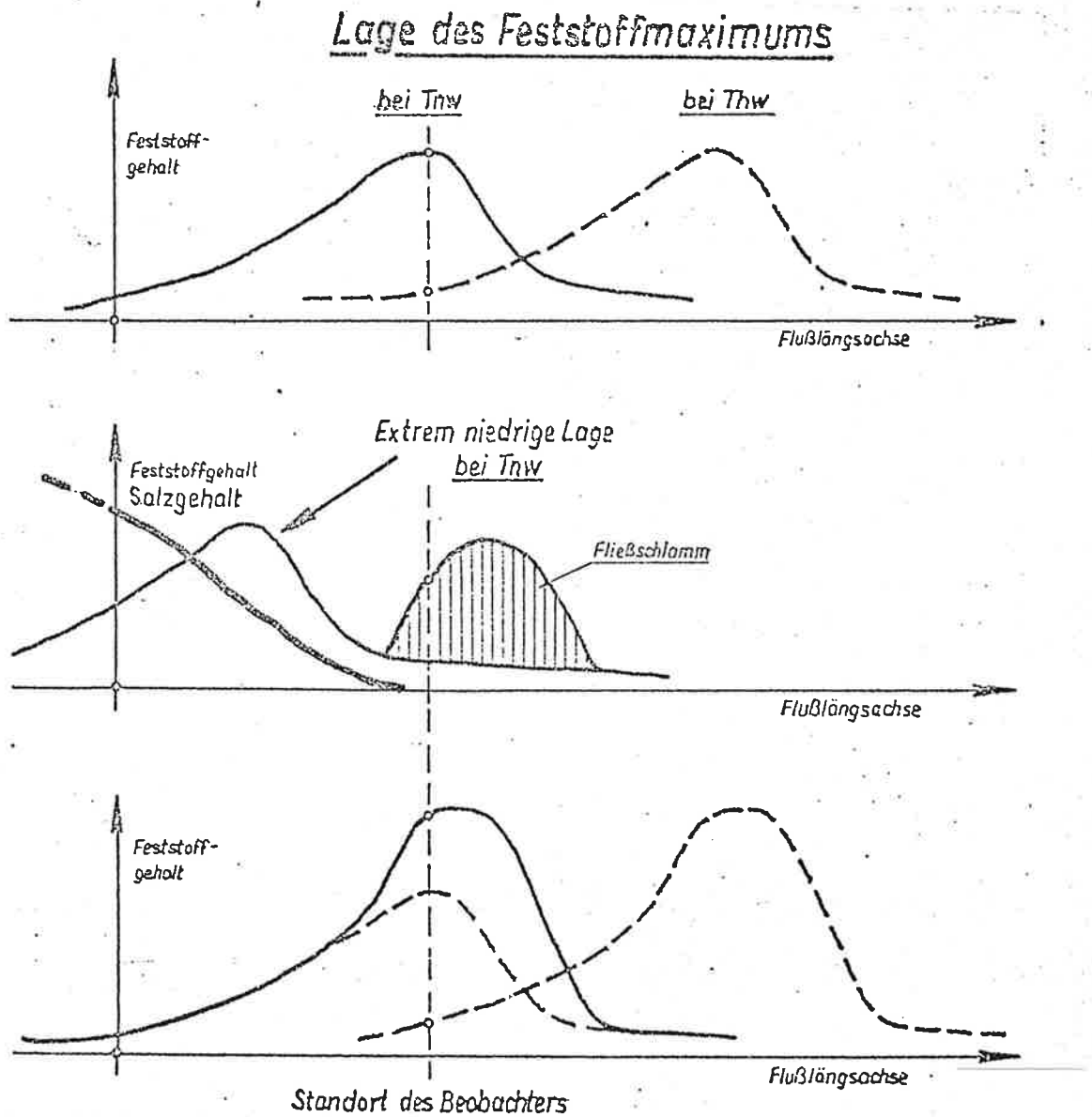


Abb. 28: Aufnahmen eines Schlammflusses in den Kopf der Brackwasserzone

Bis zum Erreichen der Gleichgewichtskonzentration kann im vorliegenden Fall die Feststoffmenge von mehreren kleineren Schlammflüssen aufgenommen werden. Nach dem Rückgang der Brackwasserzone in die weit seewärts verschobene Lage, welcher eine niedrigere Gleichgewichtskonzentration entspricht, fließen dann die überschießenden Feststoffe seewärts ab.

Mit diesem Beispiel wurde eine der offenbar vielfältigen Erscheinungsformen dargestellt, in denen Feststoffansammlungen aus der oberen Ems abtransportiert werden. Die Unterschiedlichkeit in der Art dieser Abfuhr ergibt sich durch die unterschiedlich große Menge der fortzubewegenden Feststoffe. Die in der Literatur gegebenen Analysen der Vorgänge in anderen Flußmündungen (Bellessort, 1973) unterscheiden Grenzzustände bei Konzentrationswerten unter und über 5.000 bis 10.000 g/m<sup>3</sup> und sprechen erst von einem Schlammfließen bei Feststoffkonzentrationen von 100.000 g/m<sup>3</sup> und mehr. Die Erscheinungen in der oberen Ems bewegen sich in der Regel mit ihren Konzentrationen im Bereich der unteren der genannten Schwellen. Auch diese wird nur gelegentlich überschritten. Erst nach einem Aussedimentieren und einer gewissen Konsolidierung kommen darüber hinaus Konzentrationen zustande, welche bei entsprechender Stärke des Oberwassers zum Schlammfließen führen.

Bei der voll ausgeprägten Form des Schlammfließens nach starken Anschwellungen des Oberwasserabflusses entstehen Transportkörper wie derjenige in Abb. 26. Ihr Fließverhalten entspricht dem von Flüssigkeiten mit hohem spezifischen Gewicht, welchem das ("spezifisch leichtere") Flußwasser aufliegt. In diesem Zustand kann der Schlammfluß nur in Flußarme und Hafenbecken eindringen, in welche er gleichsam mit natürlichem Gefälle hineinfließen kann.

In gewissen hochturbulenten Tidephasen werden höhere Feststoffkonzentrationen aus dem Schlammfluß auch in höhere Wasserschichten getragen. Ein weiteres Vertreiben der aufgewirbelten Feststoffe in seitliche Nebenräume wird jedoch durch ihre hohe

Sinkgeschwindigkeit verhindert. Ein Vertreiben wird außerdem dadurch eingeschränkt, daß der Schlammfluß hauptsächlich mit der Ebbe in Ebbrichtung bewegt wird. Beim Passieren von Seitenarmen läuft dann aus diesen heraus ebenfalls ein Strom. Gegen diesen kann sich keine Suspensionswolke ausbreiten.

Schlammfließen in der Ems findet nur statt, wenn die erodierten Feststoffe in einer Oberwasseranschwellung mitgeführt werden. In diesem Fall herrscht in Nebenräumen des Flusses, an welchen der Schlammstrom mit dem Süßwasser (!) vorbeigeführt wird, ein hoher Salzgehalt. Geht nämlich einer Oberwasseranschwellung keine Zeit mit langdauernd hochliegender Brackwasserzone, d.h. mit geringem Oberwasserabfluß voraus, dann kann sich keine große Feststoffmenge in der oberen Ems angesammelt haben. Dann kann auch kein Schlammfließen mit belangreichen Feststoffmengen stattfinden. War jedoch die Brackwasserzone lange Zeit stromauf verschoben, so liegt der Salzgehalt z.B. im Dollart nahe dem der Nordsee. Bei einer Oberwasseranschwellung besteht dann vom Dollart gegen die Ems ein so starkes Dichtegefälle, daß beim Vorbeigehen des Schlammflusses vor dem Dollartmund die sohlennahe Feststoffkonzentration gegen die Ems zurückgedrängt wird.

Es wird daher ein Schlammfluß immer in der tiefsten Rinne und in dem vom Emswasser durchflossenen Rinnenteil transportiert und sedimentiert werden.

Nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart ergeben sich damit als bevorzugte Orte für die Sedimentation aus einem Schlammfließen die in Abb. 29 skizzierten Bereiche. Es sind dies der äußere Vorhafen der Binnenschiffsschleuse einschließlich der nicht von der Ems durchströmten Zufahrt, der seeseitige Teil des tideoffenen Seekanals bzw., nach Abschleusung, der Vorhafen der Seeschiffsschleuse mit der Zufahrt vom Hauptfahrwasser und der obere Abschnitt des Hauptfahrwassers, soweit dieses durch Baggerungen auf Tiefe gehalten wird.



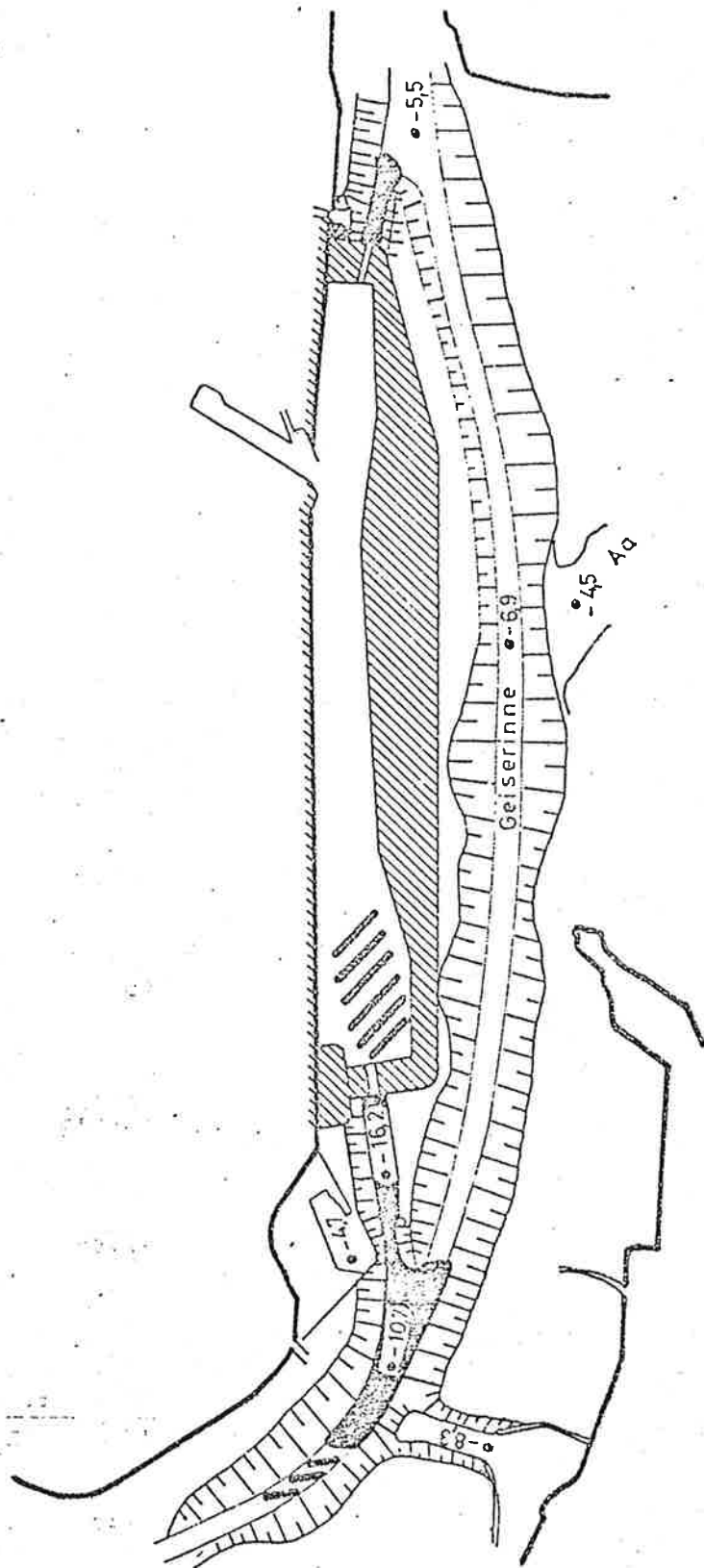


Abb. 29 : Orte der Sedimentation von Schlammflüssen  
nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart

Die eingetragenen Tiefenzahlen geben die geplante  
Sohlentiefe unter MSpTnw ( im Dollart unter MTnw ) an.

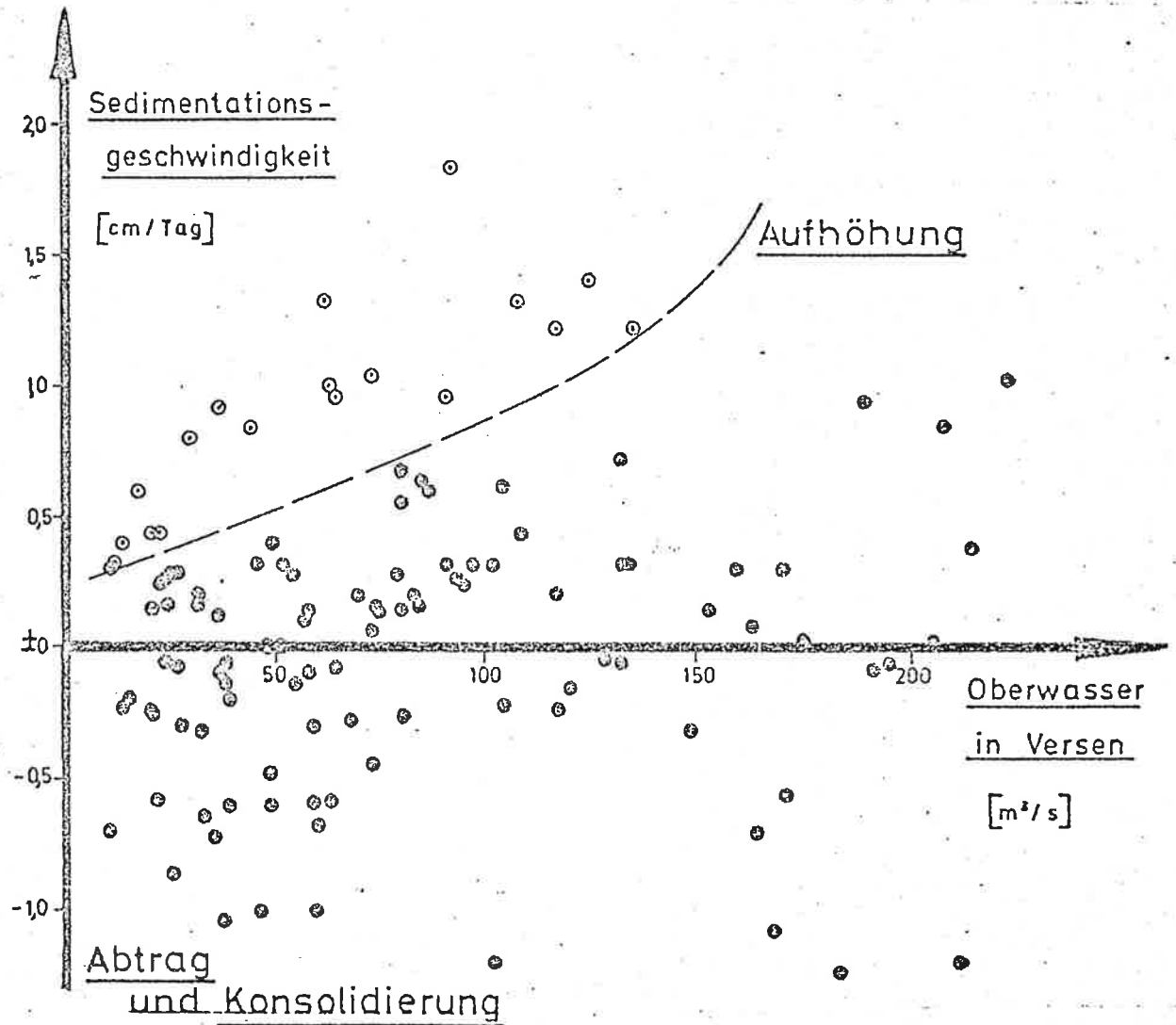


Abb. 30 : Sedimentationsgeschwindigkeit im oberen Emders Fahrwasser ( km 43,4 ) .

Die als Kreis gezeichneten Werte der Aufhöhung sind nach Beginn des Baggerjahres 1964 beobachtet worden.

Zur Zeit passieren die Feststoffabfuhr aus der oberen Ems beim Transport nach See das Emders Fahrwasser. Die mitgeführten Feststoffe sind dabei meist feinkörnig. Dadurch zeigt die Darstellung der Sohlenbewegungen im oberen Emders Fahrwasser (Abb. 30) einen anderen Charakter als diejenige ausgangs des Emders Fahrwassers (Abb. 18, Seite 68). Im oberen Emders Fahrwasser folgen den Phasen der Sedimentation solche der Erosion. Die in Abb. 30 angeführten Werte für die Schnelligkeit der Änderung der Sohlenhöhe bei stärkeren Oberwasserabflüssen sind jedoch nicht immer in ihrer absoluten Größe richtig wiedergegeben. Eintreibungen durch Schlammfließen z.B. erhöhen die Gewässersohle innerhalb einer Fluttide um Dezimeterbeträge. Die Erosion beim Weitertreiben erfolgt ähnlich schnell. Da jedoch die Sohlenhöhenaufnahmen, aus welchen die Aufhöhungsgeschwindigkeit für Abb. 30 berechnet wurde, nur in mehrwöchigem Abstand vorgenommen werden, erniedrigen sich rechnerisch die Werte der Aufhöhungs- und Abtragungsgeschwindigkeiten durch den Bezug auf die Gesamtdauer zwischen den Peilungen um etwa eine Zehnerpotenz. Der Anstieg (und der Abfall) der in Abb. 30 dargestellten Werte mit dem Zunehmen des Oberwassers erfolgt in der Natur also wesentlich schneller als etwa der Anstieg der in Abb. 30 eingezeichneten strichlierten Linie. Die Werte des "Sohlenabtrags" bei kleinen Oberwasserabflüssen ergeben sich durch die Konsolidierung und Setzung des meist feinkörnigen Sediments.

### 2.3 Die Sedimentation im Dollart

Nach den Ergebnissen neuerer Nivellements erhöhen sich die Dollartwatten heute noch um etwa den gleichen jährlichen Betrag wie im Durchschnitt der 5 Jahrhunderte seit dem Entstehen des Dollart (2.3.2). Örtliche Unterschiede in der Aufhöhungsgeschwindigkeit ergeben sich durch unterschiedliche Lage zur großräumigen Richtung der hydrodynamischen und meteorologischen Einflüsse (2.3.3). Deren Auswirkung ist über lange Zeiträume konstant.

Die Entwicklung der Rinnen in der Emsmündung seewärts des Dollart scheint sich auf die Lage der Hauptrinne des Dollart ausgewirkt zu haben. Das Ausmaß ist jedoch gering und deswegen in den Kartierungen nicht mit Sicherheit auszumachen (2.3.4). Ausdehnung und Tiefe der Wattrinnen neh-

men in dem Maße ab, in welchem durch Wattaufhöhung und Eindeichungen der Flutrauminhalt des Dollart zurückgeht (2.3.4)

Von den mit der Flut in den Dollart getragenen Feststoffen werden nur etwa 2 % dauerhaft sedimentiert. Nur 20 % dieses Sediments bestehen aus feinkörnigem Material, obwohl dieses zu mehr als 50 % im Dollartwasser in Suspension enthalten ist (2.3.5).

Nach den genannten Beobachtungen können die Änderungen der Feststoffverteilung und der hydrodynamischen Gegebenheiten, wie sie in begrenztem Ausmaß bei einer Umsumleitung zu erwarten sind, die Eigengesetzlichkeit der Wiederverlandung des Dollart nicht merkbar beeinflussen (2.3.6).

### 2.3.1 Die Wiederverlandung des Dollart und ihre unterschiedliche Wertung

Die Bedeutung des Dollart als Vorfluter und Aufnahmebecken für die Tidewassermenge wird erst seit der Mitte dieses Jahrhunderts als vorrangig angesehen. Frühere Bestrebungen gingen dahin, durch Eindeichungen landwirtschaftlich nutzbare Flächen zu gewinnen. Beobachtungen über den Verlandungsfortschritt sind daher hauptsächlich unter dem letztgenannten Gesichtspunkt angestellt worden. Nachstehend soll daraus das allgemeine Sedimentationsverhalten des Dollart abgeleitet werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich die von einer Umsumleitung zu erwartenden Auswirkungen auf die Entwicklung des Dollart abschätzen.

Der Dollart hat als Aufnahmebecken eines erheblichen Teils der Tidewassermenge der inneren Emsmündung maßgebliche Bedeutung für die Wasserführung der Rinnen des ihm benachbarten Mündungsgebietes. Untersuchungen im hydraulischen Modell (Boos, 1952-56) und solche mit Hilfe der Tidewellenrechnung (Hansen, Schnoor, 1952-56) haben gezeigt, in welchem Maße die Querschnittsentwicklung und damit die der Fahrwassertiefen im Gebiet seewärts der Dollartmündung durch stärkere Einschränkungen der Dollartkapazität beeinflusst werden können.

Der Dollartspeicherraum nimmt mit 125 Mio m<sup>3</sup>/Tide rd. 2/3 der Wasserführung des gemeinsamen Querschnitts von Ems und Dollart auf. Die Speicherfläche des Dollart beträgt z.Zt. jedoch nur noch etwa ein Drittel derjenigen aus der Zeit ihrer größten Ausdehnung zu Anfang des 16. Jahrhunderts. Sie hat seit dieser Zeit ständig abgenommen. Die laufenden Wiedereindeichungen des durch den

Dollarteinbruch zwischen dem 14. und 16. Jhdt. verlorengegangenen Siedlungslandes lassen den zeitlichen Fortschritt dieses kontinuierlichen Rückganges deutlich erkennen. (Abb. 31 u. 32).

Bis zur Mitte dieses Jahrhunderts waren die Beobachtungen des Verlandungsfortschritts des Dollart auf die Möglichkeit der Gewinnung von landwirtschaftlich nutzbaren Flächen gerichtet. In diesem Sinne wurde jede Erhöhung der Dollartwatten begrüßt. Sie wurde in den dafür geeigneten Randgebieten durch das Anlegen von Landgewinnungswerken gefördert.

Mit den wachsenden Anforderungen der Schifffahrt an die Fahrwassertiefen der Ems und der Erkenntnis, daß die Wassertiefen zu einem erheblichen Teil von der Größe der Tidewassermenge und damit von der Aufnahmefähigkeit des Dollart abhängen, kehrte sich die Einstellung zu der beobachteten Volumenabnahme des Dollart in die der bisherigen genau entgegengesetzte Richtung. Deutliches Zeichen dafür ist die von den beiden Anliegerstaaten, den Niederlanden und Deutschland, in dem zwischen ihnen abgeschlossenen Ems-Dollart-Vertrag von 1960 niedergelegte Verpflichtung, daß Landgewinnungs- und Eindeichungsarbeiten nur im gegenseitigen Einvernehmen durchgeführt (Artikel 5) und bei allen Maßnahmen die Bedeutung des Dollart als Vorfluter und Aufnahmebecken für die mit der Flut eindringende Wassermenge gebührend berücksichtigt werden sollen (Art. 6).

In diesem Sinne werden nachstehend die als Auswirkung einer Umleitung der Ems zu erwartenden Folgen für die Verlandung des Dollart besprochen. Die Unterlagen, auf welche sich diese Stellungnahme dabei stützen kann, wurden mit erheblichem Aufwand hauptsächlich von niederländischer Seite erarbeitet, in früheren Jahren jedoch ausschließlich unter dem Gesichtswinkel der Möglichkeiten der Gewinnung von Neuland. Sie sollen nachstehend auf ihre Aussagen hin besprochen werden, in denen sich das natürliche Verhalten des Dollart abzeichnet bzw. in denen sich die Auswirkungen von früheren Änderungen der Tideverhältnisse des übrigen Emsmündungstrichters erkennen lassen. Daraus soll der Maßstab für die Bewertung der geplanten Regulationsmaßnahmen abgeleitet werden.

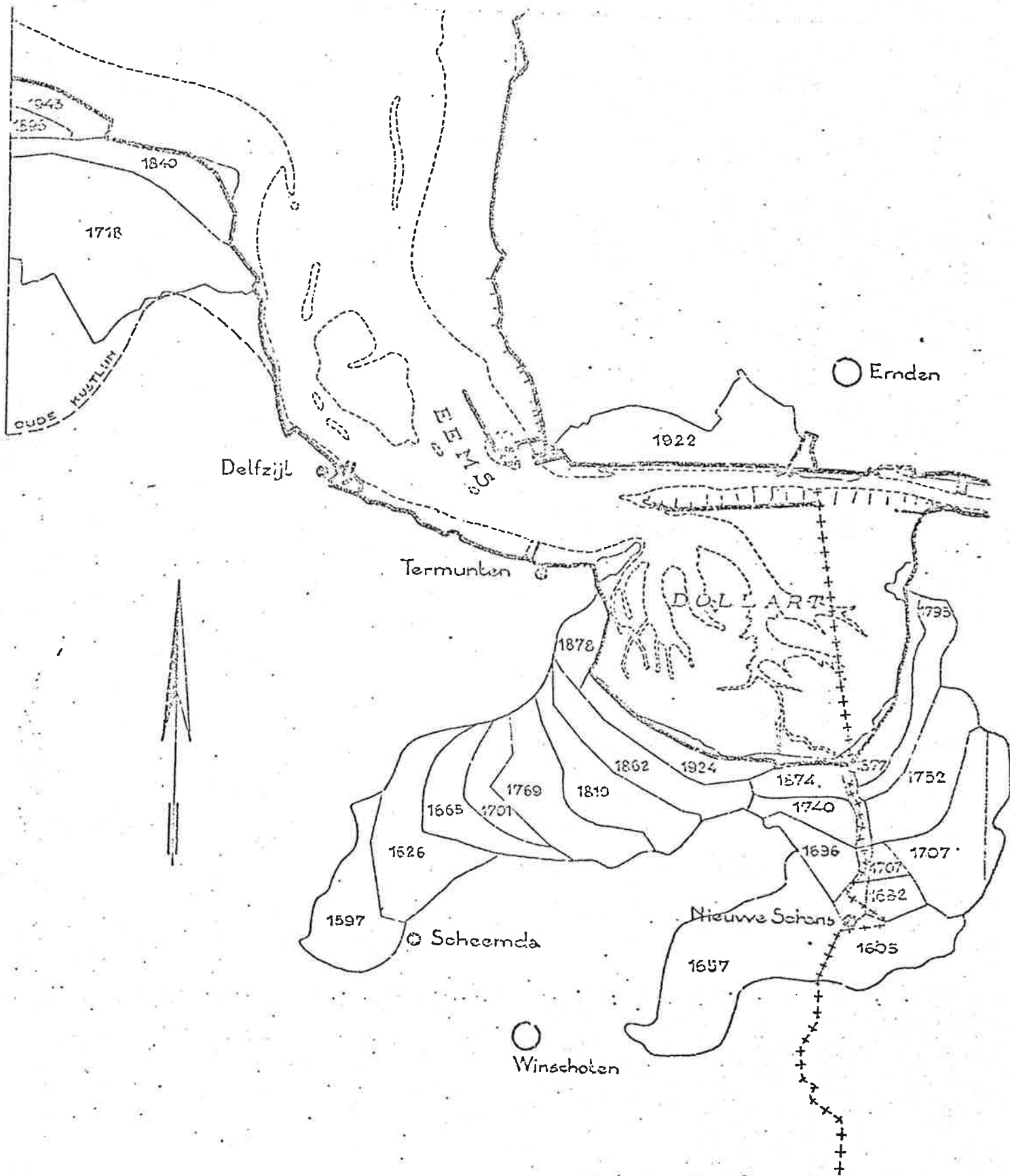


Abb. 31 : Einpolderungen in der Emsmündung seit 1500  
( Quelle: Gerritsen, 1956 )

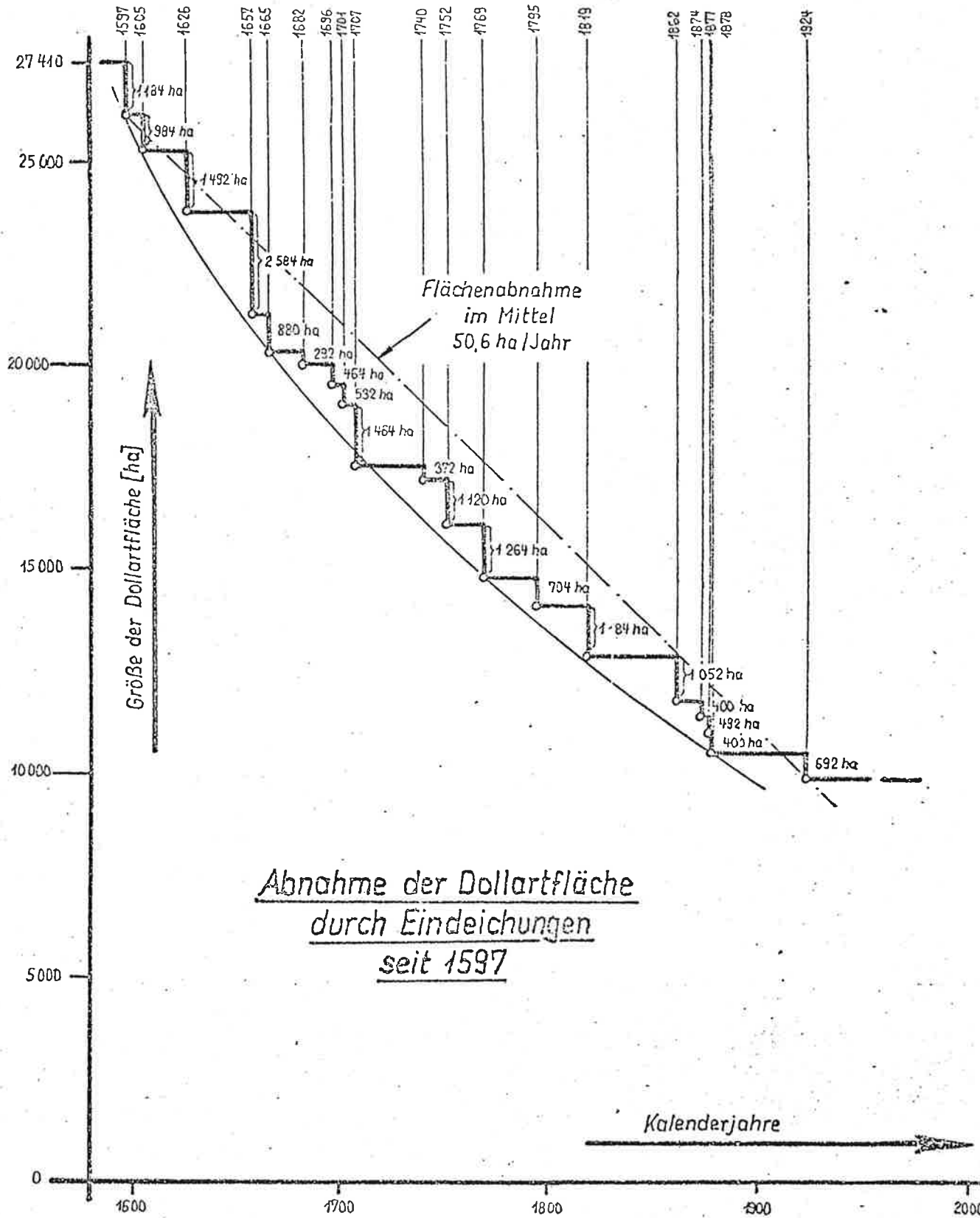


Abb. 32 : Abnahme der Dollartfläche durch Eindeichungen

### 2.3.2. Die Sedimentationsgeschwindigkeit im Dollart

Die Aufhöhungsgeschwindigkeit läßt sich für den zurückliegenden Zeitraum seit Beginn der Dollart-Wiederverlandung um etwa 1500 aus der an vielen Stellen durch Bohrungen erkundeten Sedimentdicke errechnen. Für das gegenwärtige Jahrhundert stehen für einen Vergleich die Ergebnisse von Nivellements in den Jahren 1921, 1952 und 1970 zur Verfügung. Mit einer mittleren Aufhöhung von 0,8 cm/Jahr zwischen 1952 und 1970 gegenüber derjenigen von 0,9 cm/Jahr im Mittel der davorliegenden 450 Jahre hat sich die Verlandungsgeschwindigkeit nicht erkennbar verlangsamt. Vereinzelt Unterschiede zwischen den Ergebnissen von 1921-1952 und 1952-1970 in Höhenlagen unter N.A.P. sind vermutlich auf die in der früheren Meßperiode nur lückenhafte Einmessung zurückzuführen. In Höhenbereichen, in welchen die Ergebnisse besser vergleichbar sind, stimmen sie in beiden Meßperioden gut überein.

Die Höhenlage des Dollartwatts wurde seit 1846 mehrmals durch Nivellements ermittelt. Dabei wurde das erfaßte Gebiet durch den jeweiligen Anlaß für eine solche nivellitische Aufnahme bestimmt. Meistens war das Interesse auf die deichnahen Randgebiete gerichtet, deren Eindeichungswürdigkeit überprüft werden sollte. Beginnend mit 1921 wurden jedoch Nivellementsprofile auch über fast das gesamte Watt des Dollart außerhalb der Deiche gelegt. Soweit bei diesen wiederholten Höhengnahmen dieselben Meßpunkte in einigem Zeitabstand wiederholend eingemessen wurden, läßt sich aus der seit der vorausgegangenen Messung eingetretenen Höhenänderung die Sedimentationsgeschwindigkeit an diesen Orten berechnen.

Der Vergleich von nivellitisch eingemessenen Höhenpunkten in größeren Flächenbereichen des Dollart ist, wie aus vorstehendem zu erkennen, nur über das letzte halbe verstrichene Jahrhundert seit 1921 möglich. Für weiter zurückliegende Zeiträume der Wiederverlandung des Dollart sind von niederländischer Seite (de Smeet, Wiggers, 1960, Anhang) Berechnungen über die Sedimentationsgeschwindigkeit angestellt worden. Diese Untersuchungen setzen die aus Bohrungen bekannte Mächtigkeit der Sedimentschicht in den Dollartpoldern in Beziehung zum Alter des jeweiligen Polders im Jahre seiner Bedeichung. Die inzwischen ein-



getretene Setzung der Sedimente kann aufgrund niederländischer Untersuchungen (de Smeets, Wiggers, 1960) nach Angabe der Autoren mit ziemlich großer Genauigkeit zur ursprünglichen Mächtigkeit der Ablagerungen zurückgerechnet werden.

Die nach dem vorstehend besprochenen Verfahren für länger zurückliegende Zeiträume der Dollart-Verlandung errechnete Sedimentationsgeschwindigkeit zeigt einen umso höheren Wert, je früher nach dem Dollarteinbruch der Polder eindeichungsreif geworden war. Die niederländischen Autoren führen das auf die nach den vorhergegangenen Landabbrüchen anfangs sehr schnelle Sedimentation zurück. Sie gaben für den ältesten von ihnen untersuchten Polder eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 1,7 cm/Jahr an, welche bis zum jüngsten Polder nach ihren Untersuchungen auf 1,3 cm/Jahr abnimmt. Für das Gebiet außerhalb der Deiche errechneten sie eine mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,9 cm/Jahr (durchschnittliche sedimentierte Höhe etwa 4 m in einer Periode von 450 Jahren).

Die vorstehend zitierten Angaben über die Geschwindigkeit der Sedimentation in weiter zurückliegenden Zeiträumen hängen natürlich wesentlich von der Annahme über den Zeitpunkt des Beginns der Sedimentation ab, besonders wenn die Eindeichung eines Polders sehr früh erfolgt ist. Als Beginn der Sedimentation ist bei den besprochenen Ermittlungen das Jahr 1500 angenommen worden, um welche Zeit etwa der Dollart seine größte Ausdehnung hatte. Diese Annahme ist die nächstliegende. Die Größenordnung der damit berechneten Werte stimmt zudem mit derjenigen überein, welche aus neueren Nivellements ermittelt wurde.

Höhenaufnahmen in ausgedehnten Nivellementsnetzen, welche zur Berechnung von Mittelwerten oder zur Ermittlung von gebietsweise unterschiedlichem Verhalten im Dollart geeignet sind, wurden in den Jahren 1921, 1952 und 1970 durchgeführt. Der Bericht des Rijkswaterstaat, Centrale Studiedienst, aufgestellt von F. Gerritsen (1956) gibt Auskunft über die Ergebnisse des Vergleichs der Nivellements 1921 und 1952. Über die Entwicklung des Dollart in der Periode 1952 - 1969/70 berichtet der Studie-

dienst Delfzijl der Rijkswaterstaat Directie Groningen unter D.H. van der Meulen (1972). Im letztgenannten Bericht werden zum Teil die Ergebnisse beider durch Nivellements belegten Perioden besprochen. Sie sollen hier zitiert und in einigen Fällen spezieller beleuchtet werden.

In der Abb. 33 sind die Meßprofile der Aufnahmen 1921, 1952 und die Facheinteilung 1970 zusammengezeichnet worden. Es stellen die Punkte im Profilnetz 1921 - 1952 die Orte dar, für welche in dieser Periode die miteinander vergleichbaren Meßwerte gewonnen wurden. Für die Aufnahme 1970 waren leider viele Vermarkungspunkte der Profile der früheren Messungen nicht mehr auffindbar. Es wurde daher ein völlig neues Nivellementsnetz eingerichtet. Dieses erlaubt zwar nicht mehr den punktweisen Vergleich mit den früheren Messungen, die Gegenüberstellung mit der Aufnahme 1952 wurde aber durch die Erstellung von Höhenschichtlinien-Plänen für 1952 und 1970 und gebietsweise Mittelwertbildung ermöglicht. Die Einteilung in die Fächer Vak 1 bis Vak 23, in welchen gemittelt wurde, ist in der Abb. 33 eingezeichnet.

Die Ergebnisse der Periode 1921 bis 1952, soweit sie als Mittelwerte vorliegen, sind nach der Art ihrer Entstehung und teilweise hinsichtlich ihres Gültigkeitsbereichs nicht ohne Kommentar mit denen der Periode 1952 - 1970 vergleichbar. Die erforderlichen Erläuterungen werden nachstehend gegeben.

Gerritsen (1956) stellte für frühere Aufnahmen in Randbereichen des Dollart und für die Periode 1921 - 1952 eine Abhängigkeit der Sedimentationsgeschwindigkeit von der Höhenlage des Watts fest. Er berechnete daher Mittelwerte der Aufhöhungsgeschwindigkeit in drei Höhenabschnitten. Die gleiche Einteilung wurde für die Periode 1952 - 1970 zur Erleichterung des Vergleichs mit der vorhergesehenen Untersuchung beibehalten (van der Meulen, 1972). Die entsprechenden Mittelwerte, wie sie in den jeweiligen Berichten über die Messungen gegeben werden, sind die folgenden:

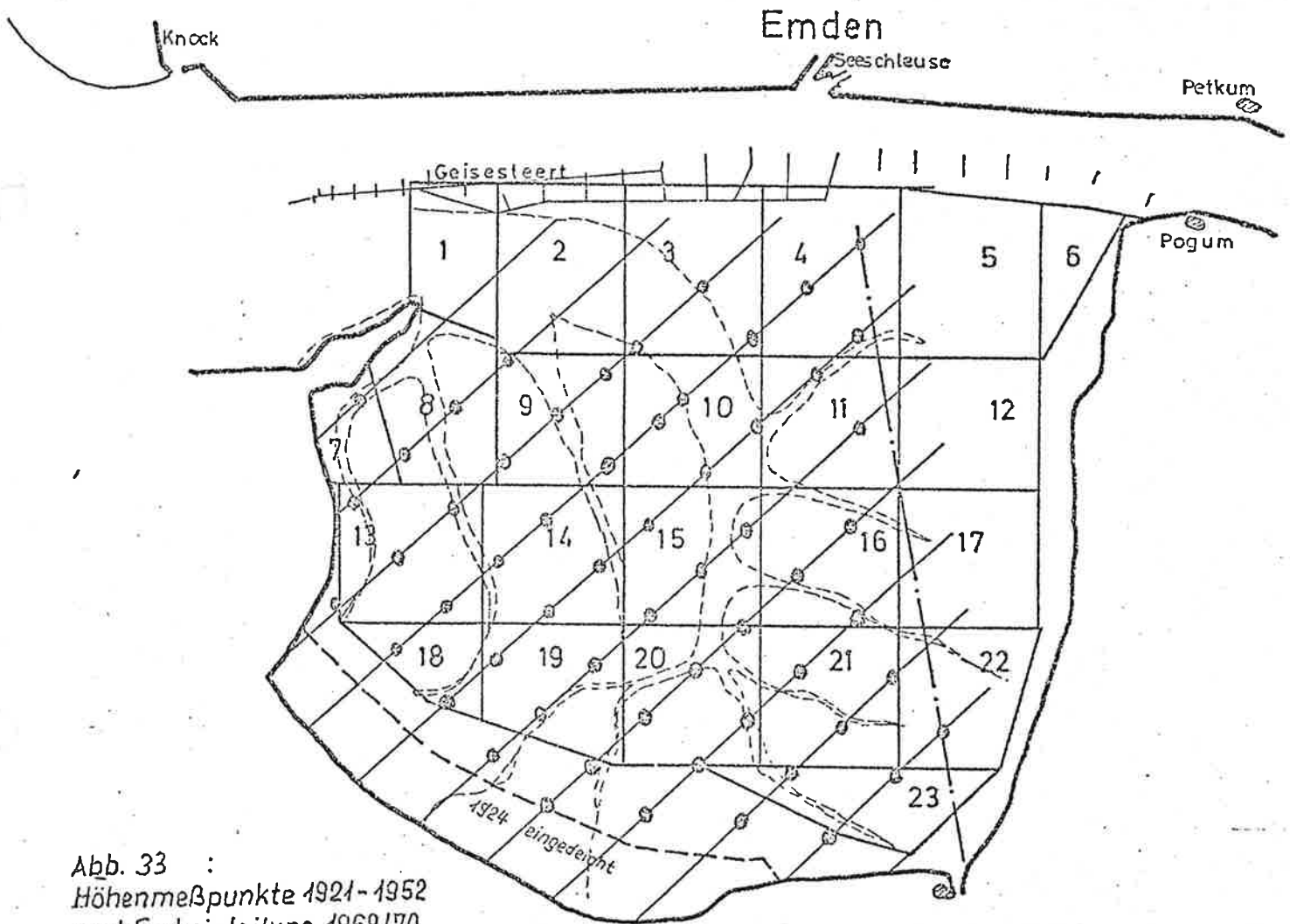


Abb. 33 :  
Höhenmeßpunkte 1921-1952  
und Facheinteilung 1969/70

Durchschnittliche Erhöhung pro Jahr

	<u>1921 - 1952</u>	<u>1952 - 1970 *)</u>	
		Angabe im Text	Graph. Darst.
Gebiet über N.A.P. **) + 0,5 m	+ 1,32 cm/Jahr	"vernachlässig- bar klein"	<+ 0,1 cm/Jahr
Gebiet zwischen N.A.P. + 0,5 m und N.A.P.	+ 0,74 cm/Jahr	"um 0,5 cm/Jahr"	~ 0,57 cm/Jahr
Gebiet zwischen N.A.P. und N.A.P. - 0,5 m	+ 0,61 cm/Jahr	"beinahe 2 x so groß wie über die Periode 1921-1952"	~ 1,16 cm/Jahr

Für einen Vergleich der Sedimentationsgeschwindigkeiten in den beiden Untersuchungsperioden sei folgendes angeführt:

Das Gebiet über N.A.P. + 0,5 m, in welchem über die Periode 1921 - 1952 die sehr hohe Sedimentationsgeschwindigkeit gemessen wurde, lag im südlichen Randgebiet des Dollart innerhalb der Landgewinnungsanlagen. Es sind dort also keine "natürlichen Auflandungen" beobachtet worden. Das Gebiet ist 1970 nicht wieder aufgemessen worden und daher nicht in die Berechnung der Mittelwerte eingegangen. Die Aussage der neueren Untersuchung, daß die Aufhöhungsgeschwindigkeit im Höhenbereich über N.A.P. + 0,5 m des heutigen Dollart unbedeutend sei, ist auf den von dem zuletzt durchgeführten Nivellement erfaßten Bereich zu beschränken.

\*) Im Bericht über die Messungen 1969/70 (van der Meulen, 1972) sind die Sedimentationsgeschwindigkeiten nicht zahlenmäßig angegeben. Die Zitate im dortigen Text sind vorstehend in deutsche Übersetzung angeführt. Die Zahlenangaben wurden aus einer graphischen Darstellung abgelesen.

\*\*) N.A.P. = Niederländisches Vermessungsnull. Es liegt 2 cm höher als das deutsche NN.

Für das unter dem vorbesprochenen Höhenbereich gelegene Gebiet zwischen + 0,5 m und N.A.P. wird nach den neueren Messungen eine niedrigere Sedimentationsgeschwindigkeit nachgewiesen als in der Periode 1921 - 1952. Der neu ermittelte Wert von etwa 0,5 cm/Jahr ist als verbesserte Aussage hinsichtlich des Aufhöhungsverhaltens des Gesamt-Dollart anzusehen. Er steht nicht im Widerspruch zu dem von Gerritsen für die Periode 1921 - 1952 genannten Wert, denn das Untersuchungsgebiet der Periode 1921 - 1952 umfaßte nicht den deutschen Teil des Dollart. Berechnet man für die Periode 1952 - 1970 einen Mittelwert im genannten Höhenbereich nur für die Fächer, welche in der Periode 1921 - 1952 zur Mittelwertbildung beigetragen haben, so ergibt sich die

Sedimentationsgeschwindigkeit im Dollart ohne den deutschen Dollartteil

Bereich zwischen	1921 - 1952	1952 - 1970
+ 0,5 m und N.A.P.	+ 0,74 cm/Jahr	+ 0,75 cm/Jahr

für beide Perioden mit dem gleichen Wert.

Für die Berechnung des vorstehend für die Periode 1952 - 1970 angeführten Wertes mußte das im niederländischen Bericht wiedergegebene Sekundärmaterial verwendet werden, d.h. es konnten nur Mittelwerte ganzer Fächer in die Berechnung eingegeben werden. Die Gebietsgrenzen der in den beiden Untersuchungsperioden ausgewerteten Flächen waren deswegen nicht exakt einzuhalten. Wie empfindlich die Angabe der Sedimentationsgeschwindigkeit aber auf derartige Grenzverschiebungen reagiert, sei durch folgendes Beispiel belegt: In den Mittelwert 1952 - 1970 der Aufhöhungsgeschwindigkeit 0,75 cm/Jahr ist die Teilfläche des Vak 22 voll eingerechnet worden. Diese liegt jedoch zu 75 % im deutschen Dollartteil. Läßt man sie entsprechend dem Ermittlungsziel außerhalb der Berechnung, so steigt der Mittelwert der Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,75 cm/Jahr auf 0,81 cm/Jahr. Es kann daher der Zurückhaltung des niederländischen Berichts bei den zahlenmäßigen Angaben hinsichtlich der Sedimentationsgeschwindigkeit über die Periode 1952 - 1970 nur beigepflichtet werden.

Nach dem vorstehend Gesagten kann zusammengefaßt werden, daß im Dollart für den Höhenbereich über N.A.P. nach den Untersuchungen von 1921 - 1970 keine Änderung in der Sedimentationsgeschwindigkeit zu erkennen ist.

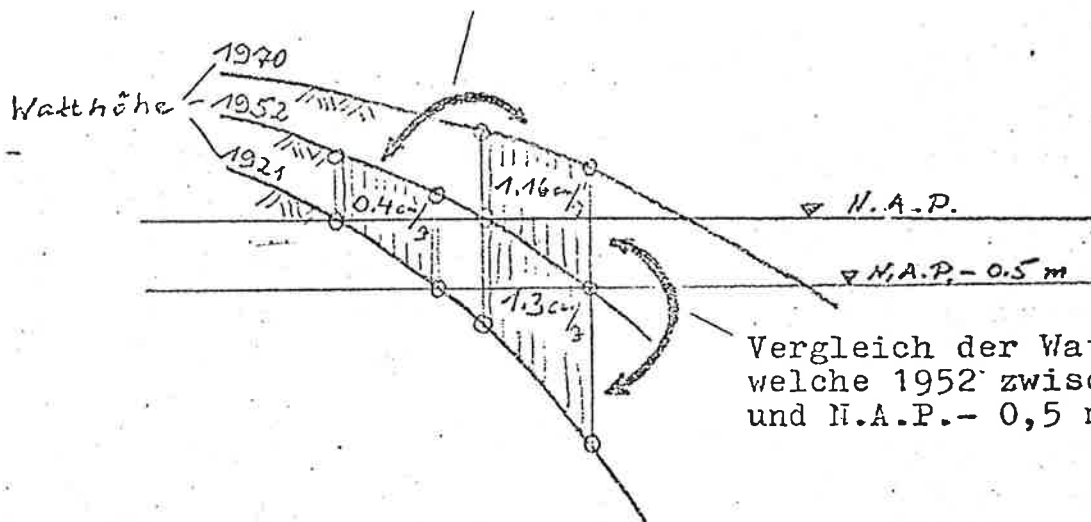
Für den Bereich unter N.A.P. weist der neuere niederländische Untersuchungsbericht eine größere Aufhöhungsgeschwindigkeit als in der Periode 1921 - 1952 nach. Die aufgrund der Messung von 1970 im Höhenbereich zwischen N.A.P. und N.A.P. - 1,5 m errechnete "gemittelte Höhenzunahme von etwa 1 cm/Jahr" ist durch ein wesentlich reichhaltigeres Beobachtungsmaterial abgesichert, als es Gerritsen für seine Ermittlung zur Verfügung stand. Das geht schon aus der Ausdehnung des Beobachtungsbereichs der Periode 1952 - 1970 auf drei tieferliegende Höhenbereiche hervor, in denen miteinander übereinstimmende Ergebnisse errechnet werden.

Der Bereich mit Höhenzunahme in der Periode 1952 - 1970 reicht bis zu einem Niveau von N.A.P. - 3,0 m hinunter. Bei Verwendung aller Meßwerte der Periode 1921 - 1952 unter N.A.P. errechnet sich dagegen in diesem tiefliegenden Bereich für die weiter zurückliegende Zeitspanne 1921 - 1952 eine kleine Höhenabnahme.

Bei dieser Mittelbildung 1921 - 1952 sind alle verfügbaren Meßergebnisse verwendet worden. Zwischen 1921 und 1952 stehen im Bereich unter N.A.P. jedoch nur Messungen an insgesamt 42 Einzelmeßpunkten für einen Vergleich zur Verfügung (Gerritsen, 1952, Bijlage 5). Davon liegen 5 Beobachtungen einseitig am östlichen Rand des Groote Gat, welches durch Verlagerung der Rinne auf diesem Ufer vertieft wurde. An den Meßpunkten wurden daher Änderungsbeträge zwischen - 2,5 cm/Jahr und - 11,0 cm/Jahr ermittelt. Diese Meßwerte ziehen das Ergebnis bei der Mittelwertbildung 1921 - 1952 stark herab, da ihnen keine Meßwerte vom Westufer gegenüberstehen. Meßpunkte am Westufer hätten ähnlich große Änderungen gezeigt, jedoch in positiver Richtung. Es erscheint daher zweifelhaft, ob ein Vergleich mit den in der Periode 1952 - 1970 ermittelten Werten möglich ist.

Trotz der 1921 - 1952 unter N.A.P. nur lückenhaften Einmessung läßt sich jedoch für den Bereich zwischen N.A.P. und N.A.P. - 0,5 m eine Übereinstimmung mit den neueren Messungen finden. Geht man von der Vereinbarung ab, daß die Einteilung in Höhenstufen immer auf die Höhe des Meßpunkts zu Anfang der Vergleichsperiode bezogen werden soll, so errechnet sich für die Orte, welche in der Zeitspanne 1921 - 1952 am Ende dieser Periode zwischen N.A.P. und N.A.P. - 0,5 m lagen, eine durchschnittliche Aufhöhung von + 1,3 cm/Jahr. Das ist die gleiche Größenordnung, wie sie für 1952 - 1970 mit + 1,16 cm/Jahr in diesem Höhenbereich gefunden wurde (siehe die Zusammenstellung auf S. 115 ). Die nachfolgende Skizze zeigt, daß bei dieser Berechnung die Wahrscheinlichkeit besteht, Messungen am gleichen Ort miteinander zu vergleichen. Beim Festhalten an der Regel, daß die Ausgangshöhe zu Anfang der Meßperiode bestimmend sein soll, erzwingt man einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Beobachtungsorten. Bei der geringen Besetzung mit Meßwerten in 1921 - 1952 führt das gegebenenfalls zu Fehl-  
ergebnissen.

Vergleich der Wattflächen, welche zu Anfang des Zeitabschnitts im Höhenbereich zwischen N.A.P. - 0,5 m und N.A.P. lagen



Vergleich der Wattflächen, welche 1952 zwischen N.A.P. und N.A.P. - 0,5 m lagen

Im Bereich zwischen N.A.P. und N.A.P. - 0,5 m ist übrigens in der Periode 1952 - 1970 die Sedimentationsgeschwindigkeit mit und ohne Einbeziehung des deutschen Dollartteils von gleicher Größe (+ 1,2 cm/Jahr). Das unterschiedliche rechnerische Ergebnis der Untersuchungen in den beiden miteinander verglichenen Perioden ist im Höhenbereich unter N.A.P. also nicht auf unterschiedliche Abgrenzung der Untersuchungsgebiete zurückzuführen.

Im Höhenbereich zwischen dem mittleren Niedrigwasser und mittlerem Hochwasser hat sich das Dollartwatt von 1952 - 1970 im Durchschnitt um rd. 0,8 cm/Jahr erhöht. Dieser Wert stimmt gut mit der aus der Sedimentstärke errechneten Aufhöhungsgeschwindigkeit von 0,9 cm/Jahr im Mittel der letzten 450 Jahre überein, bei welcher nach den ermittelnden Autoren eine größere anfängliche Sedimentationsrate als sehr wahrscheinlich anzunehmen ist. In die Messungen 1969/70 sind Höhenbereiche über dem mittleren Hochwasser nicht einbezogen worden. Es wurden insgesamt 8200 ha neu vermessen. 1380 ha entfielen davon im Bezugsjahr 1952 auf den Höhenbereich unter dem mittleren Niedrigwasser. Im Flutspeicherraum zwischen Niedrig- und Hochwasser mit 6820 ha Wattfläche wurden in der Periode 1952 - 1970 im Mittel 0,53 Mio m<sup>3</sup>/Jahr sedimentiert und damit dem Flutraum an Speichervolumen entzogen.

### 2.3.3. Die örtliche Verteilung der Auflandungen im Dollart

Unterschiede in der Auflandungsgeschwindigkeit zwischen westlichem und östlichem Dollartwatt erklären sich aus der jeweiligen Lage zur Hauptwindrichtung und dem Füllstrom. In dem durch Nivellements erfaßten Zeitraum ist die Sedimentation ohne wesentliche Änderung ihrer Stärke fortgeschritten. Unregelmäßigkeiten sind auf menschlichen Eingriff in der Nachbarschaft zurückzuführen.

Im vorhergehenden Besprechungsabschnitt wurde für die Periode 1952 - 1970 und den Bereich über N.A.P bis N.A.P + 0,5 m der im niederländischen Bericht angeführte Wert der mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit im Gesamtdollart, nämlich "um + 0,5 cm / Jahr", und der für allein den niederländischen Dollartteil berechnete (+ 0,75 cm / Jahr



um etwa 50 % größeren Wert mitgeteilt. Diesen Angaben ist zu entnehmen, daß die Dollartwatten westlich des Groote Gat merkbar schneller aufhören als diejenigen auf der Ostseite des Dollart. Für dieses unterschiedliche Verhalten der östlichen Dollartwatten gegenüber den westlichen lassen sich mehrere Gründe anführen, welche aus der geographischen und hydrographischen Orientierung des Dollart abzuleiten sind.

In den höhergelegenen Wattbereichen überschreiten die Wasserströmungen der normalen Tiden kaum Geschwindigkeitswerte über 0,3 m/s. Entsprechend niedrig sind die Transportkräfte dieser Strömungen und die von ihnen bewirkten Materialversetzungen. Die Transportrichtung verläuft aber in der Regel vom tieferen Wasser der Rinnen zu den flacheren Bereichen hin, so daß die höheren Wattbereiche weiter aufgehört werden. Dieser Mechanismus ist sehr eingehend von Postma (1954) sowie van Straaten und Kuenen (1957, 1958) beschrieben worden. Störend in diesem kontinuierlichen Prozeß wirken sich jedoch die umlagernden Kräfte der Windwellen aus. Diese treten umso öfter in Wirkung, je geringer die Wasserbedeckung der Watten mit ihrem Höherwachsen wird. Im flacheren Wasser bekommen bereits die kleineren Wellen bei geringeren Windstärken Bodenberührung.

Der Windeinfluß ist jedoch je nach geographischer Lage des Watts hinsichtlich der Richtung der häufigst auftretenden Winde, der für die Wellenentwicklung entscheidenden Streichlänge über der freien Wasseroberfläche und hinsichtlich der Lage zu den Stau erzeugenden Küsten unterschiedlich. In den genannten Beziehungen ist das westliche Dollartwatt in einer wesentlich besser geschützten Position als das östliche. Es liegt bei den am häufigsten auftretenden stürmischen westlichen und südwestlichen Winden im Schutz des niederländischen Festlandes. Bei Ostwinden ist zwar theoretisch die Streichlänge des Windes zwischen den Dollartdeichen gleich derjenigen für die westlichen Watten bei Westwinden. Bei Ostwinden wird jedoch in der Emsmündung die Steighöhe der Tiden regelmäßig vermindert. Bei stürmischen Ostwind-Wetterlagen laufen die Tiden zum Teil um

mehr als 1 1/2 m niedriger als die rein astronomisch bedingten Tiden auf. In diesen Fällen sind die westlichen Dollartwatten gar nicht vom Wasser bedeckt.

Auch hydrographisch liegt das westliche Dollartwatt in einem Gebiet mit geringer Strömungsaktivität des Wassers. Die Tidewassermenge, welche das westliche Dollartwatt füllt, wird diesem aus der Bucht von Watum zugeführt. Sie wird nach den Durchflußmessungen in der Bucht von Watum abzüglich des zwischen Bucht von Watum und Dollart liegenden Flutspeicherraums überschläglich eine Größenordnung von 25 Mio m<sup>3</sup>/Tide ausmachen. Aus dieser Größe und der Lage der höchsten Rücken des westlichen Dollartwatts ist abzuleiten, daß vom Tidewasser der Bucht von Watum etwa der Raum von Vak 7, 8, 9, 13, 14, 18 und 19 nach der Einteilung des Berichts über die Messung von 1969/70 gefüllt wird (siehe Abb. 33 und 34). Die Wasserscheide zwischen dem Wasser aus der Bucht von Watum und dem aus dem Ostfriesischen Gatje läuft demzufolge mittig über die Heringsplaat, dem Gebiet mit der im mittleren Dollart höchsten Sedimentationsgeschwindigkeit.

Das westliche Dollartwatt wird nach dem vorstehend Ausgeführten um die Landspitze der Hoek van Reide herum gefüllt. Die von Gerritsen (1956) ausgesprochene Vermutung, daß die schnelle Abnahme der Rinnen im westlichen Dollartteil auf die Errichtung von Bauwerken auf dem Geisesteert zurückzuführen sein wird, muß daher schon aus diesem Grunde in Frage gestellt werden. Es werden vermutlich eher durch die von Natur aus "indirekte" Anströmung des westlichen Watts die Effekte der turbulenten Umsetzung von kinetischer in potentielle Energie in der aus der Emsmündung einlaufenden Tideströmung erheblich reduziert.

Bei der Betrachtung von Teilgebieten des Dollart im Bericht über die Messung von 1969/70 wird darauf hingewiesen, daß die Gebiete ohne wesentliche Aufhöhung in der Periode 1952-1970 oder mit

Höhenabnahmen hauptsächlich in den nördlichen und östlichen Randgebieten liegen. Der im Bericht angegebenen Begründung kann zugestimmt werden, daß für die Fächer entlang dem Geiserücken die dort festgestellte teilweise Höhenabnahme auf die Errichtung des Geise-Leitdamms 1960 - 65 zurückzuführen ist. Es wurde jedoch durch den Anschlußteil dieses Leitdamms an den Deich bei Pogum der Wasseraustausch zwischen Ems und Dollart nie völlig unterbunden. Die im dortigen Watt durchbauten Priele haben den Leitdamm immer wieder durchstoßen. Es ist nach ersten vergeblichen Versuchen, die Lücken mit nicht zu hohem Kostenaufwand zu schließen, aufgegeben worden, die Durchströmung zu verhindern. Der Wasseraustausch erfolgt hier nach Beobachtungen des WSA Emden zugunsten des Emders Fahrwassers. Er hat die Aufhöhung in unmittelbarer Nähe des Leitdamms niedriggehalten oder sogar Material abgetragen.

Für die Gebiete entlang dem deutschen Dollartdeich kann mitgeteilt werden, daß ihre in der Periode 1952 - 1970 festgestellte Entwicklung eine gleichsinnige Fortsetzung ihres Verhaltens vor diesem Zeitabschnitt ist. Das geht aus einer Untersuchung der Periode 1938 - 1951 im deutschen Dollartteil hervor. In Abb. 34 sind die Ergebnisse der niederländischen Untersuchung 1921 - 1952 durch die Ergebnisse der deutschen Messungen 1938 - 1951 ergänzt worden. In den eingezeichneten Fachbegrenzungen der niederländischen Untersuchung 1952 - 1969/70 zeigt sich für die Periode 1938 - 1951, daß sich Fach 12 mit einer Sedimentationsgeschwindigkeit von etwas über 1 cm/Jahr in gleichem Maße wie in der neuen Untersuchung aufgehört hat und daß in den Fächern 17 und 22 bereits vor 1952 Nullerhöhung bis Höhenabnahme zu beobachten war, wie dies auch in der Periode 1952 - 1970 der Fall ist.

Mit diesen Zusätzen und den im vorhergehenden Besprechungsabschnitt gegebenen Erläuterungen kann zusammenfassend ausgesagt werden, daß sich das Dollartwatt im Höhenbereich über N.A.P. in den Perioden 1921 - 1952 und 1952 - 1970 in unveränderter Sedimentationsgeschwindigkeit weiterentwickelt hat. Nur in der un-

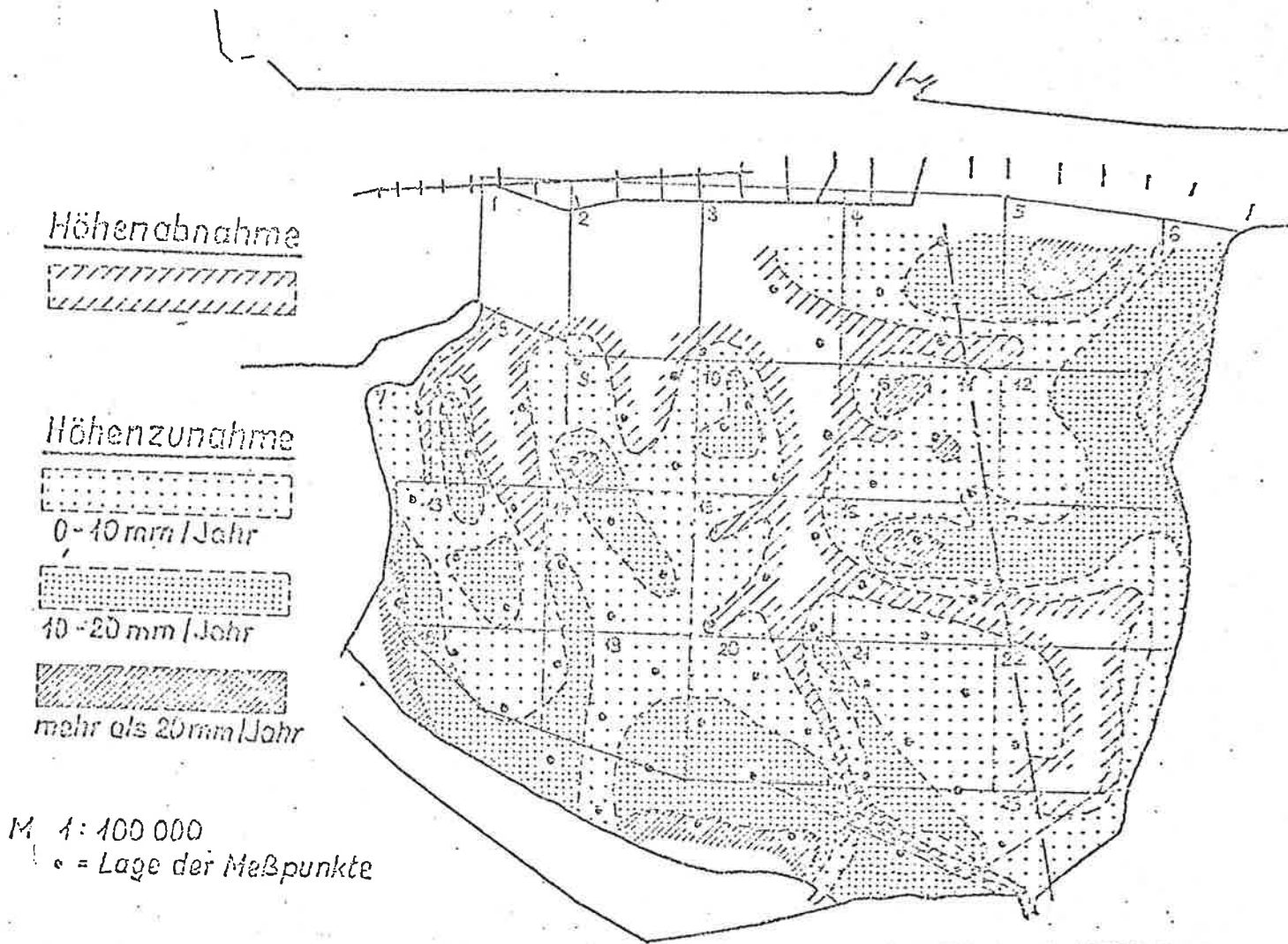


Abb. 34 = Höhenänderung im Dollart 1921 bis 1952  
( im deutschen Dollart 1938 bis 1951 )

mittelbaren Nachbarschaft des Geise-Leitdamms ist infolge der durch dieses Bauwerk geänderten Abflußverteilung die Sedimentation zurückgegangen. Zum Teil ist Boden abgetragen worden.

Im Höhenbereich unter N.A.P. höht sich das Dollartwatt schneller als im Mittel des Gesamtdollart auf. Da die Messungen 1921 - 1952 in diesem Bereich nicht eine gleichgroße Anzahl von vergleichbaren Meßwerten erbracht haben wie die neueren Messungen 1952 - 1970, kann nicht erkannt werden, ob hierin eine Änderung gegenüber dem früheren Verhalten eingetreten ist.

#### 2.3.4 Die Entwicklung der Rinnen des Dollart

Natürliche oder künstliche Veränderungen im Nachbarbereich der Emsmündung können auf die Entwicklung des Dollart eingewirkt haben. In diesem Falle müssen sie als zeitlich parallele Abläufe in den Kartierungen beider Gebiete zu erkennen sein.

Einer Unregelmäßigkeit in der Bewegung der Hauptrinne des Dollart (Karte von 1932) wird unter diesem Gesichtspunkt nachgegangen. Gleichzeitig mit ihr erfolgt eine Umlagerung der Hauptrinne im Gatjebogen. Diese ist wegen ihres wiederholten Auftretens als dominierender Vorgang zu erkennen. Die im Kartenbild 1932 verzeichnete Rückschwenkung und Erweiterung der Hauptrinne des Dollart sowie ein Rückgang der Verlandung im nordwestlichen Dollartwatt wären eine logische Folge. Diese Änderungen sind in ihrer Größenordnung jedoch so wenig bedeutend, daß ein Zusammenhang mit der Rinnenverlagerung im Gatjebogen nicht mit Sicherheit nachzuweisen ist.

Die mit der Umleitung der Ems zu verbindende Regelung des Gatjebogens sieht dort einen Rinnenverlauf vor, welcher dem um etwa 1932 entspricht. Eine ähnlich günstige Entwicklung im Rinnen- und Wattgebiet des Dollart wie zu jener Zeit ist damit zu erwarten. So begrenzt in ihrem Ausmaß wie die damaligen Umstellungen werden auch die Folgen der Emsumleitung für den Dollart sein.

In den vorangehenden Besprechungsabschnitten ist an Hand der nivellitischen Vermessungen des Dollart dem Verlauf der Aufhöhung des Dollartwatts nachgegangen worden. Für die höherliegenden Wattbereiche läßt sich nach den seit 1921 für größere Flächen des inneren Dollart vorliegenden Erhebungen keine Änderung der Sedimentationsgeschwindigkeit erkennen, welche nicht ihre Begründung in der natürlichen Entwicklung des Dollart oder in unmittelbar benachbart vorgenommenen menschlichen Eingriffen findet.

Die beobachtete schnelle Höhenzunahme während der Periode 1952 - 1970 in den Höhenbereichen unter N.A.P. bis zu N.A.P. -3m hinunter erfolgt im Übergangsbereich vom Watt zu den Rinnen des Dollart. Wenn diese Verengung des Rinnenteils nicht ohne weitere Diskussion als eine Folge des Rückgangs des Speicherraums im inneren Dollart angesehen

werden soll, muß auch mit Einflüssen gerechnet werden, welche gegebenenfalls aus geänderten hydrodynamischen Bedingungen des übrigen Emsmündungsgebiets in den Dollart hinein wirken. Dieser Möglichkeit soll im folgenden nachgegangen werden.

Äußere Einflüsse, welche die Entwicklung des Dollart bestimmen, lassen sich für zurückliegende Zeiten gegebenenfalls indirekt aus den Veränderungen ableiten, welche auch die übrige Emsmündung unter den vermutlich gleichformenden Kräften erfahren hat. Eine solche etwaige Parallelität im Verhalten ist jedoch nur soweit zurück zu verfolgen, wie verlässliche Vermessungsunterlagen für beide Gebiete zur Verfügung stehen.

Für den Mündungstrichter der Ems ist, beginnend mit der ersten, nach modernen wissenschaftlichen Methoden der Kartographie durchgeführten Aufnahmen von Beutemps-Beaupré aus dem Jahre 1812, von mehreren Autoren die Entwicklung der Rinnen beschrieben worden (Gerritsen, 1952; Niebuhr, 1952; Ramacher, 1952; Lang, 1958). Die bemerkenswertesten Erscheinungen in dieser Entwicklung sind der seit etwa einem Jahrhundert kontinuierliche Rückgang der Querschnittsgrößen, der in allen angeführten Untersuchungen als eine Folge der Abnahme der Flutrauminhalts des Dollart gesehen wird und die Umlagerung der Wasserführung von der Bucht von Watum auf das Ostfriesische Gatje. Die der letzteren Erscheinung entsprechende Änderung der Querschnittsgrößen ist in Abb. 35 dargestellt.

Die für eine Untersuchung der Entwicklung der Rinnen im Dollart geeignete älteste topographische Aufnahme dürfte nach niederländischem Zitat (Gerritsen, 1956) im Jahre 1853 durchgeführt worden sein. Anscheinend existiert die nach dieser Aufnahme gedruckte niederländische Stabskarte jedoch nur in einer Form, welche erhebliche Berichtigungen im Jahre 1902 und kleinere Korrekturen im Jahre 1912 erfahren hat. Eine skizzenhafte Nachzeichnung ist dem niederländischen Bericht über die Vermessung des Dollart im Jahre 1952 (Gerritsen, 1956) beigegeben. Auf die am gleichen Ort mit dem Verlauf

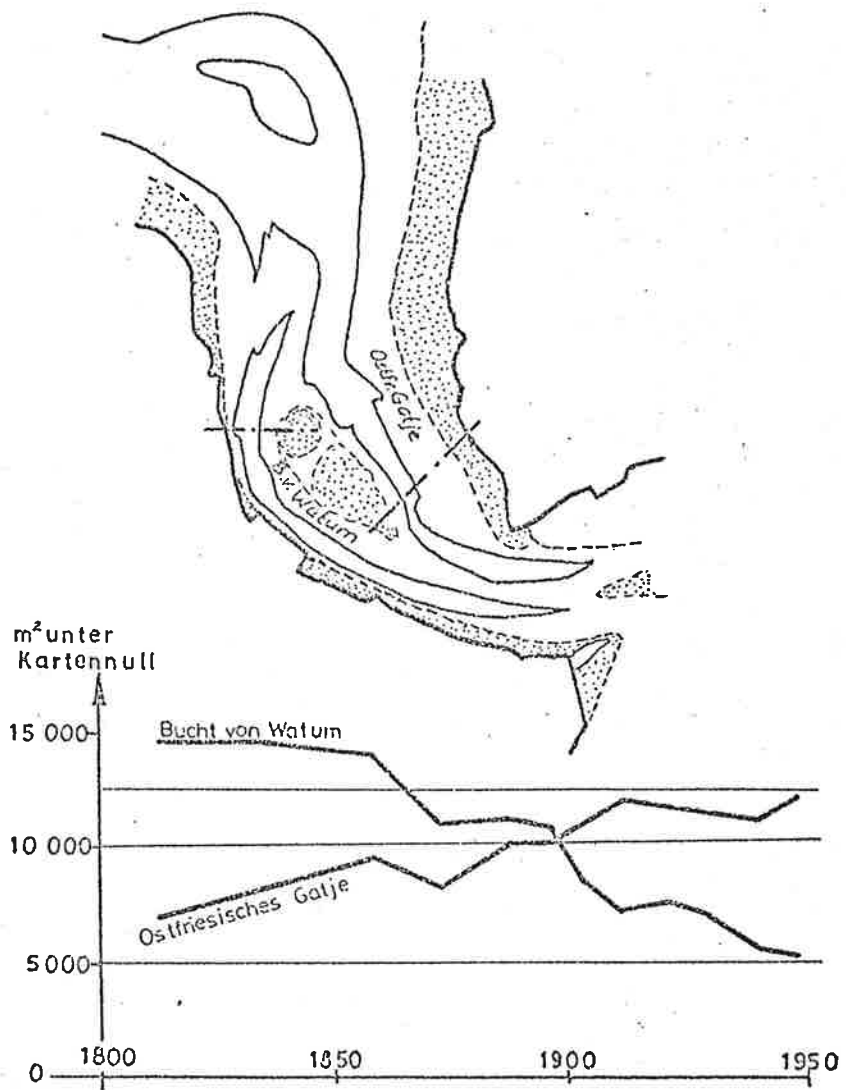


Abb. 35 : Änderung der Größe der Durchflußflächen der Bucht von Watum und des Ostfriesischen Gatje



der Niedrigwasserlinie und der Vorlandgrenze wieder-  
gegebenen späteren Aufnahmen des Dollart wird im  
folgenden Bezug genommen.

Nach der anscheinend zeitlich schwer einzuordnenden  
Aufnahme von (1853) 1902 (1912) erfolgte eine Neu-  
aufnahme des gesamten Dollart im Jahre 1921. Auf den  
dabei nivellitisch eingemessenen Höhen von Punkten  
des Dollartwatts beruht der bereits mehrfach ange-  
sprochene Höhenvergleich mit dem Nivellement des Jah-  
res 1952. Eine Karte des Rinnenverlaufs des Dollart  
vom Jahr 1932 macht wegen der ungewöhnlich eingehenden  
Darstellung von Einzelheiten den Eindruck, als sei sie  
nach Luftaufnahmen angefertigt worden (Gerritsen, 1956).  
Niederländische Autoren stellen daher in Zweifel, ob  
die Angaben dieser Karte auf das gleiche Niveau wie die  
übrigen bezogen ist. Nach den Nivellements und Lotungen  
der Jahre 1952 und 1969/70 wurden die neueren Dollart-  
karten gezeichnet.

In den Abb. 36 bis 39 sind die Niedrigwasserlinien je-  
weils zweier zeitlich aufeinander folgender Karten des  
Dollart der vorstehend angegebenen Reihe zusammengezeich-  
net worden. Es wurde angenommen, daß die Hochwasserlinie  
mit dem in den Kartennachzeichnungen (Gerritsen, 1956)  
angegebenen Verlauf der Vorlandkante gleichgesetzt werden  
darf. Die Hochwasserlinie bezeichnet somit für ein Rinnen-  
system die zugehörige landseitige Grenze des Flutspeicher-  
raums. Aus den Darstellungen in den genannten Anlagen ist  
dann folgendes abzuleiten:

Die Rinnen im Dollartteil westlich des Groote Gat ver-  
lieren in dem Maße an Nord-süd-Ausdehnung, wie ihnen durch  
das Vorrücken der Hochwasserlinie an Flutspeicherraum oder  
durch Neueindeichung an Einzugsflächen entzogen wird. Es  
lassen sich zumindest nicht mit Notwendigkeit andere Ein-  
flüsse für die Veränderungen der Rinnen in diesem Dollart-  
bereich voraussetzen, wenn man berücksichtigt, daß die  
zeitliche Einordnung der frühesten Darstellung (1933 ??,  
1912 ?) und bei der Karte von 1932 der Bezugshorizont un-

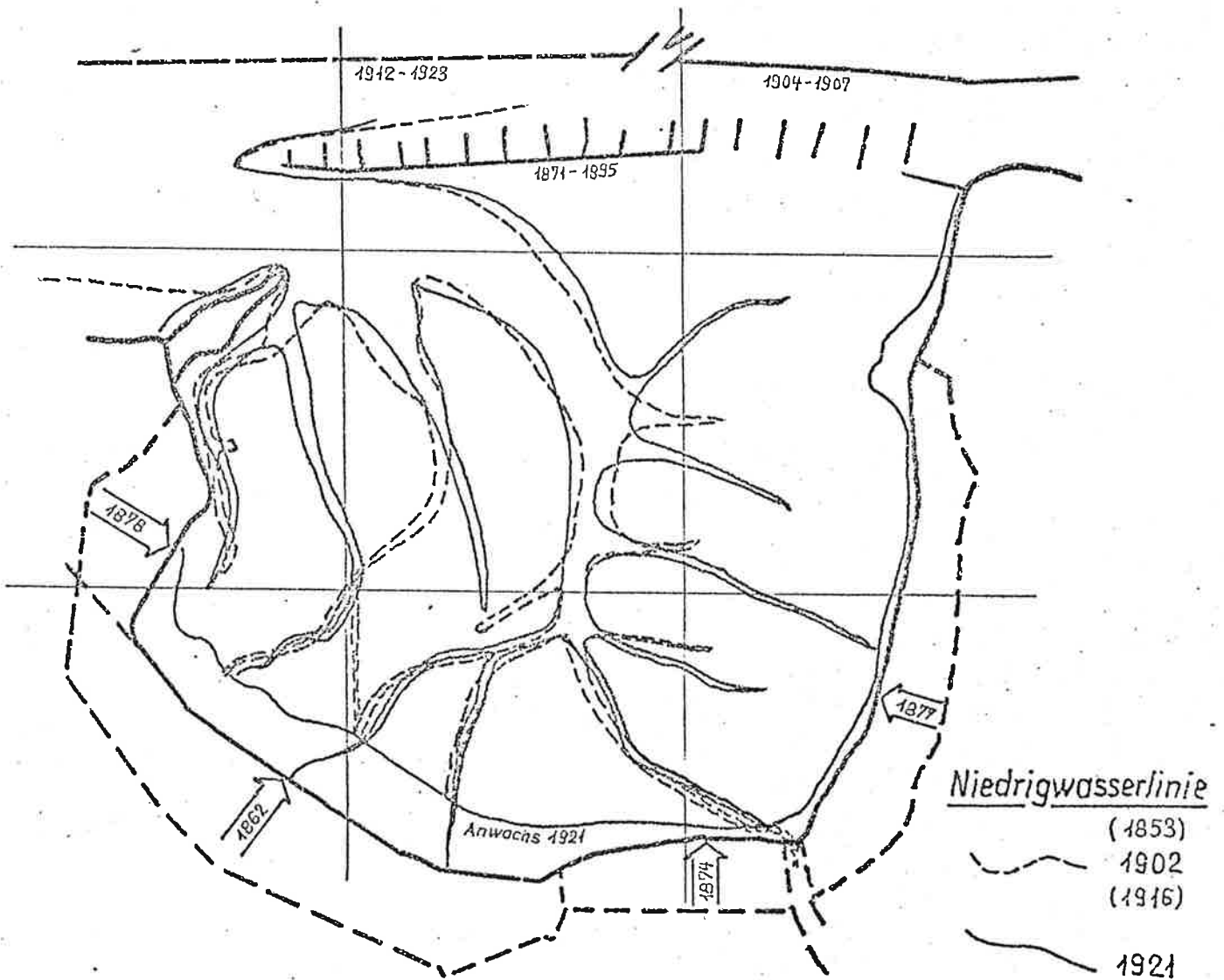


Abb. 36

# Dollartrinnen

(1853) 1902 (1916) und 1921

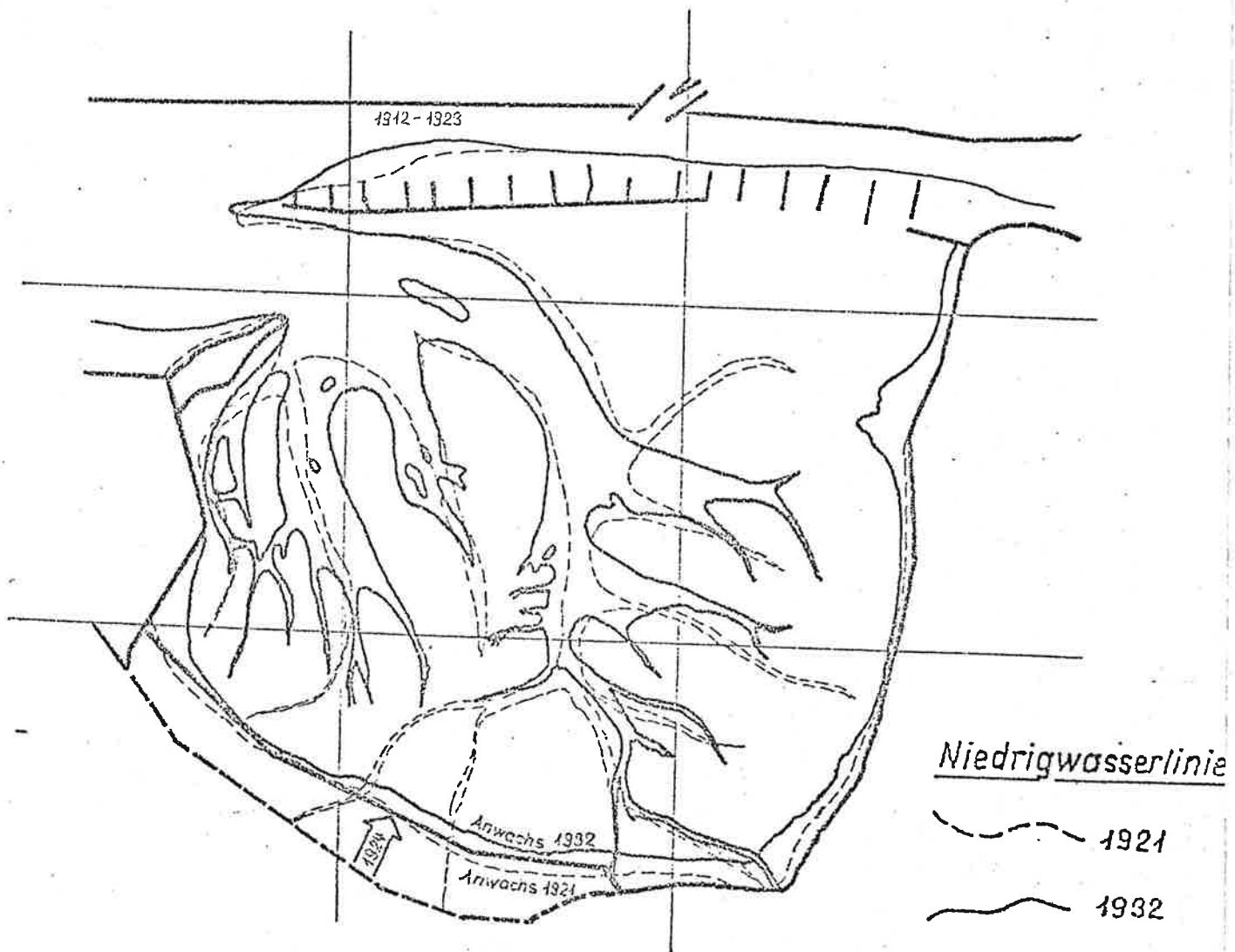


Abb. 37

Dollartrinnen  
1921 und 1932

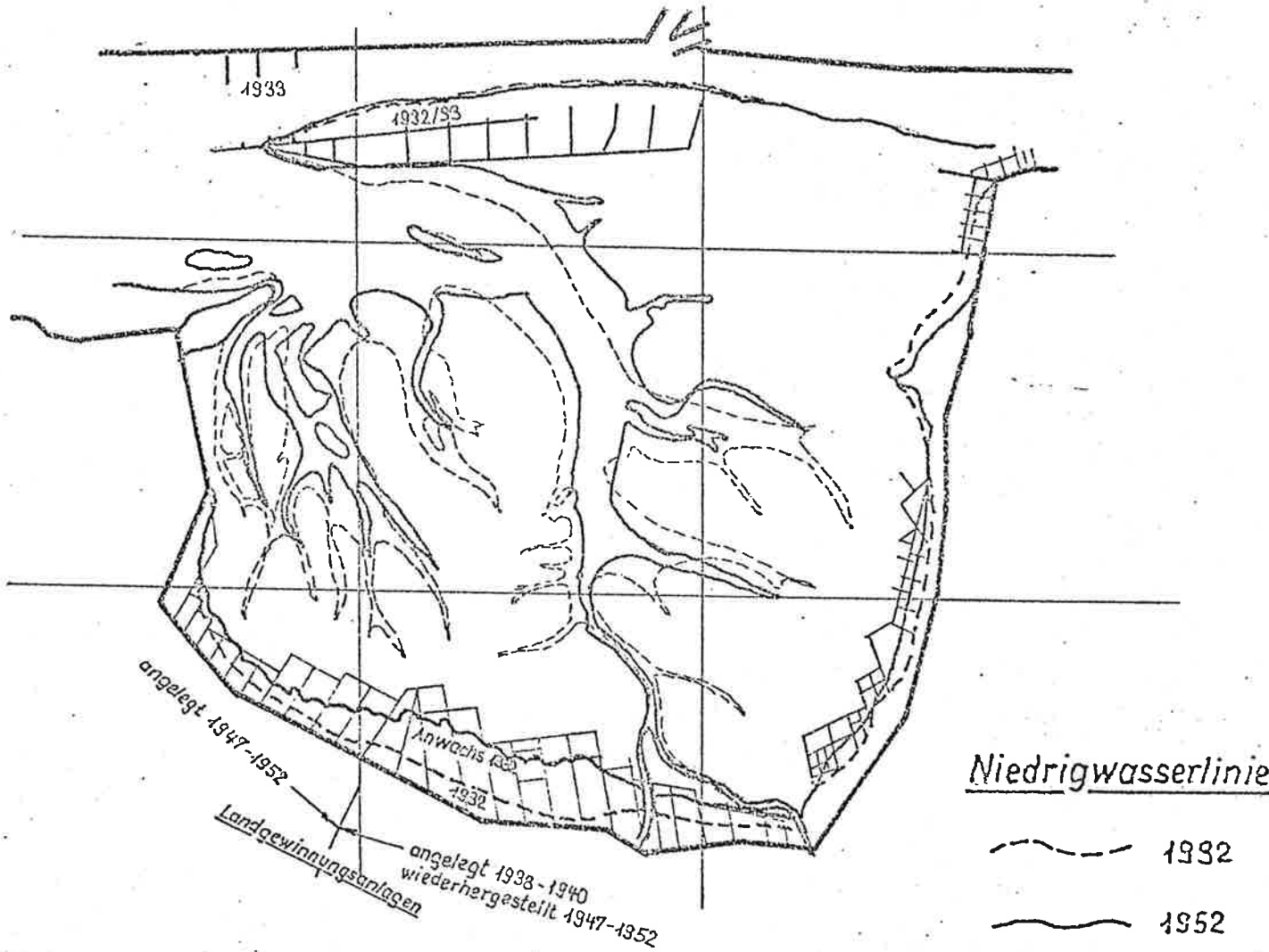


Abb. 38

Dollartrinnen  
1932 und 1952

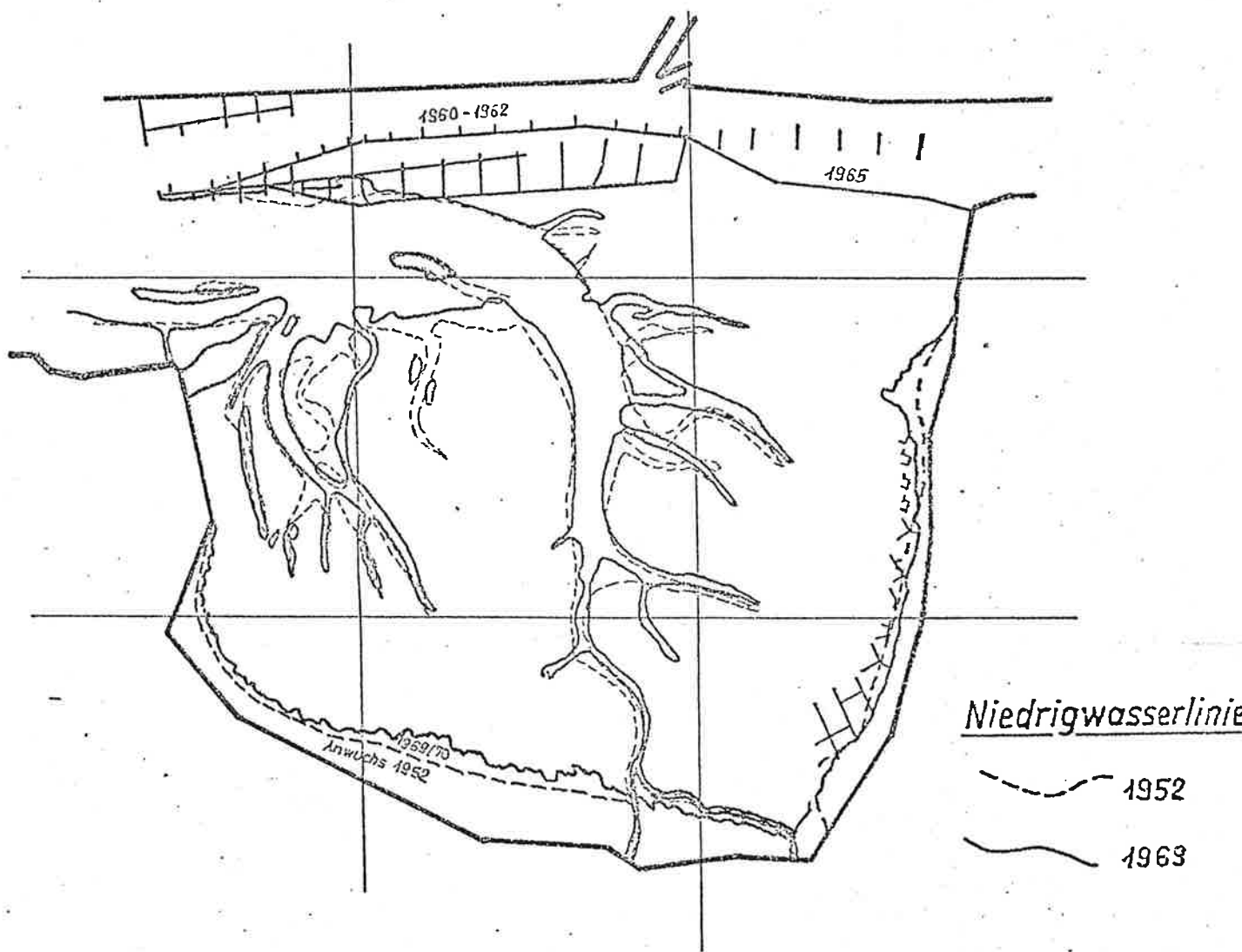


Abb. 39.

Dollartrinnen

1952 und 1969

sicher sind. Im westlichen Dollartteil sind danach keine Änderungen im Umfang des Rinnensystems auszumachen, für welche nicht allein eine Änderung der Größe des Flutspeicherraums des Dollart infolge natürlicher oder künstlich geförderter Aufhöhung des Watts als Begründung anzunehmen wären.

Auch das östlich des Groote Gat gelegene Dollartwatt hat nach den dort durchgeführten Nivellements - abgesehen von begrenzten Bereichen im südöstlichen Teil - an Höhe zugenommen. Als Folge davon wäre zu erwarten, daß die in dieses Watt hineinlaufenden Rinnen sich entsprechend der Flutraumverminderung verkürzen und das Groote Gat sich unter Querschnittsabnahme mehr nach Westen, zur Hauptachse des Dollart hin verlegt. Solche, dem Ablauf der internen Prozesse des Dollart entsprechende Änderung der Rinnenlage erfolgt jedoch in der großen Tendenz des Ablaufs von 1902 nach 1921 (Abb. 36) und von 1921 nach 1952 (Abb. 37 und 38) im beweglicheren Nordteil des Groote Gat nicht. Im Südteil wird die Bewegung des Groote Gat möglicherweise durch wenig tief unter der Oberfläche liegende feste holozäne Schichten behindert. Der nördliche Bogen nimmt von 1902 auf 1921 an Breite zu und verschiebt sich in östlicher Richtung. Diese Bewegung setzt sich in der Periode von 1921 auf 1952 fort mit einer Rückwärtsbewegung gegen die Zeit der Aufnahme von 1932 (Abb. 37).

Die beschriebene Bewegung des Groote Gat entspricht in der Richtung ihrer Ostverschiebung nicht dem, was nach der Abnahme der Leistungsfähigkeit der östlichen Watträume zu erwarten ist. Daß diese Bewegung von einer zeitweilig rückläufigen abgelöst wird, liegt auch nicht in der Tendenz der großflächig einsinnig gerichteten Entwicklung des Dollart. Die beobachteten Erscheinungen sprechen daher für eine Einwirkung in die Rinnenentwicklung des Dollart von außen. Die rückläufige Bewegung um das Jahr 1932 erfolgt nur vorübergehend. Es ist daher zu folgern, daß die Ursache nicht in der Errichtung eines Regelbauwerks sondern im natürlichen Ablauf eines Prozesses zu suchen ist, welcher sich

mit einer vorübergehenden Stagnationsphase durchsetzt. Ein solcher Prozeß ist die zunehmende Durchströmung des Ostfriesischen Gatje und die durch die Paapsand-Geise-Barre behinderte bzw. umgelenkte Einströmung in den Dollart.

Die Änderung des Verhältnisses der Größe der Querschnittsfläche des Ostfriesischen Gatje zu derjenigen der Bucht von Watum seit etwa dem Anfang des vorigen Jahrhunderts (Abb. 35) läßt keinen anderen Schluß zu, als daß sie die Folge einer fortschreitenden Umverteilung der Tidewassermenge von der westlichen auf die östliche Hauptrinne der inneren Emsmündung ist. Diese zunehmende Benachteiligung der Bucht von Watum hat sich bis in die neuere Zeit fortgesetzt, wie an der weiteren Abnahme ihres Rinnenquerschnitts zu erkennen ist. Für die letzten zurückliegenden drei Jahrzehnte läßt sich die aus der Morphologieänderung gefolgerte Umverteilung der Wassermengen auch durch Strömungsmessungen belegen. Schlüsse über die Stromverteilung vor dieser Zeit können aber bestenfalls durch einige wenige Einzelmessungen gestützt werden. In der Regel muß der Strömungsverlauf mit der dabei gebotenen Vorsicht aus dem Grundriß- und Querschnittsbild der stromführenden Rinnen abgeleitet werden.

In der näheren Umgebung des Dollartmundes ist das Relief der Gewässersohle so wenig prägnant gegliedert, daß die zu beobachtende Veränderung der Kleinformen bisher noch keine Rückschlüsse auf die flächenhafte Änderung der Lage und Ausdehnung der Dollarttrinnen zugelassen hat. Eine niederländische Untersuchung der Größe des Querschnitts im Dollartmund ab 1949 (van der Meulen, 1972) weist auf die Parallelität zur Änderung der Gesamtgröße der Tidewassermenge im Dollart hin. Diese Untersuchung wurde bei der BAW auf zeitlich weiter zurückliegende Gewässerbettaufnahmen ausgedehnt (Abb. 40). Außer einer untypischen (?) fortschreitenden Abnahme der Tiefe des im südlichen Teil des Querschnitts gelegenen Kolkes durch Vorrücken des südlichen Unterwasserufers sind über die in der niederländischen Untersuchung angesprochene, allgemeine Abnahme der Querschnittsgröße hinaus anscheinend keine Veränderungen in der Gliederung des

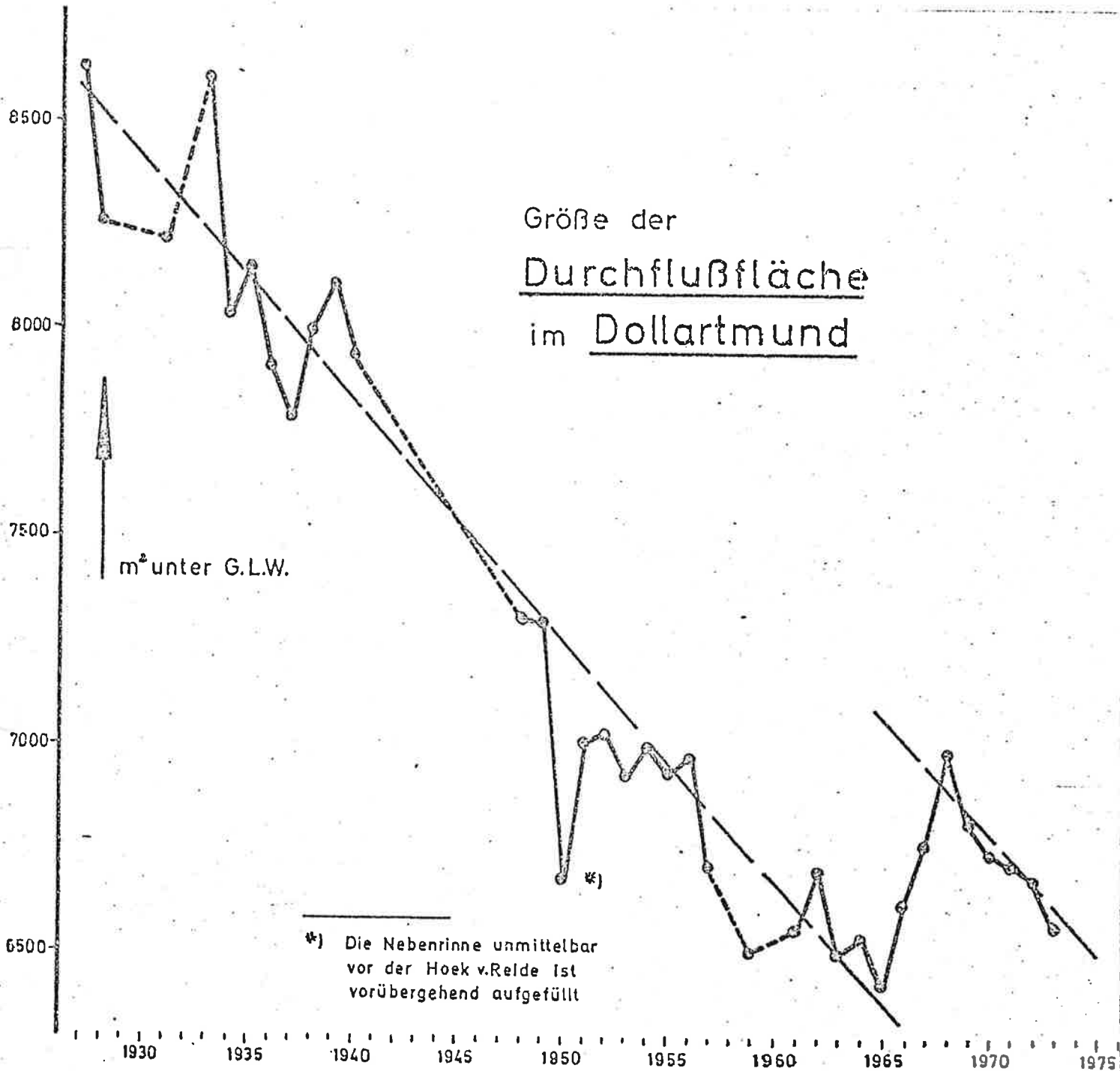


Abb.40 : Größe der Durchflußfläche im Dollartmund in den Jahren 1927 bis 1973 ( nach deutschen Aufnahmen )



Querschnitts des Dollartmundes zu erkennen, welche auf Unregelmäßigkeiten in der Entwicklung des Dollart schließen lassen. Parallelen zu dieser Entwicklung des Dollart, welche auf Einwirkung von außen zurückzuführen sind, müssen daher weiträumiger in der Morphologie der Emsmündung gesucht werden.

Die gleichsinnig fortschreitende Verlagerung des Bogens des Groote Gat nach Nordosten, welche nicht der Entwicklung der angrenzenden Dollartwatten entspricht, kann auch der allgemein zu erwartenden Verstärkung der Bogenkrümmung eines natürlich "mäandernden" Gewässers (Buchtbildung) zugeschrieben werden. Es ist damit nicht zwingend die fortschreitende Zunahme der Wasserführung des Ostfriesischen Gatjes in Verbindung zu bringen. Die Betrachtung konzentriert sich daher auf die Unregelmäßigkeit in der Verlagerung des Bogens des Groote Gat um die Zeit der Aufnahme des Dollart im Jahre 1932. Zeitlich parallel zu diesem Ereignis im Dollart erfolgt in der nächsten Nachbarschaft, im Gatjebogen, eine gegenüber der allgemeinen Entwicklung im Dollart relativ schnell verlaufende Veränderung im Rinnensystem, welche die Richtung der Einströmung in den Dollart merkbar beeinflusst haben kann. Die Buchtbildung der Hauptrinne im Gatjebogen durchläuft in dieser Zeit eine charakteristische Phase.

Die Hauptrinne im Gatjebogen zeigt in sehr starkem Maße die Tendenz, die Bogenkrümmung zu verstärken, indem der Bogen-scheitel nach Südwesten wandert (Abb. 43). Im Extremzustand ist dann dieser Bogen für die Flut, besonders aber wohl für die Ebbströmung hydrodynamisch so ungünstig gelegen, daß sich ein Ansatz für eine neue Rinne in der Richtung der Bogensehne bildet. Es ist nicht bekannt, ob sich diese neue Rinne in natürlicher Weiterentwicklung zur neuen Hauptrinne ausformen kann. Bisher wurde die natürliche Entwicklung in ähnlichen Phasen der Buchtbildung im Gatjebogen durch fördernde oder gegenwirkende Baggerungen beeinflusst.

# Wanderung der Haupttrinne im Gatjebogen 1901 bis 1969

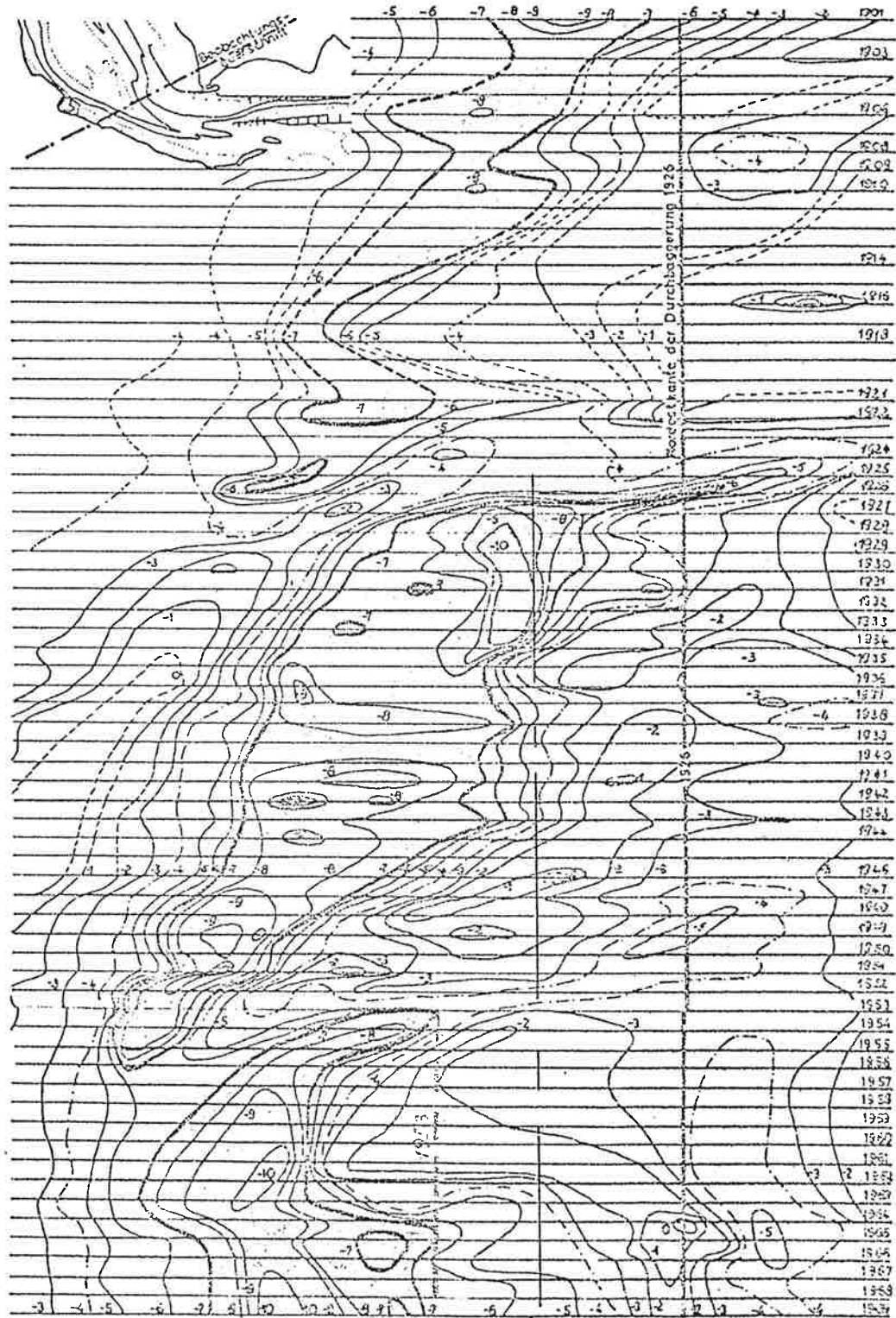
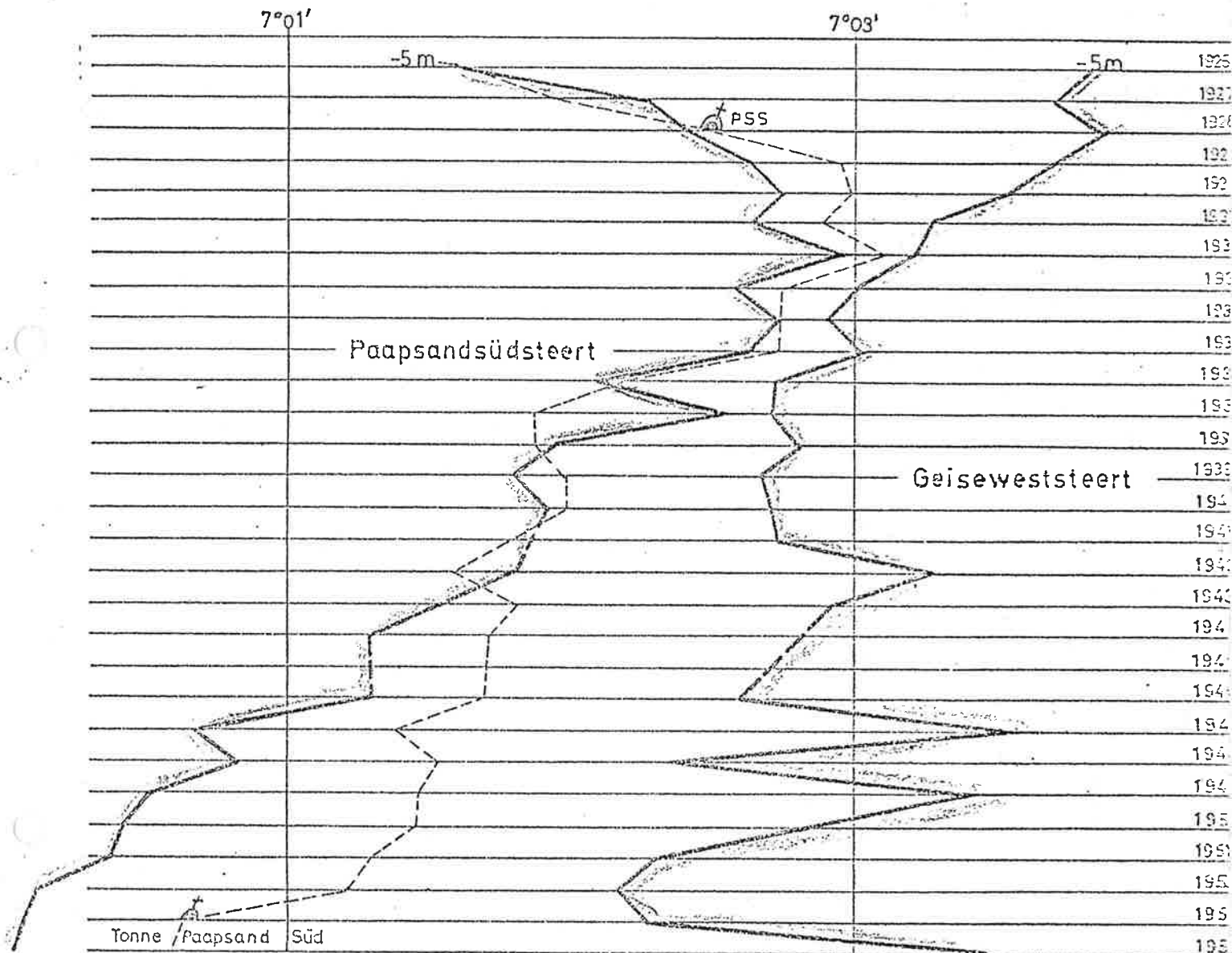
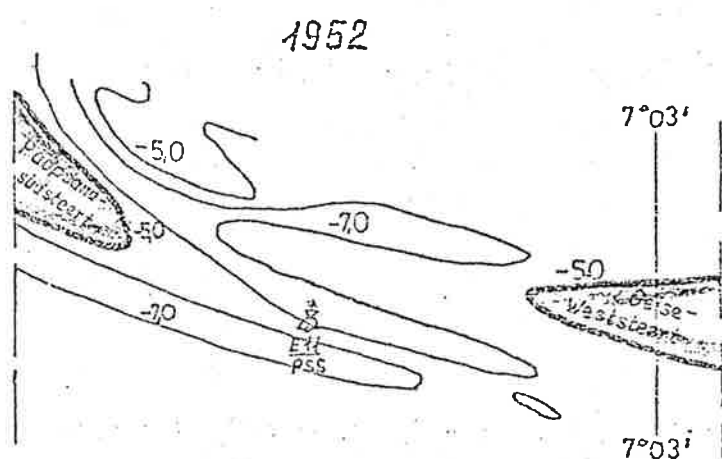
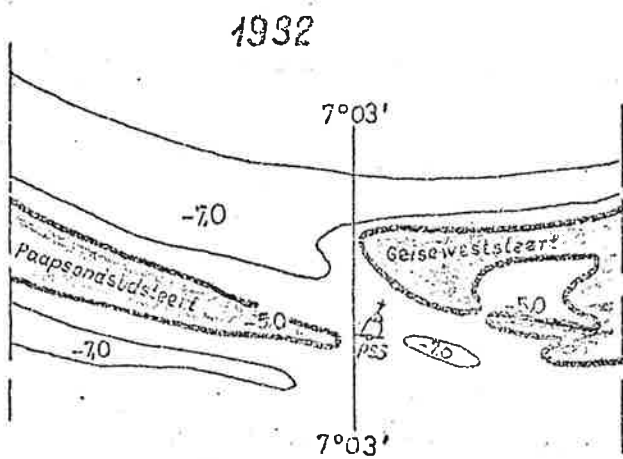


Abb. 41: Wanderung der Haupttrinne im Gatjebogen 1901 - 1969  
(. Zeit-Weg-Plan ). mit der Lage der Durchbaggerungen  
1926 (-----), 1953 (---) und derjenigen der Ems-  
umleitung (—).

# Wanderung von Paapsandsüdsteert u. Geiseweststeert



M=1:25000



M=1:50000

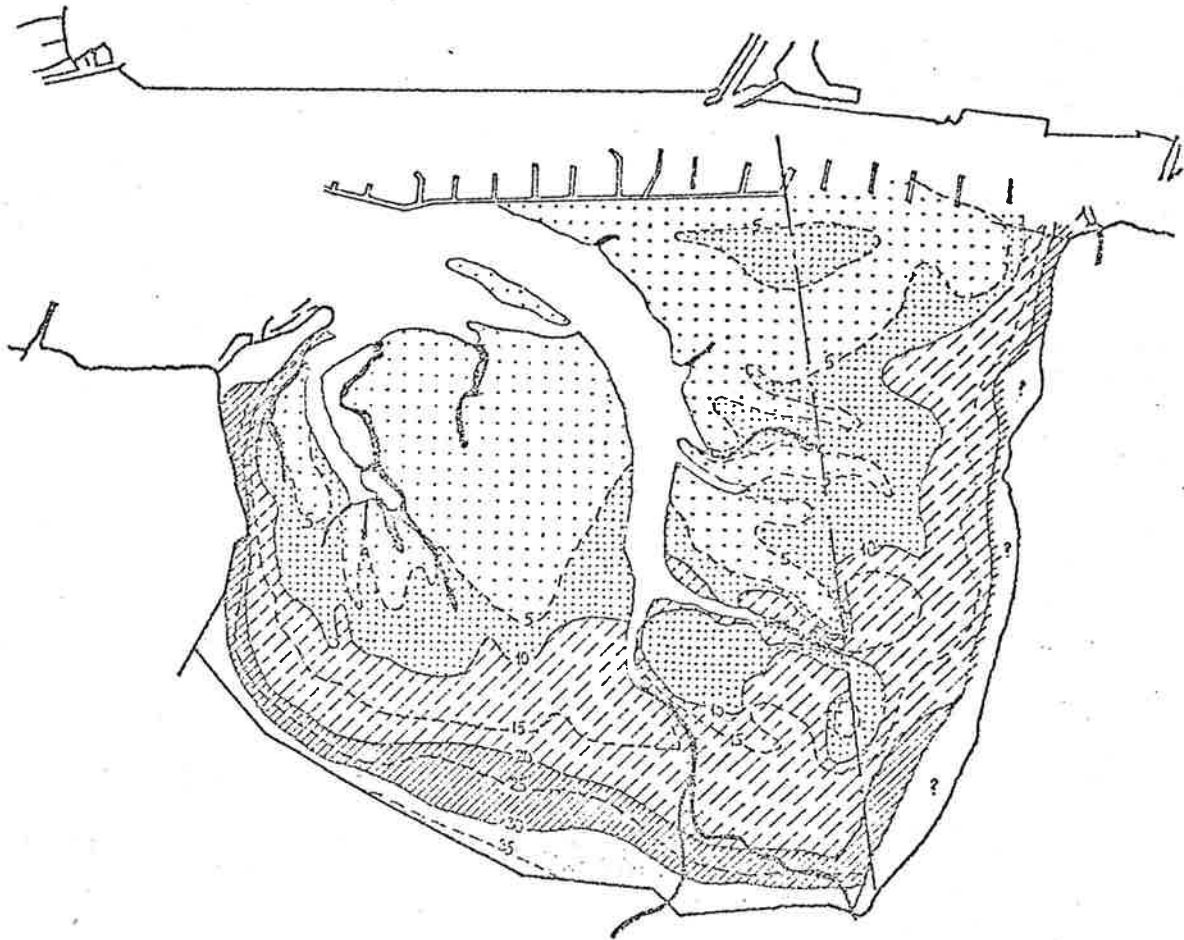


Abb. 47 : Tongehalt (Korngrößen  $\leq 0.002\text{ mm}$ ) in der Schicht 0-25 cm in den Jahren 1952 (niederländischer Dollart) und 1953 (deutscher Dollart) in Prozent

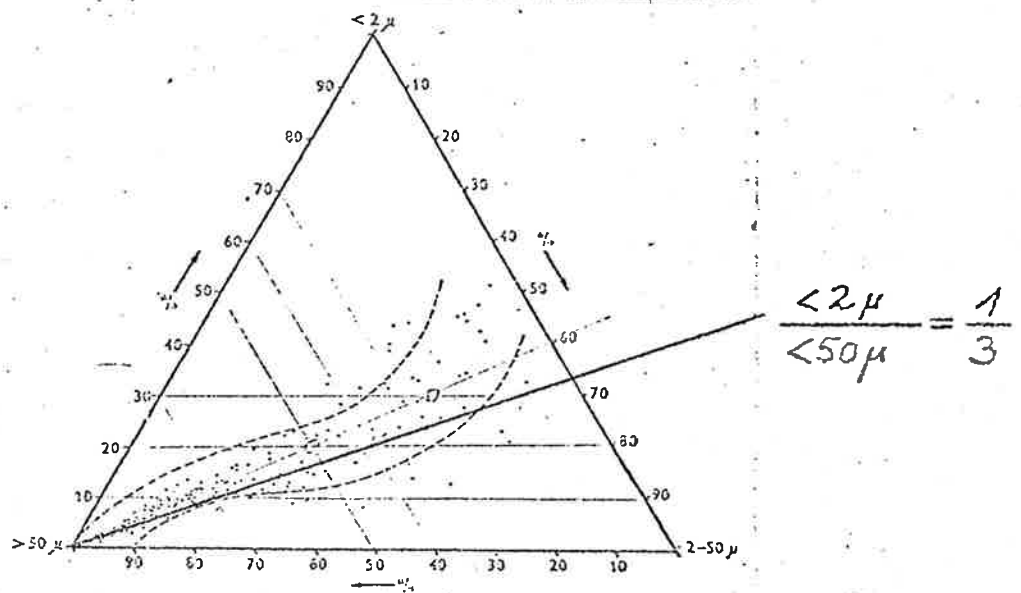


Abb. 48. - Dreieckdiagramm mit den Dollart-Eems Proben

in der Karte des Tongehalts angegebenen Prozentanteil an Ton multipliziert werden, Wiggers (1960) gibt weiter in einem Dreiecksdiagramm die Kornzusammensetzung der Dollart-Ems-Proben an, welche 1952/53 gesammelt wurden (siehe Abb. 48). Die Untersuchungswerte liegen in diesem Diagramm in einem ziemlich schmalen Bündel, so daß man mit der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen dem Prozentsatz der Korngrößenanteile des Tons zu dem der Korngrößen bis 0,05 mm Durchmesser hinauf das hier angestrebte Ermittlungsergebnis nicht wesentlich verfälscht. Es wurde das Verhältnis "Ton: Korngrößen < 0,05 mm" mit 1 : 3 so angenommen, daß es nach dem Dreiecksdiagramm der Abb. 48 den Anteil der Korngrößen < 0,05 mm sicher etwas zu groß wiedergibt (siehe die in Abb. 48 eingezeichnete Proportionalitätsgerade).

Nach der vorstehend beschriebenen Ermittlung betrug der Tongehalt der in der Periode 1952 - 1970 auf dem Dollartwatt zwischen Tide-niedrigwasser und Hochwasser sedimentierten Menge 7 % und der daraus hochgerechnete Anteil an Korngrößen > 0,05 mm kaum mehr als 20 %. Die den Flutraum des Dollart verkleinernde Sedimentation erfolgt also zu 80 % durch sandiges Material. Wenn dazu in einer in der Zeit der Bodenkartierung durchgeführten Durchfluß- und Feststoffgehaltsmessung im Dollartmund (23.6.49) festgestellt wurde, daß von den rund 12.500 t mit der Tide im Dollartmund bewegten Feststoffen 6500 t Feststoffe von Korngrößen > 0,05 mm sind, also mehr als 50 %, so ist daraus zu schließen, daß die Sedimentation der Feinkornanteile im derzeitigen Dollart ungünstigere Bedingungen findet als die des Sandes. Es müßten nach dem von Wiggers für die Dollartpolder angegebenen Prozentsatz von gut 50% allein für die Korngrößen < 0,016 mm sich die Sedimentationsverhältnisse infolge der Verkleinerung des Dollart und der dadurch geänderten hydrodynamischen Umstände erheblich verändert haben.

Gerritsen (1956) berechnet dazu überschläglich, daß von der mit dem Flutwasservolumen in Suspension in den Dollart getragenen Feststoffmenge nur " gut 2 % " auf die Dauer sedimentiert werden: Mit  $134 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ /Tide Flutwassermenge und einem Feststoffgehalt von  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$  nach Meßresultaten aus dem Jahre 1952 werden in jeder Tide  $2,7 \cdot 10^4 \text{ m}^3$  Feststoffe in den Dollart getragen. Das sind im Laufe eines Jahres  $19 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ /Jahr. Im Dollart

dauerhaft sedimentiert werden  $0,5 \text{ cm/Jahr}$  auf  $8000 \text{ ha}$ , also  $0,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  (Gerritsen, 1956).

Nach theoretischen Überlegungen sowie nach dem Ergebnis der Durchmischungsversuche im Modell der BAW in Hamburg-Rissen wird nach einer Umleitung der Ems an fast allen Orten des Dollart der Salzgehalt des Tidewassers geringer. Wie entsprechende Laboruntersuchungen ausweisen (Whitehouse, Jeffrey, Debricht, 1960; van Olphen, 1963), geht bei einer solchen Abnahme des Salzgehalts die Neigung zur Flockenbildung zwischen den suspendierten feinkörnigen Feststoffteilchen zurück. Ebenso vermindert sich die Größe ihrer Sinkgeschwindigkeit (Whitehouse, u.a. 1960, Krone 1962). In der Tendenz reduzieren diese beiden Umstände nach einer Emsumleitung den Feinkornanteil im Sediment sowie die absolute Größe der Sedimentation im Dollart. Die Auswirkung auf die künftige Verlandung des Dollart läßt sich jedoch nicht zahlenmäßig angeben.

#### 2.3.6 Die Auswirkung einer Umleitung der Ems durch den nördlichen Dollart auf die Sedimentation im Dollart

Aus den für die vorliegende Stellungnahme gesichteten und gewerteten Untersuchungen über den bisherigen Verlauf der Sedimentation im Dollart kann der Schluß gezogen werden, daß durch eine Umleitung der Ems durch den Dollart mit Abschleusung des Emders Fahrwassers die Sedimentation im Dollart nicht beschleunigt wird. Im einzelnen sind dafür folgende Gründe anzuführen:

Die Sedimentationsgeschwindigkeit im Dollart folgt Gesetzmäßigkeiten, welche überwiegend durch seine eigene Konfiguration bestimmt sind. Die örtliche Verteilung und die Kornzusammensetzung des Sediments haben während des Zeitraumes der zurückliegenden Wiederverlandung des Dollarteinbruchs ihren Charakter nachweislich geändert. Es ist aber offensichtlich dafür die durch das Abnehmen des Flutraumes geänderte Hydrodynamik des inneren Dollart und nicht die natürlich oder künstlich veränderte des übrigen Emsmündungstrich-

*nicht stark  
schal problem*

ters verantwortlich zu machen. Der Wechsel vom stark feinkörnigen Sediment der älteren Dollartablagerungen zur fast ausschließlich sandigen Zusammensetzung im heutigen Dollart (2.3.5) zeigt den Übergang vom ruhigen Absetzbecken der alten Einbrucharme zu dem der primären Tideenergie ausgesetzten heutigen Restdollart.

Die Wirkung äußerer Einflüsse auf die Topographie des heutigen Dollart ist zu erkennen. Sie tritt jedoch - von örtlich eng begrenzten Bereichen abgesehen - hinter dem Fortgang der natürlichen Verlandung zurück. Wesentliche Änderungen in Stärke und Richtung der Einströmung durch den Dollartmund haben sich in diesem Jahrhundert nur in geringfügigen Verlegungen der Rinnen des Dollart bemerkbar gemacht (2.3.4). Bedeutende Änderungen des Feststoffhaushalts der inneren Emsmündung haben das Sedimentationstempo nicht nachweisbar beeinflusst. Der Entzug einer Feinkornmenge von der Größenordnung der Gesamtmenge der Dollartablagerungen eines Jahres durch die in diesem Maß verstärkten Jahresbaggerungen im Emden Fahrwasser und dem Hafen Emden während der letzten Periode der Dollartuntersuchungen hat sich nicht auf die Sedimentationsgeschwindigkeit ausgewirkt (2.3.2). Letzteres ist darauf zurückzuführen, daß die Sedimentation im Dollart wesentlich stärker durch die Dynamik der Wasserbewegung als durch das Angebot an suspendierten Feststoffen im Wasser bestimmt wird (2.3.5). Ein weiterer Punkt ist die offensichtlich nicht sehr enge Verbindung zwischen den in den Dollart bzw. in das Emden Fahrwasser einströmenden Wasserkörpern in qualitativer Hinsicht. Die infolge der verstärkten Baggerungen im Emden Fahrwasser verstärkt dort und im anschließenden seewärtigen Bereich konzentrierte suspendierte Feststoffmenge (2.2.5.2) hat sich nicht über den Gesamtquerschnitt so ausgebreitet, daß eine Auswirkung davon auf den Dollart ausgegangen ist.

Die derzeit in der dem Emden Fahrwasser zufließenden Tidewassermenge hohe Konzentration an suspendierten Feststoffen ist eine Auswirkung der verstärkten Baggerungen (2.2.5.2).

Werden diese in der Zukunft eingestellt, so ist auch mit einem erheblichen Rückgang der Feststoffkonzentration zu rechnen. Bei einer Umleitung der Ems durch den Dollart wird in der Rinne im nördlichen Dollart eine Sinkstoffkonzentration zu erwarten sein, welche wesentlich niedriger als die z.Z. im Emden Fahrwasser zu beobachtende ist. Eine Differenz gegenüber derjenigen des heutigen Dollarts würde sich bei völliger Durchmischung mit der doppelt so großen Dollartwassermenge entsprechend reduzieren und dadurch den Dollart kaum belasten. Da im Durchschnitt der Verhältnisse eines Jahres in der nördlichen Dollarttrinne nach einer Umsumleitung ein weniger salzhaltiges Wasser vorhanden sein wird als im Wasser des Dollart, wird infolge des daraus resultierenden Dichteunterschiedes das evtl. im Feststoffgehalt etwas höhere Emswasser in der nördlichen Dollarttrinne konzentriert zusammengehalten werden und wie bisher ohne Belastung des Dollart abfließen.

Das Dollartwatt westlich des Groote Gat wird vom Tidewasser aus der Bucht von Watum aufgefüllt (2.3.3). Die Möglichkeit einer Vermischung von ggfs. etwas höher feststoffhaltigem Wasser am Nordufer der ungeleiteten Ems mit demjenigen aus der Bucht von Watum ist sehr gering. Es ist daher kaum wahrscheinlich, daß durch eine evtl. Qualitätsänderung hinsichtlich der bei einer Umsumleitung geänderten Feststoffverteilung das niederländische Dollartwatt betroffen würde.

Bei der Verstärkung der Anströmung des Dollart aus dem Ostfriesischen Gatje heraus, wie sie sich im Laufe dieses Jahrhunderts durch die natürliche Entwicklung ergeben hat, wurde anscheinend die Rinne des Groote Gat erweitert, zumindest ist ihre Versandung zeitweise verzögert worden. Es ist zu erwarten, daß die Umleitung der Ems einen ähnlichen Effekt auf die Rinnenentwicklung im Dollart ausübt. Da der umzuleitenden Ems eine ihrer Wasserführung entsprechende künstlich vertiefte Rinne geschaffen werden soll, vermindert sich evtl. ein aus ihrer verstärkten Anströmung resultierender günstiger Effekt. Es ist dann aber zumindest keine Verschlechterung der Entwicklung des Groote Gat und des östlichen Dollartwatts gegenüber dem bisherigen Verhalten zu befürchten.



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

( B A W )

Untersuchung

der Sedimentationsverhältnisse in der Unterems und im Dollart

nach einer geplanten Emsumleitung

Aufgestellt von: Außenstelle Küste  
Fachgruppe  
Seebaugrundlagen

Hamburg, im Oktober 1977

### 3. Die Geiserinne

Bei einer Umleitung der Ems durch den Dollart bestimmt die Menge des Tidewassers und des abzuführenden Oberwassers die Querschnittsgröße des Geisedurchstichs (Geiserinne). Eine solche Dimensionierung nach der hydrodynamischen Leistungsfähigkeit erfüllt gleichzeitig ausreichend die hinsichtlich der Fahrwassertiefe zu stellenden Forderungen der Schifffahrt zu den Häfen an der oberen Ems. Auch der Querschnitt im Dollartmund muß entsprechend der durch die Umleitung vergrößerten Tidewassermenge erweitert werden. Die erforderliche Querschnittsgröße soll durch eine einmalige Ausbaggerung so hergestellt werden, daß sie weiterhin ohne Unterhaltungsbaggerungen von der Strömung im natürlichen Gleichgewicht von Sedimentation und Erosion gehalten wird. Das Verfahren der Dimensionierung und der Berechnungsgang werden besprochen. Die Ergebnisse von Untergrunderkundungen zeigen günstige Voraussetzungen für eine auch in der Linienführung stabile Lage der Geiserinne.

Bei einer Abdämmung oberhalb der Einfahrt zum Hafen Emden ist die Ems durch den nördlichen Dollart umzuleiten. Der dadurch entstehende neue Emslauf wird als Geiserinne bezeichnet (Abb. 1, S. 5). Es ist vorgesehen, hierfür die Geise westlich der Landspitze von Pogum zu durchbaggern und diesem Durchstich eine Querschnittsgröße zu geben, welche in ihrer Wassertiefe den Anforderungen der Schifffahrt zu den Häfen der oberen Ems genügt. Weiter soll der Durchflußquerschnitt hydrodynamisch in der Lage sein, dem oberen Emslauf die ihm bisher durch das Emdener Fahrwasser zugeleitete Tidewassermenge in unverringelter Größe weiterhin zufließen zu lassen.

Auch in dem im nördlichen Dollart an den Durchstich anschließenden Abschnitt der Emsumleitung reichen die dort von Natur gegebenen Wassertiefen nicht aus, um neben der bisher dort fließenden Dollartwassermenge zusätzlich die Wassermengen der Ems zu- und abzuführen. Zwischen Dollartmund und Geisedurchstich wird jedoch die Größe der durch Neubaubaggerungen herzustellenden Querschnitte allein durch die Forderung nach ausreichender hydrodynamischer Leistungsfähigkeit bestimmt. Für den Schiffsverkehr sind die Wassertiefen hinlänglich vorhanden.

### 3.1 Die Ermittlung stabiler Querschnitte

Zur Dimensionierung stabiler Querschnitte sind für die verschiedensten Flußläufe die Bemessungsregeln empirisch ermittelt worden. Solche Regeln lassen sich nur dann auf andere Reviere übertragen, wenn ihre dortige Verwendbarkeit nachgewiesen ist. Bei der Bemessung der Querschnitte der Emsumleitung wird daher die Gleichung von O'Brien angesetzt. Für sie sind weltweit Anwendungsbeispiele anzuführen. Es ist jedoch erforderlich, auch den halbempirischen Ansatz von Bruun und Gerritsen hinzuzuziehen. Dieser ist von den Autoren z.T. nach ihren Erfahrungen in der Emsmündung entwickelt worden. In 3.1.1 wird der Ansatz nach Bruun/Gerritsen auf die vorliegende Aufgabe geeicht. Berechnungsgrundlagen und Ergebnisse werden in 3.1.2 dargelegt und diskutiert. In 3.1.3 wird die Größe der Querschnitte des Geisedurchstichs entsprechend dem Verhalten des Emders Fahrwassers in Zeiten ohne Baggerungen bemessen.

Beim Anpassen der Querschnitte an die erhöhten zukünftigen hydrodynamischen Anforderungen soll durch einmaliges Ausbaggern den neuen Querschnitten möglichst gleich jene Form und Größe gegeben werden, welche sonst die Natur unter der Wirkung der verstärkten Strömungen in einem längerdauernden Erosions- oder Sedimentationsprozeß ausbilden würde. Ein solches natürlich oder künstlich hergestelltes Gleichgewichtsprofil ändert im Wechsel der meteorologisch und astronomisch bedingten Tideschwankungen auch weiterhin seine Querschnittsgröße und evtl. auch seine Grundrißlage. Durch günstige Wahl der Linienführung und der Querschnittsdimension kann aber in der Regel erreicht werden, daß diese Veränderungen quasiperiodisch um eine Gleichgewichtslage nur in eingeschränktem Maße erfolgen, so daß die an den Querschnitt gestellten nautischen und hydrodynamischen Forderungen nicht beeinträchtigt werden. Das soll auch hier das Ziel der Dimensionierung sein. Nachstehend soll erst die Stabilität hinsichtlich der Querschnittsgröße besprochen werden. Die Stabilität in der Grundrißlage wird in 3.6 abgehandelt.

Die Bemessung stabiler Querschnitte ist eine der grundsätzlichen Aufgaben des Wasserbaus. Es sind daher auf dieses Problem die verschiedensten Untersuchungen angesetzt und die unterschiedlichsten Lösungen gefunden worden. Ausführlich werden solche Gleichgewichtsbetrachtungen verschiedener

Autoren z.B. von Bruun und Gerritsen diskutiert (1960). Die historische Entwicklung der Studien über die Stabilität von Kanälen in alluvialen Böden ist von Lane (1955) dargestellt. Meist wird in den empirisch gewonnenen Regime-Gleichungen die Größe der Durchflußfläche als Funktion einer Potenz der Durchflußmenge angegeben, oft nur durch einen konstanten Faktor miteinander verbunden. Solche Ansätze, welche man mit Erfolg für die Dimensionierung von Bewässerungskanälen anwandte, unterscheiden sich wohl in der Größe des Faktors, aber oft kaum in ihrem Aufbau von solchen, welche für Tidequerschnitte gefunden wurden.

Die oben genannte Besprechung von Bruun und Gerritsen (1960) läßt demgegenüber bei den hydrodynamisch-physikalisch begründeten Ansätzen für die Querschnittsstabilität die Vielzahl der bei ihrer Anwendung zu berücksichtigenden Faktoren erkennen. Es erscheint daher zweckmäßig, einen möglichst weitgehend auf Empirie gestützten Ermittlungsweg zu beschreiten und nicht ungezwungen einen hochgradig theoretisch begründeten Ansatz mit vielen zu bestimmenden Parametern zu verwenden.

Einer der einfachen empirischen Ansätze ist der von O'Brien aus dem Jahre 1931. Er beruht auf der Beobachtung an sandigen Küsten, daß einer abzuführenden Tidewassermenge in der Regel ein ihrer Größe proportionaler Durchflußquerschnitt entspricht. Die Formulierung von O'Brien ist seit ihrer ersten Veröffentlichung auf die unterschiedlichsten Fälle angesetzt worden. Nach der dadurch möglichen Überarbeitung gibt O'Brien 1969 den von ihm erkannten Zusammenhang in der sehr einfachen Form wieder:

$$F_{\min} = 6,6 \times 10^{-5} \times T \quad *)$$

mit  $F_{\min}$  kleinste Durchflußfläche im Eintrittskanal eines Tidegebiets, gemessen unter mittlerem Seespiegel, in  $m^2$

T Tidevolumen der täglichen oder Springtide in  $m^3$

\*) Der Faktor ist hier aus der Originalfassung entsprechend der Verwendung der Maßgrößen Quadratmeter und Kubikmeter umgerechnet worden.

Gegenüber anderen empirisch gewonnenen Ansätzen (siehe Bruun und Gerritsen, 1960), welche meist nur für ein bestimmtes Tidegebiet aufgestellt wurden, hat die Gleichung von O'Brien (1969) den Vorteil, daß sie an Tide-mündungen der amerikanischen Atlantik-, Golf- und Pazifikküste angesetzt wurde, in Mexiko, Südostasien und Australien und sowohl auf Tidebuchten und Lagunen wie auf Tideflußmündungen. Giese (1971) hat den Ansatz von O'Brien auf die deutschen Tideflußmündungen angewandt. Er wies nach, daß für diese die Größe der Querschnittsfläche unter MTnw zur Tidewassermenge der Flut im Verhältnis 1 : 5 bis  $7 \times 10^{-5}$  steht. Mit dieser Proportionierung lassen sich die deutschen Tideflüsse gut in das Beobachtungsmaterial von O'Brien über die Mündungen der amerikanischen Tideflüsse einordnen, wie von Giese dargestellt ist. Die angegebene Streubreite des Verhältnisses von Querschnittsgröße zur Wassermenge wird von Giese auf die unterschiedliche Korngröße des (sandigen) Sohlenmaterials und eine evtl. vorhandene küstenparallele Sanddrift zurückgeführt.

Bei dem vorliegenden Problem der Dimensionierung eines Querschnitts zur Vereinigung zweier bisher getrennt nebeneinanderliegender Tideflußarme ist die Größe des Faktors im Ansatz nach O'Brien oder Giese ohne Bedeutung. Für den zu vergrößernden Querschnitt, hier z.B. den Dollartmund, ergibt sich nach O'Brien/Giese:

$$\begin{aligned} \frac{F_{\text{Ausbau}}}{F_{\text{vorhanden}}} &= \frac{a \times 10^{-5} \times (T_{\text{Dollart}} + T_{\text{Ems}})}{a \times 10^{-5} \times T_{\text{Dollart}}} \\ &= \frac{T_{\text{Dollart}} + T_{\text{Ems}}}{T_{\text{Dollart}}} \end{aligned}$$

Diese Formulierung befriedigt nicht ganz wegen des bekannten Umstands, daß durch die vergrößernde Vertiefung des Querschnitts dessen hydrodynamische Leistungsfähigkeit erhöht wird, so daß der Ausbauquerschnitt bei gleichem Wasserabfuhr-

vermögen kleiner ausgeführt werden kann, als oben gefordert ist. Wesentlicher als diese Feinheit ist jedoch die Unklarheit der Aussage, auf welchen Querschnittsanteil sich die obengenannte Proportion beziehen muß: Der Zusammenhang zwischen Tidevolumen und Größe der Durchflußfläche wurde von O'Brien für die Fläche "unter mittlerem Seespiegel" gefunden. Giese weist einen gleich engen Zusammenhang zur Flächengröße unter dem mittleren Tideniedrigwasser nach. Für den Dollartmund z.B. verhalten sich jedoch die Flächen unter den beiden angegebenen Bezugsniveaus wie rd. 1,4 : 1. Nach O'Brien wäre also der Ausbauquerschnitt um 40 % größer herzustellen als nach Giese. Eine Entscheidung für eine der beiden Aussagen ist bei den rein stochastisch oder statisch von O'Brien oder Giese gefundenen Abhängigkeiten nicht möglich. Hier muß zur Verdeutlichung eine Formulierung herangezogen werden, welche auf die ursächlichen Abhängigkeiten des Problems von den hydrodynamisch-physikalischen Faktoren eingeht.

Eine praktikabele Formulierung dieser Art wird von Bruun und Gerritsen (1960) gegeben. Sie hat gegenüber anderen Gleichungen den Vorteil, daß sie von den genannten Autoren bereits in der Emsmündung erprobt worden ist. In dem Ansatz wird die Größe der Schubkraft angegeben, welche das strömende Wasser auf die Gewässersohle ausübt und welche im Falle der Stabilität ein dynamisches Gleichgewicht zwischen dem An- und Abtransport von Feststoffen im betrachteten Querschnitt bewirkt. Einflüsse der Querschnittsform, der Sohlenungleichförmigkeit, des Sohlenmaterials, des Geschiebetransports, des Feststoffgehalts in Suspension, der Wellenwirkung, des Küstenlängstransports, des Oberwasserabflusses und des Zeitfaktors werden neben dem rechnerischen Schubkraftansatz diskutiert, bleiben aber außerhalb der mathematischen Formulierung. Die Aussage der Gleichung bleibt daher gut übersehbar. Ihre Anwendung ist unkompliziert. Sie ist jedoch wegen der in ihr verwendeten "maßgebenden Schubkraft" oder "Stabilitäts-Schubkraft", in welche durch Anpassung der Gleichung an die Verhältnisse im entsprechenden Naturquerschnitt die vorgenannten Einflüsse eingehen, halbempirisch.

Die Größe der Stabilitäts-Schubkraft wird aus Strömungsmessungen in der Natur im Bezugsquerschnitt aus der bettbildenden maximalen Strömung und der während ihres Auftretens vorhandenen Querschnittsgröße berechnet. Vorausgesetzt wird dabei, daß am Tage der Messung tatsächlich der angenommene Gleichgewichtszustand gegeben war. Das ist jeweils zu diskutieren. Als bettbildende Strömungsverhältnisse werden diejenigen bei Springtide angesehen.

Für den hydraulischen Radius  $R$  und ein Wasserspiegelgefälle  $J$  ergibt sich die Schub- oder Scherspannung (Horizontal-Kraft pro Flächeneinheit der Gewässersohle als Wirkung der Wassersäule auf den Boden) zu

$$\tau = \rho g R J .$$

Setzt man in diesen Ansatz die bekannte Gleichung von Chézy  $v = C \sqrt{RJ}$  ein, so ergibt sich

$$\tau = \rho g \cdot \frac{v^2}{C^2} .$$

Wegen der Schwierigkeit, aus Naturmessungen die Verteilung der Scherspannung über den Querschnitt zu beschreiben, ist es üblich, ihn durch einen Mittelwert zu definieren, d.h. ihn dem Querschnittsmittel der Geschwindigkeit  $V$  zuzuordnen. So sei die mittlere Scherspannung an der Gewässersohle, bei welcher ein Querschnitt unter maximalen Strombedingungen stabil ist, als "Stabilitäts-Scherspannung"  $\tau_s$  bezeichnet. Dabei sind als maximale Strombedingungen die als bettbildend angenommenen der Springtide zu verwenden. Das Problem der Querschnittsstabilität ist damit auf die Ermittlung der Stabilitäts-Scherspannung  $\tau_s$  zurückgeführt.

$$\tau_s = \rho g \frac{V_{\max}^2}{C^2} = \rho g \frac{Q_{\max}^2}{F^2 C^2} ,$$

wobei  $Q_{\max}$  die sekundliche Durchflußmenge und  $F$  die Größe des durchströmten Querschnitts im Augenblick des Auftretens von  $V_{\max}$  sind.

Für die Diskussion des Einflusses der Bodenreibung wird auf die Ausführungen von Bruun und Gerritsen (1960) verwiesen, denen auch die vorstehende Ableitung entommen ist. Den genannten Autoren folgend wird als Reibungswert C verwendet

$$C = 30 + 5 \times \lg F.$$

### 3.1.1 Die Größe der Scherspannung für Stabilität des Durchflußquerschnitts im Dollartmund

Der Querschnitt im Dollartmund in Höhe der Hoek van Reide wird nach einer Umsumleitung eine um rd. 40 % vergrößerte Wassermenge abzuführen haben. Da er im Süden durch das Reider Buitenland (Hoek van Reide) und im Norden durch die Regelungsbauten auf dem Geisesteert in seiner Breitenausdehnung begrenzt ist, muß eine der erhöhten Wasserführung entsprechende Erweiterung des Querschnitts durch Vertiefung der Sohle in der Achse der Geiserinne vorgenommen werden. Die Dimensionen für diese Querschnittsvergrößerung soll der Scherspannungsansatz nach 3.1 liefern. Wie im vorhergehenden Abschnitt besprochen, ist dazu der gegenwärtige Zustand anhand von Strömungsmessungen zu analysieren. Die nachfolgende Tabelle gibt als Ergebnis dieser Untersuchung die Scherspannungswerte für die Maximalbeanspruchung während der durchgeführten Strommessungen in den Spalten 5 (Flut) und 11 (Ebbe) wieder.

Die Streuung der Scherspannungswerte ist offenbar wesentlich durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Meßtide erzeugt worden. In Beziehung gesetzt zur mittleren Hub- bzw. Fallgeschwindigkeit der jeweiligen Tide ( $Thb_F/D_F$  bzw.  $Thb_E/D_E$ ), ordnen sich die Scherspannungswerte zu einer linearen Abhängigkeit (siehe Abb. 49 ).



Maximale Scherspannung  $\tau'_{\max}$  im Querschnitt Dollartmund

Flut

Datum der Messung	$Q_{f\max}$	F	Wasserstand über N.A.P.	$\tau'_{f\max}$	Tidestieg
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	$m^3/s$	$m^2$	m	$Mp/m^2$	cm
21.06.60	6360	8948	- 0,22	0,20	277
23.06.60	7310	9380	+ 0,08	0,24	304
16.06.65	8460	9865	+ 0,52	0,29	321
23.09.71	8010	10390	+ 0,15	0,24	320
9.08.72	7505	9395	- 0,35	0,26	309
10.08.72	9820	10960	+ 0,62	0,32	343
23.04.74 *)	8900	10090	- 0,03	0,31	347

Ebbe

Datum der Messung	$Q_{e\max}$	F	Wasserstand über N.A.P.	$\tau'_{e\max}$	Tidefall
(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
	$m^3/s$	$m^2$	m	$Mp/m^2$	cm
21.06.60	8140	9480	+ 0,15	0,30	291
23.06.60	8660	9855	+ 0,41	0,31	303
16.06.65	9340	9310	+ 0,18	0,40	324
23.09.71	10200	10650	+0,31	0,36	310
9.08.72	10470	10090	+ 0,08	0,43	388
10.08.72	11470	10440	+ 0,30	0,48	398
23.04.74 *)	12450	10535	+ 0,20	0,56	390

\*) Siehe Fußnote auf der folgenden Seite

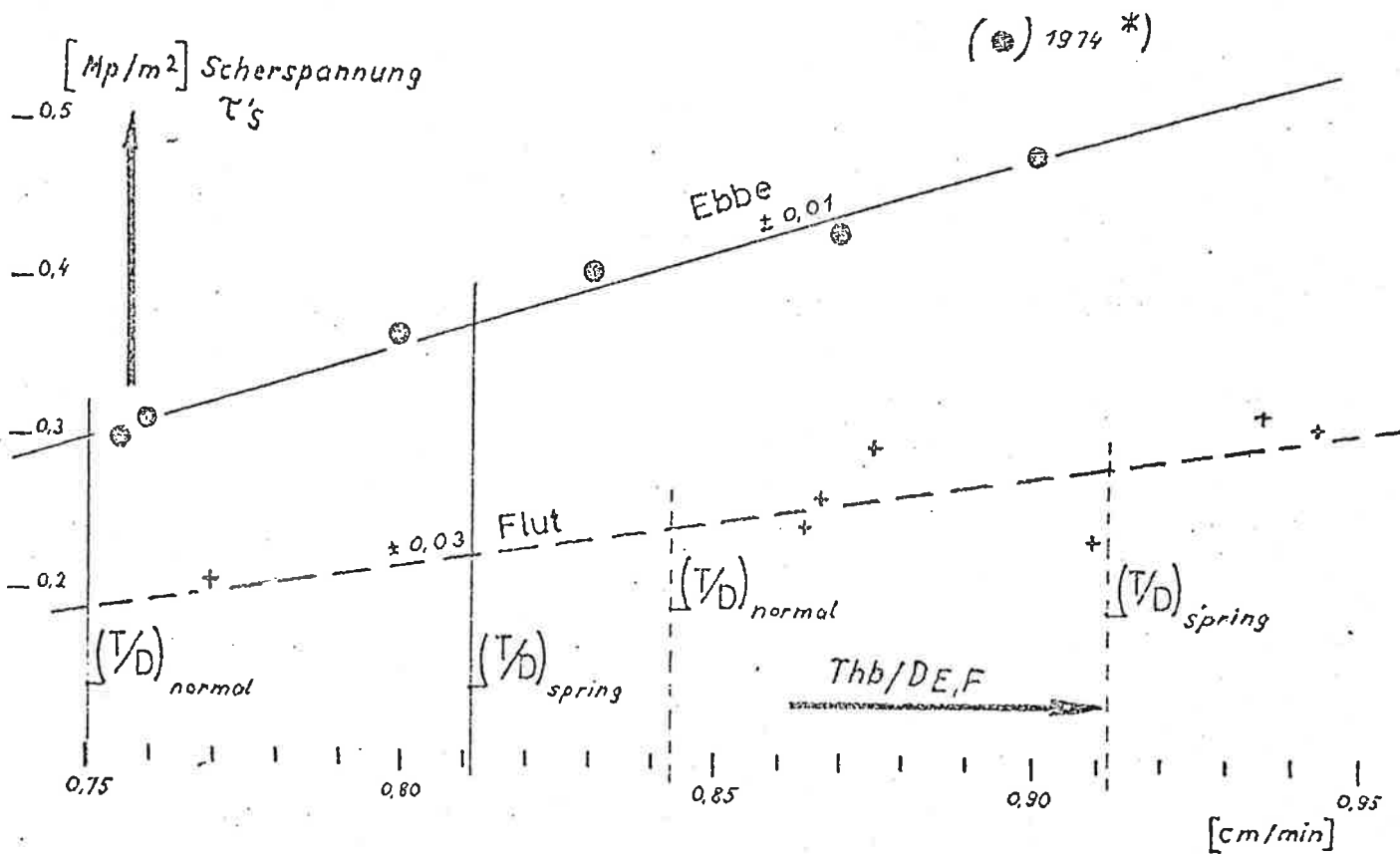
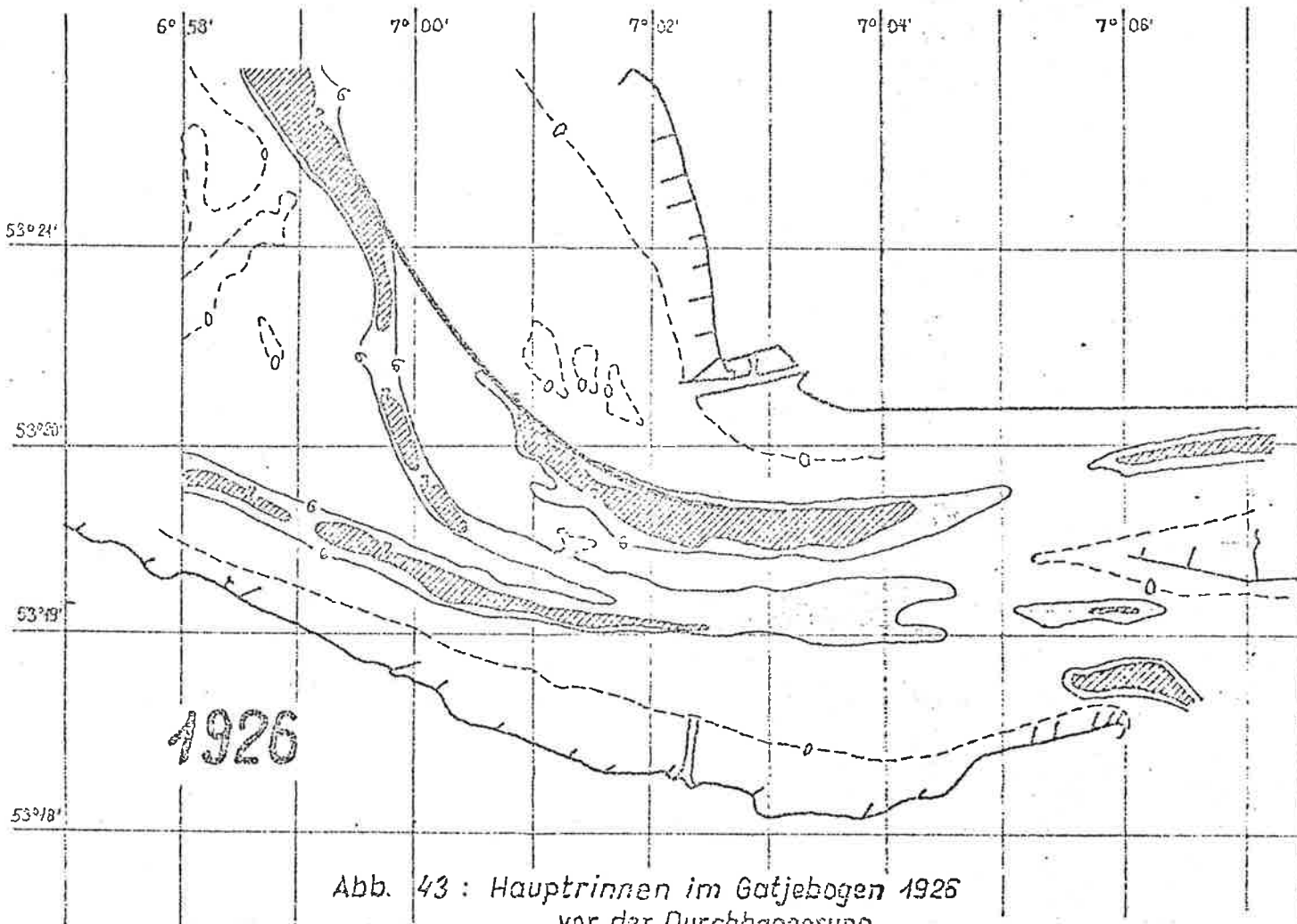


Abb. 49 : Scherspannung als Funktion der Steiggeschwindigkeit

\*) Bei der Messung 1974 wurde der Durchfluß im Gesamtquerschnitt aus der Messung des Durchflusses in nur zwei Meßpunkten des Querschnitts hochgerechnet.



1926

Abb. 43 : Haupttrinnen im Gatjebogen 1926  
vor der Durchbaggerung  
(— Nordostkante der Durchbaggerung 1926)

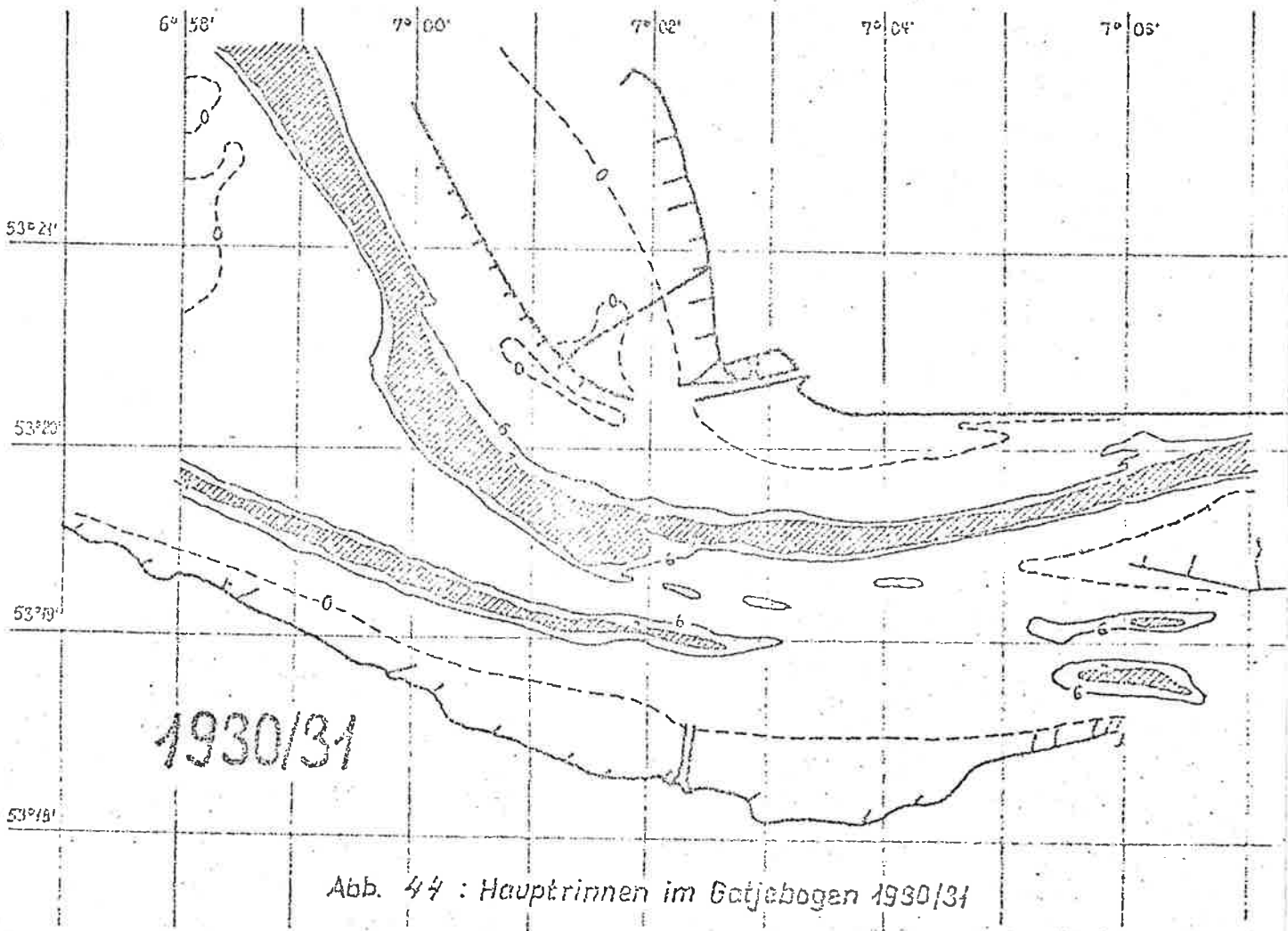
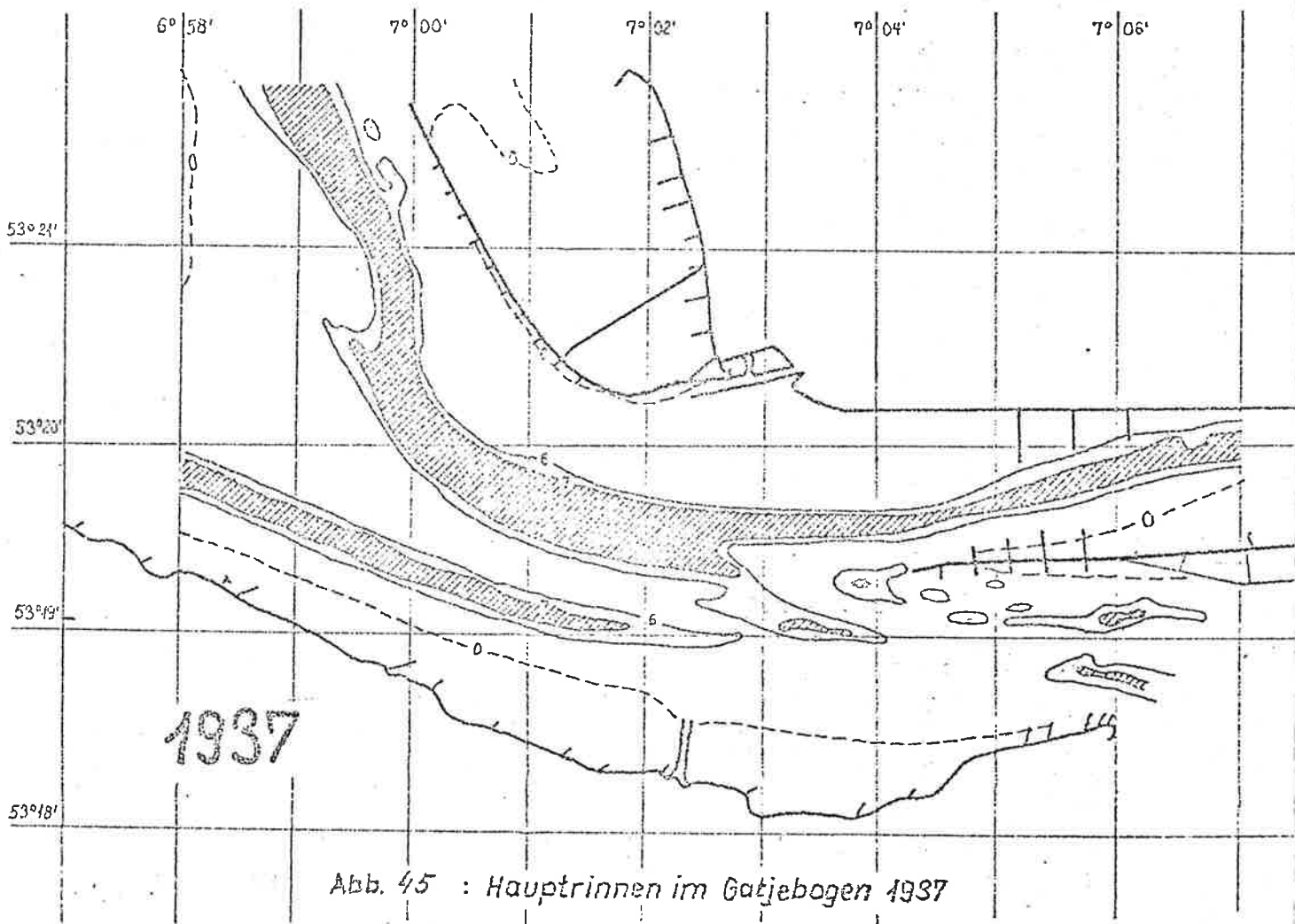


Abb. 44 : Hauptrinnen im Götjabogen 1930/31



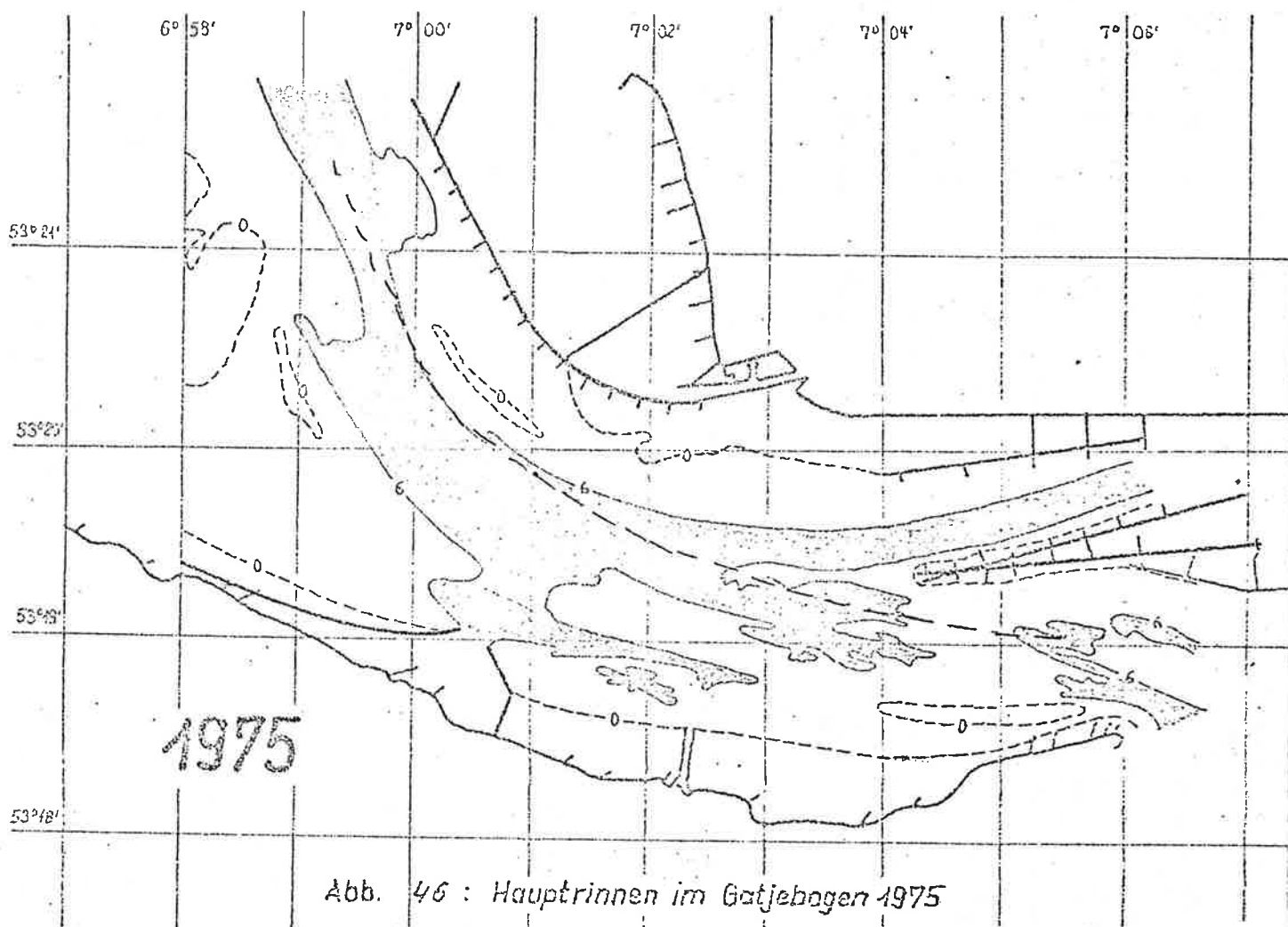


Abb. 46 : Haupttrinnen im Gatzebogen 1975

Es muß sogar bezweifelt werden, daß der Ansatz zur Ausbildung einer neuen Rinne im Verlauf der Bogensehne sich durch natürliche Weiterentwicklung zu einer neuen Hauptrinne vertieft. Dagegen spricht der Verlauf der Rinnenentwicklung im Anschluß an die bisher durchgeführten Durchbaggerungen (Abb. 41). Die neue, durch menschlichen Eingriff erweiterte Rinne in der Bogensehne wandert sehr schnell und bereits während der Erstdurchbaggerung unter zunehmender Krümmung ihres Achsenverlaufs wieder nach Südwesten. Ohne die künstliche Erweiterung würden vermutlich die alte und die neue Rinne mit wenig tiefen Querschnitten nebeneinander in einer unzusammenhängenden Verwilderungsform bestehenbleiben.

Die vorstehend beschriebene Verlagerung der Hauptrinne im Gatjebogen bringt eine Veränderung der Richtung der Dollartanströmung mit sich. Abb. 42 zeigt die damit verbundene Verlegung des Ortes, an welchem der Rücken zwischen Paapsand-Südsteert und Geise-Weststeert seine tiefste Stelle aufweist. Der Rücken wird durch eine fast mit ihm parallellaufende Ost-West-Komponente der Überströmung auf großer Breite niedriggehalten, wenn die Hauptrinne des Gatjebogens nach Westen (Südwesten) verlegt ist (siehe z.B. die Skizze des Rinnenverlaufs im Jahre 1952 unten rechts auf Abb. 42). In diesem Fall vereinigen sich die Tidewassermenge aus der Bucht von Watum und die Hauptkomponente der Überströmung des Paapsand-Geise-Rückens bereits sehr weit westlich des Dollartmundes (Abb. 43). Die Anströmung des Dollartmundes ist dann in der Hauptrichtung ost-west-orientiert.

Bei östlicher Lage der Hauptrinne im Gatjebogen mit einem nahe dem Geise-Weststeert liegenden Durchstoßpunkt der Überströmung des Paapsand-Geise-Rückens wie z.B. um das Jahr 1932 (siehe Abb. 42) erfolgt dagegen die Anströmung des Dollartmundes mit einer Nordwest-Südost-Komponente (siehe die Prinzipskizze unten links auf Abb. 42 und die Abb. 44) entsprechend der Richtung der aus dem Gatjebogen gegen den Dollart weisenden Nebenrinne. Diese östlich gelegene und steiler in den Dollartmund gerichtete Strömung hat sich im Rinnenverlauf erst

etwa 1937 voll durchgesetzt (Abb. 45). Nach 1937 erfolgt wieder eine schnelle Westwanderung der Durchstoßrinne durch den Paapsand-Geise-Rücken (Abb. 42).

Das Steilerwerden der Dollartanströmung, es beginnt einige Jahre vor 1926, schließt die Durchbaggerung der neuen Rinne 1926 ein und endet etwa 1937, umfaßt zeitlich zentral den Zustand des Dollart, wie er im Jahre 1932 aufgenommen wurde. Die vorgeschriebene Rechtsdrehung der Anströmung des Dollart fällt also zusammen mit einer ebenfalls nur vorübergehend stattfindenden Rechtsdrehung im Rinnensystem des Dollart: Der Bogen des Groote Gat verlagert sich nach Südwesten zurück, die Nebenrinnen im westlichen Dollartwatt nehmen an Ausdehnung zu (Abb. 37). Es liegt nahe, den Vorgang im Dollart als eine Folge der vorübergehend steileren Anströmung des Dollartmundes aus dem Gatjebogen heraus anzusehen.

Es ist nun beabsichtigt, etwa in der Linienführung 1932 der Rinne im Gatjebogen (rote Gerade in Abb. 41) die Geiserinne aus dem Dollart heraus an das Ostfriesische Gatje anzuschließen (gestrichelte Linie in Abb. 46). In Modelluntersuchungen bei der BAW ist dazu festgestellt worden, daß diese Rinnenführung gut von der Strömung im Gatjebogen angenommen wird. Die Anströmung des Dollart wird demzufolge weitgehend derjenigen zu Anfang der 30er-Jahre entsprechen und ähnlich günstige oder geringfügige Folgen für die Dollartentwicklung haben, wie sie in der Aufnahme von 1932 zu erkennen sind.

Is dat wel  
25

### 2.3.5 Die Kornzusammensetzung der Dollart-Sedimente

Das frühere Sediment des Dollart, wie es in den Böden der eingedeichten Polderflächen zu finden ist, besteht "zu 50 % aus abschlämmbaren Teilen". Der gesamte Feinkornanteil wird schätzungsweise bei mindestens 70 % liegen. Im heutigen Restdollar ist ein solcher Feinkorngehalt nur in einem schmalen Randstreifen anzutreffen. Der heutige Dollart ist der umlagernden Wirkung von Tide und Wellenenergie in einem Maße ausgesetzt, daß von den suspendiert mit der Flut in den Dollart getragenen Feststoffen nur rd. 2 % bleibend sedimentiert werden. In diesem Sediment ist Feinkorn nur zu rd. 20 % enthalten, obwohl es in der Suspension mit mehr als 50 % vertreten ist. Die Hauptmenge des dauerhaft abgelagerten Bodenmaterials besteht heute aus Sand.



Die Eigenschaften der Dollartböden sind in zurückliegender Zeit eingehend untersucht worden, soweit die analysierten Größen den landwirtschaftlichen Nutzwert des anwachsenden Sediments beleuchten konnten. In diesem Sinne war hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung der Böden die Aufmerksamkeit auf ihren Gehalt an Material von feiner und feinsten Körnung in den oberflächennahen Schichten gerichtet. Soweit die Beobachtung der Entwicklung der Wattflächen von der Absicht bestimmt war, landwirtschaftlich nutzbaren Boden zu gewinnen, interessierte wesentlich die Frage, in welcher Schnelligkeit sich das Sediment im Dollart mit einem für die landwirtschaftliche Nutzung ausreichenden Feinstkornanteil vermehrte. Untersuchungen dieser Art liegen seit jenem Zeitpunkt nicht mehr vor, von welchem ab die Gewinnung von Neuland im Dollart nicht mehr begrüßenswert erschien. Es soll nachstehend eine Bilanzierung für den neueren Entwicklungsverlauf gegeben werden. Es ist zu erwarten, daß im Vergleich mit früheren Analysen daraus Schlüsse auf das Sedimentationsverhalten des heutigen Dollart gezogen werden können.

Es sind von Wiggers (1960) und vom gleichen Verfasser zusammen mit De Smet (1960) eingehende Untersuchungen über die Korngrößenverteilung in den Dollartsedimenten durchgeführt bzw. instruktive Betrachtungen über die Herkunft und die Sedimentationsgeschwindigkeit der Dollartablagerungen angestellt worden. Die von den genannten Verfassern veröffentlichten Angaben über die Sedimentzusammensetzung in den Dollartpoldern dürften weitgehend die Ansicht anderer Bearbeiter von sekundär mit dem Dollart zusammenhängenden Fragen über die Qualität des Sediments im derzeitigen Dollart bestimmt haben. Es soll daher in diesem Rahmen kurz darauf eingegangen werden.

De Smet und Wiggers (1960) haben "von den einzelnen Teilen des innerhalb und außerhalb der Deiche gelegenen Dollartgebietes, sowohl des niederländischen als des deutschen Teils" die Sedimentmenge aus der Oberflächengröße und der jeweiligen Sedimentmächtigkeit berechnet und daraus mit den für verschiedene Dollartpolder bekannten Raumgewichten der Polderböden das Gesamtgewicht der Sedimentmenge bestimmt. Dieser Sediment-

menge werden von den genannten Bearbeitern auf Grund ihrer Erfahrungen mit den Ergebnissen von Bodenuntersuchungen im Dollartgebiet folgende Eigenschaften hinsichtlich ihrer Korngrößenzusammensetzung zugeschrieben: "Für diese Menge beträgt der Lutumgehalt schätzungsweise durchschnittlich gut 30 % und der Gehalt an abschlämmbaren Teilen (> 16 Mikron) 50 %, ...". Diesen Angaben über die Zusammensetzung der Sedimente früherer Perioden soll nachstehend eine Berechnung der Zusammensetzung des Dollartsediments in dem von den neueren Aufmessungen erfaßten Bereich des Dollart gegenübergestellt werden.

Von Wiggers (1960) ist eine Darstellung der Verteilung des Tongehalts in der Schicht 0 - 25 cm des Dollarts nach einer Bodenkartierung aus dem Jahr 1952 veröffentlicht, welche durch die Ergebnisse der Untersuchungen von Krause (1954) für den deutschen Dollartteil ergänzt wurde und in Abb. 47 beigelegt ist. Der oben zitierte Begriff "Lutum" ist gleichbedeutend mit der granulometrischen Bezeichnung "Ton". Beide sprechen die Korngrößen  $< 0,002$  mm an. Die von Wiggers angegebene Verteilung des Tongehalts soll für den nachfolgend beschriebenen Ermittlungsgang als über die Dauer der letzten Beobachtungsperiode der Dollartaufhöhung konstant angenommen werden. Für die Berechtigung dieser Annahme spricht das von Wiggers gefundene Untersuchungsergebnis, "daß die Variation in vertikaler Richtung sehr gering ist. Anders ausgedrückt, die Sedimentation verläuft sehr konservativ" (Wiggers, 1960). Gerritsen formuliert die gleiche Aussage mit den Worten: "Die Beschaffenheit des Oberbodens hat sich in einer Periode von 30 Jahren nahezu nicht geändert. Was 1921 Sandgebiet war, war das im Jahre 1952 noch" (Gerritsen, 1956).

Mit dem Aufnahmejahr der Bodenkartierung beginnt auch die Untersuchungsperiode 1952 - 1970 über die Aufhöhung des Dollartwatts. Die durch die Sedimentation verursachte Abnahme der "wasserbergenden Oberfläche" ist in Tiefenstufen von 0,5 m Abstand für jedes der Untersuchungsfächer gesondert im Bericht über diese Untersuchungsperiode angegeben (van der Meulen, 1972). Es konnte also für jedes Fach und jede Tiefenstufe die sedimentierte Menge berechnet und mit dem für den jeweiligen Ort

Im Dollartmund ist die Stromgeschwindigkeit eng der Steig- bzw. Fallgeschwindigkeit proportional. Da nun nach der Ableitung in 3.1 die Scherspannung dem Quadrat der Stromgeschwindigkeit proportional sein soll, wäre in Abb. 49 eigentlich eine andere als lineare Zuordnung zu erwarten gewesen.

Bei den entsprechenden Abszissenwerten ergeben sich an den Ausgleichsgeraden als Größe der Stabilitäts-Scherspannung im Dollartmund für

	F l u t	E b b e
mittlere Tide	$\tau'_{sf} = 0,24 \text{ Mp/m}^2$ ;	$\tau'_{se} = 0,30 \text{ Mp/m}^2$
Springtide	$\tau'_{sf} = 0,29 \text{ Mp/m}^2$ ;	$\tau'_{se} = 0,37 \text{ Mp/m}^2$

Bruun und Gerritsen (1960) geben für die Emsmündung den von ihnen in den Messungen von 1952 gefundenen mittleren Wert mit  $\tau'_s = 0,26 \text{ Mp/m}^2$  für mittlere Tide an. Aus ihrer graphischen Darstellung der Einzelwerte aus unterschiedlichen Profilen der Emsmündung ist für den Dollartmund ein etwas höherer Wert mit etwa  $\tau'_s = 0,28 \text{ Mp/m}^2$  zu errechnen, der bei Ebbe wie bei Flut in etwa gleicher Größe gefunden wird. Das entspricht recht genau dem Mittelwert aus Flut- und Ebbergebnis der vorliegenden Untersuchung. Bei dieser sind jedoch die Ebbwerte immer deutlich über denen der Flut gelegen. Bestimmend für die Querschnittsgröße im Dollartmund sind danach die Ebb-Stromgeschwindigkeiten, welche in ihren Maximalwerten diejenigen der Flut um 10 bis 15 % übersteigen.

Das Verhältnis der Werte der Springtide zu denen der Normaltide ist genau demjenigen gleich, das Bruun und Gerritsen theoretisch ableiteten. Sie stützten sich auf die Beobachtung, daß die Strömungswerte in der Emsmündung bei Springtide rd. 10 % höher sind als bei Normaltide und folgerten, daß die  $\tau'_s$ -Werte sich dann etwa wie  $(1,1)^2 : 1$  verhalten müßten entsprechend ihrer Abhängigkeit vom Quadrat der Strömungswerte.

### 3.1.2 Die Bemessung des Durchflußquerschnitts im Dollartmund

Bei einer Umleitung der Ems durch den Dollart ist die Tidewassermenge der oberen Ems zusätzlich durch den Dollartmund zu- und abzuführen. Das Tidevolumen der Ems oberhalb des Absperrdamms in Höhe des Emden Hafens errechnet sich aus der bei Ems-km 46+350 für mittlere Tide gemessenen Flutwassermenge von 60 Mio. m<sup>3</sup> abzüglich des Flutraums des tideoffenen Seekanals oberhalb des Meßprofils bei km 46+350 von 16 Mio. m<sup>3</sup>. Zu diesen (60 - 16) Mio. m<sup>3</sup> = 44 Mio. m<sup>3</sup> tritt aus dem Einzugsgebiet der Ems bei mittleren Abflussverhältnissen ein Zufluß von 6 Mio. m<sup>3</sup> als Überschuß des Tidevolumens der Ebbe über das der Flutwassermenge. Das ergibt in Höhe des Absperrdamms eine Ebbwassermenge von 50 Mio. m<sup>3</sup>. Bis zum Abfluß durch den Dollartmund vergrößert sich diese Wassermenge noch um das Volumen des über dem Niedrigwasserniveau im Geisedurchstich zu baggernden Bodens. Um diese nach Ermittlung des WSA Emden rd. 6 Mio. m<sup>3</sup> vergrößert sich der Speicherraum des Dollart. Etwa 7 Mio. m<sup>3</sup> werden diesem jedoch auf dem Geisewatt durch Aufspülen des Trenndamms zwischen Dollart und Emden Fahrwasser und des Geländes emsseitig dahinter entzogen. In Summe werden also zusätzlich zur derzeitigen Dollartwassermenge von 125 Mio. m<sup>3</sup> nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart (125 + 49) Mio. m<sup>3</sup> = 174 Mio. m<sup>3</sup> bei Ebbe während einer mittleren Tide und bei mittlerem Oberwasser zufluß im Dollartmund abzuführen sein.

Der Durchflußquerschnitt im Dollartmund ist entsprechend der bei einer Emsumleitung größeren abzuführenden Wassermenge zu erweitern, um einer Erosion und dem Vertreiben des erodierten Boden vorzugreifen. Für die Dimensionierung liefert der Scherspannungsansatz diejenige Größe des Querschnitts, bei welcher der Feststofftransport zu keiner Erosion, aber auch zu keinen Ablagerungen im Bezugsprofil führt. Hierfür ist in den vorhergehenden Untersuchungen die Stabilitäts-Scherspannung aus Naturmessungen hergeleitet worden.

Zur Vorhersage der Größe des maßgebenden maximalen Durchflusses nach einer Umsumleitung ist die Größe der insgesamt abzuführenden Tidewassermenge bekannt (siehe oben) und aus den Modelluntersuchungen bei der Bundesanstalt für Wasserbau der Umstand, daß der maximale Durchfluß bei einem Wasserstand in der allgemeinen Höhe von NN (oder N.A.P. = NN + 0,02 m) erfolgt. Bei den Naturmessungen trat der maximale Durchfluß bei Wasserständen zwischen N.A.P. + 0,08 m und N.A.P. + 0,41 m, im Mittel bei N.A.P. + 0,25 m auf (siehe Tabelle auf S. 159 , (10) ). Letztere Angabe liefert das Bezugsniveau, unter welchem die der rechnerischen Anforderung entsprechende Querschnittsgröße vorzuhalten ist.

Gegründet auf die derzeitigen, aus Messungen bekannten Verhältnisse, führt der Schluß von der Größe der Tidewassermenge auf die Größe des maximalen sekundlichen Durchflusses zu dem Zusammenhang (siehe Abb. 50)

$$Q_{\max, e} = 63,778 \times 10^{-6} \times T_e + 1503,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

und den in die Berechnung eingehenden Wertepaaren

$T_e$	$Q_{\max, e}$
$125 \times 10^6 \text{ m}^3$	$9475 \text{ m}^3/\text{s}$
$174 \times 10^6 \text{ m}^3$	$12600 \text{ m}^3/\text{s}$

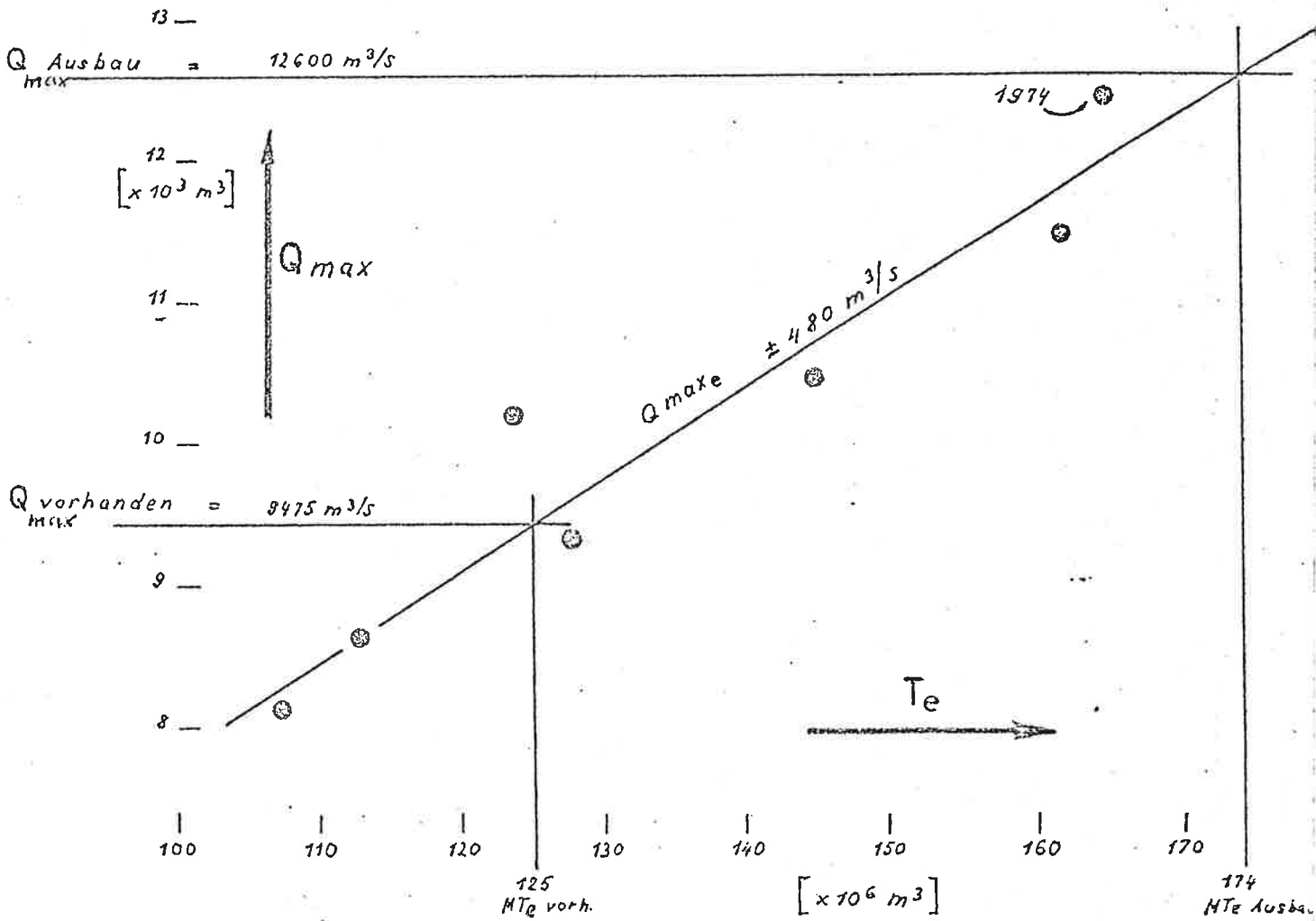


Abb.5o Max. Durchfluß als Funktion der Tidewassermenge

Damit errechnet sich unter dem Bezugsniveau von N.A.P.  
+ 0,25 m

$$F_{\text{vorhanden}} = \frac{\text{vorh. } Q_{\text{max,e}}}{C \times \sqrt{\frac{\tau'_s}{g}}} = \frac{9475}{50,19 \times 0,017} = 10900 \text{ m}^2$$

$$F_{\text{Ausbau}} = \frac{12600}{50,78 \times 0,017} = 14\,325 \text{ m}^2$$

oder bezogen auf das Niveau des mittleren Niedrigwassers

$$\text{vorh. } F_{\text{G.L.W.}} = 75250 \text{ m}^2$$

$$\text{Ausbau } F_{\text{G.L.W.}} = 10\,675 \text{ m}^2$$

Das Ergebnis ist beeinflusst durch den nicht ganz gesicherten Wert der Messung 1974 in dem in Abb. 50 dargestellten Zusammenhang. Ohne Verwendung dieses Wertes beim Ausgleich der Meßergebnisse errechnet sich mit dem Wertepaar

$$T_e = 174 \times 10^6 \text{ m}^3 ; Q_{\text{max,e}} = 12\,218 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{ein Ausbau } F_{\text{G.L.W.}} = 10\,260 \text{ m}^2.$$

Die nach Giese (1971) berechnete Flächengröße

$$\begin{aligned} F_{\text{min}} &= 6 \times 10^{-5} \times T_e \\ &= 6 \times 10^{-5} \times 125 \times 10^6 = 10\,440 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

liegt innerhalb des Bereichs der Unsicherheit des im Ansatz exakteren Verfahrens nach Bruun und Gerritsen, wie es vorstehend angewandt wurde.

Bei den vorstehenden Untersuchungen sind die Verhältnisse bei mittleren Tiden in die Berechnungen eingeführt worden. Da diese nicht von allen Hydrologen als die bettbildenden Umstände

angesehen werden, sei dazu folgende Bemerkung gemacht: Bei der nach den vorhandenen Meßwerten mit Recht vorgenommenen Linearisierung der gegenseitigen Abhängigkeit (Abb. 49 und 50) ergibt sich bei der Anwendung des Scherspannungs-Ansatzes für die Querschnittsbildung kein Unterschied im Ergebnis durch die Verwendung entweder der Werte der Normaltide oder derjenigen der Springtide. Es ist nämlich, wie bereits angesprochen, nach den Meßwerten in Abb. 49

$$\tau'_{\text{spring}} \approx (1,1)^2 \times \tau'_{\text{normal}}.$$

Nach den Werten der Abb. 50 liegt das Verhältnis von  $Q_{\text{max, spring}} / Q_{\text{max, normal}}$  dicht unter 1,1 und das bei allen in Betracht kommenden Tidewassermengen. Damit liefert die Scherspannungsgleichung für Springtiden

$$F = \frac{a \times Q_{\text{max}}}{c \cdot \sqrt{\frac{a^2 \tau'_s}{\rho \cdot g}}}, \quad a \text{ hier gleich } 1,1,$$

für alle in diesem Besprechungsabschnitt in die Berechnung eingesetzten Werte von  $Q_{\text{max}}$  die gleichen Ergebnisse wie für die Normaltide. Bei zahlenmäßig genauer Anwendung fallen die Ergebnisse sogar kleiner aus (Der Faktor vor  $Q_{\text{max}}$  ist kleiner als 1,1).

### 3.1.3 Die Dimensionierung der Querschnitte im Geisedurchstich

Der Geisedurchstich liegt in einem Abschnitt der Ems, in welchem schlickiges Sediment zu erwarten ist. In diesem Fall sind die vorstehend verwendeten Bemessungsgleichungen nicht anwendbar. Es wird daher nach dem Gleichgewichtszustand dimensioniert, auf welchen sich die Querschnitte des oberen Emders Fahrwassers einstellen, als zwischen 1942 und 1946 dort nicht gebaggert wurde.

Die Verbindung des Emslaufs mit dem Dollart in einem Durchstich durch die Geise westlich von Pogum führt dem Dollart die Tidewassermenge der oberen Ems zu. Der



hier neu herzustellende Durchflußquerschnitt hat also bei mittleren Tide- und Oberwasserverhältnissen die im Abschnitt 3.1.2 erläuterte Wassermenge von 50 Mio. m<sup>3</sup>/Tide bei Ebbe abzuführen, 44 Mio.m<sup>3</sup>/Tide gehen durch ihn bei Flut stromauf.

Die Dimensionierung des zwischen dem derzeitigen Bett der Ems und der Hauptrinne des Dollart (Aa oder Groote Gat genannt) zu baggernden Querschnitts wird durch den Umstand erschwert, daß in diesem neuen Abschnitt des Emslaufs mit Schlickablagerungen zu rechnen ist. Für diesen Fall sind Bemessungsregeln, wie sie in Abschnitt 3.1 angesprochen wurden, bisher nicht aufgestellt bzw. nicht veröffentlicht worden. Ein für die vorliegende Aufgabe geeigneter Anhalt muß daher aus den örtlichen Gegebenheiten abgeleitet werden. Es ist also etwa der gleichen Methodik zu folgen, wie sie von den Erstbearbeitern ähnlicher Probleme für einzelne Stromgebiete angewandt wurde (Lane, 1955). Für bekannte und vergleichbare Verhältnisse wird die Proportion zwischen abzuführender Wassermenge und der Größe des natürlich entwickelten Durchflußquerschnittes ermittelt. Diese wird auf den neu herzustellenden Stromanschnitt übertragen.

Wie die "Modellversuche für die Umleitung der Ems, Teil 3, Salzgehaltsverteilung" ergeben haben, werden die Querschnitte der östlichen Geiserinne, die des zu dimensionierenden Durchstichs, in gleicher Lage zur Brackwasserzone der Ems liegen wie die Querschnitte des Emslaufs unterhalb von Pogum und im Ender Fahrwasser. Die im Geisedurchstich zu erwartende Sedimentation und Erosion wird daher weitgehend derjenigen der genannten Flußstrecke (unter naturbelassenen Bedingungen) gleichen. An vergleichbaren, von der zukünftigen Abzweigung aus geometrisch zu übertragenden Orten sind weitgehend gleiche Salzgehaltsverhältnisse und gleiche Durchflußmengen und damit gleiche Querschnittsdimensionen zu erwarten wie im derzeitigen Emslauf.

Ein geeigneter Zeitpunkt für den Naturausgleich ist derjenige nach der in 2.2.3 besprochenen baggerlosen Zeit im Ender Fahr-

Querschnitte und Durchflußmengen  
im Emdener Fahrwasser

Morphologie vom 28.2. - 8.3.1946

Profil	km	F u. MTnw	T <sub>f</sub>	$\frac{F_{MTnw}}{T_f} \times 10^{-5}$	T <sub>e</sub>	$\frac{F_{MTnw}}{T_e} \times 10^{-5}$	Bemerk
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
a	41.0	2426	44.1	5.5	51.0	4.8	
b	41.5	2476	45.4	5.5	52.3	4.7	
c	42.2	2584	48.1	5.4	55.0	4.7	
d	42.7	2576	49.5	5.2	56.7	4.5	
e	43.2	2566	49.7	5.2	61.1	4.2	
f	43.8	2837	50.3	5.6	66.2	4.3	
g	44.2	2895	51.7	5.6	68.3	4.2	
h	44.8	3241	54.0	6.0	70.0	4.6	
i	45.2	3489	56.1	6.2	71.4	4.9	
j	45.7	3668	58.2	6.3	73.1	5.0	Bühne im Profil
k	46.7	3817	60.2	6.3	75.8	5.0	Bühne
l	46.7	3866	62.0	6.2	78.3	4.9	Bühne
m	47.3	4217	64.6	6.5	81.3	5.2	
n	47.9	4255	67.0	6.4	83.6	5.2	Keine definierte Grenze im Süden

wasser von 1942 bis 1946. Die Querschnittsgrößen im Emder Fahrwasser aus der Sohlenaufnahme vom 28.2. - 8.3.46 sind in der nachfolgenden Tabelle den Durchflußmengen gegenübergestellt. Die zugrunde gelegten Verhältnisse dürften denen des Sohlengleichgewichts weitgehend entsprechen. So sind z.B. bei der folgenden Sohlenaufnahme am 29.7. - 7.8.1946 die Querschnitte größer als bei dem hier dargestellten Zustand. Zwischen den beiden Peilungen sind aber keine Baggerungen ausgeführt worden. Die Tiefenzunahme beruht also auf natürlicher Erosion. Aus diesem Verhalten ist zu schließen, daß die Größe der Querschnitte bereits in der Nähe der Gleichgewichtslage pendelt. Der dabei ungünstigere Zustand ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Hinsichtlich der Ortslage vergleichbar mit den Querschnitten im Geisedurchstich zwischen der Abzweigung bei Pogum und der Einmündung in das Groote Gat sind die Profile a bis c der nachfolgenden Tabelle (km 41,0 bis 42,2). In diesem Abschnitt des Emder Fahrwassers (und stromauf davon bis Pogum) brauchte bis zum Jahre 1960 nie zur Unterhaltung der Fahrwassertiefe gebaggert zu werden. Wassertiefen von 7 m unter MSpTnw und teilweise mehr waren immer von Natur vorhanden. Nur im Bereich der Hafeneinfahrt waren einige wenige Male seitliche Eintreibungen zu beseitigen. Diese hingen jedoch mit der damals noch möglichen Überströmung der Geise zusammen.

Die mit dem Faktor nach O'Brien vergleichbaren Werte  $F/T \times 10^{-5}$  sind in Spalte 5 der vorstehenden Tabelle zu finden. Mit einer Größe von 5,5 beim am weitesten stromauf liegenden Profil a bis zu Größen von 6,5 bei m und 6,4 bei Profil n gehen diese Werte aus den Profilen mit schlickiger Sohle zu denen mit sandiger Sohle und damit zu dem von O'Brien mit 6,6 gefundenen Wert für den Proportionalitätsfaktor über. Da bei den vorangehenden Untersuchungen für den Dollart-

mund durchaus annehmbare Erfahrungen mit der Dimensionierung nach O'Brien gemacht wurden, gibt diese Übereinstimmung eine zusätzliche Sicherheit hinsichtlich der Annahme, daß die in der vorstehenden Tabelle angegebenen Größen als Gleichgewichtswerte angenommen werden können.

Die Flächengrößen der Profile a bis c sind diejenigen, welche sich nach diesem Vergleich im Geisedurchstich im Bereich der Einmündung in das Groote Gat einstellen und beständig halten werden. Das Baggererfordernis zur Schaffung der erforderlichen Querschnittsgrößen zwischen diesen Profilen und demjenigen im Dollartmund bzw. stromauf zum Übergang in das Naturprofil bei Pogum ergibt sich durch linearen Angleich der Zwischenquerschnitte.

### 3.2 Die Stabilität der Grundrißlage der Geiserinne

Die Versuche im hydraulischen Modell mit beweglichem Sohlenmaterial haben für die gewählte Linienführung der Geiserinne eine im Grundriß stabile Lage vorausgesagt. Bei Untergrunderkundungen wurde darüber hinaus festgestellt, daß die neue Rinne in Bodenschichten eingeschnitten wird, welche einen hohen Widerstand gegen Erosion bieten. Die Rinne wird dadurch in ihrer durch die Erstausbaggerung gegebenen Linienführung festgelegt.

Die vorstehenden Untersuchungen über das Verhalten der Geiserinne waren auf deren Stabilität hinsichtlich der Querschnittsgröße gerichtet. Es sind aber auch seitliche Bewegungen durch entsprechende Erosion und Sedimentation an den Seitenböschungen denkbar, soweit die Geiserinne durch Baggerung in den Boden eingeschnitten liegt. Die etwaige Neigung zu solchem seitlichen Ausweichen ist in Modellversuchen mit beweglichem Sohlenmaterial bei der BAW untersucht worden. Nach den Modellergebnissen wird die Rinne durch den nördlichen Dollart und die Geise von der natürlichen Strömung gut angenommen. Nach den Langzeituntersuchungen im Modell wird sich die Geiserinne ohne wesentliche Ver-

lagerungen in der durch Erstbaggerung gegebenen Linienführung halten.

Die vorgenannten Untersuchungen im Modell wurden mit einer Modellsohle durchgeführt, welche aus einem in der Korngröße gleichmäßig gehaltenen beweglichen Kunststoffgranulat ausgebildet wurde. Dieses setzt der Strömung nach allen Richtungen den gleichen geringen Widerstand gegen Erosion entgegen. Es entspricht daher einer Rinnenführung durch sandigen Boden. Der Unterschied zu den in der Geiserinne wirklich anzutreffenden geologischen Gegebenheiten soll daher nachstehend angesprochen werden.

Der geologische Aufbau des Untergrundes im Dollart ist in seiner Schichtenfolge sehr einheitlich. Es bestehen jedoch erhebliche örtliche Unterschiede hinsichtlich der Höhenlage dieser Schichten. An fast allen Orten ruht auf pleistozänem Sand eine Torfschicht von etwa 1 m Dicke. Deren Oberfläche wird jedoch schwankend zwischen 2 und 5 m unter NN angetroffen. Der Torf wird in den meisten Fällen von einer Schicht aus altem Klei abgedeckt (Wiggers, 1953).

Wegen des bekannten in der Höhenlage unterschiedlichen Aufbaus des Dollartuntergrundes sind entlang der projektierten Achse der Geiserinne Aufschlußbohrungen niedergebracht worden (Abb. 51). Nach ihnen wird im Geisedurchstich die Rinnensohle gerade den pleistozänen Sand anschneiden. Der untere Rinnenteil wird flankiert und in der Lage fixiert durch eine 2 bis 2,5 m dicke Torfschicht. In dieser Schichtlage bleibt der Torf auch bei tiefsten Niedrigwasser untergetaucht. Es kann keine Luft aufnehmen, und die Gefahr eines Aufschwimmens dürfte somit nicht bestehen. Über dem Torf liegt eine unterschiedlich starke Schicht von Klei. Die höheren Schichten bis zur Hochwasserlinie bestehen aus "jüngeren" Dollartablagerungen.

Diese Höhenlage der Schichten wurde in der Rinnenachse erbohrt. Weitere Erkundungen des Untergrundes hinsichtlich des geologischen Profils senkrecht zur Achse sind für das Jahr 1977 vorgesehen. Bereits jetzt spricht das Schichtenbild für

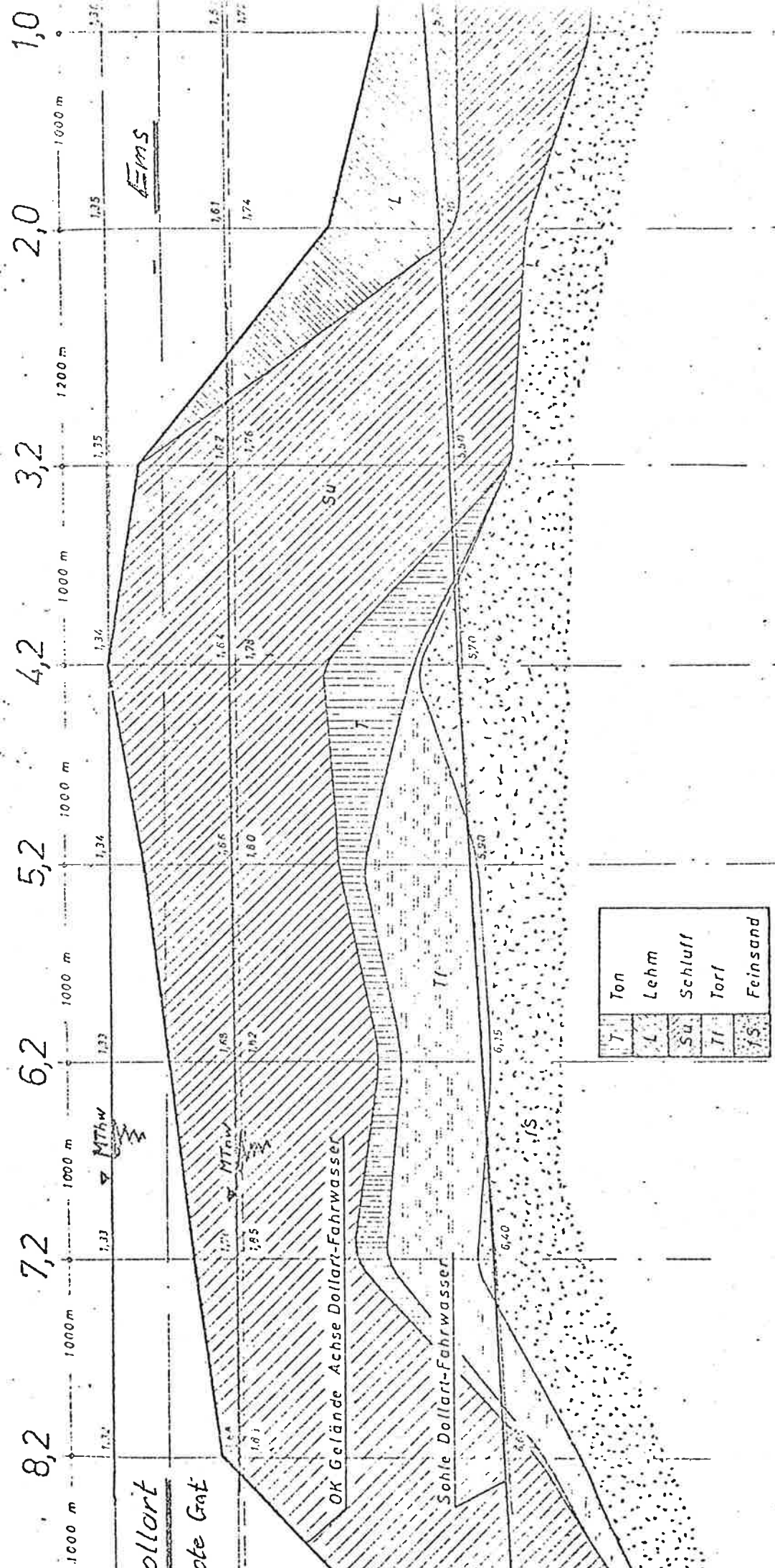


Abb. 51 : Längsschnitt durch den Untergrund im Geisedruchstüch

eine Stabilität der Rinnenlage. Nach der Vorgeschichte des Dollart zu urteilen, könnten auf den Seiten der projektierten Rinnentrasse auch noch Überreste des ursprünglichen Uferwalls der Ems aus der Zeit vor dem Dollarteinbruch vorhanden sein. Es wird vermutet, daß Reste dieses meist sehr widerstandsfähigen Altufers im Reiderbuitenland (Hoek van Reide) erhalten geblieben sind und dessen Bestand über vier Jahrhunderte in der Strömung der Emsmündung ermöglicht haben (van Eerde, 1950). Im Gebiet des Dollartwatts südlich des geplanten Geisedurchstichs sind aus dem alten Dollartland bis in das vorige Jahrhundert hinein einzelne Inseln ("Blinken") bestehengeblieben. Der Untergrund dieses Watts ist also nie bis in größere Tiefen aufgearbeitet worden. Er dürfte daher erhebliche Widerstandskraft gegen Erosion besitzen.

Die Untersuchungen im Modell mit beweglicher Sohle haben ausgesagt, daß die Geiserinne in der geplanten Linienführung in ihrer Lage stabil bleiben wird. Das gilt bei der Modellausstattung mit Kunststoffgranulat für leichterodierbares, sandiges Sohlenmaterial. Der tatsächliche geologische Aufbau des Dollartwatts, in welches die Geiserinne eingeschnitten wird, unterstreicht diese Aussage des Modellversuchs wegen seiner im Vergleich zu Sandboden wesentlich höheren Widerstandsfähigkeit gegen Erosion.

### 3.3 Der Feststoffgehalt im Tidewasser der Geiserinne

In einer im natürlichen Gleichgewicht befindlichen Geiserinne sind die Feststoffsuspensionen in solcher Größe zu erwarten, wie sie zur Zeit im naturbelassenen Bereich bei Pogum zu beobachten sind. Eine Gegenüberstellung dieser Werte mit denen des Dollart läßt auf etwa gleiche Größe des Feststoffgehalts im Jahresdurchschnitt schließen. Die im Vergleich zu den Dauermessungen bei Pogum nur wenigen Angaben aus dem Dollart erlauben keine eingehendere Beurteilung.

Wie bereits erwähnt, haben die Durchmischungsversuche im Modell der BAW ausgesagt, daß nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart die Salzgehaltswerte im unveränderten Teil der Ems bei Pogum und oberhalb von Pogum nur geringfügig von denen des heutigen Zustandes abweichen werden. Das trifft mit kleineren Unterschieden bei sehr geringen wie bei hohen Oberwasserabflüssen zu. Seewärts von Pogum wird nach einer Umleitung das Salzgehaltslängsgefälle geringer als derzeit ausfallen.

Da die Geiserinne auf der Umleitungsstrecke im Zustand eines natürlichen Gleichgewichts belassen werden soll, können unter Anlehnung an die vom Modell vorausgesagten Salzgehaltsverhältnisse und die in 2.2.5.4.1 besprochenen Zusammenhänge zwischen Salzgehalt und Feststoffsuspension in der Brackwasserzone auch Aussagen über den zukünftigen Feststoffgehalt im Tidewasser der Geiserinne gemacht werden. So läßt sich in erster Näherung annehmen, daß in der zukünftigen Geiserinne zu entsprechenden Salzgehaltswerten jene Feststoffkonzentrationen auftreten werden, welche im heutigen Zustand bei Pogum zu beobachten sind.

Die Feststoffkonzentrationen bei Pogum sind in Dauermessungen während einer Reihe von Jahren erfaßt worden. Ein Auszug aus den Ergebnissen dieser Messungen wird in Abb. 51a wiedergegeben. Es ist dort die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Feststoffwerte zusammen mit Salzgehaltswerten zwischen 2 ‰ und 8 ‰ dargestellt. Der Bereich von 2 bis 8 ‰ Salzgehalt ist derjenige des Feststoffmaximums im Kopf der Brackwasserzone (2.2.5.4.1). Die Abb. 51a zeigt damit also die Streubreite der



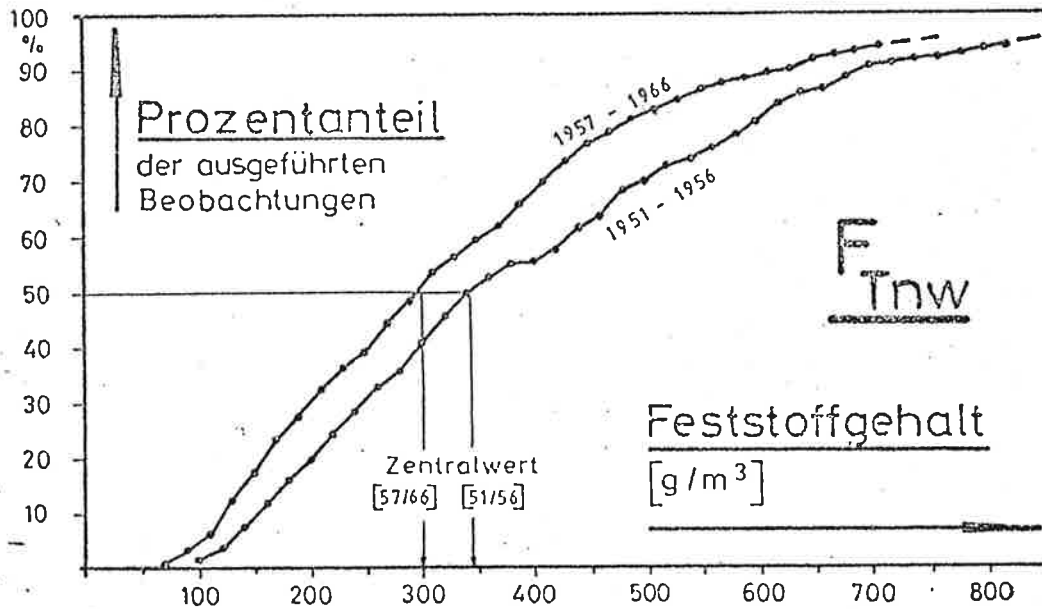
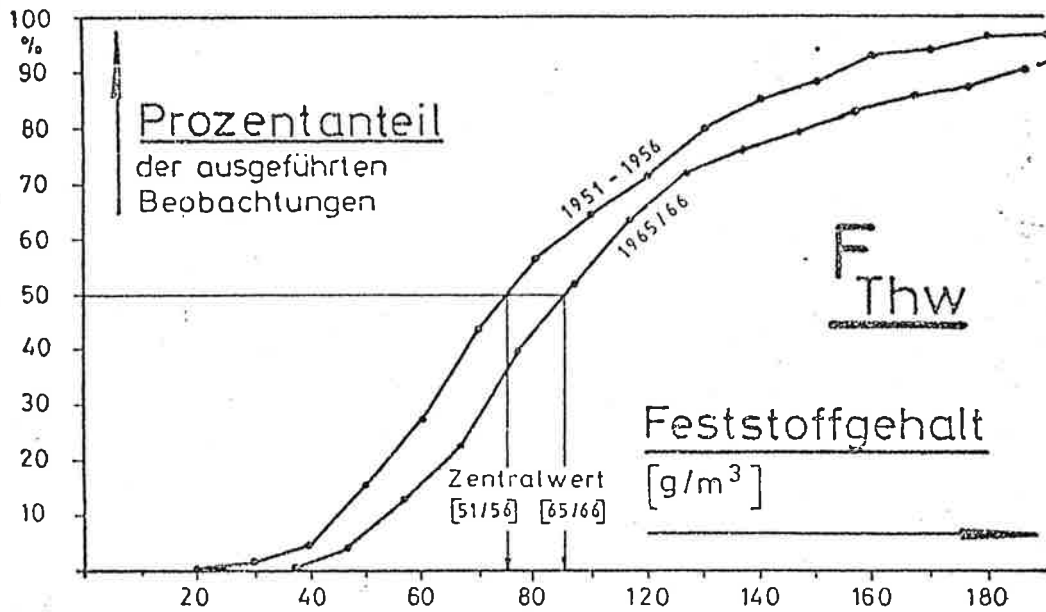


Abb. 51 a : Häufigkeit des Auftretens bestimmter Feststoffkonzentrationen zusammen mit Salzgehaltswerten zwischen 2 ‰ und 8 ‰ an der Dauermeßstelle bei Pogum

Maximalwerte der Feststoffkonzentration, wie sie zur Zeit bei Pogum gemessen wird und wie sie in der Geiserinne zu erwarten ist. In der Gesamtheit dieser Werte sind die Auswirkungen aller wechselnden tidedynamischen und meteorologischen Bedingungen des Jahresganges erfaßt.

In Abb. 51b sind die vorgenannten Werte denen von Feststoffmessungen aus der Hauptrinne des Dollart (Tonne 3, Dollartmund) gegenübergestellt. Die Werte der Abb. 51a von Pogum werden dabei durch den sie charakterisierenden Zentralwert repräsentiert. Der Zentralwert ist im Kollektiv der Beobachtungswerte derjenige Feststoffwert, welcher genauso oft unterschritten wie überschritten wird ( 50 %-Wert in Abb. 51a).

Die Feststoffwerte um Thw der Messungen aus dem Dollart (Abb. 51b) liegen immer über dem Zentralwert der Maximalwerte von Pogum. Da das Wasser, welches den Hauptteil des Flutraumes über dem Dollartwatt füllt, in diesen mit dem Feststoffgehalt um die Thw-Zeit eintritt, kann hiernach ein Überreten von Emswasser aus der Geiserinne auf das Dollartwatt nicht zu einer Erhöhung der Dollart-Sedimentation führen.

Die im Dollart gemessenen Tnw-Feststoffwerte liegen im Durchschnitt des in Abb. 51b dargestellten Jahrganges etwas unter denen der Zentralwerte von Pogum. Dazu muß jedoch noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die Zentralwerte von Pogum diejenigen der dortigen Feststoffmaxima sind. Die Gesamtheit aller Feststoffwerte der Brackwasserzone zwischen 0 ‰ und etwa 26 ‰, wie sie im Bereich von Dollart und Emders Fahrwasser im Laufe eines Jahres auftreten, liegt demgegenüber im Mittel wesentlich niedriger (Abb. 24 S. 88). Außerdem ist damit zu rechnen, daß die Feststoffwerte im Wasser der Geiserinne nach einer Umleitung kleiner ausfallen als die heute bei Pogum zu beobachtenden Werte: Die Geiserinne liegt mit ihrem Zentrum rd. 7 km weiter nach See zu als der Beobachtungsort Pogum. Nach See zu nimmt in der Ems wie in allen Flußmündungsgebieten der Salzgehaltslängsgradient an Größe ab, und dadurch verringert sich auch die Größe der Feststoffkonzentration im Kopf der Brackwasserzone (2.2.5.4.1). Dieser lagebedingte

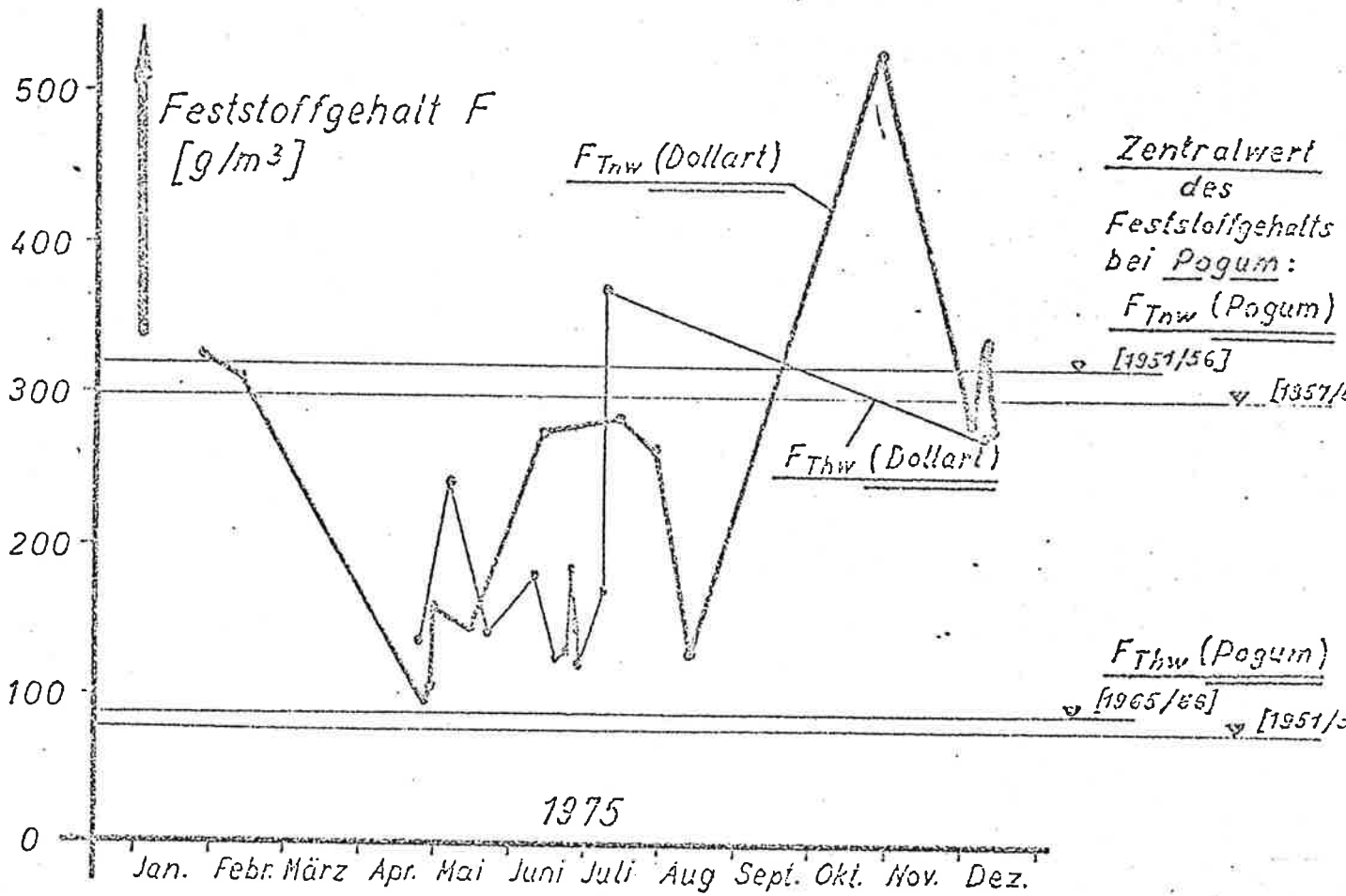


Abb. 51 b: Feststoffgehalt um Tnw und Thw im Dollart (Tonne 3, Dollartmund) im Jahresgang 1975 und Zentralwerte des Feststoffgehalts bei Pogum

Rückgang wird nach einer Umsumleitung verstärkt durch die vom Modell vorausgesagte generelle Abnahme des Salzgehaltsgradienten. Es ist daher zu erwarten, daß nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart auch die Tnw-Werte des Feststoffgehalts auf der Umleitungsstrecke im Jahresdurchschnitt nicht höher liegen als die des Dollart.

Es sind bisher nur relativ wenige Messungen über den Jahresgang der Feststoffwerte im Dollart verfügbar. Sie erlauben keine Aussagen, welche über die vorstehenden allgemeinen Ausführungen hinausgehen. Das Ergebnis des hier angestellten Vergleichs kann aber als gesichert gelten. Es wurden nämlich die in der Geiserinne zu erwartenden Werte des Feststoffgehalts mit denen verglichen, welche im Dollartmund gemessen worden sind. Im Dollartmund treten aber in der Regel die niedrigsten von allen im Dollart zu beobachtenden Feststoffkonzentrationen auf. Nach allen bisher vorliegenden Messungen steigt in den Dollart hinein gegen die Ausmündung der Aa bei Nieuwe Statenzijl der Feststoffgehalt im Dollartwasser an und erreicht eine Größe vom Mehrfachen der vorstehend dargestellten Werte.

#### 4. Der tideoffene Seekanal

Bei einer Abdämmung der Ems oberhalb der Einfahrt zum Hafen Emden wird das Emdener Fahrwasser zu einem tideoffenen Seekanal. Er wird bei jeder Tide vom Wasser der Flut gefüllt. Die dabei mitgeführten Feststoffe werden im Seekanal sedimentiert, wenn ihre Sinkgeschwindigkeit ausreicht, um während des Aufenthalts des Flutwassers im Seekanal die Gewässersohle zu erreichen. Nach diesem Ansatz läßt sich die Stärke der dortigen Sedimentation berechnen.

Die Wasserbewegung im tideoffenen Seekanal nach Zeit und Menge wurde mit Hilfe der vom hydraulischen Modell vorhergesagten Vertikaltide berechnet (Kubizierung). Aus diesen Angaben läßt sich mit gewissen Vereinfachungen (4.3.) die Dauer des Aufenthaltes eines bestimmten Wasserkörpers und sein jeweiliger Ort im Seekanal im Verlauf der Tide ermitteln.

Der mitgeführte Feststoff nach Konzentration und Verteilung in der Vertikalen ist aus den Ergebnissen der Messungen 1948 - 1952 berechnet worden. Dadurch sind die durch die Baggerungen zur Vertiefung des Emdener Fahrwassers ab 1953 eingetretenen Veränderungen der Feststoffbewegung eliminiert. Die Einflüsse auf die Feststoffkonzentration werden in 4.1 hinsichtlich ihres jahreszeitlichen Ganges und in 4.2 dahingehend besprochen, in welcher Weise sie durch die Lage der Brackwasserzone beeinflusst werden.

Der Sekundärtransport durch die Ebbe und die folgenden Tiden trägt einen Teil der sedimentierten Feststoffe wieder aus dem Seekanal heraus und verteilt die bleibenden Mengen auf die weiter einwärts gelegenen Teile des Seekanals und der Hafenbecken (4.4). Aus den danach ermittelten Sedimentmengen wird das Baggererfordernis für die einzelnen Bereiche des Seekanals und des Hafens berechnet (4.5).

Bei einer Vertiefung des tideoffenen Seekanals vergrößert sich die sohlennahe einwärtsgerichtete Dichteströmung. Die sich daraus ergebende Erhöhung des Baggererfordernisses wird in 4.6 bemessen. In 4.7 werden die den vorgenannten Berechnungen überlagerten Einflüsse diskutiert.

Durch eine Abdämmung der Ems oberhalb der Einfahrt zum Hafen Emden wird das Emdener Fahrwasser zu einem "Totarm" der Ems. Dieser soll nach wie vor als Zufahrt zum Hafen Emden und ggf. als zusätzliches Hafenbecken mit seeschiffstiefer Fahrrinne erhalten bzw. in zukünftigen Ausbaustufen auf seiner ganzen Länge über die derzeit unberhaltene Wassertiefe hinaus vertieft werden. Wegen der in seiner Längserstreckung an allen Orten etwa gleichen Form und Größe seiner Querschnitte ist dieser Teil der Zufahrt zum Hafen Emden als "Kanal" anzusprechen,

welcher an seinem westlichen Eingang in Höhe des Geise-Weststeert dem Eindringen der Flut offensteht. Der aufgeführten Eigenschaften wegen ist er als "tideoffener Seekanal" zu bezeichnen.

Im Emden Fahrwasser ist z.Z. die angestrebte Fahrwassertiefe nur durch ständige Unterhaltungsbaggerungen aufrechtzuerhalten. Die Gründe für die ständigen Eintreibungen, welche diese Baggerungen erforderlich machen, sind im Abschnitt 2. erläutert worden. Nach einer Abdämmung des Emden Fahrwassers werden die in Abschnitt 2. dargelegten hydrodynamischen Verhältnisse in dem durch den Emsabschluß geschaffenen tideoffenen Seekanal zwar grundlegend gegenüber den derzeitigen geändert, es wird aber nach wie vor in diesem Teil der Zufahrt zum Hafen Emden zu Ablagerungen kommen. Diese rühren von den in der ungehindert eindringenden Flutwassermenge mitgeführten Feststoffen her, welche im langsam strömenden Wasser des Seekanals sedimentieren. Der Ermittlungsweg und das Ergebnis der Vorausbestimmung der Sedimentmenge und der erforderlichen Unterhaltungsbaggerungen wird nachstehend erläutert.

#### 4.1 Der Feststoffgehalt des Flutwassers im tideoffenen Seekanal

Messungen im Emden Fahrwasser in Höhe der Einfahrt zum künftigen tideoffenen Seekanal zeigen eine Abhängigkeit des Feststoffgehalts von der Größe der mittleren Stromgeschwindigkeit. Die Stromgeschwindigkeit im tideoffenen Seekanal für eine Berechnung des Feststoffeintriebs wird den Messungen des hydraulischen Modells entnommen. Besonderheiten des Modellergebnisses werden besprochen.

Von der mit der Flut in den tideoffenen Seekanal eindringenden Wassermenge werden Feststoffe in Suspension mitgeführt. Es handelt sich in der Hauptsache um mineralische Stoffe unterschiedlicher Korngröße, welche in stehendem Wasser unter der Wirkung der Schwerkraft zu Boden sinken. Im bewegten Wasser werden sie durch die Erosionswirkung der Strömung an der Sohle in Suspension gebracht. Die Turbulenz der Strömung hält davon eine ge-

wisse Menge gegen die Schwerkraftwirkung in einem dynamischen Gleichgewicht in suspendiertem Zustand.

Die Menge des erodierten Materials ist eine Funktion der Stromgeschwindigkeit am Erosionsort. Die Menge des suspendierten Kornes, welche an einem bestimmten Ort im Strom zu beobachten ist, wird dagegen durch die Strömungsverhältnisse innerhalb einer nicht genau angebbaren Wegstrecke bestimmt, welche im Stromstrich auf den Beobachtungsort zuführt. Letztgenannter Vorgang hat sich bisher einer erschöpfenden Analyse entzogen. Für die hier zu behandelnden Fragen soll daher auf die Empirie, d.h. auf die Naturbeobachtungen im Gebiet des Geise-Weststeert in der geplanten Einfahrt zum tideoffenen Seekanal zurückgegriffen werden.

In Modelluntersuchungen bei der BAW ist die Stromgeschwindigkeit in der Einfahrt zum tideoffenen Seekanal nach Abdämmung der Ems und ihrer Umleitung durch den Dollart in Größe und zeitlicher Veränderung während der Tide gemessen worden. In Abb. 52 wurde dieses Ergebnis der Modellmessungen mit demjenigen einer Naturmessung im Emsquerschnitt in Höhe des Geise-Weststeert im derzeitigen Zustand der Stromverteilung auf Ems und Dollart zusammengezeichnet, und nachstehend soll die Vergleichbarkeit von Modell- und Naturmessung hinsichtlich ihres Transportvermögens an Hand der dargestellten und anderer Naturmessungen diskutiert werden.

Soweit als bestimmende Parameter für den Feststofftransport der Strömung die Art des Bettmaterials und die Form des Gewässerbetts, d.h. in der Hauptsache die Querschnittsfolge in Stromlängsachse das Ergebnis beeinflussen, ist im vorliegenden Fall der Vergleich der Modellmessung mit einer Messung in der Natur zulässig: Auf der für die volle Ausbildung eines dynamischen Transportgleichgewichts erforderlichen relativ kurzen Anströmstrecke seewärts des Vergleichsquerschnitts am Geise-Weststeert werden trotz der großräumig tiefgreifenden Umstellungen durch die Emsumleitung keine den Vergleich beeinflussenden Umstände verändert. Entscheidend für die Menge der von der Strömung mit-

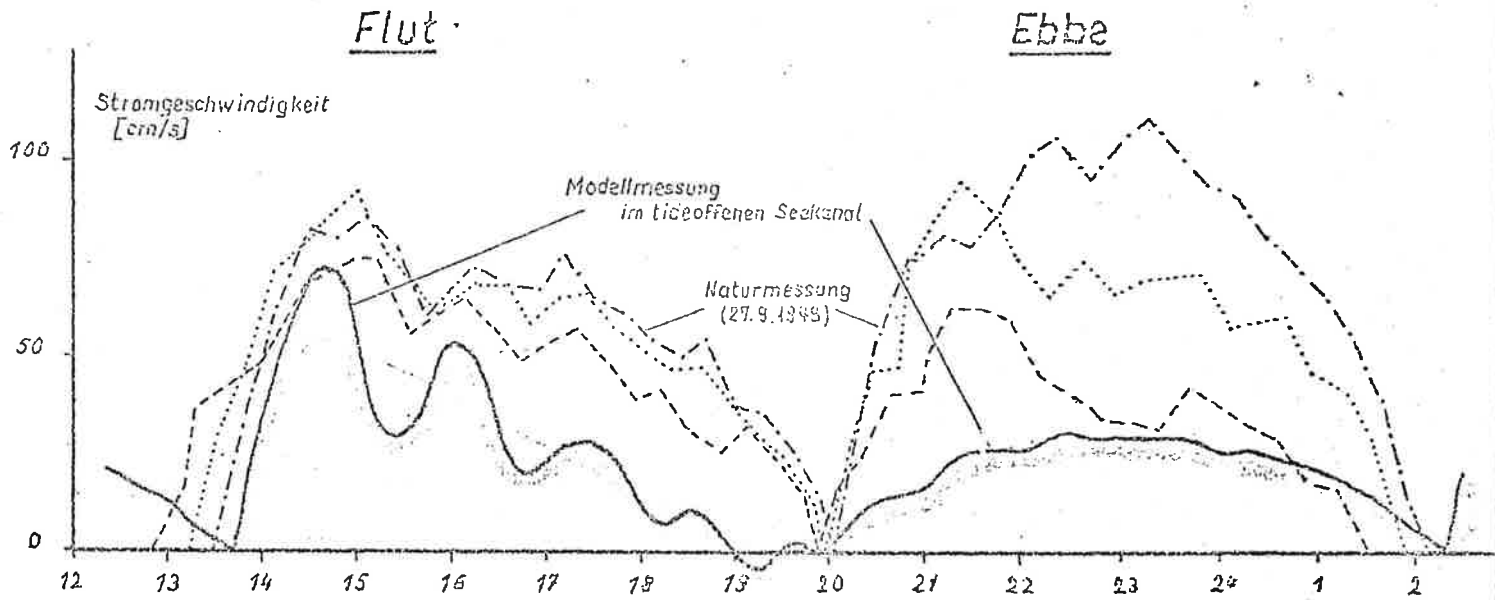
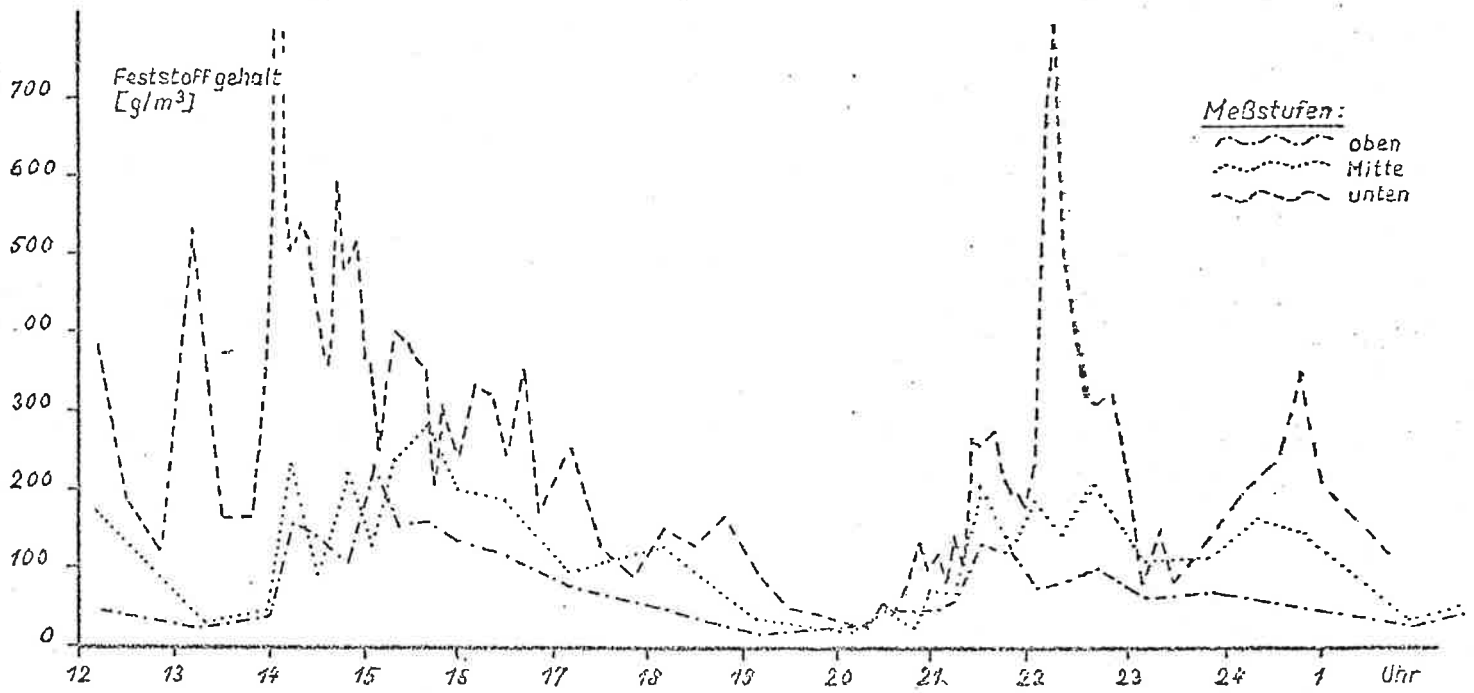


Abb. 52 : Stromgeschwindigkeit und Feststoffgehalt in der Ems,  
Ems-km 47,9 ( Geise - Weststeert )



geführten Feststoffe sind daher allein die Größe und womöglich der zeitliche Verlauf der Stromgeschwindigkeiten während der Tide. Der Einfluß der Form der Geschwindigkeitsganglinie wird als erster besprochen.

In der Abb. 52 fällt auf, daß die Flutgeschwindigkeiten der Modelltide im Seekanal zeitlich stärker schwanken als diejenigen der Naturtide im nicht abgedämmten Emden Fahrwasser. Durch nähere Untersuchungen im Modell ist geklärt worden, daß die Schwankungen von kurzperiodischen Schwingungen im inneren Emsmündungstrichter herrühren, welche auch in das Emden Fahrwasser einlaufen. Sie werden der wesentlich längerperiodisch und daher in ihrem Strömungsverlauf ruhigeren Tide aufgesetzt und führen zu den zu beobachtenden Pulsationen.

Nach einer Abdämmung der Ems oberhalb des Hafens Emden werden am Sperrdamm sowohl die Tidewelle wie auch die kürzerperiodischen Wellen reflektiert. Als Ergebnis der Reflexion der Tidewelle ist in Abb. 52 bei der Modelltide die gegenüber der Naturtide verkürzte Flutdauer und der bei geglättet gedachten Oberschwingungen bei der Modelltide sehr ausgeprägt dreiecksförmige Verlauf der Geschwindigkeitsganglinie während der Fluttide zu erkennen. Bei ihr folgt nach schnellem Anfangsanstieg der Geschwindigkeit ein fast linearer Abfall bis zur Kenterung.

In ihrer charakteristischen, vorbeschriebenen Grundform unterscheidet sich der im Modell bei abgedämmter Ems gemessene Geschwindigkeitsverlauf von dem in Abb. 52 dargestellten einer Naturmessung im heutigen Emden Fahrwasser. (Um die Formunterschiede deutlicher werden zu lassen, stelle man sich die Werte der Naturmessung im Verhältnis der mittleren Geschwindigkeiten auf etwa  $\frac{3}{5}$  ihrer Größe in Abb. 52 verkleinert vor.) Der Grund für den Übergang eines Geschwindigkeitsverlaufs ähnlich dem der Naturmessung in den der Modellmessung ist die kontinuierliche Überlagerung des bereits am Sperrdamm angekommenen und reflektierten Teils der einlaufenden Tidewelle mit dem nachfolgenden.

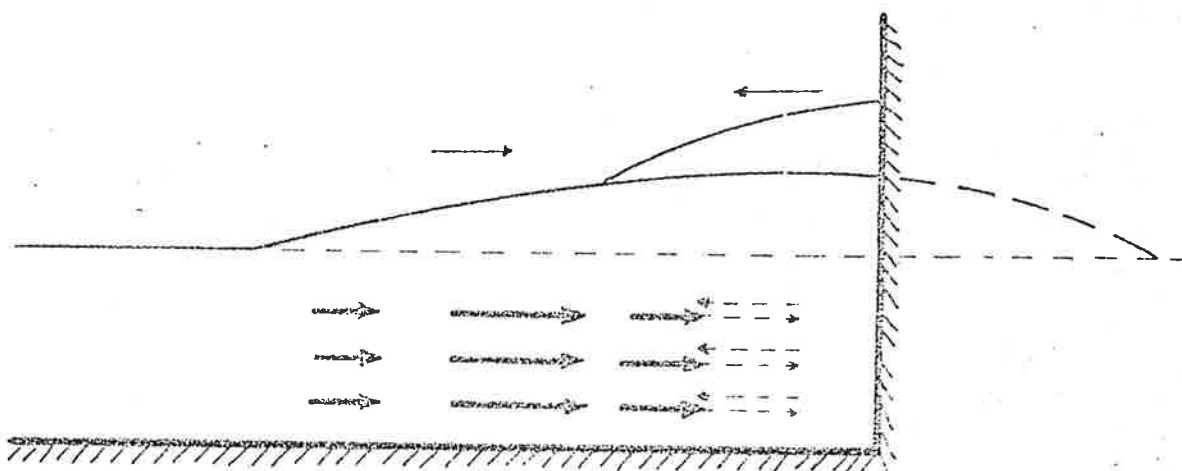


Abb. 53 : Reflexion der Tidewelle an einer Wand

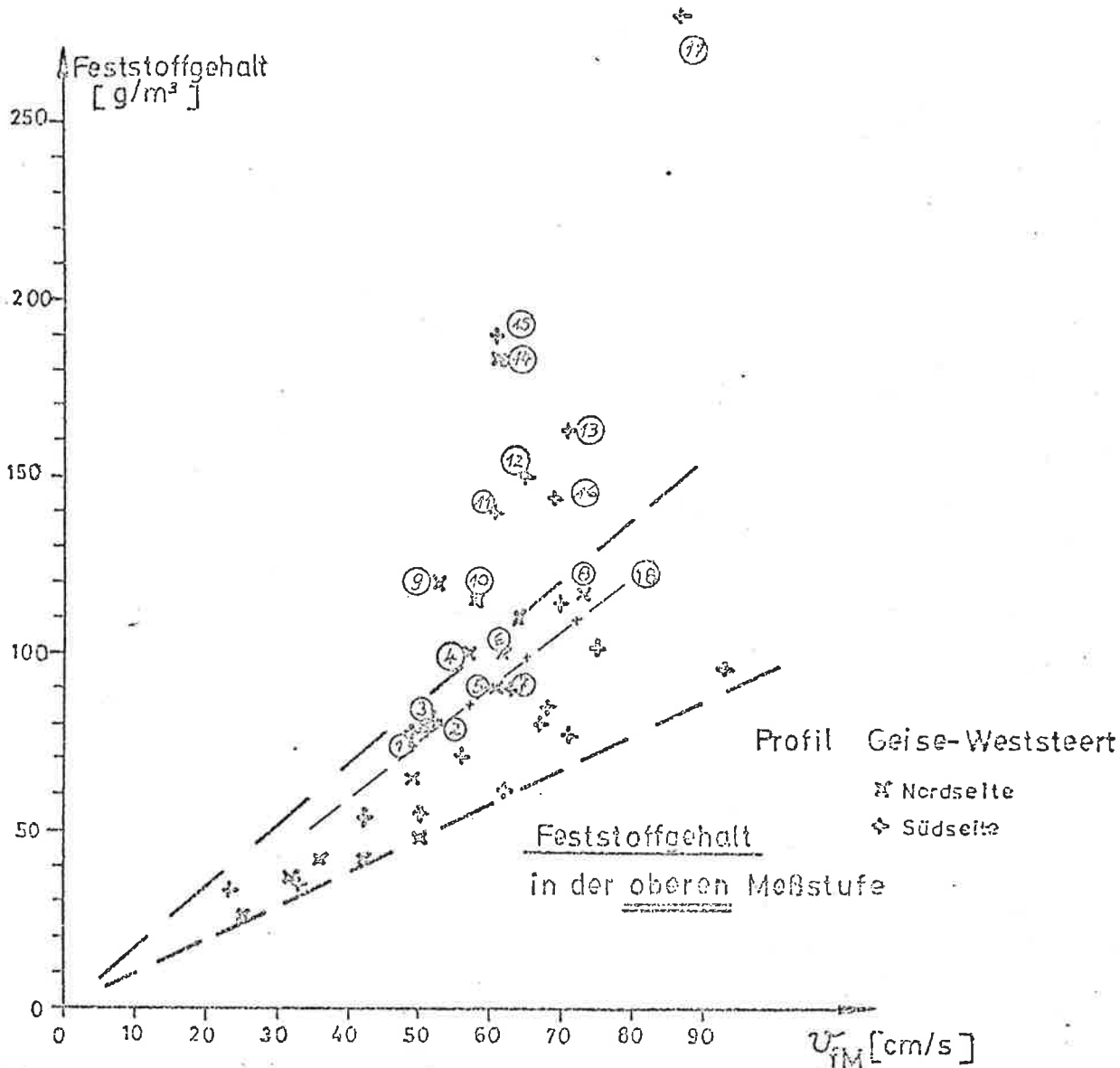
Die Laufrichtung wie das Geschwindigkeitsfeld der reflektierten Tidewelle sind dem der einlaufenden entgegengerichtet. Bei der Überlagerung und vektoriellen Addition der Stromgeschwindigkeiten beider Wellenteile werden die Geschwindigkeiten der einlaufenden Welle fortlaufend verkleinert (siehe Abb. 53). Für einen Beobachter in einigem Abstand von der Absperrstelle geht die Geschwindigkeit nach dem Durchgang des Kopfs der Welle schnell und stark zurück, und zwar stärker als bei einer unreflektierten oder teilreflektierten Welle. Der gleiche Vorgang spielt sich bei den kürzerperiodischen Wellen ab. Er wiederholt sich jedoch mehrmals im Verlauf der Fluttide und führt im vorliegenden Falle zu stärkeren Oszillationen im Geschwindigkeitsverlauf im tide-offenen Seekanal als im unabgedämmten Emden Fahrwasser.

In Abb. 52 ist über dem Geschwindigkeitsverlauf der Tide auch der gleichzeitig gemessene Feststoffgehalt der Naturmessung dargestellt. Auch dieser schwankt in seiner Größe im Verlauf der Tide und besonders in Sohlennähe sehr stark und schnell. Es fallen jedoch kaum oder anscheinend nur zufällig die Maxima der Feststoffkonzentration mit denen der Geschwindigkeit zusammen.

Das ist erklärlich, da das Anwachsen des Feststoffgehalts auf eine der Geschwindigkeit entsprechende Größe erst eine gewisse Länge des Fließweges, d.h. einige Zeit der Wirksamkeit der Stromgeschwindigkeit erfordert. Ebenso geht die Feststoffkonzentration nach Rückgang der Geschwindigkeit nur verzögert zurück. Schnelle Oszillationen werden daher im Gang des Feststoffgehalts ausgeglichen. Die hohen, kurzzeitigen Spitzen in der Feststoffganglinie erklären sich durch die Zufallsfänge beim Schöpfen von Wasserproben aus den bekannten, örtlich begrenzten Feststoffwolken.

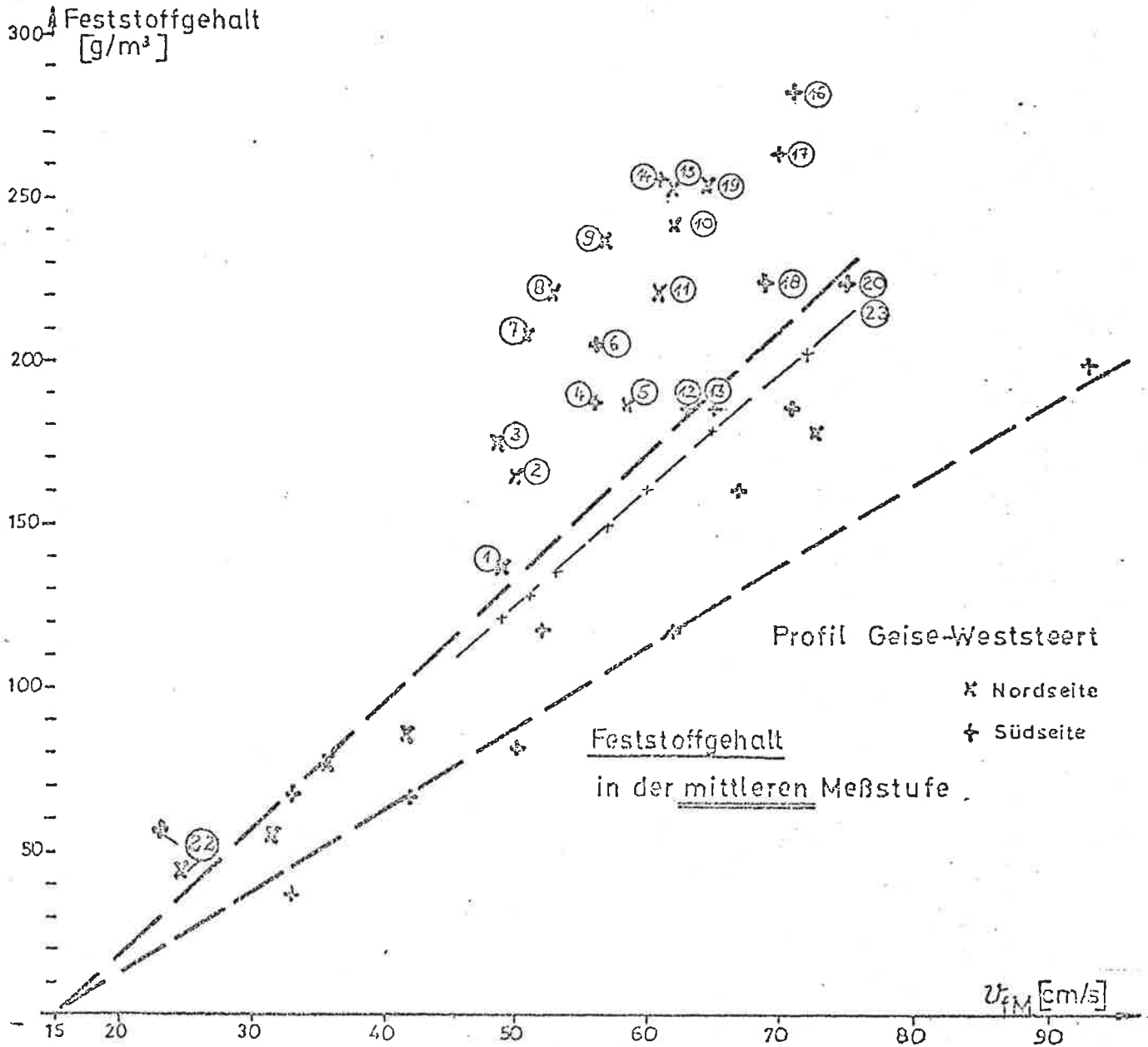
Es wird nachstehend zu sehen sein (Abb. 54 bis Abb. 57), daß sich der mittlere Feststoffgehalt der Flut mit einer für die hier anzustellenden Betrachtungen ausreichenden Näherung durch die mittlere Geschwindigkeit während der Flutstromdauer charakterisieren läßt. Dieses Ergebnis wurde mit Tiden gewonnen, welche in Steilheit und Schwankungsgrad der Geschwindigkeitganglinie sehr unterschiedlich ausgefallen waren. Es ist daher zu schließen, daß auch die mittlere Geschwindigkeit der Modelltide als Proportional-Maßstab für den durch sie bewirkten Feststofftransport verwendet werden darf. Dieser Schluß gilt zumindest innerhalb der Grenzen der Genauigkeit, welche der hier anzustellenden Ermittlung durch Umstände gesetzt werden, welche später noch zu besprechen sind.

In Abb. 54 bis Abb. 57 ist die Größe des mittleren Feststoffgehalts während der Flutstromdauer über dem Mittelwert der gleichzeitig gemessenen Geschwindigkeit für mehrere Naturmessungen abgesetzt worden. Die Abbildungen zeigen den Zusammenhang zwischen dem Tide- und Tiefenmittel der Geschwindigkeit und dem mittleren Feststoffgehalt jeweils einer der Tiefenstufen "oben", "Mitte", "1 m über der Sohle" und "unten" in einer nördlichen (☼) und einer südlichen (☽) Meßvertikalen des Profils am Geise-Weststeert. Beim Vorliegen besonderer Umstände (Wind, Oberwasser), welche den Tideablauf und damit die dargestellten Meßgrößen beeinflussen haben können, ist den Meßwerten eine Erläuterung als Fußnote beigefügt worden. Klammert man in den angesprochenen Abbildungen die wegen irgendwelcher Beeinflussungen mit Bemerkungen



1	13,851	WSW 6, SW 6	10	9,549	Nach Oberwasser-Anschwellung, NNW 5
2	27,948	SSW 5, WSW 6	11	11,549	" " "
3	10,549	Nach Oberwasser-Anschwellung	12	13,549	" " "
4	12,549	" "	13	24,848	" " "
5	15,549	" "	14	8,948	" " "
6	13,549	" "	15	9,549	" " " , NNW 5
7	12,549	" "	16	25,848	WSW 6, SW 7
8	24,848	" " , W 5	17	22,948	Hohe Flut, W 6, WSW 6
9	11,549	" "	18	20-26,6, 52	Feststoff nur als Mittelwert bekannt

Abb 54 : Feststoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (Flut)



1	13,8,51	WSW6 SW6	13	135,49	Nach Oberwasser-Anschwellung
2	253,52	Nach Oberwasser-Anschwellung	14	9,5,49	" " "
3	19,48	" " "	15	89,48	" " "
4	11,5,49	" " "	16	249,48	" " " W5
5	9,5,49	" " "	17	239,48	W5,NW4
6	105,49	" " "	18	258,48	WSW6, SW7
7	105,49	" " "	19	610,48	Nach überhöhter Tide
8	11,5,49	" " "	20	610,48	" " "
9	12,5,49	" " "	21	229,48	Hohe Flut, W6, WSW6
10	13,5,49	" " "	22	259,51	Sehr niedrig gelegene Tide
11	15,5,49	" " "	23	20-26,52	Feststoff nur als Mittelwert bekannt
12	12,5,49	" " "			

Abb 55: Feststoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (Flut)

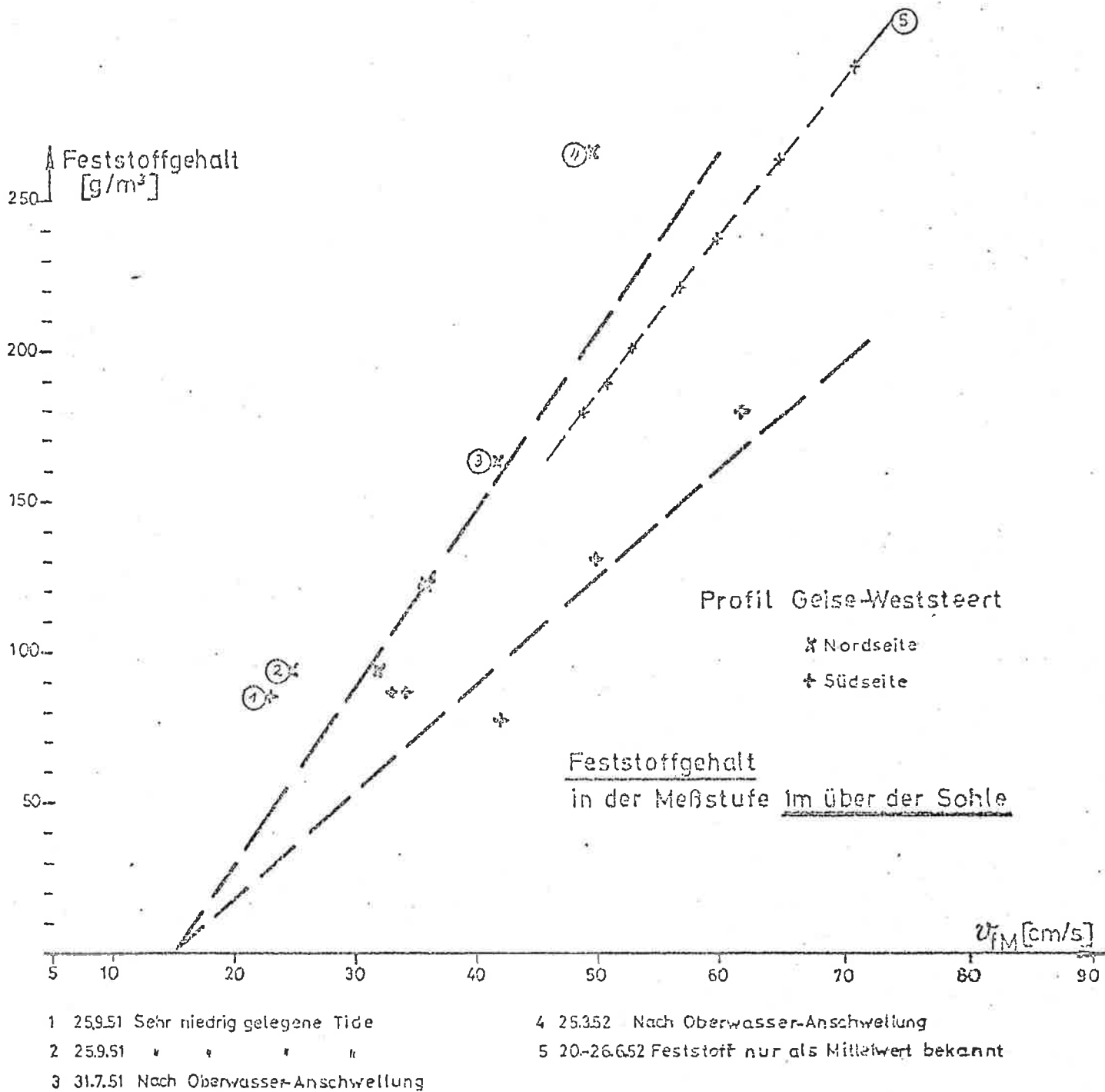
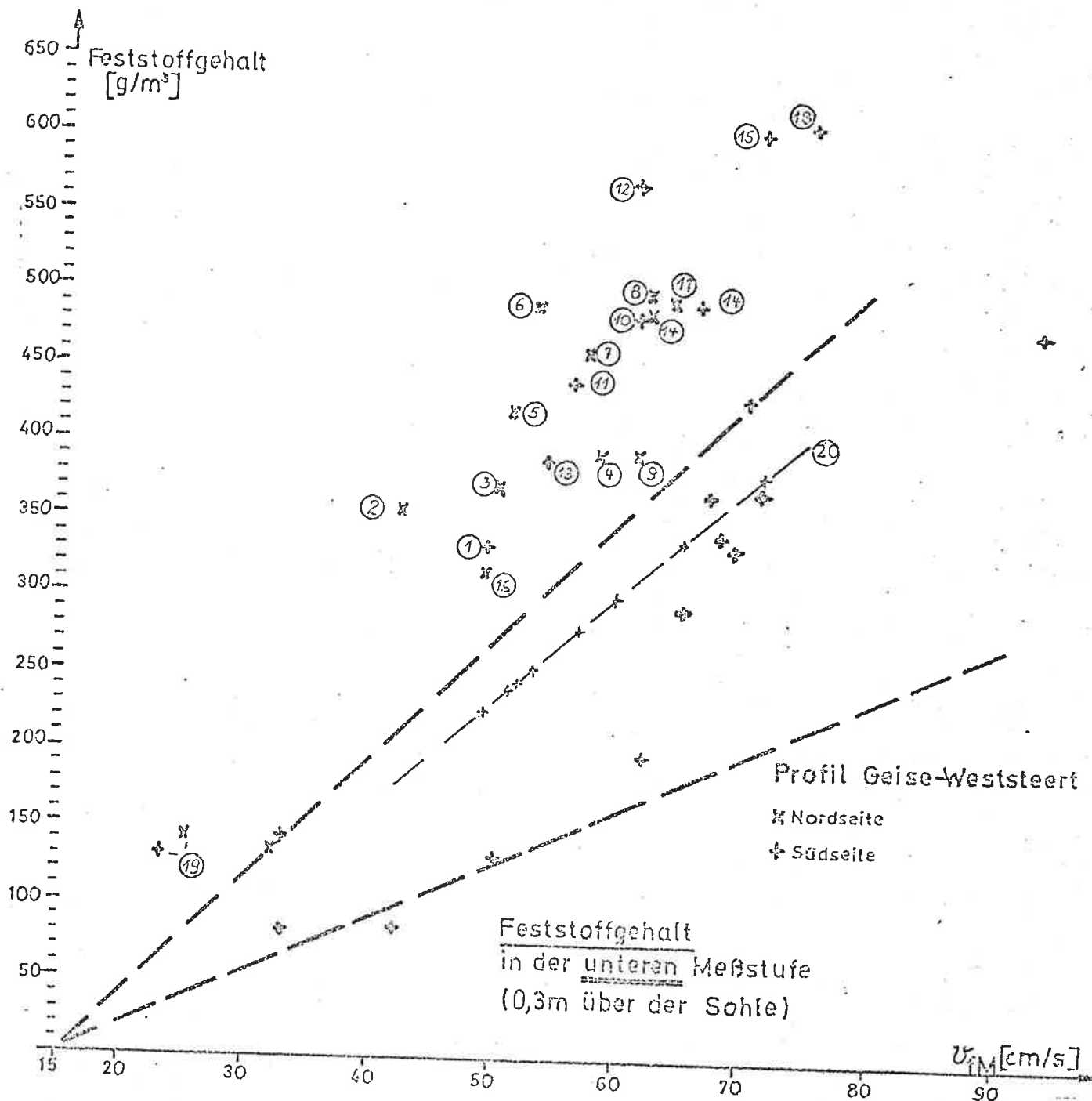


Abb. 56: Feststoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (Flut)



1	13.8.51	WSW 6	11	10.5.49	Nach Oberwasser-Anschwellung
2	31.7.51	OSO 4	12	11.5.49	" " "
3	25.3.52	Nach Oberwasser-Anschwellung	13	12.5.49	" " "
4	9.5.49	" " "	14	8.9.48	" " "
5	10.5.49	" " "	15	24.8.48	" " "
6	11.5.49	" " "	16	19.4.8	" " "
7	12.5.49	" " "	17	6.10.43	Nach überhöhter Tide
8	13.5.49	" " "	18	18.6.48	" " "
9	15.5.49	" " "	19	25.9.51	Sehr niedrig gelegene Tide
10	9.5.49	" " "	20	20.-26.6.52	Feststoff nur als Mittelwert bekannt

Abb 57 : Feststoffgehalt in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (Flut)

verschiedenen Beobachtungswerte von der Betrachtung aus, so liegen die übrigen Meßpunkte in einem relativ schmalen Sektor konzentriert, dessen Grenzen durch strichlinierte Geraden markiert worden sind.

Es sei ausdrücklich vermerkt, daß durch diese Geraden kein funktionaler Zusammenhang angedeutet werden soll. Die Messungen sind nicht zahlreich genug, um echte Korrelationen mit ihnen erarbeiten zu können. Sie sind auch nicht alle streng vergleichbar, da in verschiedenen Meßjahren verschiedene Meßmethodik angewandt wurde. So wurde ab 1951 die Geschwindigkeit nur noch in drei Tiefenstufen (oben, Mitte, unten) gemessen. Man betrachtete diese Messungen nur noch als orientierende Wiederholungsmessungen der in den Jahren 1948/49 mit größerer Stufenzahl intensiver erkundeten Strömungsverhältnisse.

Leider wurde bei diesem Übergang auch die Höhe der unteren Meßstufe von ursprünglich 0,5 m über der Sohle auf 0,25 - 0,3 m über Sohle verlegt. Dadurch vermindert sich die Anzahl gleichartiger Messungen sehr. Es war daher nicht möglich, die vorliegenden Untersuchungen über den Feststofftransport auf einen Zusammenhang mit der Größe der Sohlengeschwindigkeit anzulegen. Nach allen wissenschaftlichen Erkenntnissen hätte das zumindest bei den Sandkornfraktionen eine mathematisch formulierbare Abhängigkeit liefern können. Die Versuche dieser Art mit der vorhandenen Meßwertmenge waren jedoch erfolglos. Die zumindest für die untere Meßstufe mit hohem Sandgehalt sicher zu erwartende Abhängigkeit des Feststofftransportes von einer höheren Potenz der Sohlengeschwindigkeit geht beim Bezug auf die mittlere Geschwindigkeit in der Vertikalen als nicht nachweisbar in der allgemeinen Streuung unter (siehe Abb. 57).

Messungen neueren Datums sind nicht in die vorliegenden Darstellungen aufgenommen worden. Ab 1958 wurde das Beobachtungsprofil um rd. 1 km stromauf verlegt. Der Zusammenhang mit den wesentlich reichlicher vorliegenden älteren und hier verwendeten Messungen wäre nur schwer herzustellen gewesen.



Die Darstellungen der Abb. 54 und 57 engen in den zwischen den strichlierten Geraden zusammengefaßten Meßwerten den Streubereich, welcher mittleren Tideverhältnissen zugeordnet werden kann, für die vorliegenden Betrachtungen hinreichend ein. Im Abschnitt 4.7 wird dargelegt werden, daß die Umstände, welche bei den ausgeklammerten Werten zu größeren Feststoffkonzentrationen geführt haben, in ihrer Summe bei den vorliegenden Untersuchungen gegen andere, entgegengesetzt wirkende Einflüsse aufgerechnet werden können. Es darf also die weitere Betrachtung auf die in den Abb. 54 bis 57 herausgehobenen Sektoren abgestellt werden.

#### 4.2 Der Einfluß der Bewegungen der Brackwasserzone auf den Feststoffgehalt im Wasser des Seekanals

In 4.1 wurde die Größe der Feststoffkonzentration im Wasser des tideoffenen Seekanals aus den vorliegenden Naturmessungen abgeleitet. In diesen Naturmessungen ist nicht die ganze Breite der möglichen Änderungen des Feststoffgehalts im Laufe des Jahres erfaßt. Der Einfluß unterschiedlich hoher Lage der Brackwasserzone wird nachfolgend berücksichtigt.

Die Streubreite der Meßwerte in den gekennzeichneten Sektoren der Abb. 54 bis 57 ist neben meßmethodischen, auswertetechnischen und zufallsbedingten Einflüssen wesentlich bedingt durch die unterschiedliche Lage der Brackwasserzone während der Messungen. Dieser Parameter muß unbedingt zusätzlich in die Betrachtung eingeführt werden.

Einem Kenner der Verhältnisse in der Brackwasserzone wird in den Abb. 54 - 57 die scheinbar leichtmögliche und recht enge Zuordnung des Feststoffgehalts zur Stromgeschwindigkeit auffallen. Die nähere Analyse zeigt dann auch, daß die zu den hier besprochenen Darstellungen verarbeiteten Meßwerte einer nicht ganz zufallsbedingten, einseitigen Auslese unterworfen sind: Da die klimatischen Bedingungen in der Mitte des Jahres geringere physische Belastungen mit sich bringen als in den meist stürmischen Wintermonaten, werden Strommessungen im See- und Mündungsgebiet in der Regel in den Sommermonaten einschl. Spätfrühling und dem frühen Herbst durchgeführt, so auch diejenigen der hier betrachteten Meßwertmenge. Während dieser weitgehend oberwasserarmen

Meßzeit liegt der Kopf der Brackwasserzone so weit oberhalb des hier untersuchten Meßprofils am Geise-Weststeert, daß die Bewegungen der Brackwasserzone nur relativ geringe Auswirkungen auf die Größe des Feststoffgehalts haben. Die Bedeutung dieses Umstandes für das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung wird nachstehend dargelegt.

Die Größe der Feststoffkonzentration zeigt in der Brackwasserzone eine gewisse Regelmäßigkeit der Bindung an die Lage des Bezugsorts zum Kopf der Brackwasserzone. Es ist das in der Hauptsache eine Funktion des Salzgehalts-Längsgradienten. Dadurch läßt sich die Ortslage eines gewissen Feststoff-Konzentrationswerts mit einiger Genauigkeit auch durch einen Salzgehaltswert beschreiben. Salzgehaltsschwankungen ziehen daher Änderungen des Feststoffgehalts nach sich, welche jedoch je nach Lage zum Kopf der Brackwasserzone, d.h. je nach der Größe des Salzgehalts unterschiedlich groß sind.

Nach der Größe des Salzgehalts klassifiziert, es sei derjenige bei Tnw gewählt, liefen die Meßtiden, welche zwischen den Begrenzungsgeraden der Abb. 54 - 57 zum engeren Betrachtungsbereich gehören, bei Salzgehaltswerten von 13 ‰ bis 19 ‰ ab. Welche Salzgehaltswerte dagegen im Profil am Geise-Weststeert auftreten können, ist in der Abb. 58 dargestellt. Es sind in dieser Abbildung die Ergebnisse der Wasserprobenentnahmen vom Kopf eines Spülgerüsts in unmittelbarer Nähe des Geise-Weststeert (aber am Nordufer gelegen) aufgetragen. Da dieses Spülgerüst zur Vermeidung von Schäden durch Eisgang im Spätjahr abgebrochen und erst im Frühling wieder aufgebaut wird, ist auch durch die dort gewonnenen Meßwerte nicht die ganze Breite der Qualitätsbeeinflussung infolge von Ortsänderungen der Brackwasserzone erfaßt. Durch Hinzunahme von Einzelbeobachtungen läßt sich jedoch auch der Extrembereich außerhalb des durch Messungen dichter belegten Streuungsfeldes in seinen Eigenschaften skizzieren.

Die in Abb. 58 aufgetragenen Salzgehaltswerte zeigen erklärlicherweise eine erhebliche Streuung. Sie ist in der Hauptsache bedingt durch die Änderungen des Oberwasserabflusses. Die Größe des Oberwassers wurde deswegen als Abszissenmaßstab gewählt. Da

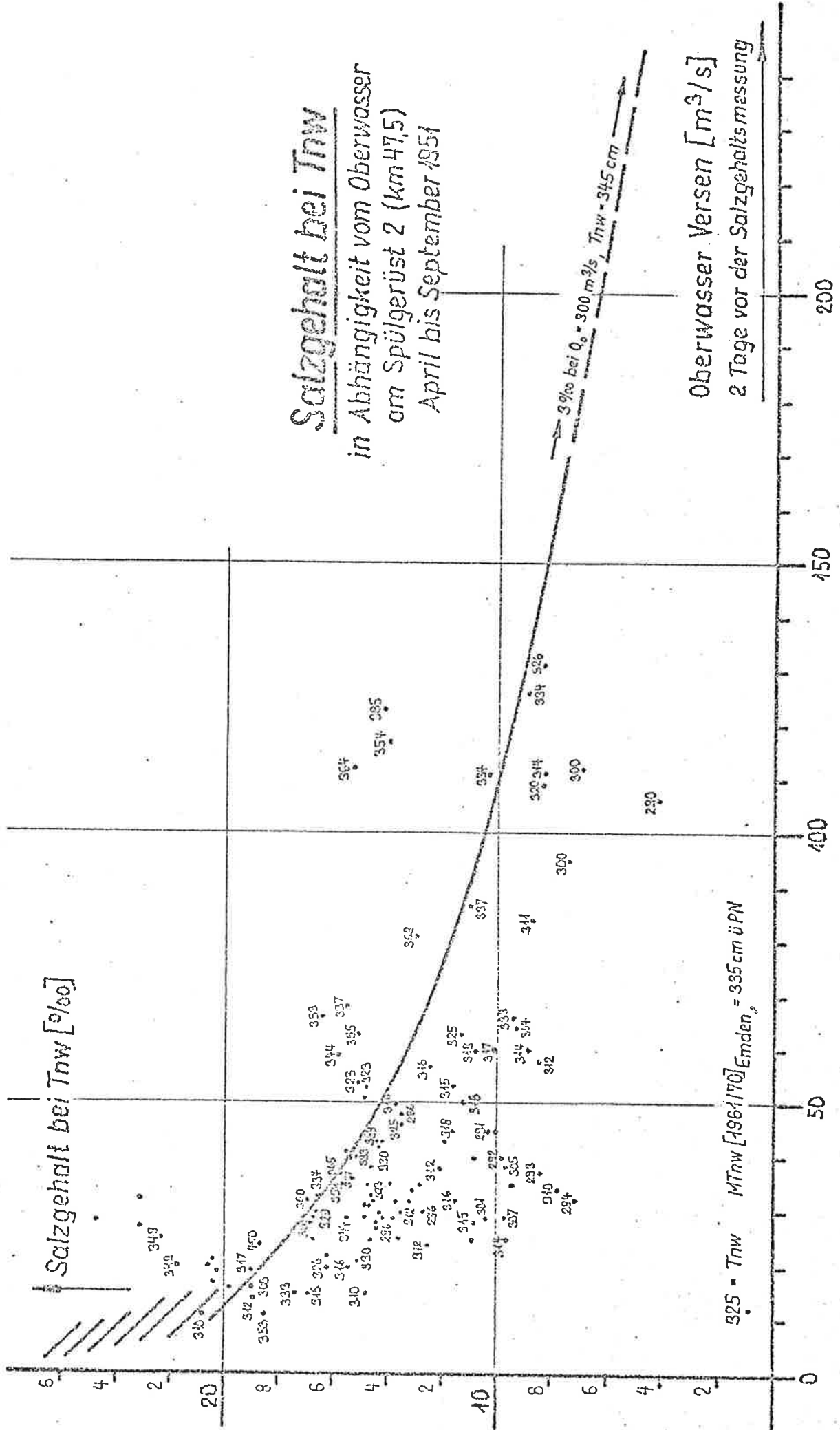


Abb. 20

der Salzgehalt jedoch auch umso kleinere Werte annimmt, je tiefer die Tide im Niedrigwasser absinkt und dabei das Brackwasser aus dem oberhalb gelegenen Flutraum nach See zu ablaufen läßt, ist in Abb. 58 als zusätzlicher Parameter an die meisten Meßwerte die Höhe des Tnw der Tide angeschrieben, während welcher die entsprechende Wasserprobe entnommen wurde.

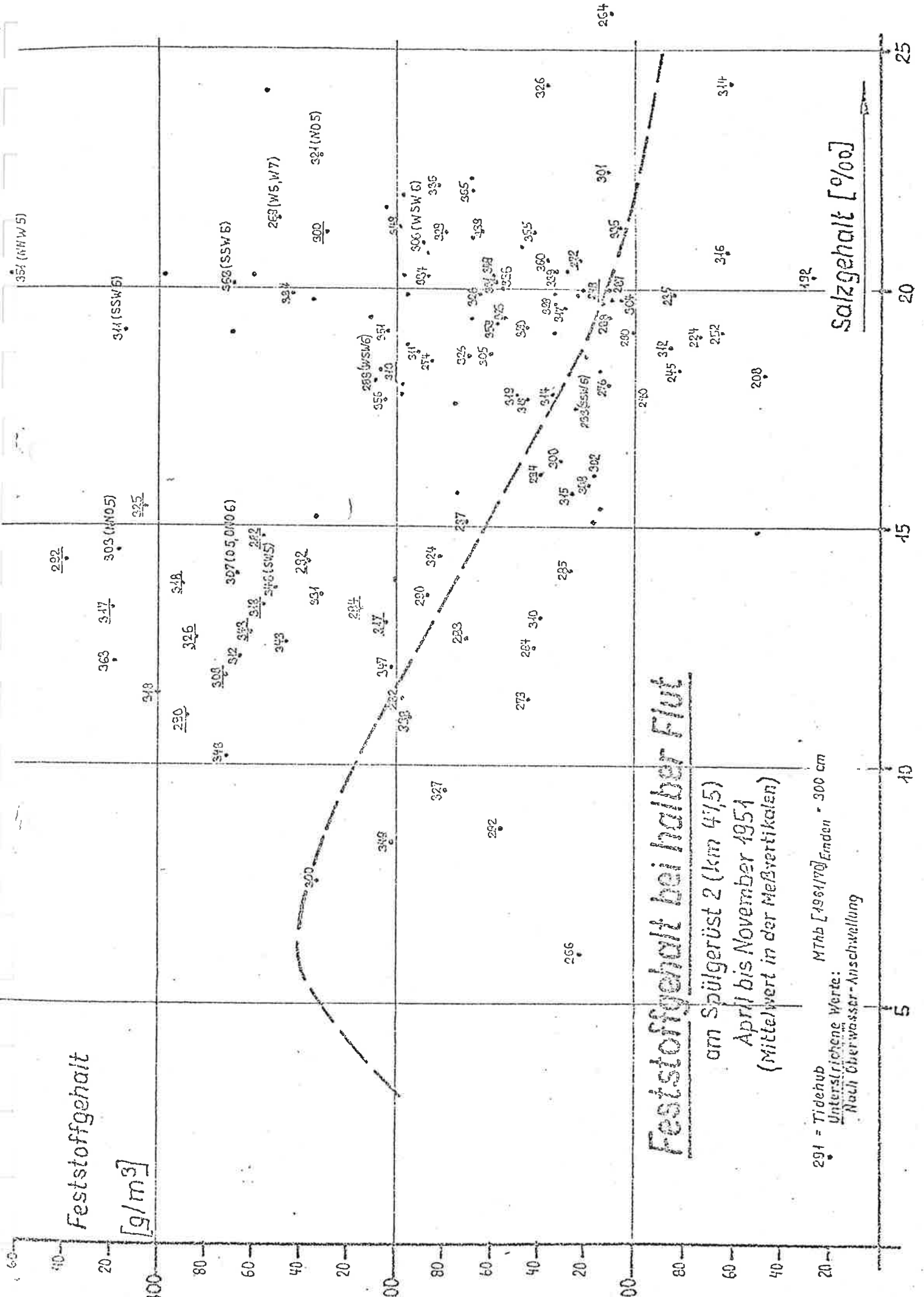
Eine zusätzliche Streuung kommt durch die Meßmethodik in das Wertefeld. Da nur eine einzige Wasserprobe geschöpft wurde, ist deren Eigenschaft allen natürlichen Qualitätsschwankungen des Gewässers unterworfen. Es wurde darüber hinaus der Entnahmepunkt nach der langzeitigen Tidevorhersage festgelegt. Zeitverschiebungen zwischen der Voraussage und dem wahren Eintritt der Tide führen daher zu Abweichungen vom angezielten Ergebnis. Die in Abb. 58 eingelegte Orientierungslinie für den bei mittlerem Tnw etwa zu erwartenden Salzgehalt kann deswegen nicht als sicher festgelegt gelten. Besonders bei niedrigen Oberwasserabflüssen ist dazu noch wegen des langsamen Höherrückens der Brackwasserzone durch ihre eigene Dichtestromdynamik je nach Dauer der Trockenperiode jeder Salzgehaltswert bis etwa 26 ‰ hinauf möglich.

Der Darstellung der Abb. 58 soll für die vorliegende Untersuchung nur die Aussage entnommen werden, daß mit Feststoffmessungen bei Tiden mit Salzgehaltswerten zwischen 13 ‰ und 19 ‰ bei Tnw, wie sie in den Abb. 54 und 57 in der Mittelwertgruppe zusammengestellt sind, nur Zustände innerhalb eines sehr beschränkten Bereichs der Brackwasserzone erfaßt wurden. Nach der Orientierungslinie der Abb. 58 beurteilt, sind die Verhältnisse unberücksichtigt, welche bei Oberwasserabflüssen kleiner als  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  und größer als  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  zu erwarten sind. Tage mit Abflüssen unter  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  treten nach den Angaben im Gewässerkundlichen Jahrbuch so selten auf, daß sie für die Größenordnung des hier betrachteten Mittelwertes ohne Belang sind. Abflüsse mit  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  und mehr sind dagegen im langjährigen Durchschnitt an etwa 155 Tagen des Jahres (42%) zu erwarten. Für diesen besonderen Zeitraum werden nachfolgend die zu erwartenden Feststoffgehaltswerte besprochen.

Es wurden am Spülgerüst in der Nähe des Geise-Weststeert auch Wasserproben in drei Tiefenstufen bei halber Fluttide entnommen und auf ihren Feststoffgehalt untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 59 dargestellt. Für diese gilt das über die Zufallsabhängigkeit oben Gesagte in noch stärkerem Maße. Die Zeitangabe "halbe Tide" ist in der Vorhersage noch unsicherer als die oben angesprochene der Tnw-Zeit. Es wurden weiter zwar drei Proben in unterschiedlichen Tiefenstufen entnommen. Diese sind aber trotzdem zeitlich gesehen nur Einzelproben, und der Feststoffgehalt schwankt zeitlich wesentlich stärker als der Salzgehalt (siehe Abb. 52, oben).

Nach diesen Bemerkungen ist es geradezu erstaunlich, daß sich der in Abb. 59 dargestellten Meßwertmenge doch relativ gut ein ordnendes Prinzip unterlegen läßt. Die Abhängigkeit der Feststoffkonzentration vom Salzgehalt ist aus anderen Untersuchungen (Abb. 24. S. 88) besonders auch Längsfahrten bekannt. Die Meßwerte wurden daher in Abb. 59 über dem in den Proben gemessenen Salzgehaltswerten als Abszisse aufgetragen. So konnten für das Aufsuchen einer Orientierungslinie in der Abb. 59 auch die aus Längsfahrten bekannten charakteristischen Formeigenschaften der Längsverteilungskurve der Feststoffe beim Abfahren der Brackwasserzone in Richtung steigender Salzgehaltswerte in die Meßwertmenge projiziert werden.

Als zweiter ordnender Parameter stellt sich der Tidehub der Meßtide als einfachste zu verwendende Größe heraus (in Abb. 59 an die Meßwerte angeschrieben). Die Brauchbarkeit des Tidehubs als charakterisierende Eigenschaft einer Tide für die Größe ihres mittleren Feststoffgehalts erklärt sich durch den recht engen Zusammenhang zwischen der Steiggeschwindigkeit und der Stromgeschwindigkeit einer Tide. Da die Tidedauer i. a. nur wenig schwankt, ist anstelle der Steiggeschwindigkeit auch die Steighöhe, der Tidestieg, in guter Proportion zur Stromgeschwindigkeit zu finden (Abb. 60). Die Abhängigkeit der Feststoffkonzentration von der Stromgeschwindigkeit wiederum ist durch die Darstellungen der Abb. 54 - 57 belegt.



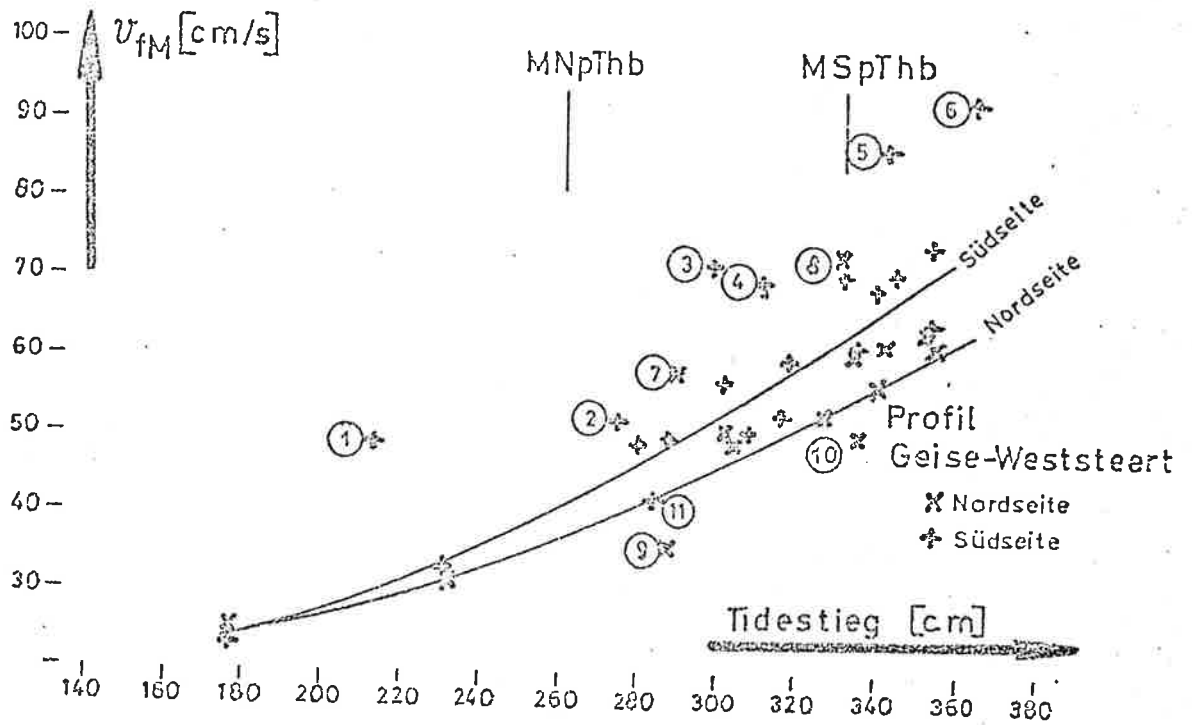
Feststoffgehalt  
[g/m³]

Feststoffgehalt bei halber Flut

am Spülgerüst 2 (km 4/5)  
April bis November 1951  
(Mittelwert in der Meßvertikalen)

291 = Tidehub  
Unterstrichene Werte:  
Nach Oberwasser-Anschwemmung  
MThb [1961/70] Emden - 300 cm

Salzgehalt [%o]



- 1 13.851 WSW 6, SW 6
- 2 27.948 SSW 5, WSW 6
- 3 24.652 NW 6
- 4 23.948 W 5, NW 4
- 5 22.948 Hohe Flut, W 6, WSW 6
- 6 4.1048 " " , NW 4, W 4

- 7 9.549 Erhöhtes Oberwasser, NNW 5, N 5
- 8 24.848 " " , W 5
- 9 20.352 " " , SSO 4
- 10 25.352 Hohes Oberwasser, ONO 2
- 11 31.751 OSO 4

Abb. 60: Mittlere Stromgeschwindigkeit der Flut in Abhängigkeit vom Tidestieg

Nach den vorgenannten nur genähert geltenden Beziehungen und den Zufälligkeiten der Probenentnahmen ist nicht zu erwarten, daß sich in der Wertegruppe der Abb. 59 eine streng definierbare Abhängigkeit darlegen läßt. Ein Grund für das Abliegen sehr vieler und gerade der extremsten Streuwerte konnte jedoch noch in den Windverhältnissen gefunden werden (in Klammern neben den Meßwerten angeschrieben) bzw. bei anderen Meßwerten in dem Umstand, daß sie nach Oberwasseranschwellungen beobachtet wurden, welche in der Regel zu Schlammfließen führen. Für eine Gruppe von Tiden, bei welchen mit ziemlicher Sicherheit Erscheinungen von Schlammfließen zu einem etwa verdoppelten Feststoffgehalt geführt haben, wurden im mittleren, oberen Teil der Abb. 59 die Tidehubwerte zur Andeutung dieses zusätzlichen Ereignisses unterstrichen.

In der Abb. 60 ist den am weitesten streuenden  $v_{FM}$ -Werten in einer Fußnote eine Bemerkung über besondere Umstände beigegeben, welche ihre Meßtide von derjenigen der übrigen Meßwerte unterscheidet. Trotz der relativ wenigen Beobachtungswerte zeichnet sich dabei die Tendenz ab, daß bei gleichem Tidestieg am Pegel Emden die mittlere Flutgeschwindigkeit bei nördlichen und westlichen Winden größere Werte annimmt, dagegen bei östlichen Winden kleiner als bei windunbeeinflussten Tiden. Es wird offenbar der oberhalb liegende Flutraum unterschiedlich gefüllt. Da in der Abb. 59 grundsätzlich alle windbeeinflussten Tiden merklich höhere Feststoffwerte zeigen, ohne Rücksicht auf die Windrichtung, ist offenbar für diese höheren Konzentrationswerte mehr die Windwellenturbulenz als die Größe der mittleren Stromgeschwindigkeit maßgebend.

Die dargelegten erkannten Prinzipien erlaubten es, in die Meßwertgruppe der Abb. 59 eine Orientierungslinie einzulegen für die Größe der bei mittlerem Tidehub und einem bestimmten Salzgehalt zu erwartende Feststoffkonzentration. Aus ihrem Verlauf sollen nachstehende Folgerungen gezogen werden, welche auch bei der nur näherungsweise Fixierung der Zusammenhänge durch die vorhandenen Beobachtungen gut erkennbar sind:

-- Neben der Abhängigkeit des Feststoffgehalts von der Stromgeschwindigkeit im Bereich des Bezugsortes wird die Größe der Feststoffkonzentration durch die besondere Strömungsdynamik der



Brackwasserzone bestimmt. Diese führt zu einer in erster Näherung durch den Salzgehaltswert charakterisierbaren Ortsabhängigkeit des Feststoffgehalts.

- Unterhalb des für die vorliegende Untersuchung belangreichen Salzgehalts zwischen 0 und 19 ‰ bei halber Flut (entsprechend etwa 13 ‰ bei T<sub>hw</sub>) ist der Feststoffgehalt im Mittel rd. doppelt so hoch wie im Bereich 19 - 25 ‰.

Aus Längsfahrten ist bekannt, daß im Bereich der hohen Salzgehaltswerte über 25 ‰, soweit er für die vorliegende Untersuchung von Belang ist, der Feststoffgehalt nicht wesentlich unter demjenigen liegt, welcher durch die Meßwerte der Abb. 54 - 57 repräsentiert ist. Danach läßt sich der Feststoffgehalt des Wassers, welches mit der Flut in den tideoffenen Seekanal einströmt, aufgrund der Naturmessungen im Querschnitt in Höhe des Geise-Weststeert wie folgt als Mittelwert eines Durchschnittsjahres bestimmen:

An den relativ oberwasserarmen Tagen eines Jahres ist der Feststoffgehalt als proportional zur mittleren Stromgeschwindigkeit der Flut eingangs des tideoffenen Seekanals und entsprechend den Darstellungen in Abb. 54 - 57 anzunehmen. Das gilt für rd. 210 Tage = 58 % des Jahres. An den übrigen, oberwasserreichen Tagen des Jahres (42 %) ist mit einem etwa doppelt so hohen Feststoffgehalt zu rechnen. Für das Gesamtjahr ist danach der Feststoffgehalt, welcher sich aus den Abb. 54 - 57 für das nach den Modelluntersuchungen für die Einfahrt zum tideoffenen Seekanal zu errechnende Tidemittel der Stromgeschwindigkeit von  $v_{fM} = 0,31 \text{ m/s}$  ergibt, um 42 % zu vergrößern. Nach dem Aufsuchen der Feststoffgehaltswerte für die einzelnen Tiefenstufen zur Konzentrationsverteilung im vertikalen Gesamtprofil und prozentualen Vergrößerung ist in die weiteren Berechnungen ein Feststoffgehalt von  $82,1 \text{ g/m}^3$  im Durchschnitt der Fluttide einzusetzen.

#### 4.3 Die Flutwassermenge und ihr Einlaufen in den tideoffenen Seekanal

Mit der einlaufenden Flutwassermenge werden Feststoffe suspendiert in den tideoffenen Seekanal hineingetragen. Das Tidewasser hält sich unterschiedlich lange im Seekanal auf je nach der Zeit seines Eintritts während der

Tide. Damit ist auch den suspendierten Feststoffen unterschiedlich lange Zeit zum Sedimentieren gegeben. Um das berücksichtigen zu können, wurde die Wasserbewegung im tideoffenen Seekanal mit Hilfe der vom hydraulischen Modell vorausgesagten Vertikaltide (Tidekurve) nach Zeit und Ort berechnet (Kubizierung).

Die mit dem Flutwasser in den tideoffenen Seekanal eingetragene Feststoffmenge wird nur zu einem Teil dort sedimentiert. Es ist jedoch schwer abzuschätzen, um welchen Prozentsatz es sich handeln könnte. Daher wurde von der BAW eine detaillierte Berechnung der Wasserbewegung durchgeführt, welche bei nur geringfügig vereinfachenden Annahmen zutreffende Auskunft gibt über den Ort, an welchem sich zu einer bestimmten Zeit der Tide ein gewisser Wasserkörper im tideoffenen Seekanal befindet und wie lange er sich bereits im Kanal aufhält. Die erste Angabe gestattet es, den Ort anzugeben, an welchem zu diesem bestimmten Berechnungszeitpunkt sedimentiert wird. Aufgrund der Angabe über die Aufenthaltszeit läßt sich berechnen, welche Kornfraktionen aus der Feststoffsuspension zu diesem Zeitpunkt am angegebenen Ort ausfallen, indem die Berechnung der Wasserbewegung mit einem Ansatz über die Größe der Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Kornfraktionen kombiniert wird.

Berechnungen der vorgenannten Art über die Wasserbewegung lassen sich beiwertfrei, d.h. ohne irgendwelche geschätzten Größen in die Rechnung einzuführen, mit Hilfe der bekannten Abmessungen des Seekanals und des im Modell gemessenen Wasserstandsverlaufs der Tide durchführen (Kubizierung). Im vorliegenden Fall wurde vereinfachend angenommen, daß die Stromgeschwindigkeit in allen Punkten eines Querschnitts des tideoffenen Seekanals sowohl über die Tiefe wie über die Breite von gleicher Größe ist. Nach dieser Annahme befinden sich gleichzeitig in den Kanal eingetretene Wassermengen nach einiger Zeit zwar an einem anderen Ort im Seekanal. Sie befinden sich dort aber immer noch alle zusammen im gleichen Querschnitt. Das Wasser an allen Punkten eines beliebig wählbaren Querschnitts hat dann zu einem bestimmten Zeitpunkt der Berechnung gleichlange im Kanal zugebracht. Es ist durch diese Annahme also ausgeschlossen, daß obere Schichten die bodennahen überholen oder daß ufernahe Wasserkörper hinter denen der Kanalmitte zurückbleiben.

Die vorstehenden Annahmen sind aufgrund folgender Überlegungen ohne Einfluß auf das Berechnungsergebnis: Wie z.Z. im Emdrer Fahrwasser wird auch im tideoffenen Seekanal eine dann zwar gegenüber dem derzeitigen Zustand verminderte aber wirksame Dichteströmung die Sohlengeschwindigkeit verstärken (2.2.5.2). Das Vertikalprofil der Flutstromgeschwindigkeiten wird daher kaum stärker von einer Rechteckform abweichen als im heutigen Zustand. Wie Abb. 52 bei der Naturtide zeigt, sind die Sohlengeschwindigkeiten meist nur 10 - 15 cm/s kleiner als die an der Gewässeroberfläche. Schon dieser geringe Unterschied fällt erkennbar zu Lasten der Transportweite in den sohlennahen Schichten. Es wird dadurch weniger Wasser mit den hohen Feststoffkonzentrationen in Bodennähe in den Seekanal hineingetragen, als es der vereinfachenden Annahme der durchgeführten Berechnung für den Wassertransport entspricht.

Das durch Annahme einer gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung zu groß ausfallende Ergebnis der Berechnung wird aber durch eine andere vereinfachende Annahme wieder korrigiert: In der Berechnung wird die vom Flutwasser in der Einfahrt zum tideoffenen Seekanal mitgeführte Feststoffkonzentration als über die gesamte Flutdauer zeitlich unverändert angesetzt. Das ist in der Natur nicht der Fall (siehe Abb. 52, oben). Den größeren Geschwindigkeiten zu Anfang der Flut entspricht auch ein höherer Feststoffgehalt. Die Wassermengen, welche zuerst in den Seekanal eintreten, haben daher den größten Feststoffgehalt. Sie haben auch die größte Aufenthaltsdauer, so daß die mitgeführten Feststoffe fast vollständig ausfallen. Mit fortschreitender Tide nehmen in der Natur sowohl die Sinkstoffkonzentration wie auch die Aufenthaltsdauer und mit letzterer der Prozentsatz ab, der vom Sinkstoffgehalt ausgefällt wird. Die in der Natur insgesamt sedimentierte Feststoffmenge ist wegen der ungleichmäßigen Verteilung der Feststoffkonzentration über die Flutdauer größer als bei der rechnerischen Annahme konstanten Feststoffgehalts. Für das Ergebnis der Sedimentationsberechnung kompensieren sich aber die Auswirkung der Annahme einer gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten in der Berechnung der Wasserbewegung gegen die Folgen der vernachlässigten Veränderlichkeit der Feststoffkonzentration über die Flutdauer.

Nach dem vorstehend besprochenen Verfahren wurde die Wassermengenbewegung im tideoffenen Seekanal in gleichabständigen Zeitschritten über die Tidedauer fortschreitend berechnet. Für die während jeweils eines Zeitschritts von 30 Minuten Dauer in den Seekanal eintretenden Teilwassermengen wurde ermittelt, welchen Abschnitt des Seekanals sie während des nächsten und jedes weiter folgenden Zeitschritts durchwandern. Im rechten Teil der Abb. 61 ist skizzenhaft der Zustand am Ende eines solchen Zeitschritts, hier für den Zeitpunkt 10.30 Uhr, mit den berechneten

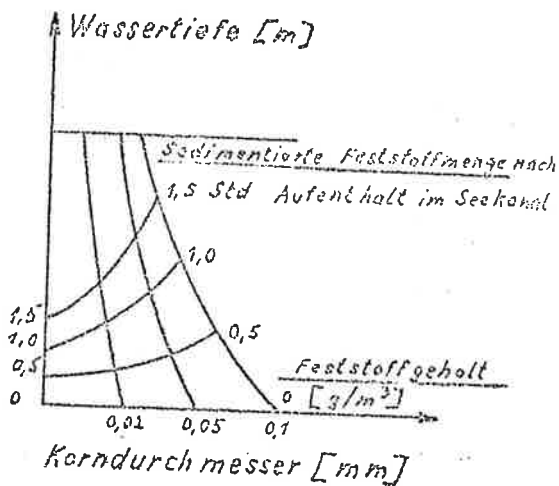
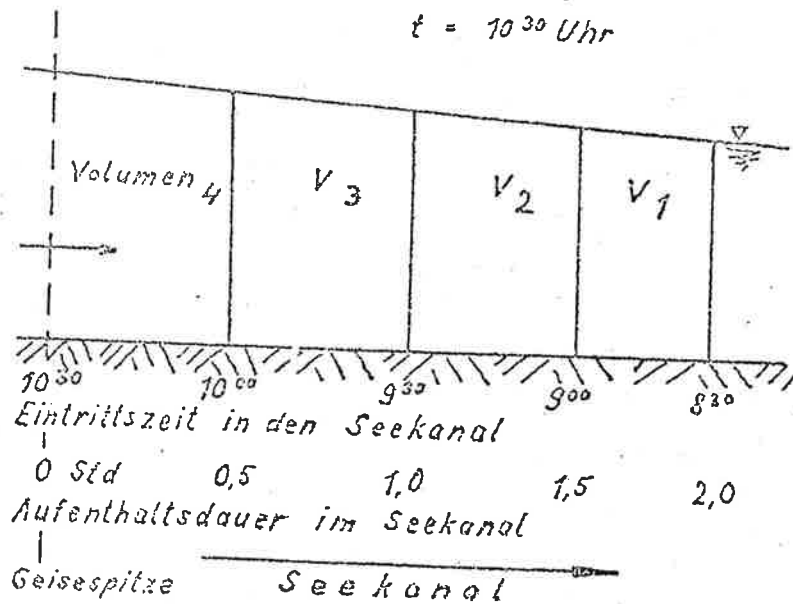


Abb.:61



Daten, nämlich der Größe der Wasservolumina, ihrer Eintrittszeit und bisherigen Aufenthaltsdauer sowie ihres augenblicklichen Ortes im Seekanal dargestellt. Die Folge dieser Daten über die gesamte Dauer der Tide ist die Grundlage für die nachfolgende Sedimentationsermittlung.

#### 4.4 Die Sedimentation im tideoffenen Seekanal

Nach dem in 4.3 angesprochenen Kubizierungsverfahren wurden für eine mittlere Tide die Aufenthaltsdauer und der jeweilige Aufenthaltsort der mit der Flut in den tideoffenen Seekanal tretenden Teil-Wasserkörper ermittelt. Die in diesem Wasser in Suspension mitgeführten Feststoffe erreichen je nach der ihrer Korngröße entsprechenden Sinkgeschwindigkeit und ihrer Höhe über der Gewässersohle beim Eintritt in den Seekanal nach unterschiedlicher Aufenthaltsdauer die Sohle des Seekanals. Für einen bestimmten Teil-Wasserkörper läßt sich nach der durchgeführten Kubizierung (4.3) zu dieser Aufenthaltsdauer auch sein Aufenthaltsort im Seekanal angeben. Damit ist der Ort festgelegt, an welchem zu einer gewissen Zeit eine bestimmte Korngröße und Menge sedimentiert wird. Die von diesem Sediment während der folgenden Ebbe teilweise wieder ausgeräumte Menge wurde proportional zur dritten Potenz der Sohlergeschwindigkeit der Ebbe nach Modellmessung berechnet.

Durch die vorstehend besprochene Berechnung der Wasserbewegung im tideoffenen Seekanal wird unter anderem auch die bereits durch die Anschauung zu gewinnende Einsicht bestätigt, daß die Stromgeschwindigkeiten von der Einfahrt des tideoffenen Seekanals gegen den Hafen hin zu kontinuierlich und näherungsweise linear abnehmen. Wegen der Abhängigkeit der Größe des Feststoffgehalts von der Stromgeschwindigkeit fallen daher aus einem mit der Flut in den Seekanal einwandernden Wasserkörper während seiner sich fortgesetzt verlangsamenden Vorwärtsbewegung die von ihm mitgeführten Feststoffe weitgehend aus.

Unter Laboratoriumsbedingungen läßt sich genau angeben, mit welcher Geschwindigkeit ein kugelförmiges Mineralkorn von gegebenem Durchmesser in stehendem Wasser von bestimmter Temperatur absinkt. In der mäßig turbulent bewegten Wassermenge des tideoffenen Seekanals sind dagegen die Gegebenheiten, welche das Sedimentationstempo bestimmen, verwickelter und in ihrer Wirkung nur global abzuschätzen. Im freien Gewässer treten zu den in ihrer Wirkung nur durch Wahrscheinlichkeitstheoretische

Ansätze zu erfassenden turbulenten Transportvorgängen die für die Gegebenheiten der Brackwasserzone noch wenig erforschten molekularphysikalischen Prozesse, welche z.B. zur Teilchenverkittung führen, hinzu.

Für die hier durchzuführenden praktischen Ermittlungen reduziert sich die Problematik jedoch auf abschätzbare Größenordnung. So ist z.B. zu überblicken, daß die in den Suspensionen enthaltenen Korngrößen mit Durchmessern von mehr als 0,05 mm in der Beruhigungsphase der Flutbewegung genügend Zeit erhalten, um vollständig auszufallen, auch wenn man eine gewisse Verzögerung des Absinkens durch Turbulenzvorgänge für gegeben annimmt. Die entsprechenden Korngrößengruppen stellen nach den zusammen mit den Untersuchungen unter 4.1 angestellten Ermittlungen 26 % des für die vorliegenden Berechnungen maßgebenden Feststoffgehalts dar. Für diesen Korngrößenanteil würden Annahmen über seine Sinkgeschwindigkeit, welche den natürlichen Werten nicht ganz entsprächen, keinen Einfluß auf das Ergebnis der Sedimentationsberechnung haben.

Bei Zugrundelegung der im Labor gemessenen Sinkgeschwindigkeiten dürften Kornfraktionen mit Durchmessern unter 0,005 mm innerhalb der Stauwasserzeiten der Tiden nicht oder nur in Spuren sedimentiert werden können. Es reichte dafür nicht einmal die lange Aufenthaltszeit des Tidewassers im Emden Außenhafen aus. Trotzdem sind diese Korngrößen mit einem Anteil von über 40 % der Fraktionen unter 0,05 mm im Sediment des Außenhafens enthalten. Vermutlich verkitten sich diese Feinstfraktionen untereinander oder mit anderen Korngrößen und sinken in diesen größeren Einheiten schneller ab, als es dem Einzelkorn möglich ist.

Nach den letztgenannten Beobachtungen kann angenommen werden, daß im vorliegenden Fall eine Sedimentationsberechnung unter Ansatz der im Labor gemessenen Sinkgeschwindigkeiten ein hinsichtlich der Mengenangaben zutreffendes Ergebnis liefern wird. Die zu erwartende Verkittung zu größeren Kornklümpchen oder Flocken mit größeren Sinkgeschwindigkeiten als denen der Einzelkörner gleicht die Ungenauigkeit des Ansatzes von labormäßig idealen Absetzbedingungen weitgehend aus.

Der Sedimentationsberechnung wurde folgende, aus den Messungen im Profil am Geise-Weststeert errechnete mittlere Kornzusammensetzung zugrunde gelegt:

Korndurchmesser	>0.05	0.05-0.02	0.02-0.01	0.01-0.005	<0.005	Mittelwert
Meßstufe						[g/m <sup>3</sup> ]
oben	11.8	8.0	9.9	8.0	22.0	59.7
Mitte	17.6	12.2	10.4	8.2	22.6	71.0
1 m ü.Sohle	35.3	17.6	14.5	11.6	31.8	110.8
unten	60.5	19.5	16.3	12.9	35.6	144.8

Als Sinkgeschwindigkeiten wurden die in Laborversuchen ermittelten Werte (Todd, 1972) angenommen. Damit lieferte die Berechnung für den tideoffenen Seekanal als Ergebnis die Längsverteilung des Sediments nach Gewicht und Korngrößenzusammensetzung, indem für jeden Ort in Längserstreckung des Seekanals für alle aufeinander folgenden Berechnungszeitpunkte der Wasserbewegungsrechnung die aus dem jeweils am Bezugsort befindlichen Wasservolumen ausfallende Feststoffmenge aus der nach der Aufenthaltsdauer des Wasserkörpers möglichen Fallhöhe für die mitgeführten Korngrößenanteile errechnet wurde.

Nach der vorstehend besprochenen Ermittlung werden in einer Flut im tideoffenen Seekanal 1100 t Feststoffe abgelagert. Diese Erstsedimentation von frisch in den Seekanal gebrachten Feststoffen (zu unterscheiden von den internen Umlagerungen im tideoffenen Seekanal) erfolgt bei mittleren Tiden jedoch nur in einem Bereich bis zu 3.2 km einwärts von der Einfahrt. Bei Springfluten verdoppelt sich etwa diese Strecke. Die frischen Sedimente liegen damit in einem Bereich, in welchem die Ebbgeschwindigkeiten noch eine Größe haben, bei welcher das Sediment wieder erodiert werden kann. Auch die Ebbgeschwindigkeiten haben um so kleinere Werte, je weiter der Bezugsort von der Einfahrt einwärts liegt.

Die Menge des von der Ebbe wieder ausgeräumten Sediments wurde im Verhältnis des Transportvermögens der Sohlengeschwindigkeit der Ebbe zu dem der Flut aus der von der vorhergehenden Flut sedimentierten Feststoffmenge berechnet. Das Transportvermögen ist dafür als  $\int v_s^3 dt$  aus den im Modell gemessenen Stromgeschwindigkeiten berechnet worden. Da im vorliegenden Fall der Quotient der rechnerischen Transportvermögen der Ebbe und Flut zur Bemessung der wechselseitigen Verfrachtungsleistung zu verwenden ist, entfiel die Diskussion über die Größenordnung eines Proportionalitätsbeiwerts.

Nach der vorgenannten Berechnung werden durch die Ebbe rd. 17 % der von der Flut eingetragenen Sedimentmenge wieder ausgeräumt. Die einlaufende nächste Flut verfrachtet danach die im tideoffenen Seekanal verbliebene Menge Frischsediment kanaleinwärts, denn es dringt zwar das mit Feststoffen beladene "Frischwasser" nur etwa 3,2 km in den Seekanal ein, die vor ihm in einer Stauchbewegung kanaleinwärts und hafeneinwärts zu einer dem Tidehub entsprechenden Höhe zusammengeschobenen Wassermengen fließen jedoch bei dieser Bewegung während der Flut durchaus mit Geschwindigkeiten, bei welchen Sediment erodiert werden kann.

Die einlaufende Flut nimmt das während der voraufgehenden Tide abgelagerte Sediment auf und versetzt es um eine gewisse Strecke tiefer in den Seekanal hinein. Dieser in jedem Tidestrom wirksame Mechanismus ist im tideoffenen Seekanal ausgesprochen auf einen einwärtsgerichteten Materialtransport ausgerichtet: Der Flut im tideoffenen Seekanal sind die in 4.1 besprochenen Schwallwellen überlagert, welche ein mehrmaliges An- und Abswellen der Stromgeschwindigkeit während einer Flut-tide zur Folge hat. In der Zeit der anschwellenden Geschwindigkeit werden dadurch Feststoffe von der Sohle aufgenommen und in Flutrichtung im Seekanal einwärtsgetragen. Wenn bald darauf die Stromgeschwindigkeit zurückgeht, werden erst die gröberen Stoffe sedimentiert. Die feineren gehen zu Boden, wenn noch etwas später die Geschwindigkeit fast oder ganz auf Null geht. Diese Wirkung der Schwallwellen erstreckt sich auf die ganze Länge des Seekanals und in die offenen Hafenbecken hinein. Die Ebbe überschreitet dagegen die Grenzgeschwindigkeit, bei welcher Fest-



stoffe von der Sohle aufgenommen werden können, nur auf einer Strecke von rd. 3 km einwärts vom Geise-Weststeert, da die Stromgeschwindigkeit der Ebbe schon am Geise-Weststeert nur wenig über diesen Grenzwert ansteigt und kanaleinwärts etwa linear abnimmt.

Bei diesem sekundären Transportvorgang, welcher fast ausschließlich in den Seekanal hinein gerichtet ist, werden die Feststoffe, welche zuerst nur auf der Hälfte oder drei Vierteln der Länge des Seekanals sedimentiert waren, über seine ganze Länge verteilt und in die Hafenbecken eingetragen. Die Kornzusammensetzung wird dabei nicht wesentlich verändert.

Danach sind die aus fast völlig sandfreiem Schlick bestehenden Sedimente in den Abschnitt zwischen der Ostmole und dem Absperrdamm sowie in den Außenhafen gedrängt worden. Da dieses Sediment über Wochen hin eine relativ dünnflüssige Suspension bleibt ("Buttermilch"), kann es leicht durch die Schleusen in den Binnenhafen getragen werden.

#### 4.5 Die erforderlichen Unterhaltungsbaggerungen im tideoffenen Seekanal

Nach dem in 4.4. dargestellten Verfahren wurden die in den verschiedenen Bereichen des tideoffenen Seekanals sedimentierten und teilweise bis in die Hafenbecken transportierten Sedimentmengen nach Korngröße und Feststoffgewicht ermittelt. Die Umrechnung dieser Feststoffmengen in Baggermengen wird nachstehend besprochen. Der Umrechnung wurden die Erfahrungssätze aus dem derzeitigen Baggerbetrieb zugrunde gelegt.

Die im vorhergehenden Abschnitt besprochenen Feststoffablagerungen müssen durch Baggerungen beseitigt werden, wenn sie die Sohle des Seekanals soweit aufhöhen, daß dadurch die Schifffahrt behindert wird. Durch das Aufbaggern wird das Korngefüge des Sediments stark aufgelockert. Es wird Wasser beim Baggervorgang oder zum Verspülen an Land zugesetzt. Das zu bewegende Volumen des Feststoff-Wasser-Gemischs bestimmt also die dafür vorzuhaltende Transportraumgröße, die Pumpenleistung bei

evtl. Rohrförderung sowie andere Leistungsgrößen im Baggerbetrieb, welche damit proportional zur bewegten Menge an Feststoff-Wasser-Gemisch Kosten verursachen. Es werden aus diesem Grunde in der Leistungsstatistik und der Kostenkalkulation die beseitigten oder zu beseitigenden Feststoffmengen als "Baggerungen in Laderaummaß" oder "in Schutenmaß" geführt.

Für die Umrechnung von natürlich gelagertem Sediment in seine Transportmenge haben sich in der langjährigen Baggerpraxis des WSA Emden Erfahrungssätze herausgebildet. Diese basieren auf Korngrößenuntersuchungen des Sohlenmaterials der verschiedenen Baggerabschnitte des Emsfahrwassers und den an den entsprechenden Orten erbrachten Leistungen der Baggergeräte. Es wurden Umrechnungsfaktoren ermittelt, welche für einen bestimmten Baggerboden mit gegebener Kornzusammensetzung errechnen lassen, wieviel Tonnen Feststoffgewicht in einem Kubikmeter Laderauminhalt nach dem Aufbaggern enthalten ist (Tabelle 2, S. 25).

Abgesehen von den Streuungen, welche bei solchen Untersuchungen bereits die unterschiedliche Korngrößenzusammensetzung in einem Baggerungsabschnitt in die Korrelation mit den Baggerleistungen bringt, ist die Art des zum Lösen und evtl. Verspülen des Bodens eingesetzten Geräts von erheblichem Einfluß auf die Leistungswerte. Eine Vorausermittlung des in Laderaummaß anzugebenden Baggererfordernisses, wie sie in der vorliegenden Untersuchung zu erbringen ist, kann daher nur mit dem Vorbehalt als zutreffend gelten, daß die Auflockerungswerte der künftigen Baggerungen den nachstehend genannten entsprechen.

Aus den Angaben des WSA Emden über den Feststoffgehalt je  $m^3$  gelösten Baggerbodens in Schutenmaß bei unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung wurde mit einer Ausgleichung, welche eine Programmierung des Ansatzes ermöglicht, folgende empirische Näherung gefunden und in die weitere Ermittlung eingeführt:

$$\begin{aligned} & \text{Baggermenge in Schutenmaß [m}^3\text{]} \\ & = \text{Trockengewicht der Feststoffe [t]} \\ & \quad \times \frac{\text{Trockengewicht der Feststoffe [t]}}{\text{Trockengewicht des Korngrößenanteils } \geq 0.05 \text{ mm t}} \times 1 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{t}} \right] \end{aligned}$$

Dieser Ansatz gilt bis zu einem Mindestgehalt von 30 Gewichts-% des Korngrößenanteils mit  $\geq 0,05$  mm Durchmesser. Unterhalb dieser Grenze ist anzusetzen, daß in einem  $m^3$  Baggermenge in Schutenmaß 0,3 t Feststoffe enthalten sind.

Mit dem vorgenannten Ansatz wurden die nach 4.4 errechneten Sedimentgewichte in Baggermengen in Schutenmaß umgerechnet. Sie ergeben mit der Anzahl der Tiden eines Jahres (705 Tiden/Jahr) multipliziert, die jährlich zur Unterhaltung der Wassertiefe zu leistenden Baggerungen.

Es wurde angenommen, daß die lange sehr dünnflüssig bleibenden Sedimente mit weniger als 30 % der Korngrößen über 0,05 mm sich in einem Verhältnis, das ihrer Grundflächengröße entspricht, auf den jetzigen Außen- und Vorhafen bzw. den rückwärtigen Teil des Seekanals zwischen Ostmole und dem Emsabsperrrdamm verteilen. Etwa 50 % der dünnflüssigen Sedimente der tideoffenen Becken des Hafens Emden werden vermutlich durch die Seeschleuse in den Binnenhafen getragen. Bei dieser Abschätzung wird für die Verteilung auf Außen- und Binnenhafen grob das langjährige Mittel der bisherigen Hafenbaggerungen zugrunde gelegt. In abgerundeten Werten entfallen damit auf

Ostmole bis Emsabsperrrdamm	0,2 Mio $m^3$ /Jahr
Außenhafen und Vorhafen	0,1
Neuer Binnenhafen	0,1

Die Verteilung der Baggermengen auf den tideoffenen Seekanal zwischen Geise-Weststeert und Ostmole (insgesamt 1,2 Mio  $m^3$ /Jahr) hat sich direkt aus der Sedimentationsberechnung ergeben. Es entfallen auf jeweils ein Drittel der Strecke einwärts abnehmend 0,5... 0,4... 0,3 Mio  $m^3$ /Jahr, wobei etwa von der halben Länge des Seekanals einwärts "Schlickbaggerungen" (Sandgehalt kleiner als 30 %) anfallen in einer Menge von  $1/2 \cdot 0,4 + 0,3 = 0,5$  Mio  $m^3$ /Jahr.

Die vorgenannte Verteilung der Baggermengen im tideoffenen Seekanal und den anschließenden Hafenbecken ist in Abb. 62 nach den

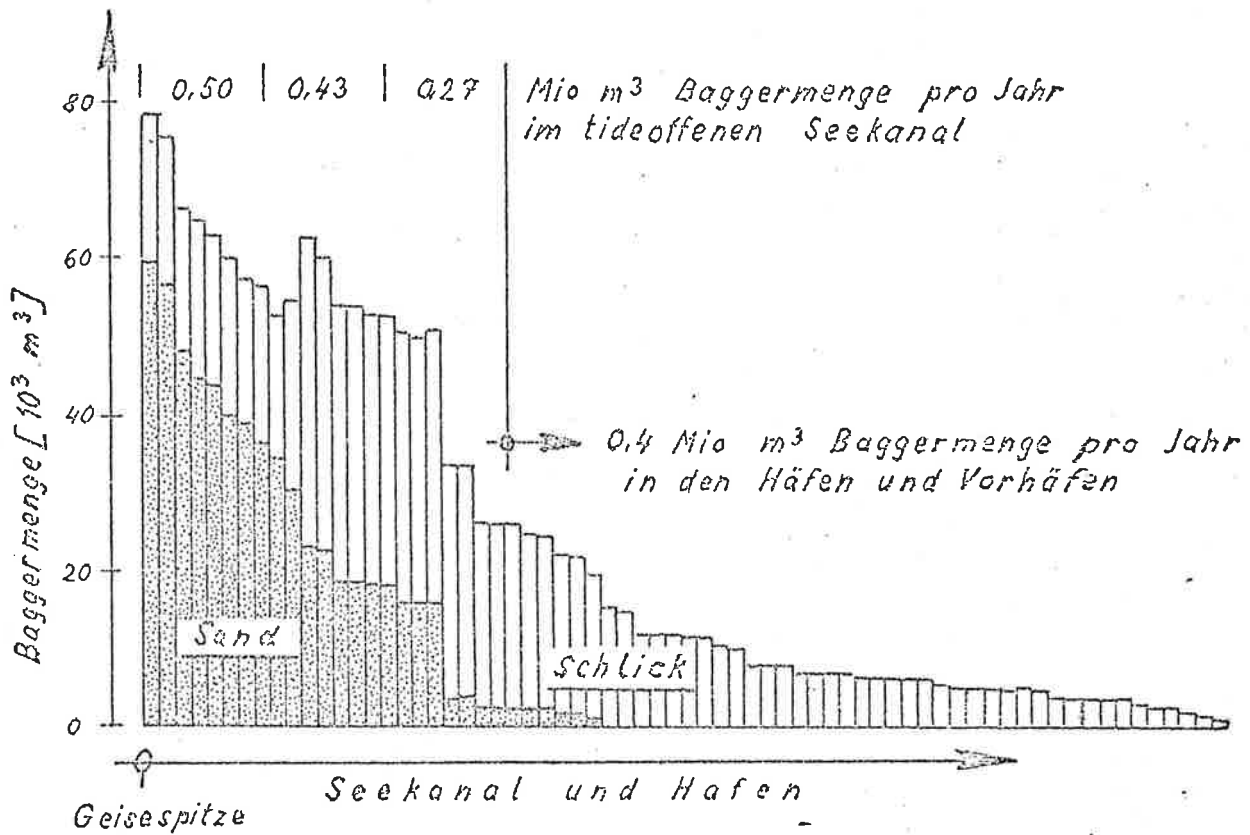


Abb. 62 : Jährliche Baggermengen im Seekanal und in den Häfen

Berechnungsergebnissen dargestellt. Dabei sind die in der Berechnung feiner klassifizierte Korngrößen des Sediments zu nur zwei charakteristischen Gruppen mit der Bezeichnung "Sand" für die gröberen Fraktionen (Durchmesser  $\geq 0,05$  mm) und "Schlick" für die feineren zusammengefaßt worden.

#### 4.6. Die Dichteströmung im tideoffenen Seekanal und die Unterhaltungsbaggerungen bei weiterer Vertiefung

Wenn in einer weiteren Ausbaustufe die Sohle des tideoffenen Seekanals vertieft wird, vergrößert sich die Stärke der sohlennahen einwärtsgerichteten Dichteströmung. Die Größe dieser Dichteströmung wurde nach Abraham/van der Burgh (1964) für den 35'-Ausbau als Ausgangszustand und für einen Ausbau auf 41' und 45' berechnet.

Unter vereinfachenden Annahmen und unter Verwendung der Tatsache, daß bei einer Vertiefung die Größe der einlaufenden Wassermengen nicht geändert wird, ist unter Anhalt an die rechnerisch ermittelten Sohlengeschwindigkeiten eine geänderte Verteilung der Stromgeschwindigkeit in der Vertikalen konstruiert worden. Mit dieser und einer proportional zur Wassertiefe geänderten Feststoffverteilung wurde ein je nach Ausbaustufe unterschiedlicher Feststofftransport in den tideoffenen Seekanal hinein berechnet.

Die Sohlengeschwindigkeit nach Modellmessung wurde im Verhältnis der Querschnittsgrößen vor und nach Vertiefung verkleinert und additiv mit der errechneten Dichteströmung überlagert. Mit dem so ermittelten Geschwindigkeitsverlauf sind als seine dritte Potenz das Transportvermögen der Flut und der Ebbe für alle Ausbaustufen errechnet worden. Proportional zu diesen Größen wurde der geänderte Sekundärtransport des Sediments bestimmt. Ergebnis der Ermittlungen sind die Änderungen der Größe des Baggeraufwands bei weiterem vertiefenden Ausbau gegenüber demjenigen des 35'-Ausbaus.

Bei den derzeitigen Verhältnissen der Stromführung und Wassermengenverteilung kann sich der Süßwasserabfluß der oberen Ems erst seewärts des Geise-Weststeerts mit dem Dollartwasser vermischen. Nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart ist dagegen bereits vom Zusammenfließen des Wassers der Geiserinne mit dem in der Aa eine Mischung möglich. Die etwa doppelt so große und meist höher salzhaltige Wassermenge des Dollart hat daher nach einer Emsumleitung die Salzgehaltsschwankungen der Tide durch Zumischung von Salzwasser zum Süßwasserabfluß der Ems beim Eintreffen des Wassers am Geise-Weststeert bereits wesentlich gedämpft.

In der Einfahrt zum tideoffenen Seekanal ist der Unterschied des Salzgehalts zwischen Hoch- und Niedrigwasserwert noch geringer als im Wasser der Geiserinne. Der Salzgehalt im Seekanal, einem "Totarm" der Ems, folgt nur in dem Maße demjenigen in der Geiserinne, wie sich die Wasserqualität durch Quermischung seewärts des Geise-Weststeert derjenigen des Wassers aus der Geiserinne angleicht. Dabei wird vorausgesetzt, daß dem Seekanal keine wesentlichen Mengen Süßwasser zugeführt werden.

Nach den Modelluntersuchungen über die Salzgehaltsverteilung bei einer Umleitung der Ems durch den Dollart wird der Salzgehalt vor der Einfahrt zum Seekanal bei mittleren Tideverhältnissen nur um rd. 2 ‰ zwischen Tnw und Thw schwanken. Da nach dem Ergebnis der Berechnung der Wassermengenbewegung (4.2) frisches Flutwasser bis etwa 3 km in den tideoffenen Seekanal eindringt, wird um Thw an einem Punkt 3 km einwärts vom Geise-Weststeert der Salzgehalt des Wassers der Tnw-Qualität vorhanden sein, an der Einfahrt dagegen ein um 2 ‰ höherer Salzgehalt. Mit einem Gradienten von 2 ‰ auf 3 km ist dann aber das Dichtegefälle im Seekanal nur um ein Drittel kleiner als dasjenige im jetzigen Emders Fahrwasser (etwa 3 ‰ auf 3 km). Es ist daher im tideoffenen Seekanal eine merkbare Dichteströmung zu erwarten.

Das Eindringen des Salzwassers in nicht durchströmte Nebenarme wie Vorhäfen und Schleusen ist ein in seinen Folgen technisch wichtiger Vorgang. Es wurde daher eingehend untersucht und von den verschiedenen Autoren dargestellt (Zusammenstellung bei Stückrath, 1970). Der theoretische Ansatz für eine rechnerische Erfassung ist von Abraham und v.d.Burgh (1964) formuliert und von anderen Bearbeitern des Problems im Modell und in der Natur bestätigt worden (Keulegan bei Barr, 1963; Riddel, 1969; Allen und Price, 1959). Danach läßt sich die Geschwindigkeit des Vordringens des Salzwassers angeben als

$$v_S = a \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\frac{1}{2} \cdot (\rho_1 + \rho_2)}} \cdot g \cdot \sqrt{h}$$

worin

- $\rho_1$  = Dichte des schweren Wassers
- $\rho_2$  = Dichte des leichteren Wassers
- $g$  = Erdschwerkbeschleunigung
- $h$  = Wassertiefe

Der Faktor  $a$  ist das Produkt eines Werts von etwa der Größe  $0,5$  im Falle zweier mit senkrechter Trennschicht nebeneinanderstehender Wasserkörper und einem Faktor, welcher die Abnahme der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des instationären Salzkeils berücksichtigt (Keulegan, 1963). Er ist bei der hier zu erwartenden Eindringtiefe von  $3$  km mit etwa  $0,3$  anzusetzen. Damit wird im vorliegenden Fall  $a = 0,15$ .

Im inneren Teil des tideoffenen Seekanals stellt sich ein Salzgehalt ein, welcher sich während einer Tide praktisch nicht ändert. Er wird in der Nähe des Mittelwerts des Tide-maximums und -Minimums in der Einfahrt zum Seekanal liegen. Da der Salzgehalt in der Einfahrt sich im Jahresgang so ändert, daß er während 11 Monaten langsam ansteigt, dann fast schlagartig auf einen Minimalwert nahe Null abfällt und einige Tage niedrig bleibt, wird der Salzgehalt im Kanalinnern im Mittel des Jahres hinter dem Mittelwert des Außensalzgehalts zurückbleiben. Für die folgende Berechnung der Dichteströmung wird daher das Salzgehaltslängsgefälle zu den Extremzeiten der Tide wie in der Skizze der Abb. 63 angenommen.

$$v_S = a \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_2}{\frac{1}{2} \cdot (\rho_1 + \rho_2)}} \cdot g \cdot \sqrt{h}$$

worin

- $\rho_1$  = Dichte des schweren Wassers
- $\rho_2$  = Dichte des leichteren Wassers
- $g$  = Erdschwerkbeschleunigung
- $h$  = Wassertiefe

Der Faktor  $a$  ist das Produkt eines Werts von etwa der Größe  $0,5$  im Falle zweier mit senkrechter Trennschicht nebeneinanderstehender Wasserkörper und einem Faktor, welcher die Abnahme der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des instationären Salzkeils berücksichtigt (Keulegan, 1963). Er ist bei der hier zu erwartenden Eindringtiefe von  $3$  km mit etwa  $0,3$  anzusetzen. Damit wird im vorliegenden Fall  $a = 0,15$ .

Im inneren Teil des tideoffenen Seekanals stellt sich ein Salzgehalt ein, welcher sich während einer Tide praktisch nicht ändert. Er wird in der Nähe des Mittelwerts des Tide-maximums und -Minimums in der Einfahrt zum Seekanal liegen. Da der Salzgehalt in der Einfahrt sich im Jahresgang so ändert, daß er während 11 Monaten langsam ansteigt, dann fast schlagartig auf einen Minimalwert nahe Null abfällt und einige Tage niedrig bleibt, wird der Salzgehalt im Kanalinnern im Mittel des Jahres hinter dem Mittelwert des Außensalzgehalts zurückbleiben. Für die folgende Berechnung der Dichteströmung wird daher das Salzgehaltslängsgefälle zu den Extremzeiten der Tide wie in der Skizze der Abb. 63 angenommen.



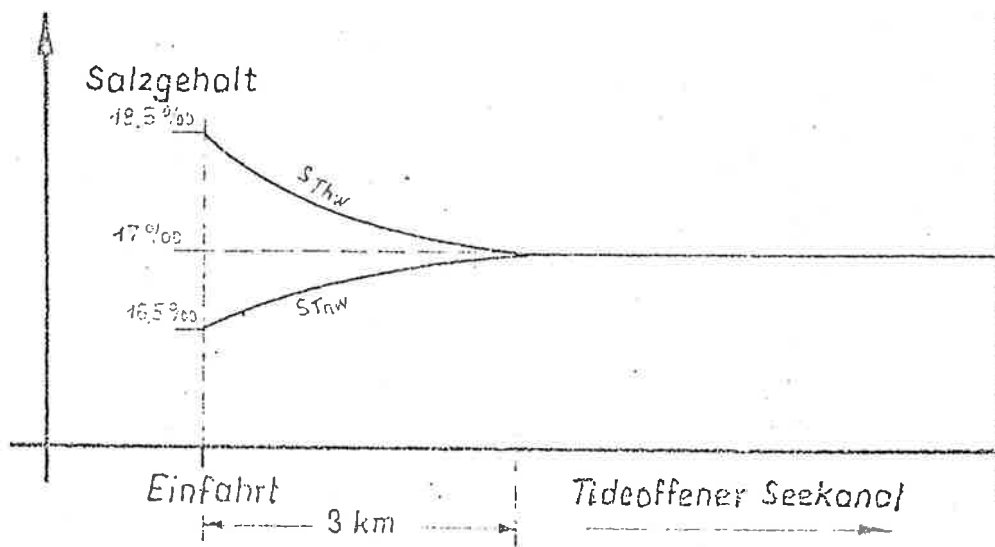


Abb. 63 : Salzgehalt im tideoffenen Seekanal bei Thw und Tnw

Mit den in Abb. 63 angegebenen Salzgehaltswerten errechnet sich die maximale Geschwindigkeit der Dichteströmung der Flut zu

$$v_{S \text{ Flut}} = 0.15 \times \sqrt{\frac{0.00114}{1.01259} \times 9,81} \sqrt{h}$$

$$= 0.01576 \sqrt{h}$$

diejenige bei Ebbe zu

$$v_{S \text{ Ebbe}} = 0.15 \times \sqrt{\frac{0.00038}{1.01183} \times 9,81} \sqrt{h}$$

$$= 0.00910 \sqrt{h}$$

mit den Dichtewerten der

Flut bei Thw :  $S_{\text{außen}} = 18,5 \text{ ‰}$  ,  $\rho_{\text{außen}} = 1.01316$   
 $S_{\text{innen}} = 17,0 \text{ ‰}$  ,  $\rho_{\text{innen}} = 1.01202$

Ebbe bei Tnw :  $S_{\text{innen}} = 17,0 \text{ ‰}$  ,  $\rho_{\text{innen}} = 1.01202$   
 $S_{\text{außen}} = 16,5 \text{ ‰}$  ,  $\rho_{\text{außen}} = 1.01164$

bei einer Wassertemperatur von  $16^{\circ} \text{ C}$ .

In den verschiedenen Ausbaustufen werden danach folgende maximalwerte der Dichteströmung erreicht:

Ausbaustufe	Tiefe unter T1/2w	$v_{Sf}$	$v_{Se}$
35'	13,6 m	5,8 cm/s	3,3 cm/s
41'	15,9	6,3	3,6
45'	17,2	6,5	3,8

Bei einer Vertiefung des Fahrwassers im tideoffenen Seekanal wird der durchströmte Querschnitt vergrößert, die mit der Flut

einströmende Wassermenge und ihre zeitliche Verteilung auf die Tidedauer bleiben praktisch unverändert. Demzufolge verringert sich die mittlere Stromgeschwindigkeit der Flut im umgekehrten Verhältnis der Größe der Querschnittsflächen gegenüber dem 35'-Ausbau:

$$v_{Mf} = v_{Mf\ 35'} \cdot \frac{F_{T1/2w\ 35'}}{F_{T1/2w\ \dots'}}$$

Ausbaustufe	$F_{T1/2w}$	$v_{Mf}$	$v_{sf} \approx v_{Mf} \cdot 0.7 + v_{Sf}$
1	2	3	4
35'	6065	31 cm/s	21,7 + 5,8 = 27,5 cm/s
41'	6285	29,9	20,9 + 6,3 = 27,2
45'	6435	29,2	20,5 + 6,5 = 27,0

Die Geschwindigkeit in Sohlennähe  $v_{sf}$  beträgt rd 70 % des Mittelwerts in der Vertikalen, wenn keine Dichteströmung wirksam ist. In Spalte 4 wurde mit diesem Ansatz die Sohlengeschwindigkeit der Flut in den verschiedenen Ausbaustufen durch Addieren des in der vorhergehenden Tabelle angeführten Wertes der Dichteströmung errechnet. Man sieht, daß durch das Wachsen der Dichteströmung mit der vergrößerten Wassertiefe der Rückgang der mittleren Geschwindigkeit in der Vertikalen während der Flutdauer weitgehend aufgehoben wird. Es wird daher der von der Sohlengeschwindigkeit abhängende Feststoffgehalt im Flutwasser etwa die gleiche Größe bei allen weiteren Ausbaustufen behalten wie beim 35'-Ausbau.

Im hier zu betrachtenden Fall nimmt der Mittelwert der Geschwindigkeit in der Vertikalen mit fortschreitender Vertiefung des Durchflußquerschnitts ab, die Stromgeschwindigkeit in Sohlennähe behält dagegen ihre ursprüngliche Größe. Infolgedessen ändert sich bei einer Vertiefung die Vertikalverteilung der Geschwindigkeit, und zwar ändert sie sich so, daß die Größe der Geschwindigkeit in höheren Wasserschichten stärker zurückgeht als in den der Gewässersohle nähergelegenen Schichten. Die Menge des

nur wenig mit Feststoffen beladenen Wassers im oberen Bereich des durchströmten Querschnitts nimmt demzufolge gegenüber derjenigen mit hohem Feststoffgehalt in der unteren Querschnittshälfte prozentual ab. Da die Durchflußmenge insgesamt ihre Größe bei fortgesetzter Vertiefung nicht ändert, d.h. da sie nicht kleiner wird, wenn man nicht parallel zur Vertiefung etwa auch noch die Größe der Wasseroberfläche des Seekanals und der anschließenden tideoffenen Hafenbecken verringert, vergrößert sich bei einer Vertiefung die Menge der in den Seekanal eingebrachten Feststoffe.

Für die Berechnung der nach einer Vertiefung zusätzlich eintretenden Feststoffmenge ist die Vergrößerung der Wassertiefe und damit der Durchflußfläche bekannt, woraus sich nach S. 215 und S. 216 die Größe der Sohlengeschwindigkeit berechnen ließ. Die maßgebliche Verteilung der Stromgeschwindigkeit in den übrigen Schichten der Querschnittsvertikalen ist dagegen auf theoretischem Wege schwer abzuleiten. Den schon bei dichtestromfreiem Fließen in natürlichen Querschnitten komplizierten Gesetzen der Geschwindigkeitsverteilung sind im hier betrachteten Fall zusätzlich noch diejenigen einer Dichtestromung überlagert.

Bereits die Betrachtung des Potentials der stromverursachenden Kräfte läßt erkennen, von wievielen und im vorliegenden Fall nicht exakt in ihrer Wirksamkeit beschreibbaren Faktoren die Fließvorgänge im tideoffenen Seekanal abhängen: Beim Hinzutreten eines Salzgehalts- und damit Dichte-Längsgefälles zu einem zuvor allein unter Oberflächengefälle fließenden Strom wird in der gesamten Wassertiefe die Fließgeschwindigkeit vergrößert. Die dadurch eintretende leichte Erhöhung der Wasserstände im Tidegebiet oberhalb des Bezugsquerschnitts erzeugt jedoch ein dem Flutstrom entgegengerichtetes Oberflächengefälle und dadurch die Tendenz zu einem Rückstrom in Oberflächennähe. In tieferen Wasserschichten wird ein Rückstrom durch den mit dem Abstand von der Gewässeroberfläche wachsenden Dichteüberdruck stärker behindert.

Das Druckpotential für den vorbeschriebenen Zustand ist in Abb. 64 skizzenhaft übertrieben für den angenommenen Fall dargestellt, daß der Rückstrom durch irgendeine geeignete Maßnahme unterbunden ist. Die Größe und Richtung der resultierenden Druckkräfte sind durch kleine Pfeile im linken Teil der Skizze angegeben.

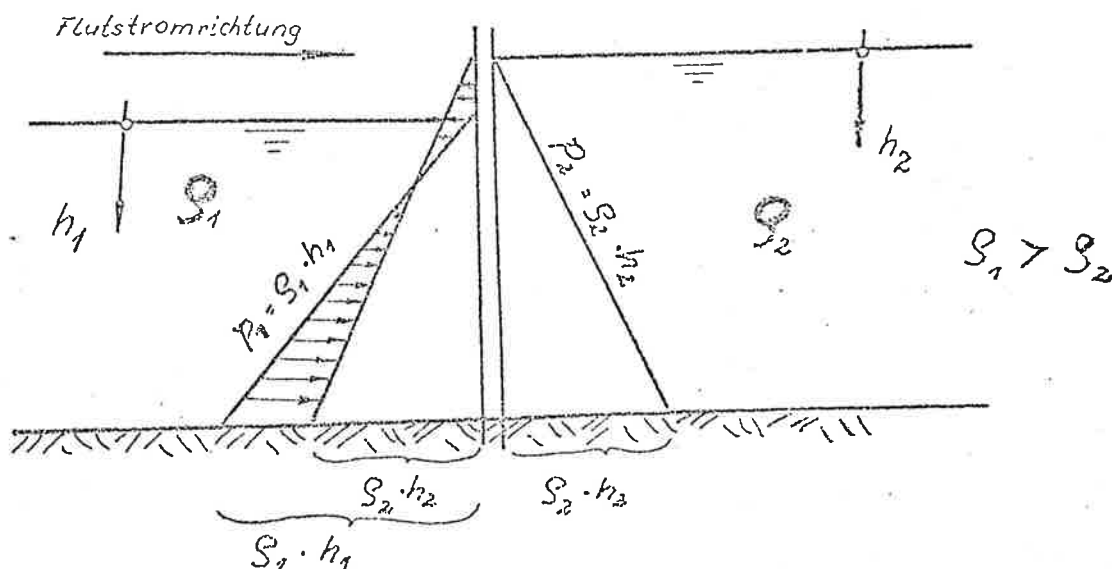


Abb. 64 : Druckpotential bei Dichtelängsgefälle

Der in Abb. 64 wiedergegebene Zustand mit Gegengefalle wird in der Natur durch das Zustandekommen einer Ausgleichströmung mehr oder weniger weit abgebaut. Bei entsprechend großem Salzgehaltsgradienten und damit großem Dichtegefälle tritt bei begrenzter Flutraumgröße, also z.B. bei tideoffenen Hafenbecken, oft eine echte oberflächennahe Rückströmung auch in der Zeit des Steigens des Außenwasserstandes ein. Beim hier zu besprechenden tideoffenen Seekanal werden die oberflächennahen Wasserschichten während des Einlaufens der Flut jedoch nur in ihrer Einströmgeschwindigkeit gebremst. Es wird aber wie in allen solchen Fällen schwierig sein, die wahre vertikale Verteilung der Stromgeschwindigkeiten für eine exakte Berechnung der Transportverhältnisse auf theoretischem Wege zu bestimmen. Neben den in der Skizze gegebenen Vereinfachungen ist in der Natur z.B. noch ein durch die Dichte-Ausgleichströmung verursachter Dichteunterschied in der

Vertikalen zusätzlich zu berücksichtigen. Wegen der Schwierigkeit, den komplexen Fließmechanismus in allen Feinheiten der natürlichen Umstände zu beschreiben, soll daher nachstehend der Strömungs- und Transportvorgang seiner Größenordnung nach durch einen vereinfachten Ansatz ermittelt und dann auf den vorliegenden Fall und seine besonderen Gegebenheiten hin diskutiert werden.

Als vereinfachtes Rechenmodell wird ein Rechteckquerschnitt mit linearer Geschwindigkeitsverteilung in der Vertikalen angenommen. Hierbei kann der Rechteckquerschnitt auch als der tiefe Haupttrinnenteil des Naturquerschnitts angesehen werden, in welchem die Fahrrinne ausgebaggert wird. Nach dieser Vertiefung ist im vorliegenden Fall die Stromgeschwindigkeit an der Sohle  $v_s$  infolge verstärkter Dichteströmung noch von der gleichen Größe wie vor der Ausbaggerung (siehe S. 216). Die mittlere Geschwindigkeit in der Lotrechten  $v_2$  ist nach der Vertiefung jedoch im umgekehrten Verhältnis der geänderten Querschnittsgrößen gegenüber der Stromgeschwindigkeit vor der Vertiefung  $v_1$  verkleinert: Es wird die Tidewassermenge  $T$  durch die Sohlenvertiefung nicht geändert, die Flutstromdauer  $D_f$  bleibt praktisch auch von gleicher Größe, so daß sich die Gleichung ergibt:

$$T = v_1 \cdot F_1 \cdot D_f = v_2 \cdot F_2 \cdot D_f,$$

und daraus

$$(1) \quad v_2 = v_1 \frac{F_1}{F_2} = v_1 \frac{h_1 \cdot B}{h_2 \cdot B} = v_1 \frac{h}{h + \Delta h}.$$

- Hierin sind  $\begin{cases} v_1 \\ v_2 \end{cases}$  die Mittelwerte der Stromgeschwindigkeiten in der Vertikalen  $\begin{cases} \text{vor} \\ \text{nach} \end{cases}$  der Vertiefung, und  $\begin{cases} h_1 = h \\ h_2 = h + \Delta h \end{cases}$  die Wassertiefen unter  $T \ 1/2w$   $\begin{cases} \text{vor} \\ \text{nach} \end{cases}$  der Ausbaggerung,  $B$  ist die bei der Betrachtung eines Rechteckquerschnitts konstante Querschnittsbreite. Die für den weiteren Berechnungsansatz erforderlichen Größen sind in Abb. 65 zeichnerisch in Beziehung gesetzt.

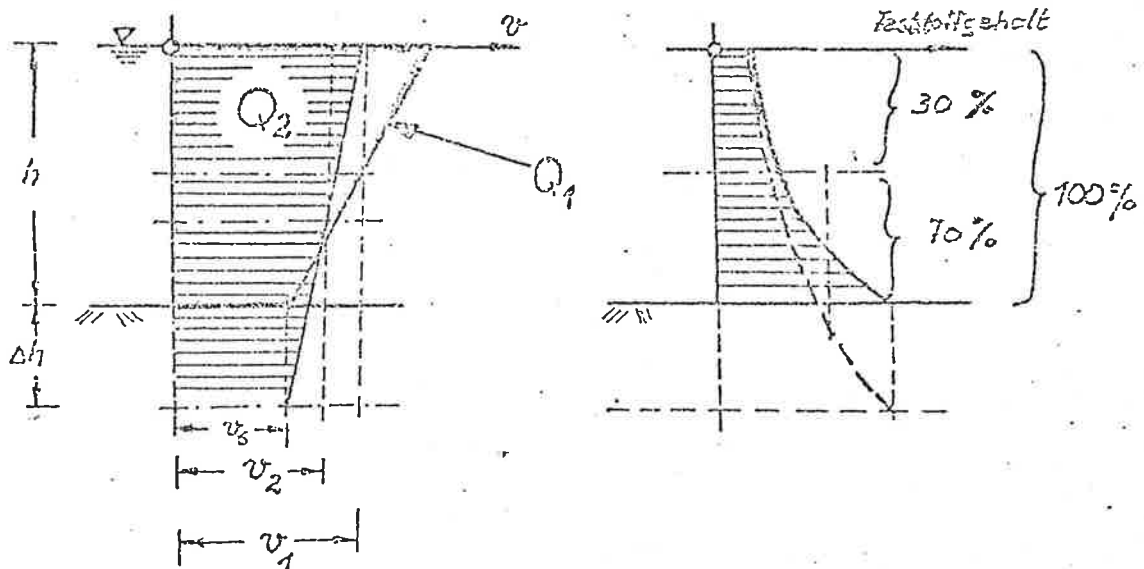


Abb. 65 : Geschwindigkeits- und Feststoffverteilung in der Lotrechten bei Schlenvertiefung, schematisiert

Die in Abb. 65 als  $Q_1$  und  $Q_2$  gekennzeichneten Flächen stellen durch ihre Größe und Verteilung in der Vertikalen die mittleren Durchflußmengen während der Flutstromdauer dar. Sie sind entsprechend Gl. (1) von gleicher Größe:

$$Q_1 = v_1 \cdot h = Q_2 = v_2 \cdot (h + \Delta h),$$

Unterschiedlich ist jedoch die prozentuale Verteilung der Durchflußmengen vor und nach der Vertiefung auf die obere und untere Querschnittshälfte. Unterschiedlich ist auch der Feststoffgehalt über die Wassertiefe verteilt. Im rechten Teil der Abb. 65 ist die Größe des in der oberen bzw. unteren Hälfte der Wassertiefe mitgeführten prozentualen Anteils der Feststoffmenge an der Gesamtmenge angegeben, wie er nach 4.4 in der Einfahrt zum tide-

offenen Seekanal zu erwarten ist: Rd. 30 % in der oberen Hälfte, 70 % in der unteren.

Aus Abb. 65 läßt sich leicht ableiten:

Feststofftransport vor der Vertiefung  $G_1 =$

Durchflußmenge in der oberen Hälfte der Wassertiefe

x Feststoffkonzentration in der oberen Hälfte

+ Durchflußmenge in der unteren Hälfte

x Feststoffkonzentration in der unteren Hälfte

$$= \frac{v_1 + v_s}{2} \frac{h}{2} \cdot 0,70 + \frac{v_1 + (v_1 + v_1 - v_s)}{2} \frac{h}{2} \cdot 0,30$$

und daraus nach einigen Zusammenfassungen

$$(2) \quad G_1 = \frac{h}{4} (1,6 v_1 + 0,4 v_s) \cdot$$

Ebenso ergibt sich die

Feststoffmenge nach der Vertiefung  $G_2 =$

$$= \frac{v_2 + v_s}{2} \frac{h + \Delta h}{2} \cdot 0,70 + \frac{v_2 + (v_2 + v_2 - v_s)}{2} \frac{h + \Delta h}{2} \cdot 0,30$$

und nach Zusammenfassung

$$(3) \quad G_2 = \frac{h + \Delta h}{4} \cdot (1,6 v_2 + 0,4 v_s) \cdot$$

Die Feststoffeintreibungen nach der Vertiefung verhalten sich danach zu denen vor Vertiefung wie

$$(4) \quad \frac{G_2}{G_1} = \left( 1 + \frac{\Delta h}{h} \right) \frac{1,6 v_2 + 0,4 v_s}{1,6 v_1 + 0,4 v_s}$$

Die Größe von  $v_2$  ergibt sich nach Gl. (1) aus derjenigen von  $v_1$  durch Umrechnung entsprechend den Wassertiefen vor und nach der Vertiefung. Für das Verhältnis von  $v_s$  zu  $v_1$  muß jedoch eine Annahme getroffen werden. Es sei mit

$$v_s = 1,0 \cdot v_1$$

gewählt entsprechend dem Ansatz einer in allen Wassertiefen kon-



stanten Geschwindigkeit in 4.2.3. Dann ergibt sich aus Gl. (4)

$$(5) \quad \frac{G_2}{G_1} = \left( 1 + \frac{\Delta h}{h} \right) \cdot \frac{1,6 \frac{h}{h + \Delta h} + 0,4}{1,6 + 0,4}$$

Durch Einsetzen der den jeweiligen Ausbaustufen entsprechenden Wassertiefen in Gl. (5) ergeben sich die nachfolgend zusammengestellten Verhältniswerte für die Größe der Feststoffeintreibungen nach einer Vertiefung zu derjenigen vor dem Tieferbaggern.

Die in Spalte 4 ausgeführten Verhältniswerte beziehen sich immer auf eine Änderung gegenüber dem 35'-Ausbau.

Ausbauzustand	h	$\Delta h$	$G_2 / G_1$	$G_2 = 1,90 \cdot G_2 / G_1$
1	2	3	4	5
35'	13,6	0	1,000	$1,90 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$
41'	15,9	2,3	1,034	1,96
45'	17,2	3,6	1,053	1,00

In Spalte 5 wurden die nach 4.5 für den 35'-Ausbau ermittelten jährlichen Feststoffeintreibungen in den tideoffenen Seekanal von 1,9 Mio  $\text{m}^3/\text{Jahr}$  (Schutenmaß) mit den in Spalte 4 angeführten Verhältniswerten zu den bei weiterer Vertiefung zu erwartenden verstärkten Fluteintreibungen hochgerechnet. Diese extrapolierten Werte sind wegen ihres auf weitgehenden Vereinfachungen beruhenden Ermittlungsweges als Anhaltswerte zu betrachten. Die vereinfachende Annahme eines linear über die Wassertiefe verteilten Verlaufs der Stromgeschwindigkeiten entspricht jedoch weitgehend dem nach den Vertiefungen der letzten Jahrzehnte im Emders Fahrwasser zu beobachtenden Stromgeschwindigkeitsprofil.

In Abb. 66 sind aus Messungen im Emdener Fahrwasser für zwei willkürlich herausgegriffene Beobachtungen die über die Tide gemittelten Vertikalprofile der Flutstromgeschwindigkeiten aufgetragen. Es wurde einer Messung aus dem Jahre 1949 eine aus 1972 gegenübergestellt. Das Profil der jüngeren Messung zeigt neben dem Rückgang der mittleren Geschwindigkeit, welcher der Vergrößerung des Durchflußquerschnitts zwischen den Beobachtungsjahren entspricht, eine starke Linearisierung des Geschwindigkeitsverlaufs. Der derzeitige, neuere Zustand entspricht damit nahezu ideal der in der vorstehenden Ermittlung getroffenen Annahme einer linearen Verteilung.

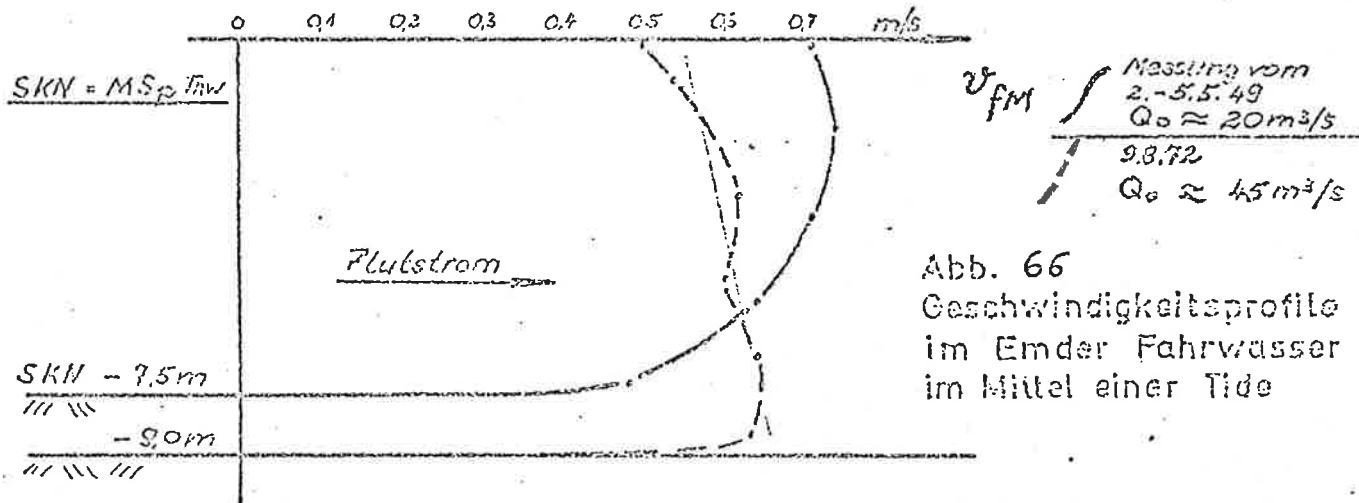


Abb. 66  
Geschwindigkeitsprofile  
im Emdener Fahrwasser  
im Mittel einer Tide

Die in Abb. 66 wiedergegebenen Meßergebnisse wurden beide in Zeiten mit geringem Oberwasserabfluß, d.h. bei hochliegender Brackwasserzone gewonnen. Sie geben also Zustände bei vermindertem Salzgehalts-Längsgefälle wieder, wie sie ähnlich auch nach einer Umleitung der Ems in der Einfahrt zum tideoffenen Seekanal zu erwarten sind. Wenn bei beiden in Abb. 66 dargestellt.

ten Messungen die Dichteverhältnisse die gleichen waren, müssen die offensichtlichen Änderungen der Form des Vertikalprofils auf die geänderte Wassertiefe zurückgeführt werden. Wie in 2.2.5.2 dargelegt, ist im Brackwassergebiet bei einer Vergrößerung der Wassertiefe mit einer Vergrößerung der sohlennahen Geschwindigkeiten zu rechnen. Bei der Messung 1972 kann danach die Aufsteilung des Profils gegenüber der Form von 1949 vermutlich diesem Effekt zugeschrieben werden.

Eine Begünstigung der Sohlengeschwindigkeiten durch die Dichteströmung tritt auch schon dadurch 1972 stärker in Erscheinung, daß ihr gegenüber die mittlere Geschwindigkeit in der Vertikalen im Vergleich zu 1949 abgenommen hat. Dieser Effekt müßte sich im tideoffenen Seekanal mit seinen gegenüber den Messungen der Abb. 66 im Mittel nur etwa halb so großen Geschwindigkeiten besonders deutlich ausprägen. Deswegen wäre in den oben geschilderten Transportrechnungen statt eines Ansatzes mit einer in der Vertikalen konstanten Geschwindigkeitsverteilung besser mit einer von der Sohle gegen die Gewässeroberfläche abnehmenden Geschwindigkeit gerechnet worden und zwar mit einem noch stärker abnehmenden Profil als dem der Messung 1972 in Abb. 66. In einem solchen Fall sagt die Rechnung für die Feststoffeintreibungen und ihre Vergrößerung bei weiterer Vertiefung des Fahrwassers im tideoffenen Seekanal größere Beträge als vorstehend genannt, voraus. Die oben in der Zusammenstellung gemachten Angaben sind deswegen vermutlich etwas zu klein ausgefallen.

Ein mit zunehmend vergrößerter Wassertiefe stärker rückgeneigtes Geschwindigkeitsprofil und stärkerer Feststoffeintreibungen ergeben sich auch, wenn das Salzgehalts- und damit Dichtegefälle vergrößert wird. Das ist z.B. der Fall, wenn entgegen der Annahme der vorliegenden Untersuchung Süßwasser in den tideoffenen Seekanal eingeleitet wird. Ein größeres Dichtegefälle wurde auch bei früheren für die vorliegende Stellungnahme durchgeführten Berechnungen als vorhanden vorausgesetzt. Die daraufhin in der "Erläuterung zur Ermittlung der Baggermengen für die Erhaltung der Fahrwassertiefe in einem zum tideoffenen Seekanal umgewandelten Emder Fahrwasser" vom 21.5.1976 genannten Baggermengen

liegen daher um rd.  $0,1 \text{ Mio m}^3/\text{Jahr}$  höher als die vorstehend wiedergegebenen Berechnungsergebnisse. Es wurde für die frühere Bearbeitung geschätzt, daß die Salzgehaltsschwankung der Tide eingangs des tideoffenen Seekanals auf rd. die Hälfte des heute eingangs des Emden Fahrwassers zu beobachtenden Werts abnimmt. Durch die Untersuchungen über die Änderung der Salzgehaltsverhältnisse nach einer Umleitung der Ems im Emsmodell der BAW ist diese Abnahme als wesentlich stärker ausgewiesen worden. Nach den Modellversuchen wird die Salzgehaltsschwankung auf rd. ein Viertel ihres heutigen Werts zurückgehen. Diese Tideschwankungen von rd.  $2 \text{ ‰}$  wurde den vorstehend geschilderten Untersuchungen zugrunde gelegt (4.6). Die Angaben über die Feststoffeintreibung auf S. 222 dürfen danach als die besser abgesicherten gelten.

Durch die Ebbe wird ein Teil der auf S.222, Spalte 5 der Zusammenstellung genannten Flutablagerungen wieder ausgeräumt. Wie die tabellarische Zusammenstellung der Größe der Dichtestrom-Geschwindigkeiten ( S.216 ) bei einem Vergleich der Stärke der Dichtestromung der Flut mit derjenigen der Ebbe erkennen läßt, wächst bei den einzelnen Stufen eines weiteren Ausbaus die Dichtestromung der Flut stärker als diejenige der Ebbe. Hinter dem wachsenden Transportvermögen der Flut bleibt dasjenige der Ebbe daher immer weiter zurück.

Die Geschwindigkeit in Sohlennähe, welche die Größe des Transportvermögens bestimmt, ändert sich gegenüber ihrem Verlauf ohne Dichtestromung während einer Tide durch Hinzutreten einer Dichtestromung so, wie dies in Abb. 67 dargestellt ist. In Abb. 67 sind die Komponenten der genannten Stromgeschwindigkeitsanteile vektoriell, d.h. unter Berücksichtigung ihrer Richtung addiert worden.

Durch Berechnung der Integralwerte der Größe des Transportvermögens (siehe auch 4.4.) aus den nach Abb. 67 konstruierten Verlaufskurven der Sohlengeschwindigkeiten wurde proportional zu der in 4.4 für den 35'-Ausbau berechneten Größe des Ebbtransports.

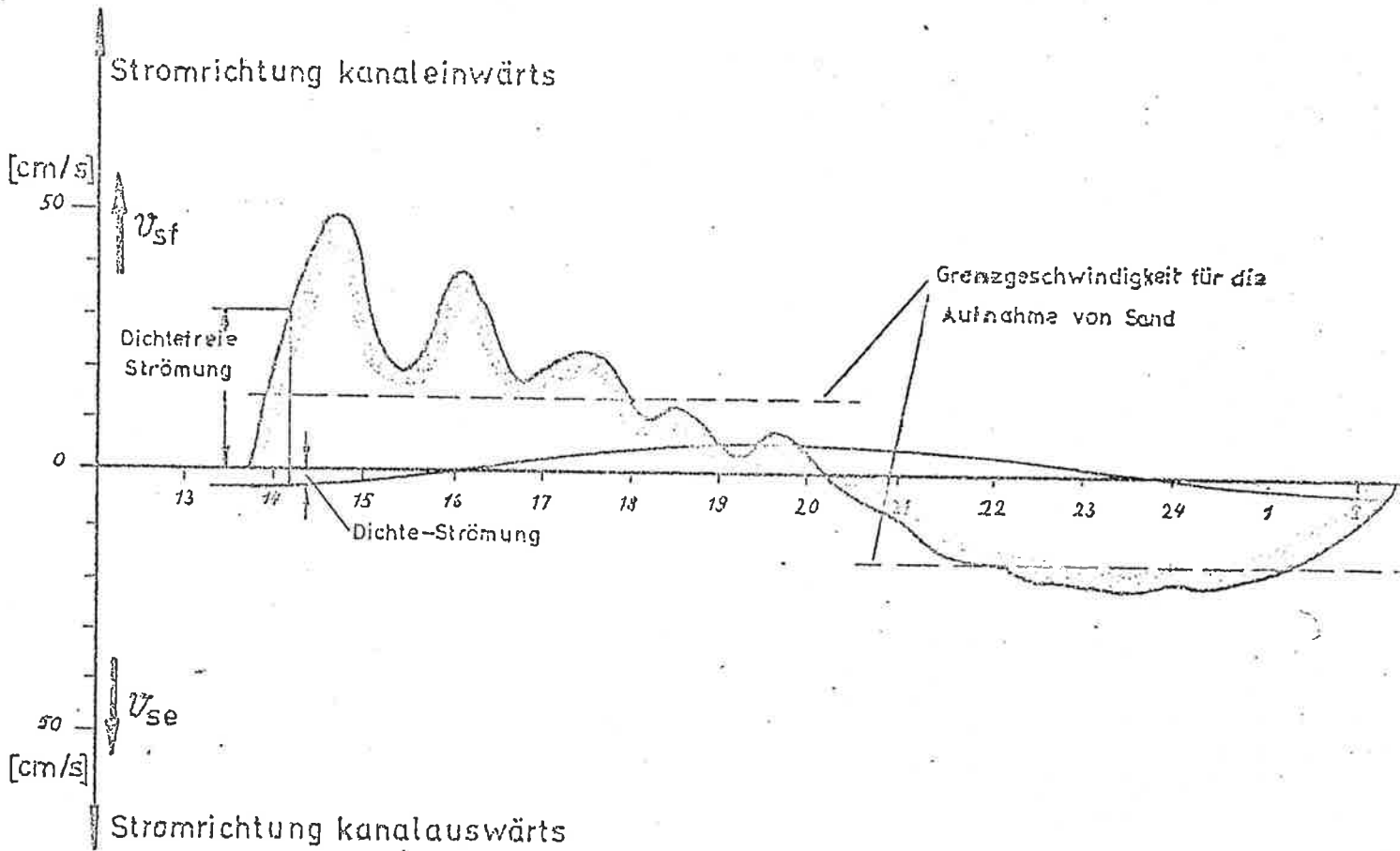


Abb. 67 : Stromgeschwindigkeit in Sohlennähe im tideoffenen See kanal, konstruiert durch Kombination einer dichtestromfreien Strömung mit der Dichtestromung

dessen Änderung bei den weiteren Ausbaustufen ermittelt (Spalte 3 der nachfolgenden Zusammenstellung). Zusammen mit den Werten für die Änderung der Größe der Flutablagerungen, berechnet durch Differenzbildung in Spalte 4 der vorhergehenden Zusammenstellung ergeben sich folgende Änderungen der Größe der Unterhaltungsbaggerungen gegenüber denjenigen des 35'-Ausbaus bei weiter vorangetriebener Vertiefung des tideoffenen Seekanals:

Änderung der Unterhaltungsbaggerungen

gegenüber dem 35'-Ausbau

Ausbau- stufe	Zunahme des Fluttransports	Abnahme des Ebbtransports	Zunahme der Baggerungen im Seekanal
1	2	3	4
41'	0.06	0.15	rd. 0.2
45'	0.10	0.25	0.4

x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/Jahr

#### 4.7 Die Baggerungen auf der Zufahrt zum tideoffenen Seekanal

Versuche im Modell mit beweglichem Sohlenmaterial haben Angaben darüber geliefert, wie sich die Menge der Eintreibungen in der Zufahrt zum tideoffenen Seekanal zu denen im entsprechenden Teil des Gatjebogens im derzeitigen Zustands verhält. Die Modellangaben wurden in Baggermengen umgerechnet. Die Größe der Unterhaltungsbaggerungen bei weiterer Vertiefung wurde nach Erfahrungssätzen bestimmt.

Nach einer Abdämmung des Emdener Fahrwassers oberhalb der Einfahrt zum Hafen Emden und der Umleitung der Ems durch den Dollart werden die rd. 40 Mio m<sup>3</sup> Tidewassermenge zur Füllung des Flutraums der Ems oberhalb der Absperrstelle zusätzlich zur Flutwassermenge des Dollart durch den Dollartmund geführt. Sie nehmen aus dem seewärts davon gelegenen Gatjebogen heraus also nicht mehr wie bisher den Weg auf das Emdener Fahrwasser zu. Der im Grundriß etwa dreiecksförmige Raum seewärts des tideoffenen Seekanals (siehe Skizze der Abb.68) zwischen der Geisespitze, dem Landesschutzdeich nördlich des Emdener Fahrwassers und der Verbindungslinie von der Geisespitze zur Südwestecke des Spülfelds Rysumer Nacken wird dann eingangs des Seekanals nur noch von rd. einem Drittel der heutigen Flutwassermenge durchströmt. Die Abgrenzung dieses Gebiets gegenüber dem Bereich mit größeren, in den Dollart gerichteten Stromgeschwindigkeiten kann im Modell durch im Wasser mitgeführte Schwimmkörper lokalisiert werden. Sie entspricht etwa der in Abb.68 einskizzierten "Stromtrennungslinie".

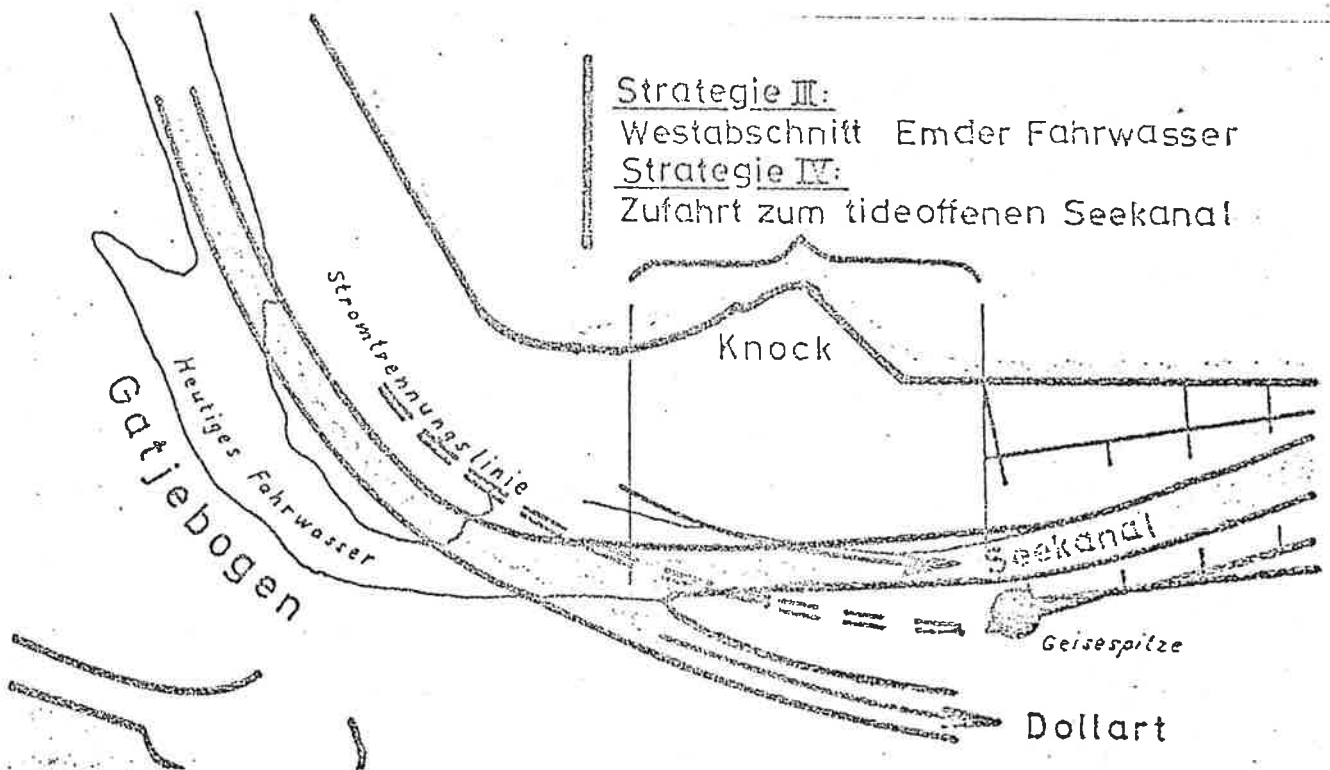


Abb.68

Entsprechend der geringeren Durchströmung sind dort, wo die Zufahrtsrinne zum tideoffenen Seekanal den vorbesprochenen Bereich durchschneidet, nach den Ergebnissen des Modellversuchs mit beweglicher Sohle die Eintreibungen der Flut in den dortigen Fahrwasserabschnitt gering. Aus der Vorwachsrichtung der das Fahrwasser verengenden Eintreibungen ist zu erkennen, daß der dort abgelagerte Sand von der Ebbe aus dem Dollartmund heraus in den Baggerschnitt der Zufahrt zum tideoffenen Seekanal eingetragen wird. Der Dollart ist jedoch langfristig gesehen selber ein Auflandungsbereich. Die angesprochenen Sandeintreibungen in die Fahrrinne müssen daher primär von der Flut in den Dollartmund getragen sein, ehe sie auf diesem Umwege in die Zufahrt zum tideoffenen Seekanal gelangen und dort abgelagert werden. Dieser nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart umständlichere Transportvorgang vermindert die Menge der Eintreibungen in der Zufahrt zum Seekanal im Vergleich mit ihrer heutigen Größe im gleichen Gebiet.

Die nach den Aufmessungen im Modell mit beweglicher Sohle in die Zufahrt zum tideoffenen Seekanal eingetriebenen Sandmengen sind beim 35'-Ausbau um etwa 20 % geringer als die, welche im gleichen Modell im praktisch mit der "Zufahrt zum tideoffenen Seekanal" identischen "Westabschnitt des Emders Fahrwassers" (siehe Abb. 68) aufgemessen wurden. Danach kann die zu erwartende Größe der Baggeraufwendungen für diesen Fahrwasserabschnitt nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart mit Hilfe des im Modell ermittelten Verhältniswerts aus den im heutigen Zustand zu erbringenden Baggerleistungen errechnet werden.

Die im Westabschnitt des Emders Fahrwassers in den zurückliegenden Jahren gebaggerten Mengen haben erkennen lassen, daß dieser Fahrwasserabschnitt neben demjenigen des anschließenden Gatjebogens einer der in der Unterhaltung pro Meter Längserstreckung aufwendigsten Baggerstrecken auf der Zufahrt zum Hafen Emden ist. Auch die Prognose für die Zunahme der Baggermengen bei weiterer Vertiefung muß auf ungünstige Erfahrungen gegründet werden, die bei der während rund eines Jahrzehnts



schrittweise in diesem Abschnitt vorgenommenen Vertiefung gewonnen wurden. Nach diesen Erfahrungen müssen zur Unterhaltung eines vertieften Fahrwassers in diesem Bereich in jedem Jahr etwa 55 % der zur Erstvertiefung zu baggernden Mengen erneut ausgebaggert werden. Das ist als Berechnungsansatz bei der Veranschlagung der Unterhaltungsbaggermengen bei weiterer Vertiefung ohne zusätzliche Regelungsmaßnahmen der Vorausberechnung zugrunde gelegt worden.

Demgegenüber ließen sich die Zunahmebeträge der Unterhaltungsmengen bei weiterer Vertiefung nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart in der Zufahrt zum tideoffenen Seekanal aufgrund der günstigeren Beurteilung durch die Modellversuche niedriger veranschlagen. Sie wurden entsprechend der bereits beim 35'-Ausbau vorteilhafteren Voraussage für das Verhalten der Zufahrt zum Seekanal gegenüber demjenigen im heutigen Zustand, welche mit rd. 20 % Baggerungsrückgang anzusetzen war, auch um mindestens 20 % niedriger angenommen. Dabei ist die eingangs dieses Berechnungsabschnitts gegebene hydrodynamische Begründung für die leichtere Unterhaltung dieses Fahrwasserabschnitts als eine begünstigende Voraussetzung für weitere Vertiefungen gewertet worden.

4.8 Diskussion der Ermittlung des Erfordernisses an Unterhaltungsbaggerungen im tideoffenen Seekanal und Beurteilung der Auswirkung einer Abschleusung (Dollarthafen)

Die bei der Berechnung der Sedimentation im tideoffenen Seekanal unberücksichtigten außergewöhnlichen hydrodynamischen und meteorologischen Umstände werden in ihrer Bedeutung abgeschätzt. Es wird erläutert, daß nach einer Abschleusung des tideoffenen Seekanals keine der in der vorliegenden Untersuchung angestellten Prognosen über das Sedimentationsverhalten im Dollart und in der übrigen Emsmündung revidiert werden muß.

Die vorstehend dargestellte Ermittlung der im tideoffenen Seekanal zu erwartenden Unterhaltungsbaggerungen ist auf Beobachtungen gegründet, welche bei den derzeit gegebenen Tideverhältnissen und bei ausgeglichenen Wetterlagen gewonnen wurden. Es soll daher die mögliche Streubreite der Eintreibungen in den tideoffenen Seekanal, wie sie bei den von mittleren Witterungs- und Oberwasserverhältnissen abweichenden Umständen zu erwarten ist, nachstehend generell abgeschätzt werden. Dabei werden die nach einer Emsumleitung gegebenen veränderten Verhältnisse ihrer Tendenz entsprechend berücksichtigt.

Wie die Durchmischungsversuche im Modell der BAW ausgesagt haben, wird nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart der Salzgehaltslängsgradient im Bereich der Geiserinne kleiner werden als derjenige, welcher zur Zeit im Emden Fahrwasser wirksam ist. Mit der demzufolge weniger intensiven Dichteströmung nehmen dann auch die Feststoffkonzentrationen an Größe ab, soweit diese Größe durch den Feststoffumlauf im Kopf der Brackwasserzone bestimmt wird. Es lassen sich daher Feststoffwerte, welche im Emden Fahrwasser gemessen worden sind, nicht unreduziert als auch für die Geiserinne zutreffend annehmen. Das ist jedoch bei den Eingangswerten der vorstehenden Sedimentationsberechnung für den tideoffenen Seekanal geschehen (Feststoffwerte der Abb. 54 bis 57 aus dem Emden Fahrwasser). Das Ergebnis der Sedimentationsberechnung ist daher um schätzungsweise 10 % zu groß ausgefallen.

Abzielend auf "mittlere Tideverhältnisse" wurden bei der Berechnung der Fluteintreibungen in den tideoffenen Seekanal (4.4 ) die Tiden mit stärkerem Windeinfluß aus der Mittelbildung für die Feststoffkonzentration im Flutwasser ausgeklammert. Tage mit Wind der Stärken 5 und mehr sowie mit östlichen bzw. westlichen Komponenten werden nach einer Statistik des WSA Emden an 10,9 % der Tage mit Windwirkung eines Durchschnittsjahres auftreten. Das sind rd. 10 % aller Tage eines Jahres. Wie aus Zusatzbemerkungen an einzelnen Beobachtungswerten der Abb.59 zu sehen, ist an solchen Tagen die Feststoffkonzentration im Emswasser auf etwa das 2,5-fache des windunbeeinflußten Gehalts erhöht. Nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart wird jedoch vermutlich die Einfahrt zum tideoffenen Seekanal, welche den Winden mit östlicher Komponente abgekehrt liegt, nur erhöhte Konzentrationen der rd. 7 % Windtage mit Westkomponente ausgesetzt sein. Rechnerisch wird dadurch das Baggererfordernis im Seekanal um 10.5 % vergrößert. Innerhalb des Streubereichs der erreichbaren Vorhersagegenauigkeit wird das mengenmäßig jedoch etwa durch die vorbesprochene Reduzierung des Baggererfordernisses durch eine generelle Abnahme der Konzentrationswerte der Feststoffe ausgeglichen.

Wie die vorbesprochenen stark windbeeinflußten Tiden wurden auch jene Meßtiden aus der Mittelwertbildung ausgeklammert, bei welchen die Feststoffkonzentration nach Oberwasserwellen wesentlich erhöht war. Von den Meßtiden der Abb. C bis F sind das diejenigen, welche im Abbildungskommentar mit der Bemerkung "Nach-Oberwasser-Anschwellung" versehen worden sind. Die große Häufigkeit ihres Auftretens unter den Meßtiden ist zufällig. Sie entspricht nicht dem Jahresdurchschnitt. Oberwasseranschwellungen, welchen Feststoffzunahmen folgen können, werden schätzungsweise fünfmal in einem Durchschnittsjahr auftreten und dann jeweils während rd. 5 Tagen etwa verdoppelte Feststoffkonzentration in einem Beobachtungsquerschnitt unterhalten.

Oberwasseranschwellungen werden also während rd. 7 % der Tiden eines Jahres die Feststoffkonzentration im Wasser der Ems wesentlich erhöhen. Aus den bisherigen Untersuchungen ist kein Grund

für die Annahme abzuleiten, daß solche Konzentrationswolken nicht auch den Bereich der Umleitung der Ems durch den Dollart passieren, um wie bisher seewärts aus dem Emsflußlauf abzutreiben. In die Einfahrt zum tideoffenen Seekanal können solche Konzentrationen jedoch nur durch Quermischung der ansonsten parallel nebeneinander fließenden Stromkomponenten der umgeleiteten Ems und des kanaleinwärts gehenden Wassers gelangen. Nach Oberwasseranschwellungen ist aber das Wasser im tideoffenen Seekanal salziger als das im benachbarten Emswasser. Seine größere Dichte wird daher weitgehend verhindern, daß die besonders in Sohlennähe während des Schlammfließens hohen Feststoffkonzentrationen in den Seekanal eindringen und dort das Baggererfordernis wesentlich erhöhen.

Es ist bisher nicht erforscht, unter welchen Umständen in gemischtkörnigen Suspensionen mit höherem Feinkornanteil die Sedimentationsgeschwindigkeit der Feinstkornanteile so erhöht wird, wie es in manchen Fällen in der Emsmündung zu beobachten ist. Sedimentationsbedingungen solcher Art unterliegen zum großen Teil die Suspensionen, welche zu den starken Ablagerungen in den tideoffenen Becken des Hafens Emden führen. Gleiche Eigenschaft haben die Suspensionen während des Schlammfließens. Nach der letztgenannten Beobachtung kann die Eigenschaftsänderung der gemischtkörnigen Feststoffe im Wasser des Außenhafens Emden also auch außerhalb der Hafenbecken verursacht worden sein. Beim Durchgang des Emswassers mit der Tidebewegung durch den Außenhafen erfolgt dann ggfs. dort eine Anreicherung infolge des schnellen Absinkens.

Für den tideoffenen Seekanal ist die vorgenannte, noch nicht definierbare Eigenschaft mancher Suspensionen aus folgendem Grund von Bedeutung: Die angesprochenen Suspensionen bilden nach dem Sedimentieren eine Grenzschicht an ihrer Oberfläche, welche bewirkt, daß sie selbst bei den hohen Fließgeschwindigkeiten des freien Stroms nicht wieder erodiert werden. Wird etwa dem Hauptanteil der in den tideoffenen Seekanal eingetragenen Feststoffe unter den dortigen Bedingungen die oben genannte unvorteilhafte Eigenschaft vermittelt, so muß damit gerechnet

werden, daß die mit 17 % der Fluteintreibungen (0.3 Mio. m<sup>3</sup> beim 35'-Ausbau) veranschlagte Ebbräumung nicht stattfindet. Da an der Sohle des tideoffenen Seekanals gegen Ende der Flut und zu Anfang der Ebbe über mehr als eine Stunde fast völlige Ruhe im Wasserkörper herrscht (siehe Abb. 67), sind dort die Bedingungen für eine Anfangskonsolidierung des Sediments gegeben.

Die Größe der Eintreibungen in den Seekanal aus dem Schlammfließen in der Ems wurde weiter oben bereits abgeschätzt. Sollten dem Seekanal nur auf diese Art Suspensionen mit den angesprochenen ungünstigen Eigenschaften zugeführt werden, so kann ihre Menge keinen Grund für eine Änderung des veranschlagten Räumverhaltens der Ebbe abgeben.

Die vorstehende Diskussion läßt erkennen, daß das Ausschließen von Extremsituationen bei der Mittelwertbildung für die Feststoffkonzentration (4.1 und 4.2) das Ergebnis der Sedimentationsberechnung für den tideoffenen Seekanal nicht beeinflusst hat. Die Wirkungen der Extremsituation auf den Feststoffgehalt heben sich im Jahresdurchschnitt gegenseitig auf. Die Unklarheit bezüglich der Wirksamkeit der Ebbströmung im tideoffenen Seekanal ließe sich nur durch langwierige und aufwendige Spezialistenuntersuchung beheben. Hier wäre eine Lücke in der allgemeinen Grundsatzforschung zu schließen. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist aber auch dann endgültige Klarheit erst durch die Erfahrung nach Ausführung der Emsumleitung zu gewinnen.

In einer zweiten Ausbaustufe der Emsumleitung soll der tideoffene Seekanal abgeschleust und in ein Hafenbecken umgewandelt werden (Dollarthafen). Die danach im Vorhafen vor der neuen Schleuse gegebenen Sedimentationsverhältnisse sind durch eine theoretische Ermittlung kaum noch zu erfassen. Beim tideoffenen Seekanal liefert das Steigen des Wasserstandes mit der Flut den überwiegend wirksamen Anteil beim Eindringen von feststofftransportierendem Wasser in den zu beurteilenden Sedimentationsraum. Die durch das Steigen der Flutwasserstände eindringende Wassermenge ist durch eine Kubizierung leicht zu ermitteln. Im kurzen Vorhafen vor der Schleuse des Dollarthafens tritt zum Füllen des Flutraums in mindestens gleicher Größenordnung ein Auswechseln von Wasser durch Dichteströmung und Walzenbildung hinzu.

Die Stärke der tidestrombedingten Walzenbewegung läßt sich durch zweckmäßig bauliche Gestaltung der Vorhafeneinfahrt reduzieren. Entsprechende Untersuchungen in einem Sondermodell bei der BAW werden zur Zeit begonnen. Die endgültige Gestaltung der Einfahrt und ggfs. des Grundrisses des Vorhafens sind daher noch nicht festgelegt. Demzufolge kann ein wesentlicher Faktor, welcher die Größe der Sedimentation im Vorhafenbereich bestimmt, vorerst nur in pauschaler Abschätzung berücksichtigt werden.

Auch die Größenordnung des Wasseraustauschs durch Dichteströmung wird durch die Geometrie des Vorhafenbeckens mitbestimmt. Es ist jedoch selbst bei bekannten Abmessungen des Wasserraums kaum möglich, die Größe des Dichteaustauschs neben derjenigen durch Walzenbildung zutreffend theoretisch vorauszusagen. Daher soll nachstehend die allein mögliche überschlägliche Abschätzung auf die Erfahrungen im jetzigen Außenhafen des Emdener Hafens abgestützt werden.

Im jetzigen Außenhafen und Vorhafen wird das Wasser in einer Tide drei-bis viermal durch Dichteströmung ausgetauscht. Auch während der Ebbe findet ein vollständiger Wasseraustausch von ausströmendem Salzwasser gegen weniger salziges aber feststoffhaltiges Emswasser statt. Im Einfahrtsbereich (Wendeplatz) wird darüber hinaus zu allen Tidephasen das Wasser durch Walzenbildung infolge des Vorbeiströmens der Tide vor dem Hafenumd ausgewechselt.

Die bei dem vorgenannten Wasseraustausch mitgeführten und aus-sedimentierten Feststoffe machen Baggerungen von rd. 3 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr erforderlich. Hierbei sind zu den Unterhaltungsbaggerungen von rd. 1,5 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr im tideoffenen Bereich des Außenhafens und Vorhafens diejenigen von noch einmal rd. 1,5 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr aus dem abgeschleusten Binnenhafen hinzuzurechnen. Wie in 2.2.2 erläutert, sind die im Binnenhafen zu baggernden Feststoffmen-gen primär im Vorhafen zur Großen Seeschleuse aus dem dort eindringenden Emswasser sedimentiert und dann erst durch Dichte-strömungen in den Binnenhafen eingetragen worden.

Im tideoffenen Seekanal und in der Einfahrt zum Dollarthafen sind die Bedingungen für die Unterhaltung der Wassertiefe günstiger als in der jetzigen Einfahrt zum Hafen Emden. In Höhe der geplanten neuen Hafeneinfahrt an der Knock ist nach den Ergebnissen der Durchmischungsversuche im Modell der BAW nach einer Umsumleitung die Salzgehaltsänderung während der Tide gut auf die Hälfte derjenigen reduziert, welche zur Zeit vor der Einfahrt zum Hafen Emden zu beobachten ist. Entsprechend kleiner werden im Vorhafen zum Dollarthafen die Dichteströmungen ausfallen. Ihre Intensität geht genähert mit der Wurzel der Salzgehaltsdifferenz zurück (4.6, S.213 ). Es ist also damit zu rechnen, daß der Wasseraustausch auf etwa 70 % ( $\sqrt{0.5/1}$ ) desjenigen im Vorhafen zum Hafen Emden zurückgeht.

Mit einem im Jahresgang mittleren Salzgehalt von 18 % in der Hauptrinne vor der Einfahrt zum Dollarthafen (Durchmischungsversuche im Modell bei der BAW) gegenüber einem solchen von 12 % derzeit vor der Einfahrt zum Hafen Emden kommt der Dollarthafen in einen anderen Bereich der Brackwasserzone zu liegen.

Dabei wirkt sich der größere Abstand vom Feststoffmaximum (Abb. 24, S. 88) erniedrigend auf den Feststoffgehalt des Tidewassers aus. Bei der hier anzustellenden Betrachtung über die im Vorhafen des Dollarthhafens zu erwartende Sedimentation ist die Änderung der Feststoffkonzentration im Flutwasser maßgebend. Sie geht nach Naturmessungen (Abb. 24) von dem einem Salzgehalt von 12 % entsprechenden Wert von  $120 \text{ g/m}^3$  (halbe Flut) vor dem Hafen Emden auf denjenigen bei 18 % von  $100 \text{ g/m}^3$  vor dem Dollarthafen zurück. In etwa diesem Verhältnis wird sich dann auf Grund des geringeren Feststoffinhalts im Flutwasser die Sedimentation im Vorhafen zum Dollarthafen gegenüber derjenigen im Hafen Emden um 20 % verringern.

Eine Abnahme des Wasseraustauschs durch Dichteströmung auf 70 % mit einer auf 80 % verringerten Feststoffkonzentration läßt auf einen Rückgang des Baggererfordernisses im Dollarthafen auf etwa 56 % der heute im Hafen Emden zu baggernden Mengen schließen. Da die Untersuchungen im hydraulischen Modell bereits vor den weiter zu erwartenden Verbesserungen durch Sonderversuche erkennen lassen, daß die Strömung in der Einfahrt zum Vorhafen des Dollarthhafens sehr ruhig ist (geringe Walzenbildung) kann aus diesem Grunde mit einer weiteren Verringerung des Unterhaltungsaufwands gegenüber demjenigen im Hafen Emden gerechnet werden. Der Baggeraufwand im Dollarthafen wird danach in einer Größenordnung von etwa 50 % desjenigen im Hafen Emden, also bei etwa  $1,5 \text{ Mio. m}^3/\text{Jahr}$  liegen.

Die eingehenderen Ermittlungen über den Umfang der zur Unterhaltung der Wassertiefe im tideoffenen Seekanal erforderlichen Baggerungen (4.1 bis 4.6) haben deren Größenordnung mit  $1,6 \text{ Mio. m}^3/\text{Jahr}$  ausgewiesen. Damit erbringen die vorstehend geschätzten Baggermengen für den Dollarthafen bei einer etwa gleichen Größe ( $1,5 \text{ Mio. m}^3/\text{Jahr}$ ) für eine Betrachtung über den Feststoffhaushalt in Dollart und innerer Emsmündung keine unterschiedlichen Gesichtspunkte. Der Verlust an Tidespeicherraum durch die Abschleusung des tideoffenen Seekanals bei einer Umwandlung in den Dollarthafen zieht zwar im Bereich seewärts des Dollarthafens eine Verringerung des Räumvermögens der Tideströmung nach sich. Das betrifft besonders die unmittelbar seewärts anschließenden



östlichen Rinnenteile. Für die Unterhaltung der Zufahrt zum Dollarthafen haben jedoch die Untersuchungen im hydraulischen Modell mit beweglicher Sohle trotzdem günstige Bedingungen vorausgesagt.

## 5. Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Bundesanstalt für Wasserbau wurde 1974 beauftragt, zusätzlich zur Aussage des hydraulischen Modells die Auswirkungen einer Umleitung der Ems durch den Dollart auf die Sedimentationsverhältnisse in der Unterems und im Dollart zu untersuchen. Die Ergebnisse der Modellversuche haben die in die Emsumleitung gesetzten Erwartungen bestätigt. Die z.Zt. im Emden Fahrwasser erforderlichen Unterhaltungsbaggerungen können dadurch weitgehend eingespart werden. Zu der gleichen Aussage gelangt die in der vorliegenden Begutachtung dargestellte Untersuchung (4. S.179 ff) auf theoretisch-rechnerischem Wege.

Zu klären ist jedoch die Frage, ob die Feststoffmengen, die künftig nicht mehr im Emden Fahrwasser gebaggert werden, zu einer unzutraglichen Verschlickung an anderen Orten des Emsmündungstrichters führen. Bei einer Umleitung werden Ems- und Dollartwasser früher als bisher zusammengeführt. Der Austausch zwischen den beiden Wasserkörpern wird dadurch intensiver. Damit wäre es denkbar, daß Feststoffmengen aus dem Wasser der Ems in den Dollart übergehen und die Verlandung des Dollart beschleunigen.

Die Untersuchungen, über welche in der vorliegenden Stellungnahme berichtet wird, haben aber derartige Befürchtungen ausgeräumt. Es wird nach einer Umleitung der Ems durch den Dollart die Aufhöhung der Dollartwatten nicht nachweisbar gefördert. Ein Einstellen der Baggerungen im Emden Fahrwasser führt weder zu Ablagerungen in der Fahrrinne noch im Flutraum zwischen Thw und Tnw, sondern lediglich im Bereich zwischen Fahrrinne und Tnw-Linie auf der Ostseite des Ostfriesischen Gatjes. Für diese Einschätzung der Folgen einer Umleitung der Ems durch den Dollart nennt der vorliegende Bericht die nachstehend zusammengefaßten Gründe:

Der Antransport der im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden derzeit zu baggernden Feststoffe erfolgt vornehmlich stromauf von der Seeseite her. Untersuchungen mit auf der Mittelplate ausgebrachtem radioaktiv markiertem Sand zeigten eine fast einseitig

stromauf gerichtete Wanderung in das Emden Fahrwasser hinein (S.79 ). Auch die Wanderung anderer Stoffe marinen Ursprungs weist auf diese Transportrichtung hin. So sind z.B. durch die Verteilung von Muschelbruch im Sediment der einzelnen Rinnen der Emsmündung die bevorzugten Transportwege bis in das Emden Fahrwasser und den Dollart hinein markiert (S.82 ). Durch das Vorkommen oder Fehlen bestimmter Minerale und besonders von Schwermineralen läßt sich der Sand in der Emsmündung bis zur Einfahrt zum Hafen Emden als Seesand erkennen. Er unterscheidet sich charakteristisch von dem oberhalb davon anzutreffenden Sand der Ems (S.81 ). Dagegen zeigen feinkörnige Bestandteile des Schlicks der Uferwatten bis zur Einmündung der Leda hinauf die gleiche Zusammensetzung wie diejenigen der Wattgebiete der Nordsee (S.82 ). Die Reste mariner Diatomeen bilden noch in Höhe des Hafens Papenburg 26 % der dortigen Individuenzahl im Sediment.

Die Größe des stromauf in das Emden Fahrwasser gerichteten Feststofftransportes entspricht der Menge des dort durch Baggerungen zu entfernenden Sediments. Das ist am Ausmaß der Erosion und Neuanfuhr von Sand auf der Mittelplate zu erkennen. Als weiteres Indiz für Richtung und Größe des Feststofftransportes ist folgende Feststellung aufschlußreich: Beim Bau des Umfassungsdamms des heutigen Spülfelds auf dem Rysumer Nacken von 1930 bis 1937 wurde mit dem Hochführen des Damms der Längstransport im Spülfeldgebiet kontinuierlich unterbunden. Die dabei durch natürliche Sedimentation seeseitig hinter dem Damme zurückgehaltenen Sand- und Schlickmengen waren von der Größenordnung des damaligen Baggererfordernisses im Emden Fahrwasser, sodaß im Emden Fahrwasser während der Bauphase kaum gebaggert zu werden brauchte. Nach Fertigstellung des Dammes fielen wieder die gleichen Unterhaltungsbaggermengen wie zuvor an (S.78 ).

Der bevorzugt stromaufgerichtete Feststofftransport erklärt sich aus den Besonderheiten der Tidedynamik und der den Tideströmungen überlagerten landeinwärts wirksamen Dichteströmung.

Ein Teil dieses Transportes ist Naturgesetz und damit unabwendbar. So ist das in Tideflüssen im Laufe der Zeit sich einspielende Gleichgewicht zwischen flutseitigem und ebbseitigem Feststofftransport in den Strommündungen der Nordsee allgemein wegen der andauernden Hebung des Seespiegels gegenüber dem Festland bisher nicht zustande gekommen. In der Emsmündung ist darüber hinaus der durch Sturmfluten erzeugte Meereseinbruch des Dollart nicht wieder vollständig durch Wiederverlandung aufgefüllt. Aktuell gestört wird das Transportgleichgewicht jedoch durch die künstliche Vertiefung der Fahrrinne und die Unterhaltungsbaggerungen.

Die Wirkung der Baggerungen im Emden Fahrwasser auf den Feststofftransport ist aus den vorliegenden allgemein gültigen Erkenntnissen erklärbar als Folge der Änderung der Strömungsverhältnisse und damit des Transportvorgangs in einer örtlich begrenzten Ausbaggerung und deren seeseitiger und stromauf gelegener Umgebung (S. 51 ff). Die danach theoretisch zu erwartenden Effekte sind aus Ergebnissen von Messungen und Beobachtungen in der Natur nachzuweisen (S. 59 ).

Die Baggerung des Emden Fahrwassers führt zu einer Erosion, welche auf dem Wege der in den Baggerschnitt gerichteten Strömungen fortschreitet. Die im Einzugsgebiet dieser Strömungen erodierten Bodenmengen werden resultierend der Baggerstelle zugeführt (S. 55 ). Oberhalb der Einfahrt zum Hafen Emden, d.h. oberhalb des Baggerschnittes des Emden Fahrwassers ist jedoch die Sohle der Ems aus einem gegen Erosion resistenten Material aufgebaut. Der Materialabtrag ist daher nur stromab vom Emden Fahrwasser wirksam. Er findet auf der Mittelplate, dem Watt des Rysumer Nackens und dem Manslagter Nacken statt. Dieses Gebiet ist durch Schwimmermessungen als Einzugsgebiet jener Strömungen nachgewiesen, welche auf das Emden Fahrwasser gerichtet sind (S. 58 ). Die Abnahme der Watthöhe auf dem Manslagter und Rysumer Nacken entspricht der Menge der im Emden Fahrwasser zu baggernden Feststoffe (S. 77 ).

Die vorliegende Untersuchung zeigt (s.31 ff), daß die Menge der im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden sedimentierten Feststoffe sich proportional zur Größe des Oberwasserabflusses ändert. Die fortschreitende Zunahme der Sedimentmenge und Baggermenge im Laufe der Jahre seit dem Beginn der Baggerungen im Emden Fahrwasser ist jedoch abhängig von der Tiefe der Ausbaggerung der Fahrrinne (S.33 ). Aus der Beobachtung, daß der Antransport von Feststoffen proportional zum Tieferbaggern der Fahrrinne an Menge zugenommen hat, läßt sich folgern, daß der durch das Baggern in Gang gesetzte Feststofftransport beim Einstellen der Baggerungen abnimmt. Er hört ganz auf, wenn am Ort der Baggerungen die Gewässersohle bis zu ihrer Gleichgewichtshöhe aufsedimentiert ist. Dieses Verhalten des Feststofftransports ist am Verlauf der Sedimentation im Emden Fahrwasser während der baggerungsfreien Zeit von 1941 bis 1946 zu belegen (S.38 ).

Bei den Untersuchungen, welche zu dem vorstehend genannten Ergebnis führten, wurden die Sedimentmengen des Hafens Emden mit denen des Emden Fahrwassers zusammengefaßt. Das Sediment des Außen- und des Binnenhafens ist seinem Ursprung nach dem des Emden Fahrwassers hinzuzurechnen. Die internen Transportvorgänge und die örtliche Verteilung des Sediments im Emden Binnenhafen lassen erkennen, daß auch dieser Teil des Sediments hauptsächlich durch die Große Seeschleuse aus der Ems in den abgeschleusten Teil des Hafens eingetragen wird (S.27 ). Ein Teil gelangt durch die Zuwässerung mittels Siel oder Pumpwerk in den Binnenhafen.

Die Abhängigkeit der Sedimentmenge von der Oberwassermenge rührt nur zu einem kleinen Teil von dem mit dem Oberwasser antransportierten Feststoffen her (S.10 ). Diese Feststoffmenge beläuft sich auf rd. 0,3 Mio t/Jahr (S.15 ). Die Schwankungen der Sedimentmenge der einzelnen Jahre im Emden Fahrwasser und im Hafen Emden betragen das Mehrfache der Sedimentanfuhr des Oberwassers. Die Unterschiede in der Menge der jährlichen Baggerungen sind daher nur zum geringen Teil auf die wechselnde Oberwasserzufuhr zurückzuführen. Sie sind vielmehr hauptsächlich durch die unterschiedliche Größe der seeseitigen Anfuhr der Feststoffe bedingt. Ursache dafür ist die mit der Oberwassermenge sich ändernde Größe der stromaufgerichteten Dichteströmung (S.64 ).

Sie ist proportional zur Größe des Salzgehaltslängsgefälles. Dieser Salzgehaltsgradient wächst im Bereich unterhalb des Emders Fahrwassers durch die seewärtige Verschiebung der Salzwasserzunge beim Zunehmen des Oberwasserabflusses (S. 66 ). Mit dieser Verschiebung erweitert sich der Bereich der Wirksamkeit der Dichteströmung bis in das Ostfriesische Gatje hinein. Mit der Zunahme der Dichteströmung vergrößert sich also gleichzeitig der Einzugsbereich der mit der Dichteströmung zusätzlich transportierten Feststoffe. Das führt zu verstärkter Sedimentation im Baggergebiet.

Aus Strömungsmessungen im Emders Fahrwasser ist die Zunahme der landeinwärts gerichteten sohlnahen Strömungskomponente beim Zunehmen des Oberwasserabflusses nachweisbar (S. 72 ). Die Schnelligkeit der Aufhöhung der Sohle des Baggerschnittes im Emders Fahrwasser zeigt die Abhängigkeit von der Oberwassermenge. Da sie den Antransport von der Seeseite aktiviert, zeigt sich das Zunehmen des Aufhöhungstempos besonders im seewärtigen Teil des Baggerschnittes. Dort wird ausschließlich Seesand sedimentiert (S. 68 ).

Die Wirksamkeit der Dichteströmung wächst aus physikalischen Gründen mit zunehmender Wassertiefe (S. 65 ). Im Baggerschnitt des Emders Fahrwassers vergrößert sich demzufolge die stromaufgerichtete Dichtekomponente mit der dort im Laufe der Jahre fortgesetzten Vertiefung. Als Folge zeigte sich in den Ergebnissen der Dauermessungen oberhalb des Emders Fahrwassers bei Pogum parallel zum Fortschreiten der Vertiefung des Emders Fahrwassers ein Anwachsen der Feststoffkonzentration. Der Feststoffgehalt nahm aber bezeichnenderweise nur in dem Wasserkörper zu, welcher aus dem Emders Fahrwasser heraus mit der Flut an die Meßstelle getragen wird. Das Wasser, welches mit der Ebbe aus der oberen Ems an der Meßstelle vorbeifließt, zeigt dagegen keine Erhöhung der Feststoffkonzentration (S. 175 ).

Es läßt sich also aus den vielen Beobachtungen belegen, daß der Antransport von Feststoffen in das Emders Fahrwasser und die Größe der dortigen Feststoffkonzentration eine Folge der dort ausgeführten Baggerungen zur Vertiefung des Fahrwassers ist.

Nach einem Einstellen dieser Baggerungen wird sich die Sohle aufhohen bis zu einer Gleichgewichtslage, wie sie im Jahre 1946 nach einer baggerungsfreien Zeit von 4 Jahren etwa erreicht wurde. Dann werden am Ort der Baggerungen keine Feststoffe mehr bleibend sedimentiert. In nicht durchströmten Nebenbecken wie Hafeneinfahrten usw. kann dann nur noch eine Sedimentation bis zur Größe der mit dem Oberwasser herangeführten Feststoffmenge erfolgen (S.38). Im Einzugsgebiet der Flutströmung, welche auf das Emders Fahrwasser gerichtet ist, werden die durch die Baggerungen verursachten Erosionen wieder aufgefüllt. Die davon betroffenen Gebiete liegen außerhalb der tiefen Rinne östlich des Fahrwassers von Gatjebogen und Ostfriesischem Gatje.

Die als Gleichgewichtszustand im Emders Fahrwasser bekannte Größe des Durchflußquerschnitts (1946) ist bei der geplanten Durchbaggerung der Geise auch für die neue Geiserinne vorgesehen (S.169). Entsprechend erhält der Querschnitt im Dollartmund durch Ausbaggerung eine Größe, welche der zusätzlichen Abfuhr des Tidewassers der oberen Ems angemessen ist. Die erste Dimensionierung für die Durchführung der Modellversuche erfolgte nach einem rechnerischen Ansatz, welcher halbempirisch die Konstruktion eines Gleichgewichtsquerschnitts ermöglicht (S.153). Nach den Ergebnissen des Modells mit beweglichem Sohlenmaterial entsprechen die Größen der so bemessenen Querschnitte in der Geiserinne den hydrodynamischen Anforderungen. Die Linienführung wird gut von der Strömung angenommen. Auch nach Dauerversuchen waren keine Veränderungen eingetreten, welche in der Natur durch Baggerungen korrigiert werden müßten. Untergrunderkundungen auf der Trasse der geplanten Geiserinne haben darüber hinaus gezeigt, daß die Geiserinne in Schichten eingeschnitten wird, welche durch ihren Widerstand gegen Erosion ein Ausweichen der Rinne verhindern (S.170). Die Geiserinne kann also nach ihrer Herstellung durch eine einmalige Baggerung dem natürlichen Gleichgewicht von Strömung und Feststofftransport überlassen werden.

In einer im natürlichen Gleichgewicht belassenen Geiserinne wird die Lage der Brackwasserzone der heutigen Situation im oberen Emders Fahrwasser und dem oberhalb bis Pogum anschlie-

Benden Emslauf entsprechen. Das ist das Ergebnis der Durchmischungsversuche im Modell der BAW. Es lassen sich also die an bestimmte Orte in der Brackwasserzone gebundenen Feststoffkonzentrationen (S. 87) auch in ähnlicher Größe in der künftigen Geiserinne erwarten.

Ein Vergleich der wie vorstehend für die Geiserinne vorherzusagenden Feststoffkonzentrationen mit denjenigen des heutigen Dollart ist nicht exakt möglich. Es liegen über den Feststoffgehalt des Dollartwassers bei weitem nicht so viele Messungen vor wie für die Ems nach den Dauermessungen bei Pogum. Die verfügbaren Messungen lassen jedoch erkennen, daß sich die Wasserkörper in Ems und Dollart im Bereich der nach dem Geisedurchstich ermöglichten Durchmischung im Jahresmittel nicht wesentlich in ihrem Feststoffgehalt unterscheiden. Durch ein Übergehen von Wasser mit nur unbedeutend geänderten Feststoffinhalt kann die Sedimentation im Dollart nicht beeinflusst werden. Das lassen die folgenden Beobachtungen erkennen: Die Eigengesetzlichkeit der natürlichen Wiederverlandung des Dollart läßt Einflüsse von außen unwirksam bleiben. Ihr Ausmaß in Größe und Wirkungsraum bleibt erfahrungsgemäß auf den Nahbereich von Baumaßnahmen (z.B. Landgewinnung, Bau des Geiseleitdammes) beschränkt.

Der Dollart ist seit der Zeit seiner größten Ausdehnung zu Anfang des 16. Jahrhunderts kontinuierlich und ohne erkennbare Änderung der Aufhöhungsgeschwindigkeit wieder verlandet. So errechnet sich aus der durchschnittlich sedimentierten Höhe von etwa 4 m in einem Zeitraum von 450 Jahren eine mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,9 cm/Jahr für das Gebiet außerhalb der Deiche und des Vorlandes des heutigen Dollart. In neuester Zeit zwischen 1952 und 1970 wurde eine Aufhöhungsgeschwindigkeit von 0,8 cm/Jahr beobachtet (S. 111 ff). Die ermittelten Auflandungsraten sind praktisch gleich groß und können als Nachweis einer über mehrere Jahrhunderte gleichmäßige Sedimentation angesehen werden. Die geringe Differenz ergibt sich dadurch, daß ganz am Anfang der Wiederverlandung wegen der aus dem vorangegangenen Abbruch vorhandenen Feststoffmengen eine



stärkere Sedimentation stattfand. Die in den letzten Jahrzehnten erfolgten Baggerungen haben die Verlandung des Dollart nicht beeinflussen können (Vergleich der Perioden 1921 - 1952 und 1952 - 1970 auf S.115 ff).

Die Unwirksamkeit von Änderungen des Gehalts an suspendierten Feststoffen wird deutlich durch niederländische Untersuchungsergebnisse über den Feststofftransport und die im Dollart sedimentierten Mengen. Danach werden von der mit jeder Flut in den Dollart getragenen Feststoffmenge im Jahresdurchschnitt nur gut 2 % auf Dauer im Dollart zurückgehalten (S.148). Vom Gehalt von Feinkorn von mehr als 50 % im Flutwasser bleibt im Dollartsediment nur ein Anteil dieser Korngrößen von rd. 20 % erhalten. Die Watten des heutigen Restdollart werden demzufolge zu 80 % aus Sand aufgebaut (S.148).

Die vorgenannten Verhältniswerte lassen erkennen, daß die Sedimentation im Dollart neben dem Angebot an Feststoffen wesentlich durch den Wiederabtrag durch Windwellen und gleichzeitige Tideströmung bestimmt wird. Das zeigt sich auch in der unterschiedlich starken Aufhöhung der Wattflächen je nach ihrer Lage zur Hauptwindrichtung. So höht sich das Watt westlich der Hauptrinne des Dollart stärker auf als das östliche, weil der Wattleil gegen die stürmischen Westwinde durch das niederländische Festland geschützt wird. Bei starken Ostwinden werden die Wasserstände in der inneren Emsmündung so stark erniedrigt, daß das Dollartwatt selbst bei Flut weitgehend trocken bleibt. Windwellen, welche durch Erosion die Aufhöhungsgeschwindigkeit des östlichen Watts niedrighalten, können daher im westlichen Watt im allgemeinen nicht wirksam werden.

Kartographische Vergleiche zeigen, daß das System der kleineren und mittleren Rinnen des Dollart in dem Maße an Ausdehnung und Bedeutung verliert, in welchem die Einpolderungen und Auflandungen die Größe der zu- und abzuführenden Tidewassermengen verringern. Die Wirkung der natürlichen oder zum Teil durch Landgewinnungsmaßnahmen geförderten Reduzierung des Flutraums des Dollart bleibt jedoch auf die Entwicklung des jeweils betroffe-

nen Einzugsgebiets beschränkt. Auch das Absperrren der Überströmung der Geise hat sich nach Abschluß der Bauarbeiten 1961 nur in einem begrenzten Gebietsstreifen parallel zum Leitdamm ausgewirkt.

Eine nur um das Jahr 1932 zu beobachtende vorübergehende Unregelmäßigkeit bei der sonst kontinuierlich fortschreitenden Nordest-Verlagerung der Hauptrinne des Dollart ist möglicherweise auf eine schnell verlaufende Umstellung im Rinnensystem in der Ems unterhalb der Dollartmündung zurückzuführen. Durch sie ist die Richtung der Einströmung in den Dollart verändert worden. ( S. 138 ). Die Auswirkungen im Dollart sind jedoch gering und in der Kartendarstellung undeutlich. Es ist daher zu folgern, daß Änderungen in der Strömungsdynamik keine tiefgreifenden Folgen für die Entwicklung des Dollart haben.

Die bei einer Umleitung der Ems durch den Dollart geplante Lage der Fahrrinne im Gatjebogen fällt mit derjenigen der dortigen Hauptrinne um das Jahr 1932 zusammen. Wenn von der dadurch geänderten Einströmung in den Dollart Wirkungen auf die Verhältnisse im Dollart ausgehen sollten, so müßten sie in der Tendenz ähnlich günstig ausfallen wie bei den Veränderungen um 1932. Die Änderung der Einströmung scheint damals den Querschnitt der Hauptrinne etwas erweitert und nach Südwesten zurückverlegt zu haben ( S. 131 ). Die Aufhöhung im westlichen Dollartwatt wurde zumindest verzögert. Beide Folgen sind als Dauereinfluß nach der Emsumleitung zu erwarten. Sie sind günstig für den Bestand des Dollart als Flutspeicherraum.

Aus allen vorgenannten Fakten geht hervor, daß die Sedimentation im Dollart weniger durch Qualität und Konzentration der dem Dollart von außen zugeführten Feststoffe bestimmt wird als vielmehr durch die in seiner eigenen inneren Konfiguration und geographischen Lage gegebenen Bedingungen. Eine Änderung der Anströmung hat nur unbedeutende Auswirkungen auf die Entwicklung des Dollart. Im Falle der geplanten Umleitung der Ems greift aber die geänderte Anströmdynamik erhaltend und daher im erwünschten Sinne in den Ablauf der Auflandung ein.

Durch eine Abdämmung oberhalb der Einfahrt zum Hafen Emden wird das Emdener Fahrwasser zu einem tideoffenen Seekanal. Er wird vom Wasser der Flut gefüllt, und die vom Flutwasser in Suspension mitgeführten Feststoffe fallen aus der mit fortschreitendem Eindringen in den Seekanal immer mehr abnehmenden und weniger turbulenten Strömung aus.

Der vorstehend grob angedeutete Ablauf der Sedimentation ist bei der Außenstelle Küste der BAW in seinen einzelnen Schritten durchgerechnet worden. Dabei wurde die Wasserbewegung im tideoffenen Seekanal aus der für diesen Ausbauzustand im hydraulischen Modell gemessenen Wasserstandsbewegung und dem in seinen Abmessungen bekannten Flutraum des Seekanals berechnet (Kubisierung). Als Ergebnis wurde sowohl die gesamte den Flutraum füllende Wassermenge ermittelt wie auch für jeden Querschnitt entlang der Längsachse für jeden Zeitpunkt des Einström- und Ausströmvorgangs die sekundliche Durchflußmenge. Danach ließ sich unter gewissen vereinfachenden Annahmen berechnen, an welchem Ort sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ein gewisser Wasserkörper befindet, wie lange er sich schon im Seekanal aufhält und wohin er nach einer vorgegebenen Zeitspanne weitergewandert ist.

Mit den vorgenannten Gegebenheiten ist es möglich, den Sedimentationszustand jedes einzelnen in den Seekanal eintretenden Wasserkörpers im Verlauf der Tide anzugeben. Der Feststoffgehalt beim Einlaufen in den Seekanal wurde aus Feststoffmessungen im Emdener Fahrwasser bestimmt (S. 180 ff). Diese Messungen zeigten eine für die vorliegenden Zwecke hinreichende Zuordnung der Feststoffkonzentration zum Tidemittel der Stromgeschwindigkeit. Über diese Bezugsgröße wurde die im vorliegenden Fall anzunehmende Feststoffverteilung über die Wassertiefe nach Konzentration und Kornzusammensetzung aus den Naturmessungen ermittelt. (S. 205).

Unter Ansatz der für Mineralkorn bekannten Sinkgeschwindigkeit wurde danach errechnet, an welchem Ort aus dem jeweilig betrachteten Wasserkörper sedimentiert wird. Die Berechnung lieferte so für den tideoffenen Seekanal die Längsverteilung des Sediments nach Menge und Korngrößenzusammensetzung.

Da in der Natur die Sinkgeschwindigkeit der zu größeren Einheiten (Flocken) zusammengeschlossenen Feinkornanteile der Suspensio-

größer ist, als vorstehend angenommen wurde, müssen die errechneten Ergebniswerte um schätzungsweise 10 % vergrößert werden (S. 205).

Von der wie vorstehend berechneten Primärsedimentation wurde rechnerisch jene Feststoffmenge abgesetzt, welche durch die der Sedimentation folgende Ebbe wieder erodiert und aus dem Seekanal heraustransportiert wird. Die Größe dieses Ebbtransports wurde als dritte Potenz der Sohlengeschwindigkeit nach den Messungen im hydraulischen Modell bestimmt und im Verhältnis zur Größe des rechnerischen Fluttransports von der Primärsedimentation abgezogen. Über die Verteilung des Sediments durch sekundäre Transportvorgänge auf die inneren Abschnitte des Seekanals und die Hafenbecken wurden den Verhältnissen entsprechend Annahmen getroffen (S. 209).

Erhöhungen der Feststoffkonzentrationen nach Oberwasseranschwellungen waren bei der Mittelbildung für den Feststoffgehalt im Flutwasser außer Berechnung geblieben. Sie müssen nachträglich als Zuschlag von rd. 17 % den genannten Baggerungen zugerechnet werden (S. 234).

Ein Schlammfließen und seine graduellen Unterstufen als Folge einer Oberwasseranschwellung erbringen für den Jahresdurchschnitt keinen zusätzlichen Anfall an Feststoffen. Es wird vielmehr die Gesamtmenge der vom Oberwasser während der vorhergehenden Trockenperiode herangeführten und in der oberen Ems zurückgehaltenen Feststoffe stoßartig seewärts in Bewegung gesetzt. Zu diesen Mengen treten die gegebenenfalls mit der aufwärtsrückenden Brackwasserzone mitgeführten Feststoffe. Beide Anteile sind aber während der mehr oder weniger langdauernden meteorologischen Vorphase zum Schlammfließen dem Sedimenthaushalt des mittleren oder unteren Emsmündungsgebietes vorenthalten worden. Sie wären bei einem denkbaren Jahresgang mit kontinuierlich "mittlerem Oberwasserabfluß" ohne eine merkbare zeitliche Häufung innerhalb der Gesamtsedimentmenge der Baggerstrecke zusätzlich angefallen.

Für den Feststoffabgang bei starker Oberwasseranschwellung ist wegen seiner besonderen Konsistenz (S.96) der endgültige Verbleib nicht verlässlich vorauszusagen. Die Transportweite hängt ab von der Stärke und Verteilung des Oberwasserabflusses. Durch seine Fließeigenschaft wie eine schwere Flüssigkeit werden der Weg des Fließschlammes und der Ort der endgültigen Ablagerung jedoch durch die jeweils größte Tiefe im Querschnitt bestimmt.

Als Ablagerungsorte kommen besonders die durch Baggerungen über das natürliche Maß vertieften Fahrwasser- und Hafenbereiche infrage. Jedoch wird bei einer Rinnenverzweigung oder bei Hafenbecken mit belangreich unterschiedlicher Sohlentiefe immer nur der tiefere Teil den Schlammfluß aufzunehmen haben.

Bei einer Vertiefung des Fahrwassers und des tideoffenen Seekanals wird die gleiche Tidewassermenge durch einen infolge der Vertiefung vergrößerten Querschnitt strömen. Die Ebbe, welche bereits nahe an der Grenze dessen lag, was einen Feststofftransport ermöglicht, verliert dann gegenüber der Flut weiter an Transportvermögen. Ihre Geschwindigkeiten nehmen in dem vergrößerten Querschnitt weiter ab. Daneben trägt die infolge der Vertiefung wirkungsvoller gewordene Dichteströmung mit der Flut zusätzliche Feststoffmengen in den Seekanal hinein (S.217).

Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeit der Größe der Eintreibungen von der Wassertiefe (Dichteströmung) und der Abnahme des Transportvermögens der Ebbe bei weiterer Vertiefung wurden die Beträge der Änderung der Baggermengen für die verschiedenen Ausbaustufen im tideoffenen Seekanal berechnet (S.227).

Die im Gatjebogen und auf der Zufahrt zum tideoffenen Seekanal erforderlichen Unterhaltungsbaggerungen wurden nach den Aussagen des Modells mit beweglichem Sohlenmaterial ermittelt. Im Verhältnis der Eintreibungen im Modell bei der Nachbildung des jetzigen Zustandes mit denen nach erfolgter Umleitung sind die derzeitigen Baggeraufwendungen zur künftig zu erbringenden Größe umgerechnet worden. Die Aufwendungen bei weiterer Vertiefung wurden nach Erfahrungssätzen des WSA Emden geschätzt (S.230).

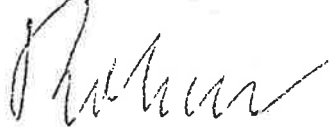
Die Untersuchungen haben ergeben, daß sich auch nach einer Abschleusung des tideoffenen Seekanals die Sedimentationsverhältnisse im beobachteten Gebiet nicht ändern.

Somit ist abschließend festzustellen, daß eine Emsumleitung durch den Dollart sowohl mit als auch ohne Abschleusung große Vorteile für das Emsfahrwasser und die Hafenunterhaltung bringt. Nachteilige Folgen für das Geiserinnen- und Dollartgebiet entstehen dadurch nicht.

Hamburg, 10. Oktober 1977

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Im Auftrage:



Ltd. Baudirektor

Bearbeiter:



Dipl.-Ing.

6. Verzeichnis der zitierten Literatur

- Abraham, G., und  
Burgh, van der, P.,  
1964 "Pneumatic reduction of salt  
intrusion through locks",  
Proceedings ASCE.  
Journal of the Hydraulics Division
- Allen, F.H. und  
Price, W.A.,  
1959 "Density currents and siltation in  
docks and tidal basins",  
The Dock and Harbor Authority,  
Juli 1959
- Arulanandan, K.,  
1975 "Fundamental aspects of erosion of  
cohesive soils", Journal of the  
Hydraulics Division. Vo. 101,  
No. HY 5
- Barr, D.I.H.,  
1963 "Densimetric exchange flow in rect-  
angular channels I", La Houille  
Blanche, Nov. 1963
- Bellessort, B.,  
1973 "Movement of suspended sediments  
in estuaries"  
Techn. Rep. Ser. Unt. Atom Energy 14
- Boos, W.,  
1952-1956 "Modellversuche für das Tidegebiet  
der Ems",  
Unveröffentl. Bericht d. Bundesan-  
stalt für Wasserbau
- Brockmann, Chr.,  
1935 "Diatomeen und Schlick im Jadege-  
biet",  
Abh. Senckenberg. Naturforsch.  
Ges. 430
- Bruun, P., und  
Gerritsen, F.,  
1960 "Stability of Coastal Inlets",  
North-Holland Publishing Company,  
Amsterdam
- Crommelin, R.D.,  
1940 "De herkomst van het zand van de  
Waddenzee",  
Tijdschrift Kon. Ned. Aardr. Gen. 57,

- Crommelin, R.D.,  
1960  
"A contribution to the sedimentary petrology of the Dollart as compared with adjoining areas",  
verh.Kon.Ned.Geo.-Mijnb.Gen.,  
Geol.Ser.D XIX. Das Ems-Estuarium  
(Nordsee), s'Gravenhage
- Dtsch.Gewk.Jb.,  
1975  
"Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Weser- und Emsgebiet",  
Der Niedersächsische Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Hannover
- Dillo, H.G.,  
1960  
"Sandwanderung in Tideflüssen",  
Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, TU Hannover, H. 17
- Dronkers, J.J.,  
1952  
"Oversichten van de uitkomsten van getijberekeningen betreffende het Eemsestuarium bij verruimd Doekgat en resp. bij geheel of gedeeltelijk afgesloten Dollard", Juni '52
- Erde, van, L.A.Ae.,  
1950  
"De ondergrond van de landpunt van Reide", Waddensymposium, Stichting voor marine Geologie
- Favejee, S.Ch.,L.,  
1960  
"On the Origin of the mud deposit in the Ems-Estuary" in (van Voorthuysen 1960)
- Franzius-Institut,  
1958  
"Versuche über den Transport von Ems sand als Geschiebe", unveröffentlicht
- Gerritsen, F.,  
1952  
"Historisch hydrographisch onderzoek van het Eemsestuarium", Rijkswaterstaat, unveröffentlicht Juni, 1952
- Gerritsen, F.,  
1956  
"Enige Opmerkingen over de Ontwikkeling van de Dollart",  
Rijkswaterstaat, Directie van de Waterstaat, Centrale Studiedienst, unveröffentl. Nota CSD 55-17, s'Gravenhage



- Giese, E.,  
1971  
"Fahrwasserumbildung in der Unter- und Außenelbe",  
Die Wasserwirtschaft, 61 Jg.H.3
- Hansen, W., und  
Schnoor, E.,  
1952-1955  
"Untersuchungen über die voraussichtlichen Folgen einer Dollartedeichung, Tidewellenrechnung",  
unveröffentl. Bericht des WSA Emden
- Hensen, W.,  
1955  
"Stromregelung, Hafengebäuden, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf",  
Hamburg, Großstadt und Welthafen;  
Deutscher Geographentag 1955
- Hinrich, H.,  
1974  
"Schwebstoffgehalt, Gebietsniederschlag, Abfluß und Schwebstofffracht der Ems bei Rheine und Versen in den Jahren 1965 - 1971",  
Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 18. Jahrg., Heft 4
- Hinrich, H.,  
1975  
"Die Schwebstoffbelastung der Weser und der Vergleich mit Elbe und Ems"  
Dtsch.Gew.Kdl.Mitt., Sonderheft
- Hirsch,  
1938  
"Die Regulierung der unteren Ems an der Knock",  
Die Bautechnik, H. 53/54
- Hustedt, F.,  
1939  
"Die Diatomeenflora des Küstengebietes der Nordsee vom Dollart bis zur Eismündung",  
Abh., Nat.Ver. Bremen 31
- Jirgensons-Starmanis,  
1949  
"Kurzes Lehrbuch der Kolloidchemie",  
Berlin
- Keulegan, G.H.,  
1963  
"siehe in diesem Zusammenhang  
(Barr, 1963)"
- Köppen, R.,  
1950  
"Beitrag zur Schlickbildung in Küstengewässern und Bestimmung der mineralogenen und organogenen Kieselsäurebestandteile des Schlicks"  
unveröffentl. Bericht des WSA Emden

- Kramer, J., und  
Beth, H.,  
1955 "Ein integrierendes Sinkstoff-  
Fanggerät",  
Die Küste, Jg. 4
- Krause, H.R.,  
1954 "Abschließender Bericht über die  
in den Jahren 1951 und 1952 durch-  
geführten Schilluntersuchungen im  
Mündungsgebiet der Ems",  
Norderney, unveröffentlicht
- Krone, R.B.,  
1962 "Flume studies of the transport of  
sediment in estuarial shoaling  
proces-final report",  
Univ. California Hydraulic Eng.Lab.  
and Sanitary Eng.Research Lab.,  
Berkeley, 1962
- Kühl, H. und  
Mann, H.,  
1954 "Über die Hydrochemie der unteren  
Ems",  
Veröffentl. des Instituts für Meeres-  
forschung in Bremerhaven, Bd.III,H.1
- Kühl, H. und  
Mann, H.,  
1968 "Vergleichende Untersuchungen über  
Hydrochemie und Plankton deutscher  
Flußmündungen",  
Helgoländer wiss. Meeresunters.,H.17
- Lane, E.W.,  
1955 "Design of Stable Channels",  
Proceedings, A.S.C.E., Vol. 120
- Lang, A.W.,  
1958 "Gestaltungswandel des Emsmündungs-  
trichters, Untersuchungen zur Ent-  
wicklung der Emsmündung von der  
Mitte des 16. bis zum Beginn des  
20. Jahrhunderts", Schr.der wirt-  
schaftswiss.Ges.z.Studium Nieder-  
sachsens, N.F. 58, Bremen-Horn 1958
- Lucht, F.,  
1953 "Hydrographische Untersuchungen in  
der Brackwasserzone der Elbe",  
Deutsche Hydr.Zeitschrift, Bd. 6,H.1
- Lüttmer, S.H.,  
1952 "Zur Schlickbildung im Mündungsge-  
biet der Ems",  
Kolloidzeitschrift 131

- McCave, I.N.,  
1972 "Mud in the North Sea",  
North Sea Science, Part II
- Meulen, van der, D.H.,  
1972 "De Ontwikkeling van de Dollart  
over de Periode 1952 - 1969/70",  
Rijkswaterstaat, Directie Groningen,  
Studiedienst Delfzijl,  
unveröffentl. Nota Nr. 72.1
- Naturmessungen  
1976 "WSA Emden, Meet-en Adviesdienst  
Delfzijl, BfG Koblenz, Rijksinstituut  
Zuivering van Afvalwater Sappemeer
- Niebuhr, W.,  
1950 "Beobachtungen über Großrücken in  
der unteren Ems", WSA Emden, unver-  
öffentl.
- Niebuhr, W.,  
1952 "Über die neuere Entwicklung der  
Außenems und ihre vermutlichen Ur-  
sachen",  
Die Küste, Jg. 1, H. 1, März 1952
- Niebuhr, W.,  
1955 "Beobachtungen über den Sandtrans-  
port in der unteren Ems",  
Die Küste, Jg. 4
- O'Brien, M.P.,  
1931 "Estuary Tidal Prism Related to  
Entrance Areas", Civil Engineering,  
Vol. I, No. 8
- O'Brien, M.P.,  
1969 "Equilibrium Flow Areas of Inlets  
on Sandy Coasts", J. of the Water-  
ways and Harbors Division, Vol. 95
- Olphen, van, H.,  
1963 "An introduction of clay colloid  
chemistry",  
Interscience Publication, New York,  
1963
- Postma, H.,  
1954 "Hydrography of the Dutch Wadden Sea".  
Thesis Groningen, Arch. Neerland.  
Zoologie, t. X, 4e Livraison
- Postma, H.,  
Kalle, K.  
1955 "Die Entstehung von Trübungszonen  
im Unterlauf der Flüsse, speziell  
im Hinblick auf die Verhältnisse  
der Untereibe"

- Postma, H.,  
1960 "Einige Bemerkungen über den Sinkstofftransport im Ems-Dollart-Gebiet", in (van Voorthuysen 1960)
- Ramacher, H.,  
1952 "Die Ems unterhalb Pogum, Teil A: Die natürliche Entwicklung des Emsmündungsgebietes", WSA Emden, unveröffentl. 1952
- Riddel, J.F.,  
1969 "Diskussionsbeitrag in La Houille Blanche, No.2, S. 177, 1969"
- Rijksuniversiteit Groningen,  
1970 "Analysenresultaten onderzoek Ems-estuarium 4. Juni 1971"
- Schnoor, E.,  
1959 "Leitfaden für das Kubizierungsverfahren", Mitt. der Hann.Vers.Anst.f.Wasserbau Franzius-Institut, H. 16, 1959
- Smet, de, L.A.H., und Wiggers, A.J.  
1960 "Einige Bemerkungen über die Herkunft und die Sedimentationsgeschwindigkeit der Dollartablagerungen", in (van Voorthuysen 1960) Anhang zu (Wiggers, 1960)
- Straaten, van, L.M.J.U. und Kuenen, Ph.H.,  
1957 "Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea", Geol. en Mijnb., 19e Jrg.
- Straaten, van, L.M.J.U. und Kuenen, Ph.H.,  
1958 "Tidal action as a cause of clay accumulation", Journ.Sed.Petrol, Vol. 28
- Straaten, van, L.M.J.U.  
1960 "Transport and composition of sediments. in (van Voorthuysen 1960)
- Stückrath, T.,  
1970 "Über die Durchmischung von Süß- und Salzwasser in den Brackwassergebieten von Tideflüssen", Mitt. d.Franzius-Instituts, H.35, 1970
- Todd, D.K.,  
1972 "The Water Encyclopedia", Water Information Center, Port Washington, N.Y.

- Vetter,  
1977  
"LUFA Oldenburg", unveröffentl.  
Manuskript des Referats auf der  
Vortragstagung in Berlin
- Voorthuysen, van, J.H.,  
1960  
"Das Ems-Estuarium",  
Verh.v.h.Koninkl.Nederl.geolog.  
mijnbk.Genootsh., Geologische  
Serie Deel XIX, s'Gravenhage
- Voorthuysen, van, J.H.,  
1960  
"Die Foriminiferen des Dollart-  
Ems-Estuariums"  
in (van Voorthuysen, 1960)
- Wagner, C.W.,  
1960  
"Ostracoden, Biocoenosen und  
Thanotocoenosen im Ems-Estua-  
rium" (N.O.Niederlande)  
(van Voorthuysen, 1960)
- Werf., van der, A.,  
1960  
"Die Diatomeen des Dollart-Ems-  
Gebiets"  
in (van Voorthuysen, 1960)
- Whitehouse, U.G. und  
Jeffrey, L.M.,  
Debricht, J.D.,  
1960  
"Differential settling tendencies  
of clay minerals in saline wa-  
ters",  
Proc. 7th Natl.Conf.Clays,  
Clay minerals, 1 - 79, 1960
- Wiggers, A.J.,  
1953  
"Voorlopig rapport over de bodem-  
gesteldheid van de Dollart"  
Kampen
- Wiggers, A.J.,  
1960  
"Die Korngrößenverteilung der  
holozänen Sedimente im Dollart-  
Ems-Ästuarium"  
von de Smet, (in van Voorthuysen  
1960)
- Wittmer, H.,  
1958  
"Tideänderung durch Einbauten in  
Tideflüssen",  
Mitt.d.Franzius-Inst., H.13, 1958