

Was die Umschlageinrichtungen an Bord und an Land anbelangt, so ist hier auf die grundsätzlichen Untersuchungen des Ausschusses für Hafenumschlagtechnik der Hafenbautechnischen Gesellschaft hinzuweisen, die in der Zeitschrift »HANSA« Nr. 17/18 vom 28. April 1951 veröffentlicht sind.

Der Ausschuß kam zu dem Ergebnis, daß die in europäischen Häfen zu behandelnden Umschlagaufgaben sich am zweckmäßigsten durch den Einsatz von Uferkranen lösen lassen, und zwar aus den Gründen, die in dem Abschnitt Bremen unter VI. — 1 — 6 bereits aufgeführt sind.

Unterschiede in der Abfertigung von Reisenden in den hamburgischen und den bremischen Häfen sind örtlich bedingt.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, daß Hamburg und die bremischen Häfen, soweit es irgendwie möglich war, bei dem Wiederaufbau ihrer einzelnen Anlagen die neuesten Gesichtspunkte und Erfahrungen beim Umschlag verwertet haben und die einzelnen Glieder ihrer Hafenanlagen auf den erheblich gestiegenen Lastkraftwagenverkehr und die übrigen Verkehrsmittel so abstimmten, daß eine möglichst gleiche Leistungsfähigkeit zwischen An- und Abfuhr und Verladung erzielt wurde. Berücksichtigt man die rasante Entwicklung der Verkehrsmittel in den letzten fünfzig Jahren, so muß es das Ziel der Seehäfen bleiben, ihre alten Anlagen soweit wie irgend möglich auf die zukünftigen Anforderungen des Verkehrs abzustellen und neue Hafenanlagen räumlich so großzügig wie möglich zu verplanen.

Es ist und bleibt die Tragik für die Seehäfen, daß, bedingt durch die moderne Entwicklung der Verkehrsmittel, der Flächenverbrauch pro t/Umschlaggut sich wesentlich vergrößert hat und daher in den Häfen ständig steigende Investitionen erforderlich werden.

Abt. II — Mitteilung 3

Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in Seekanäle und in Häfen.

Von Prof. Dr.-Ing. H e n s e n, Techn. Hochschule Hannover.

Inhalt: In der Mischungszone von Fluß- und Meerwasser in den Mündungsgebieten von Tideflüssen überlagern sich Dichte- und Tideströmungen. Mit Meßergebnissen wird der Einfluß dieser verwickelten Strömungsverhältnisse auf die Sandwanderung und die Schwebstoffbewegung untersucht.

Es wird festgestellt, von welchen Einflüssen die Lage der Mischungszone abhängt und wie der Ausbau der Ströme auf die Lage der Mischungszone eingewirkt hat.

Da die theoretischen Überlegungen durch die Ausbaufolgen bestätigt werden, ist es möglich, Strombaumaßnahmen vorzuschlagen, die die Lage der Mischungszone in der beabsichtigten Richtung beeinflussen, z. B. stromab verschieben.

Zusammenfassung: In den Mündungsgebieten von Tideflüssen trifft das Seewasser mit dem leichteren Flußwasser zusammen. In der Mischungszone, dem Brackwassergebiet, entstehen dadurch verwickelte Strömungsverhältnisse, daß sich Dichte- und Tideströmungen überlagern. Im allgemeinen überwiegt im unteren Brackwassergebiet an der Sohle die Flutströmung.

Dadurch wird Seesand in die Flußmündung verfrachtet. Der größte Sinkstoffgehalt tritt in dem Abschnitt der Brackwasserzone auf, wo der Salzgehalt 2 bis 5‰ beträgt.

Die Lage der oberen Brackwassergrenze wird vorwiegend vom Oberwasser des Flusses, von der Flutwassermenge und von der Tidebewegung beeinflusst, und zwar derart, daß sie mit steigendem Oberwasser und mit abnehmender Flutwassermenge und mit niedrigerem Thw stromab rückt. Außerdem liegt die obere Brackwassergrenze bei Thw weiter stromauf als bei Tnw. Die Verschiebung der oberen Brackwassergrenze stromauf wächst mit abnehmendem Oberwasser.

Durch folgende Maßnahmen kann erreicht werden, daß die obere Brackwassergrenze stromab rückt:

Durch Verkleinern des Flutraumes, z.B. durch Abschneiden von Nebenarmen, durch Eindeichen von Flächen, die bei jeder Tide überflutet werden, und durch Abdämmen von Nebenflüssen oberhalb der oberen Brackwassergrenze.

Durch langfristigen Ausgleich des Oberwasserabflusses läßt sich vermeiden, daß die obere Brackwassergrenze gerade in Trockenzeiten außergewöhnlich weit stromauf rückt.

Der Salzgehalt in Zuwässerungskanälen läßt sich dadurch herabsetzen, daß die Zuwässerungszeiten nicht nach der Tide-, sondern nach der Salzgehaltskurve des Außentiefs geregelt werden und daß bei kleinem Oberwasser und hohen Tiden nicht zugewässert wird.

1. Allgemeine Grundlagen.

In den Mündungsgebieten von Tideflüssen spielt das Zusammentreffen des Flußwassers mit dem bei Flutstrom eindringenden Seewasser eine erhebliche Rolle. Diese Erscheinung ist sowohl für den Strömungsverlauf, für die Wanderung des Sandes und die Bewegung der Schwebstoffe, als auch in landwirtschaftlicher und fischereibiologischer Hinsicht von Bedeutung.

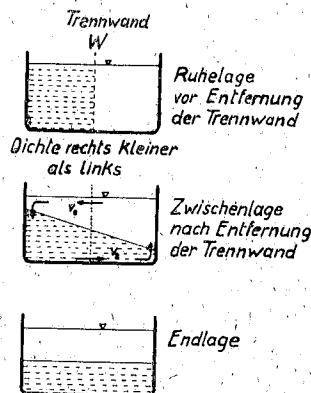


Abb. 1. Ausspiegelung von Flüssigkeiten verschiedener Dichte.

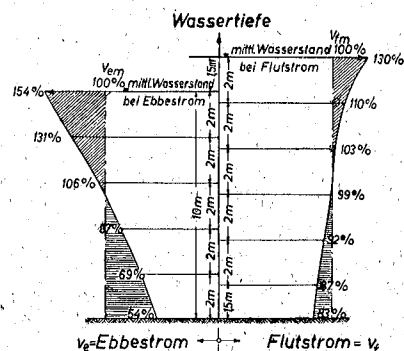


Abb. 2. Verschiedenheit in der senkrechten Verteilung von mittlerer Flut- und Ebbestromung in der Außenelbe.

Grundsätzlich handelt es sich hier um den Vorgang der Mischung zweier verschieden schwerer Flüssigkeiten. Stellt man sich in einem Behälter zwei verschieden schwere Flüssigkeiten vor (Abb. 1), die durch eine senkrechte Wand getrennt sind, dann werden die Flüssigkeiten nach Entfernen der Trennwand das Bestreben zeigen, waagerechte Flächen gleichen Druckes (Niveauflächen) auszubilden, damit das hydrostatische Gleichgewicht hergestellt wird.

Es entstehen entgegengesetzt gerichtete Strömungen an der Oberfläche (v_o) und an der Sohle (v_s). Diese Geschwindigkeiten treten in einer zunächst ruhenden Flüssigkeit verschiedener Dichte auf. In den Tidegebieten jedoch findet dieser Dichteaussgleich in einem Wasserkörper statt, der außerdem der Strömung durch die Tidewellenbewegung unterliegt. Es überlagern sich also Dichte- und Tideströmung. Da das Seewasser schwerer ist als das Flußwasser, wird an der Sohle eine stromauf, an der Oberfläche eine stromab gerichtete Dichteströmung eintreten. Bei Flutstrom wird daher die Oberflächenströmung kleiner und die Sohlenströmung größer sein, als sie unter sonst gleichen Voraussetzungen im einheitlichen Wasser wäre. Bei Ebbestrom wird dagegen die Oberflächenströmung verstärkt, die Sohlenströmung verzögert. Auf Abb. 2 ist die Geschwindigkeitsverteilung in der Elbemündung schematisch dargestellt. Sie ist aus einer größeren Reihe von Strömungsmessungen gemittelt und auf eine Tiefe von 10 m bei mittlerem Wasserstand während des Ebbestroms bezogen.

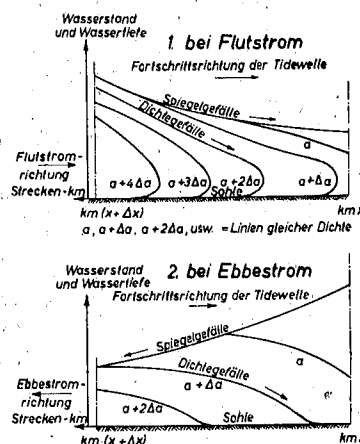


Abb. 3. Schematische Darstellung von Dichte- und Spiegelgefällen bei Flut- und Ebbestrom.

Bei einsetzendem Flutstrom schiebt sich das schwerere Flutwasser keilartig unter das an der Oberfläche noch ablaufende leichtere Ebbwasser der vorigen Tidewelle. Das Dichtegefälle bei Flutstrom ist größer als das Spiegelgefälle (Abb. 3). Die Flutströmung in den tieferen Schichten wird daher außer durch das Energiegefälle (= Spiegelgefälle $\pm$ Beschleunigungs-(Verzögerungs-)gefälle) noch durch das Dichtegefälle beschleunigt. Die Ebbeströmung dagegen wird in der Nähe der Sohle durch das dem Energiegefälle entgegenwirkende Dichtegefälle verzögert, während an der Oberfläche die geschilderten Verhältnisse die Ebbeströmung begünstigen. Das dichtere Wasser strömt im Flutbett flussaufwärts. Gleichzeitig dringt es in die Uferbereiche ein. Es bewegt sich also nicht nur in Richtung der Flutströmung, sondern auch quer dazu. Das bedeutet, daß ein Dichtegefälle nicht nur in der Längsrichtung des Flusses, sondern auch in der Querrichtung vorhanden ist.

Der Einfluß des Dichtegefälles auf die Strömungen muß dort aufhören, wo die Voraussetzungen dafür wegfallen, d. h. wo sich während des Tideverlaufes der Salzgehalt nicht ändert, also oberhalb und unterhalb der dadurch gekennzeichneten Brackwasserzone (Abb. 4). Diese Zone liegt nicht fest, sondern rückt unter dem Einfluß vor allem des Oberwassers und der periodischen und aperiodischen Schwankungen der Tide stromauf und stromab. Als Brackwassergebiet soll der Stromabschnitt, in dem sich die Brackwasserzone bewegt, bezeichnet werden.

Der Zufluß aus dem Flußgebiet oberhalb der Tidegrenze und die Tidebewegung bestimmen entscheidend, ob ein Brackwassergebiet entstehen kann und wo es liegen wird.

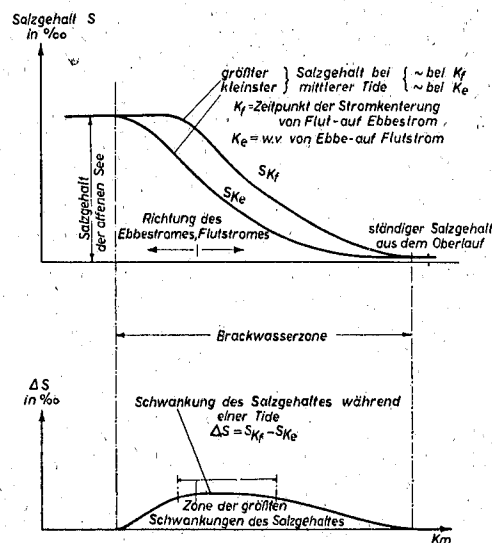


Abb. 4. Schematische Darstellung der periodischen Schwankung des Salzgehaltes in der Brackwasserzone.

In Meeresbuchten ohne Tide und ohne Süßwasserzufluß stellt sich das Wasser ungefähr auf den Salzgehalt des offenen Meeres ein. Es gibt also kein Brackwassergebiet.

In Meeresbuchten ohne Tide, jedoch mit gleichmäßigem Ober-(Süß-)wasserzufluß wird der Salzgehalt sich niemals dem Salzgehalt des Meeres angleichen können. Es wird sich vielmehr eine Gleichgewichtslage einstellen. Ohne einen Oberwasserabfluß würde an der Stromsohle das dichtere Seewasser mit einer bestimmten Geschwindigkeit v_d , die vom jeweils vorhandenen Dichtegefälle abhängt, stromauf rücken. Wenn dagegen ein bestimmter Oberwasserabfluß Q_0 vorhanden ist, der an der Sohle eine stromab gerichtete Geschwindigkeit v_0 hervorbringt, wird dort, wo $v_0 = v_d$ ist, die Gleichgewichtsstelle liegen. An der Sohle dieser Stelle ist dann keine Strömung vorhanden. Das Oberwasser kann nur in den höheren Schichten abströmen. Die Lage der Gleichgewichtsstelle hängt also — bei gleichem Salzgehalt an der Mündung — von der Geschwindigkeit des Oberwassers ab. Die Geschwindigkeit des Oberwassers ist $v_0 = \frac{Q_0}{F}$. Bei unveränderlichem Q_0 wächst v_0 mit abnehmendem F . Damit wird also bei unveränderlichem Oberwasser und gleichem Salzgehalt vor der Mündung

die Gleichgewichtsstelle (und damit die obere Grenze einer Brackwasserzone) stromab rücken, wenn die Querschnitte des Beckens (oder Flusses) eingeschränkt werden, und stromauf, wenn sie vergrößert werden. Es wird hier nur von der oberen Brackwassergrenze gesprochen. Sie ist für die deutschen Nordseeflüsse wichtiger als die untere Brackwassergrenze, die bei allen Flüssen außerhalb der Mündungsgebiete in der Deutschen Bucht liegt und deshalb die Verhältnisse in den Mündungsgebieten kaum beeinflussen kann.

Die Verlagerung der Gleichgewichtsstelle und damit der oberen Brackwassergrenze durch die Tidebewegung kann man für den vorliegenden Zweck genau genug durch die Verlagerung der Gesamtwassermenge bei Flut- oder Ebbestrom, d. h. durch »mittlere Flut- und Ebbebewege« ersetzen. Es handelt sich somit nur noch um die Frage, wie weit ein bestimmtes Massenteilchen bei Flutstrom mit der Tide stromauf zieht.

Setzt man

$$\begin{aligned}
 S_f &= \text{mittlerer Flutweg in m,} \\
 v_f &= \text{mittlere Geschwindigkeit während des Flutstroms in m/s,} \\
 D_f &= \text{Flutstromdauer in s,} \\
 \Delta t_f &= \text{Zeitspanne in s, die der Kenterpunkt } K_f \text{ (Kenterung von Flut- auf Ebbe-} \\
 &\quad \text{strom) braucht, um vom Anfangspunkt bis zum Endpunkt des Flutweges} \\
 &\quad \text{zu laufen,} \\
 T_f &= \text{Flutwassermenge in m}^3/\text{s,} \\
 F_f &= \text{mittlerer Durchflußquerschnitt auf der Strecke } S_f \text{ während der Flutstrom-} \\
 &\quad \text{dauer } D_f \text{ in m}^2, \\
 Q_o &= \text{Oberwassermenge in m}^3/\text{s an der Tidegrenze, so ist} \\
 S_f &= v_f \cdot (D_f + \Delta t_f). \text{ Darin ist} \\
 v_f &= \frac{T_f}{F_f \cdot D_f} - \frac{Q_o}{F_f}. \text{ Daraus ergibt sich} \\
 S_f &= \left(\frac{T_f}{F_f \cdot D_f} - \frac{Q_o}{F_f} \right) \cdot (D_f + \Delta t_f) \text{ und} \\
 S_f &= \frac{T_f - Q_o \cdot D_f}{F_f \cdot D_f} \cdot (D_f + \Delta t_f). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Aus dieser Gleichung sind diejenigen Größen zu entnehmen, die den mittleren Flutweg S_f und damit die Bewegung der oberen Brackwassergrenze beeinflussen. Der Flutweg wird größer, d. h. die obere Grenze der Brackwasserzone rückt stromauf, wenn bei jeweils sonst unveränderten Werten

1. die Flutwassermenge T_f größer,
2. die Oberwassermenge Q_o kleiner,
3. der Durchflußquerschnitt F_f kleiner wird.

Wenn also bei einer Stromregelung im Tidegebiet, ohne daß sich die Flutwassermenge vermehrt, die Durchflußquerschnitte vergrößert werden, dann wird sich bei gleichem, z. B. mittlerem Oberwasser die obere Brackwassergrenze stromab verlegen.

Allgemein ist die Verlegung der oberen Brackwassergrenze durch eine Stromregelung jedoch nicht mit Bestimmtheit vorauszusagen. Das ist nur möglich, wenn man die Wirkung der Baumaßnahmen auf alle in Betracht kommenden Größen vorher rechnerisch oder durch Modellversuche ermittelt hat.

Mit wachsendem F_{fm}/F_{em} kann dann eine Stelle erreicht werden, an der

$$\frac{v_{em}}{v_{fm}} = \frac{F_{fm} \cdot D_f}{F_{em} \cdot D_e} = 1$$

wird. An der Flutstromgrenze ist $v_{fm} = 0$, $\frac{v_{em}}{v_{fm}} \rightarrow \infty$.

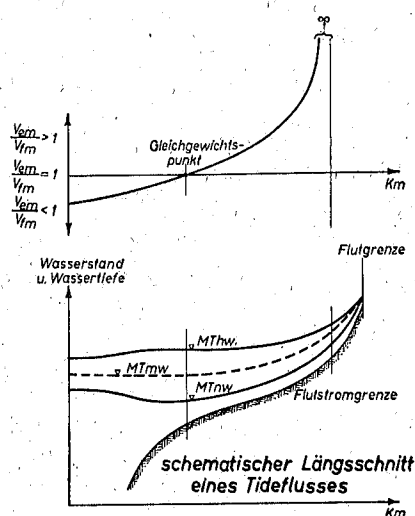


Abb. 6. Verhältnis der mittleren Ebbe- und Flußstromgeschwindigkeiten.

Es ergibt sich somit das in Abb. 6 skizzierte Bild. Die Lage des »Gleichgewichtspunktes« der Strömungen wird jedoch durch verschiedene Einflüsse noch verändert:

1. Mit steigendem Oberwasser eines Tideflusses verschiebt sich der Punkt stromab, mit fallendem Oberwasser stromauf.
2. In Tideflüssen ist wegen der seitlich des Stromes gelegenen Watten, die bei Flutstrom länger überströmt werden als bei Ebbestrom, $B_{fm} > B_{em}$ und damit $B_{fm}/B_{em} < 1$. Der »Gleichgewichtspunkt« wird dadurch stromab verlegt.
3. Die Brackwassererscheinungen, von denen noch gesprochen wird, verschieben den »Gleichgewichtspunkt« für die Geschwindigkeiten an der Sohle stromauf und für die Oberflächengeschwindigkeiten stromab.

Der Aufbau der Watten an der deutschen Nordseeküste, die zunehmende Verlandung des Jadebusens und die rasche Auflandung hinter dem Leitdamm an der unteren Ems deuten darauf hin, daß in Küstennähe der Flutstrom überwiegt (Abb. 7 und 8). Aus einem rd. 15 km langen Elbeabschnitt bei Brunsbüttelkoog sind in den drei aufeinanderfolgenden Jahren 1928 bis 1930 rd. 45 Mio. m³ Sand nach See abgetrieben, in den folgenden Jahren (von 1931 bis 1936) sind dagegen 75 Mio. m³ wieder eingetrieben (Abb. 9). Vom Oberlauf der Elbe stammen diese Mengen nicht, da der Abtrieb von dort im Mittel nur etwa 500 000 m³ jährlich beträgt. Es ist daraus zu erkennen, daß von See her große Umwälzungen in den im Strom befindlichen Sandmassen auftreten, je nach dem Kräfteverhältnis zwischen den einzelnen Einflüssen auf die Sandwanderung.

Der »Gleichgewichtspunkt« ist als ein kritischer Punkt zu bezeichnen, denn oberhalb von ihm überwiegt die stromab und unterhalb die stromauf gerichtete Sandwanderung. Es kann daher an dieser Stelle eine in jeder Hinsicht unerwünschte Sandablagerung eintreten. Natürliche Vorgänge (Oberwasser, Eisgang, jahreszeitlich schwankende Tidehubgröße, wechselnde Dichteverhältnisse durch Temperaturschwankungen und -unterschiede zwischen See- und Flußwasser usw.) verlegen jedoch in teils periodischer, teils aperiodischer Folge den kritischen Punkt und damit das Gebiet der Sandanhäufung. So bilden sich z. B. in der Elbe zwischen Brunsbüttelkoog und der Oste Verflachungen. Wegen ihrer ungünstigen Lage im Fahrwasser mußten sie bis etwa Ende des Krieges fast alljährlich durch Baggerung beseitigt werden. Dann begann sich die 1939 beendete

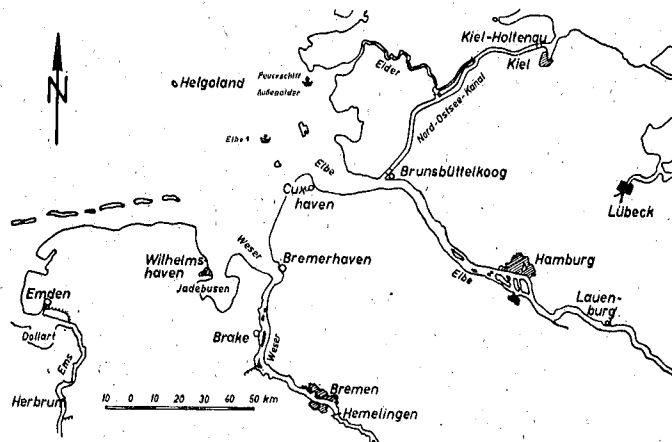


Abb. 7. Deutsche Nordseeküste.

Regelung dieser Strecke so auszuwirken, daß sich die Sandmassen seither außerhalb des Fahrwassers ablageren und Baggerungen nicht mehr erforderlich sind. Ähnliche Verhältnisse liegen in der Weser bei Kleinensiel vor, wo ebenfalls regelmäßig Eintreibungen vorkommen.

Durch keine Maßnahmen läßt sich der kritische Gleichgewichtspunkt als solcher beseitigen, wohl aber kann man versuchen, durch Regulationsmaßnahmen seine Lage in gewissen Grenzen zu verschieben.

Strenggenommen entspricht der Gleichgewichtspunkt der Strömungen nicht dem Gleichgewichtspunkt der Sandwanderung, da die Schleppkraft von der Strömungsgeschwindigkeit nicht linear abhängt, sondern für stationäre Strömungen nach dem Gesetz:

$$S = \alpha \cdot t \cdot J, \text{ woraus mit} \quad (2)$$

$$v = k \cdot R^{0,5} \cdot J^{0,5} \quad (3)$$

$$S = \beta \cdot v^2 \quad (\beta = \alpha/k^2 \text{ und } R \approx t) \text{ folgt.} \quad (4)$$

In einem Tidefluß darf die Gleichung (3) nicht angewendet werden, da wegen der Tidebewegung dauernd Beschleunigungen und Verzögerungen in der Wasserbewegung auftreten, somit keine stationäre Strömung vorhanden ist. Solange noch keine befriedigende Lösung der rechnerischen Behandlung der Strömungen in einem Tidefluß gefunden ist, wird es auch nicht möglich sein, die Gesetzmäßigkeit der Sandwanderung in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit rechnerisch genauer zu erfassen. Man muß und kann sich daher mit der oben getroffenen Gleichsetzung als Näherung vorerst zufrieden geben.

Es wurde bereits erwähnt, daß die Brackwassererscheinungen die Lage des Gleichgewichtspunktes und damit die Sand- und Schwebstoffbewegung beeinflussen. Das ist begründet in der Verschiedenheit der Strömungsverteilung in der Lotrechten bei Flut- und Ebbestrom und in ihrem Einfluß auf die Sandwanderung an der Flußsohle und damit auf die Bettbildung und -erhaltung. Die unterhalb

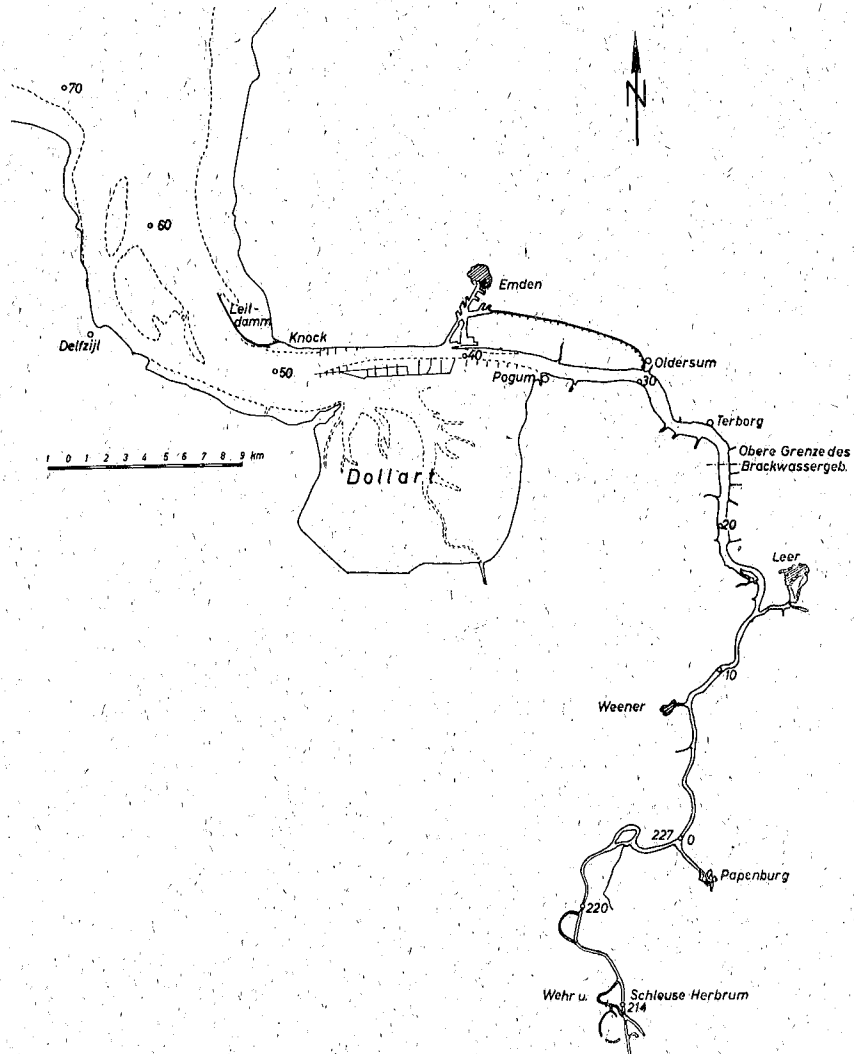


Abb. 8. Tidegebiet der Ems.

des Gleichgewichtspunktes an der Sohle die Ebbestromung übertreffende Flutströmung wird eine stromauf gerichtete Sandwanderung herbeiführen und den Gleichgewichtspunkt für Sohlenströmungen stromauf verschieben. Sandwanderungsmessungen haben diese Folgerungen ebenso bestätigt wie die Form der Sandbänke im Brackwassergebiet. Diese Bänke haben in Richtung des Flutstroms einen flachen Anstieg und einen steilen Abfall am oberen Ende. Sie besitzen eine ähnliche Form wie Dünen, deren Steilhang auch in Lee liegt. Sie stellen Flutstrombänke dar.

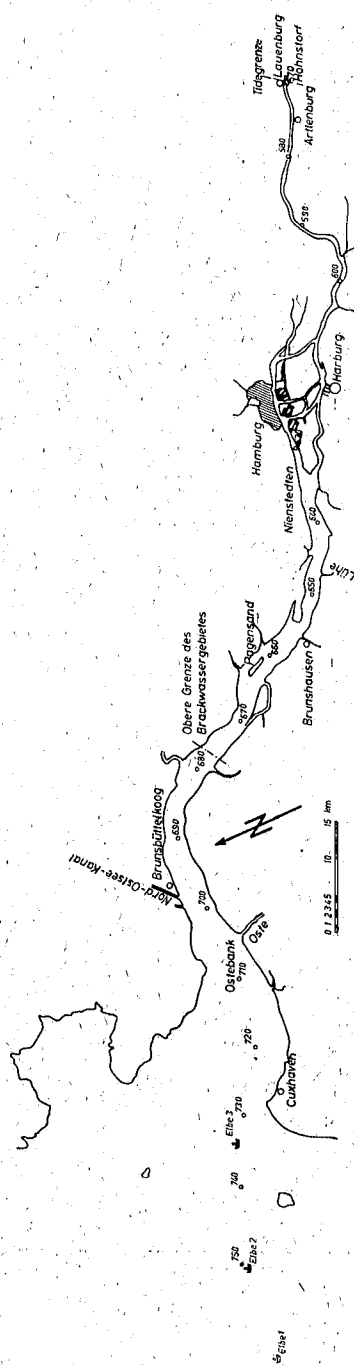


Abb. 9. Tidegebiet der Elbe.

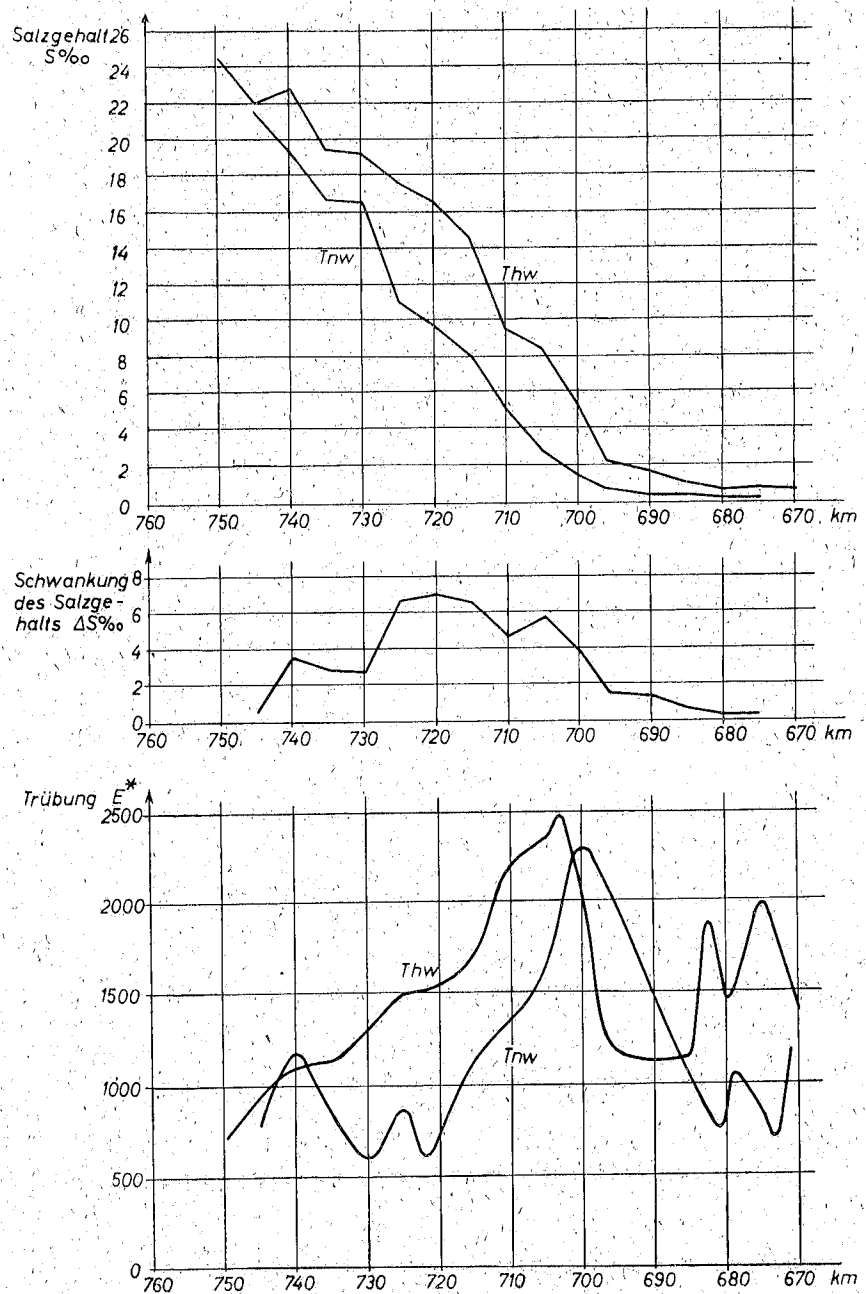


Abb. 10. Salzgehalt und Trübung der Elbe.

Das Dichtegefälle beeinflusst nicht nur die Sandwanderung, sondern auch die Schwebstoffbewegung, da diese u. a. auch vom Salzgehalt abhängt. Um diesen Zusammenhang näher zu untersuchen, fuhren Schnellboote mit einer solchen Geschwindigkeit stromauf, daß sie sich ständig auf der Hochwasserwelle zwischen Thw und K_f befanden. Dabei wurden regelmäßig Wasserproben entnommen. Die

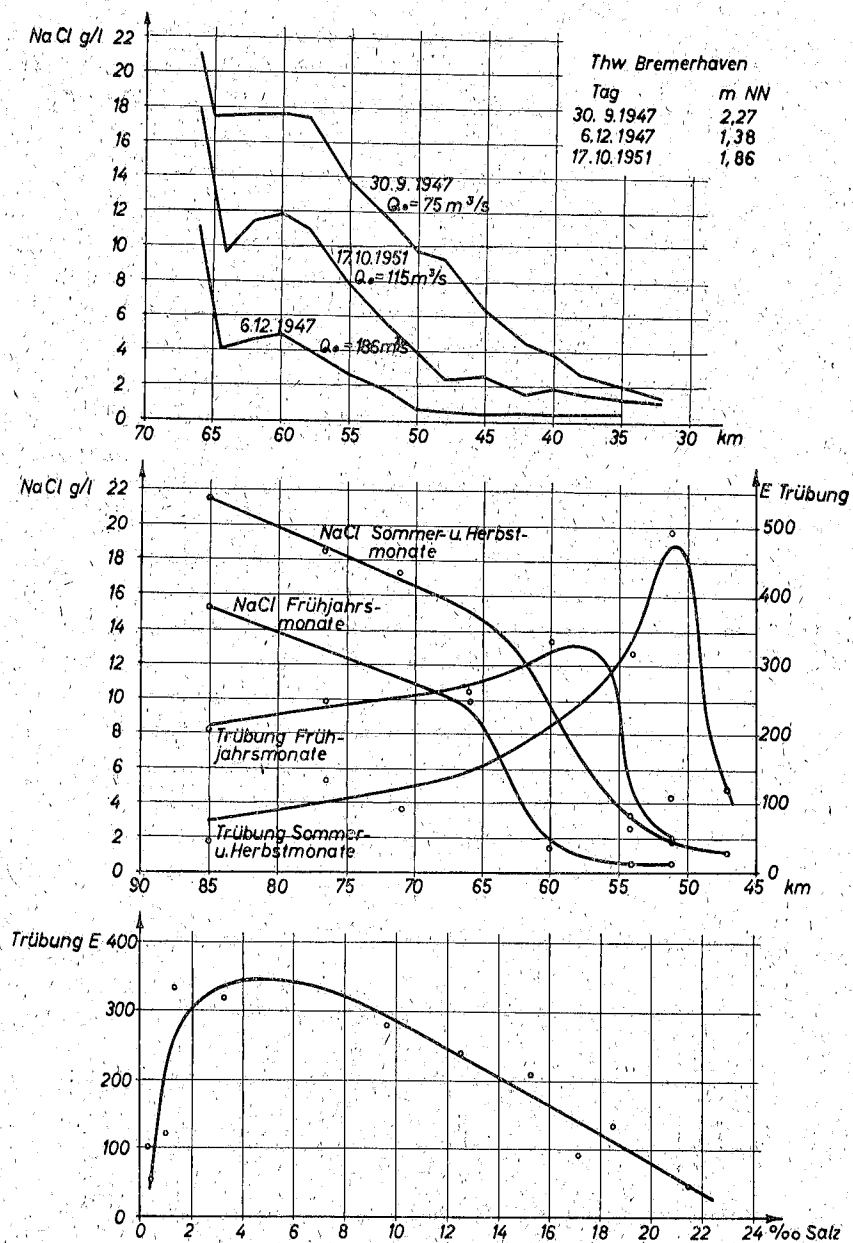


Abb. 11. Salzgehalt und Trübung der Weser.

hierbei festgestellten Salzgehalte entsprechen wegen des Entnahmezeitpunktes etwa den Höchstwerten während der Meßtide (Abb. 10 bis 12). Die Unregelmäßigkeiten in den Kurven sind darauf zurückzuführen, daß die Meßfahrzeuge nicht im Stromstrich, sondern in den Richtfeuerlinien fahren; da im Fluß nicht nur ein Dichtegefälle in der Längsrichtung, sondern auch in der Querrichtung vorhanden ist, haben die Fahrzeuge auch Bereiche geringeren Salzgehalts auf der Fahrt berührt.

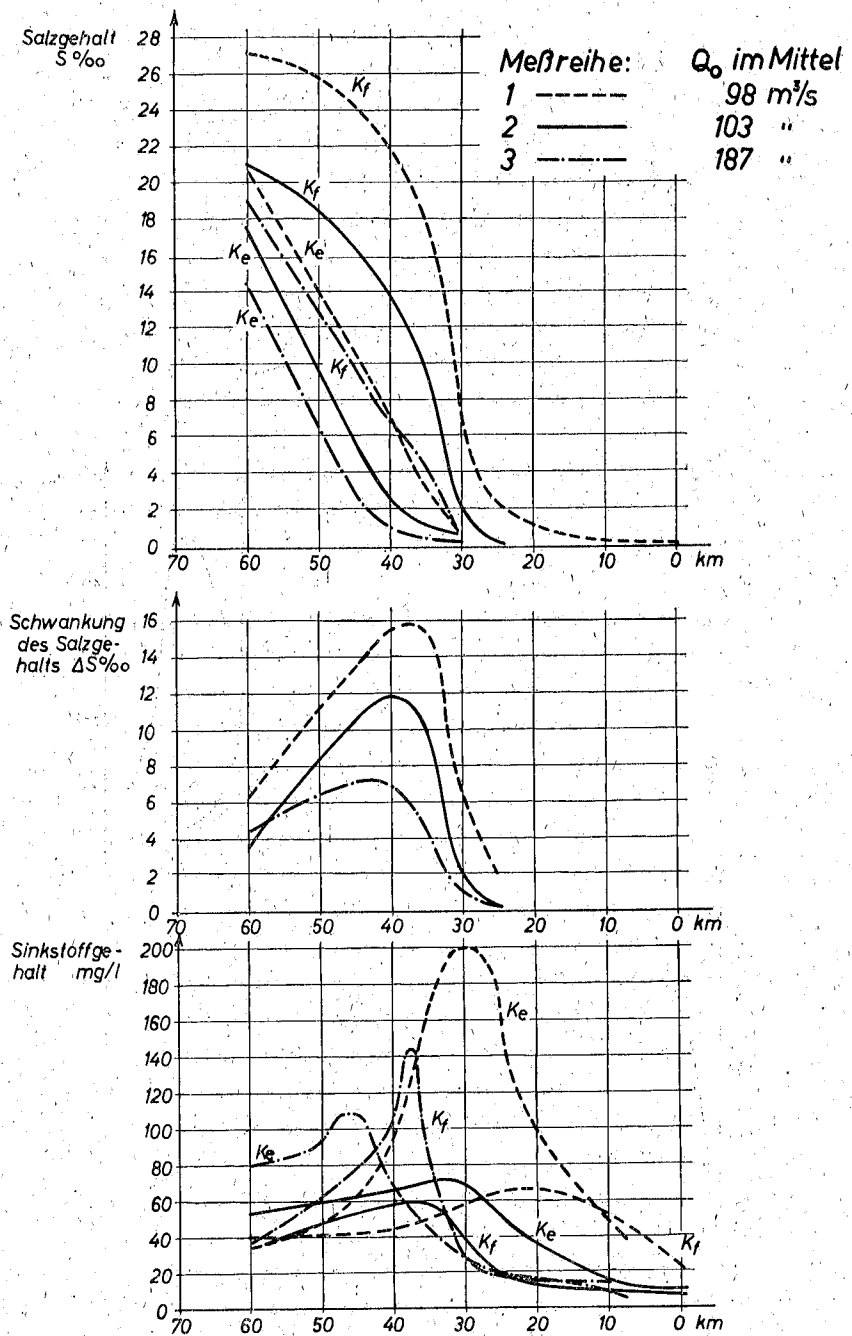


Abb. 12. Salz- und Sinkstoffgehalt der Ems.

In allen drei Flüssen wurde festgestellt, daß bei einem Salzgehalt von etwa 2 bis 5 ‰ der größte Sinkstoffgehalt vorhanden ist. Außerdem zeigen die Messungen in der Ems, daß im allgemeinen bei K_f der Sinkstoffgehalt größer ist als bei K_e ; der

größte Sinkstoffgehalt ist bei K_e zur Zeit des kleinen Oberwassers und bei K_f zur Zeit des großen Oberwassers vorhanden. Diese Angaben zu der wichtigen Frage der Bildung von Ablagerungen im Brackwasser können vorerst noch nicht durch hinreichend gesicherte Untersuchungen in ihren inneren Zusammenhängen erklärt werden.

3. Ergebnisse von Salzgehaltsmessungen aus den Tidegebieten der Elbe, Weser und Ems und aus dem Nord-Ostsee-Kanal.

Will man die Wirkung von Dichteunterschieden untersuchen, so müßte man eigentlich die hauptsächlich von Temperatur und Salzgehalt abhängige Dichte messen. Nähere Beobachtungen ergaben jedoch, daß es genügt, den Einfluß des Salzgehalts, der überwiegend die relativen gleichzeitigen Dichteunterschiede hervorruft, zu bestimmen; deshalb wurden nur Salzgehaltsmessungen ausgeführt.

In der Elbe werden die Wasserproben mit Wasserschöpfern oder mit Bleiflaschen entnommen, die nach dem Wegfrieren durch eine an einem Korkstöpsel befestigte Reißleine geöffnet werden. Als brauchbares und hinreichend genaues Auswertungsverfahren hat sich die Bestimmung des von der Dichte abhängigen Lichtbrechungsindex ergeben. Dazu dient das Zeiß'sche Eintauch-Refraktometer. Die Salzgehaltswerte werden nach internationaler Regel auf eine Temperatur von $17,5^\circ\text{C}$ bezogen. Die Ergebnisse sind mit einer Ungenauigkeit von $\pm 0,1\text{‰}$ Salzgehalt behaftet. Mit dem Refraktometer können im Mittel 150 Proben je Stunde ausgewertet werden.

Der Salzgehalt wird in der Weser seit 1887 nur durch chemische Titration nach Mohr durch Ausfällen von Silberchlorid festgestellt. Die gefundenen Chloridmengen werden in Kochsalz umgerechnet und in g/l angegeben. Um die Messung zu beschleunigen, wird eine empirische, auf 20 cm abgestimmte Lösung und eine automatische Bürette verwendet, die etwa 30 Messungen in der Stunde ermöglicht.

Um Augenblickswerte bei der Entnahme einer Wasserprobe mit einer Flasche mit Stöpsel zu vermeiden, werden an der Ems Wasserflaschen mit Einlauf-Düsen verwendet, die sich in etwa einer halben Stunde füllen. Der Salzgehalt wird durch Titrieren festgestellt. Als Titer wird Silbernitrat und als Farbindikator Kaliumchromat benutzt. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird mit 10 cm^3 Grundsubstanz gearbeitet und der ‰-Gehalt aus den Knudsen'schen Tabellen entnommen. Die Ergebnisse haben einen geringen Fehler, der darauf zurückzuführen ist, daß diese Methode auf die Salzzusammensetzung des Meerwassers geeicht ist, die von der des Brackwassers etwas abweicht.

Die Trübungen werden an der Elbe und Weser mit einem Durchsichtigkeitsmeßgerät bestimmt, in dem sich eine Selenzelle befindet. Die Angaben des Gerätes werden nach einer Eichkurve ausgewertet. Die Eichkurve wird täglich nach Wasserproben ermittelt, deren Trübung zuerst in dem Gerät und deren Feststoffgehalt dann durch Eindampfen der Probe bestimmt wird.

An der Ems werden die Wasserproben eingedampft. Da die Feststoffmengen in einer einzigen Probe zum Analysieren zu klein sind, werden die Feststoffe mehrerer Proben gleicher Tidephasen vor der Analyse zusammengeschüttet.

Die Elbe (Abb. 9) durchfließt bei einer Gesamtlänge von 1112 km von der deutsch-tschechischen Grenze bis Cuxhaven eine Strecke von 725 km Länge, davon sind zur Zeit die letzten 155 km den Gezeiten unterworfen. Beim Eintritt ins Tidegebiet hat die Elbe ein mittleres Oberwasser von $Q_{om} = 600\text{ m}^3/\text{s}$ bei einer mittleren Wassertiefe von rd. 3 m. Von Hamburg (km 620) ab ist die Unterelbe auf

10 m unter MTnw ausgebaut. Bei Cuxhaven beträgt die mittlere Flutwassermenge $Q_m = 27\,500\text{ m}^3/\text{s}$, so daß sich

$$\frac{Q_{fm}}{Q_{om}} = \frac{27500}{600} = 46 \text{ ergibt.}$$

Die W e s e r (Abb. 13) hat vom Zusammenfluß ihrer Quellflüsse Werra (Länge: 276 km) und Fulda (Länge: 180 km) bis zu ihrer Abdämmung bei Bremen eine Länge von 367 km. Die mittlere Oberwassermenge beträgt $Q_{om} = 286\text{ m}^3/\text{s}$. Bei Bremerhaven — 66 km unterhalb von Bremen — besteht ein Verhältnis von

$$\frac{Q_{fm}}{Q_{om}} = \frac{8024}{286} = 28.$$

Die E m s (Abb. 8) ist auf einem großen Teil ihres 345 km langen tidefreien Laufes kanalisiert. Ihr Tidegebiet setzt sich aus dem 52 km langen, am oberen Ende abgedämmten Flußlauf und dem einer Meeresbucht ähnlichen Dollart mit der Außenems zusammen. An der Knock verhält sich

$$\frac{T_m}{Q_{om} \cdot D_m} \cong \frac{Q_{fm}}{Q_{om}} \cong \frac{193}{5} \cdot \frac{10^6}{10^6} = 39.$$

Die oberen Grenzen der Brackwassergebiete der drei Flüsse sind auf Abb. 8, 9 und 13 eingezeichnet. In der Weser liegt die obere Grenze des Brackwassergebiets bei km 36. Bei $Q_o = 400\text{ m}^3/\text{s}$ rückt die obere Grenze der Brackwasserzone bis nach km 58. Da die höchste Oberwassermenge bis $Q_o = 4000\text{ m}^3/\text{s}$ wachsen kann, muß angenommen werden, daß die obere Grenze der Brackwasserzone bis über Bremerhaven (km 66) hinaus stromab rücken kann. Die untere Grenze der Brackwasserzone kann weder in der Elbe noch in der Weser oder Ems angegeben werden, da bisher keine ausreichenden Messungen durchgeführt wurden. Abb. 14 zeigt, daß sie in der Elbe außerhalb von Feuerschiff »Elbe I« liegen wird.

Zwischen den Grenzen des Brackwassergebiets bewegt sich die Brackwasserzone. Zwischen ihrer Lage und der Oberwassermenge besteht ein enger Zusammenhang. Aus den Abb. 10, 11 und 12 ist zu ersehen, daß sie mit wachsendem Oberwasser stromab, mit fallendem Oberwasser stromauf rückt. Um diesen Einfluß näher zu untersuchen, wird seit 1947 in der Elbe bei Cuxhaven eine Viertelstunde vor dem vorausberechneten Thw der Salzgehalt an der Oberfläche gemessen. Die Ergebnisse sind für die Zeit vom 10. April 1947 bis zum 19. Juli 1948 zusammen mit dem zugehörigen Windstau Δh (= eingetretenes Thw_e — vorausberechnetes Thw_v) und dem gleichzeitigen Oberwasser aufgetragen (Abb. 15). Unter der Voraussetzung, daß an den Stellen für $\Delta h = 0$ der Salzgehalt »echt« ist, für $\Delta h > 0$ jedoch ein zu großer und für $\Delta h < 0$ ein zu geringer Salzgehalt gemessen wurde, wurde eine Ausgleichskurve eingezeichnet. Auf Abb. 16 sind für den gleichen Zeitraum die ausgeglichenen Salzgehalte mit den gleichzeitigen Oberwassermengen in Beziehung gesetzt. Der Korrelationskoeffizient ist für die Zeit vom 10. April 1947 bis zum 23. April 1951 zu $r = 0,897$ ermittelt worden. Ihm entspricht die in Abb. 16 eingezeichnete Ausgleichsgerade. Der Korrelation liegen sämtliche Meßergebnisse zugrunde, auch diejenigen, bei denen wegen einer geschlossenen Eisdecke die Pegelstände und die daraus errechneten Abflußmengen nicht den wirklichen Abflußverhältnissen entsprechen. Eine feste Beziehung einer in Abb. 15 erkennbaren Phasenverschiebung zwischen der Salzgehalts- und der Oberwasserkurve wurde noch nicht gewonnen.

Um festzustellen, wie weit der Einfluß des Oberwassers auf den Salzgehalt in die Nordsee hineinreicht, sind auf Abb. 14 ältere Salzgehaltsmessungen von Feuerschiffen und bei Helgoland zusammengestellt worden. Die Wasserproben sind

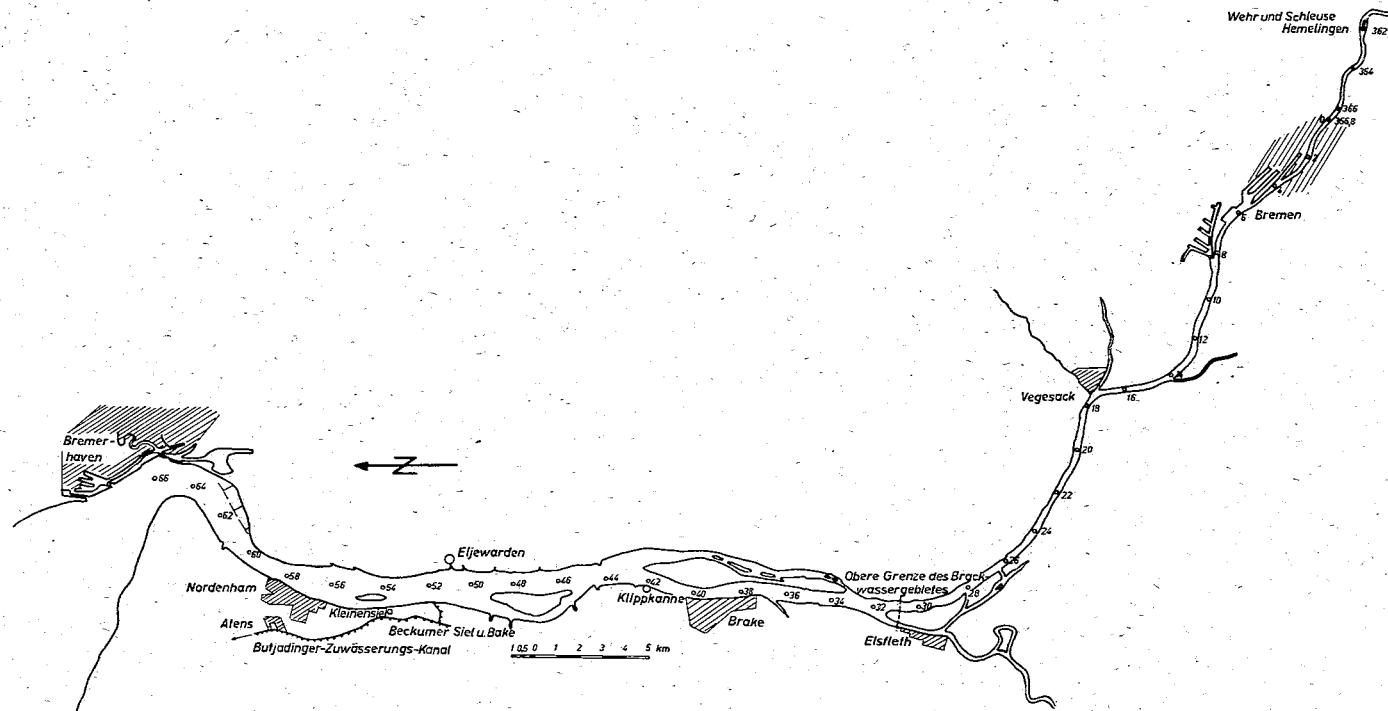


Abb. 13. Tidegebiet der Weser.

alle an der Oberfläche entnommen. Der Einfluß ist beim Feuerschiff »Elbe 4« in dem Monatsmittel noch erkennbar, beim Feuerschiff »Elbe 1« nur noch wenig, bei Helgoland und dem Feuerschiff »Außeneider« nur noch in den Jahresmitteln.

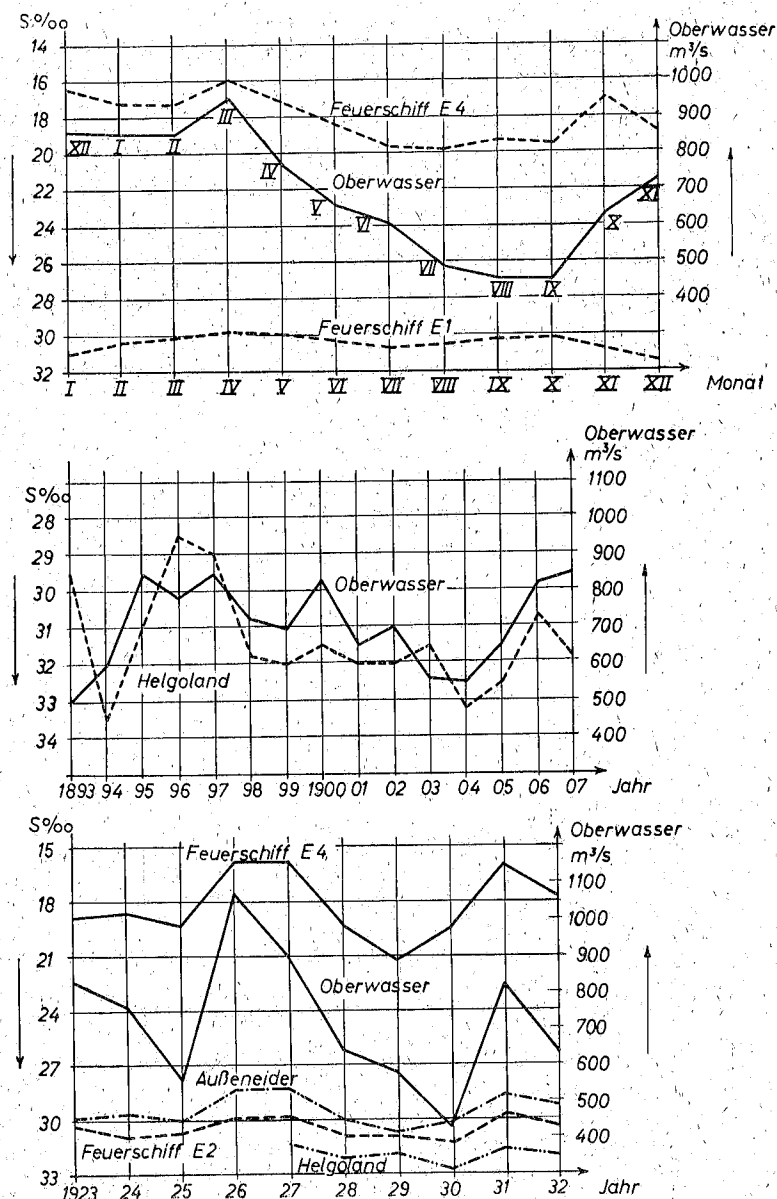


Abb. 14. Monats- und Jahresmittel des Salzgehaltes in der Elbe und in der Deutschen Bucht und des Oberwassers der Elbe bei Darchau km 536.

Die Messungen in der E m s sind für einen Brackwasserkörper ausgewertet, der an seiner oberen Grenze einen Salzgehalt von 1,8‰ und an seiner unteren Grenze von 18‰ hat (Abb. 17). Die Ergebnisse zeigen, daß die Lage der Brack-

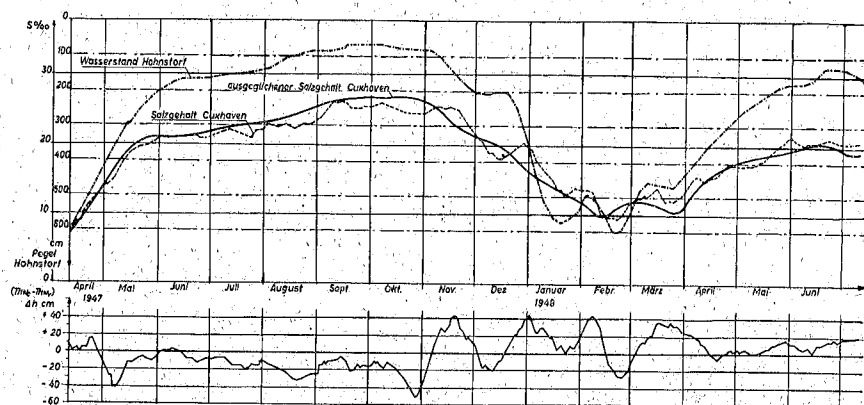


Abb. 15. Zusammenhang zwischen Oberwasser und Salzgehalt der Elbe Ganglinien.

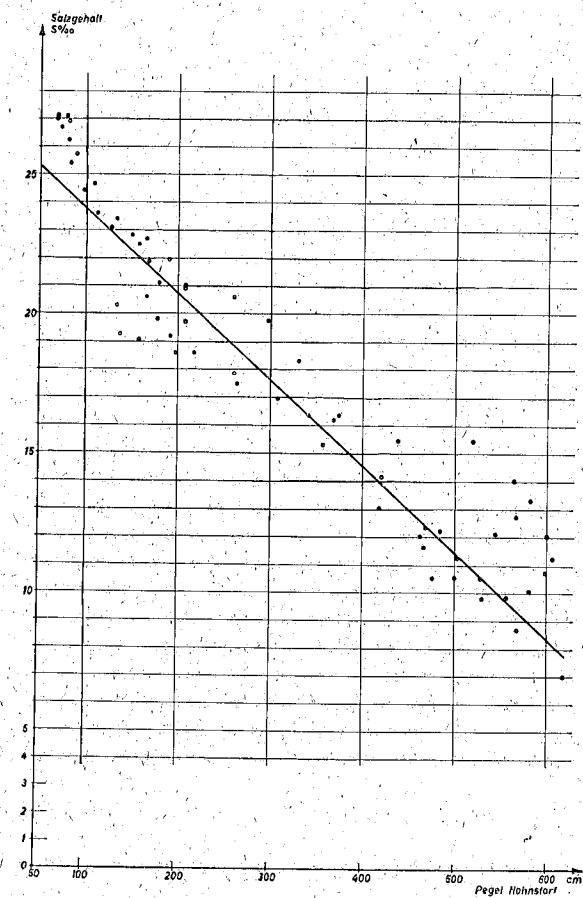


Abb. 16. Zusammenhang zwischen Oberwasser und Salzgehalt der Elbe Korrelation.

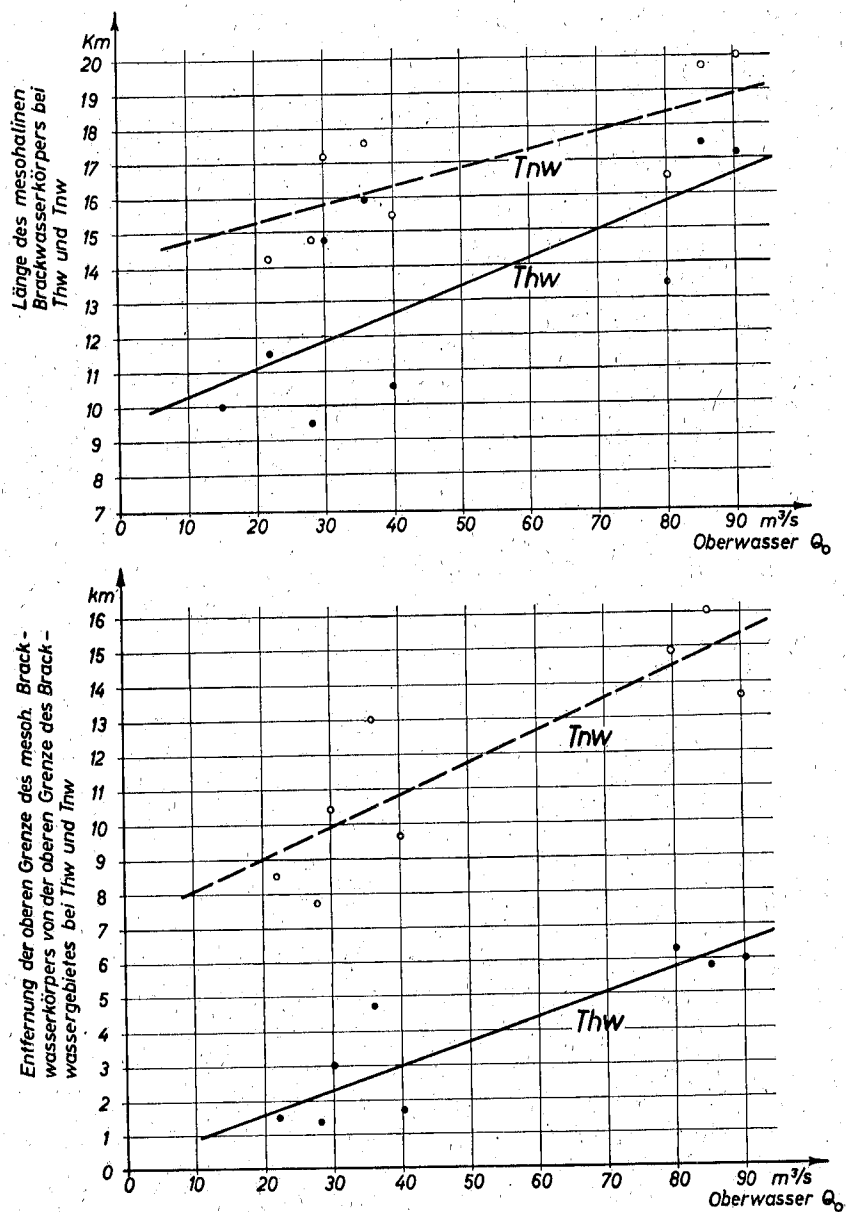


Abb. 17. Bewegung des mesohalinen Brackwasserkörpers in der Ems in Abhängigkeit vom Oberwasser bestimmt aus den Monatsmitteln.

wasserzone nicht nur vom Oberwasser, sondern auch von der Tide abhängt. Bei gleichem Oberwasser liegt die obere Grenze der Brackwasserzone bei Thw weiter stromauf als bei Tnw (Abb. 12 und 17). Außerdem ist der Brackwasserkörper bei Thw kürzer als bei Tnw. Er rückt also stromauf und wird gleichzeitig zusammengedrückt. Messungen in der Weser ergaben, daß mit wachsender Höhe

des Thw der Salzgehalt an einer Meßstelle steigt (Abb. 18 und 19), d. h. die obere Brackwassergrenze stromauf rückt.

Der Einfluß des Windstaus auf den Salzgehalt wird besonders deutlich, wenn der Wind seine Richtung wechselt (Abb. 15). Der Einfluß der periodischen

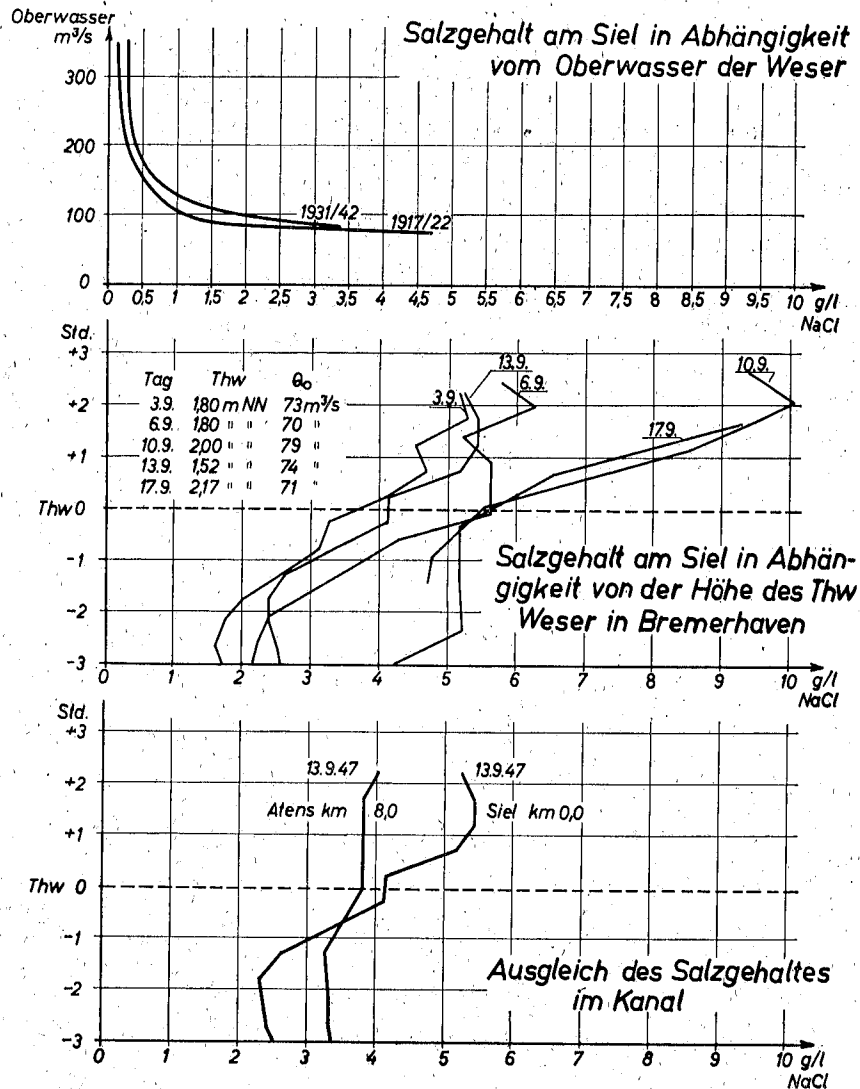


Abb. 18. Butjadinger-Zuwässerungs-Kanal.

Schwankungen des Tidehubs entsprechend der Mondstellung und der jahreszeitlichen Schwankungen des Salzgehalts der Nordsee auf den Salzgehalt des Brackwassergebiets ist nicht zu erkennen. Beide Einflüsse sind zweifellos vorhanden, werden jedoch von den Einflüssen des Oberwassers und des Windstaus zu sehr überlagert.

Es soll hier noch auf eine eigenartige Erscheinung in der Kurve für den Salzgehalt an der Oberfläche während einer Tide hingewiesen werden (Abb. 20).

Der Salzgehalt steigt mit dem Flutstrom und erreicht kurz vor dem Kentern von Flut- auf Ebbestrom seinen höchsten Wert. Dann setzt sofort ein steiler Abfall des Salzgehalts ein. Nach einiger Zeit steigt er wieder leicht an und paßt sich dann dem allgemeinen Abfall entsprechend der Ebbestromung an. Diese »Störung« ist nur in der Salzgehaltskurve der Oberfläche vorhanden. Der Abfall rührt daher, daß die Strömung an der Oberfläche früher kentert als an der Sohle. Da die Ebbestromung an der Oberfläche salzärmeres Wasser von oberstrom heranbringt, fällt die Salzgehaltskurve steil ab. Die gegenüber der Grundströmung schneller anwachsende Oberflächenströmung saugt salzhaltigeres Wasser aus der Tiefe an. Der Salzgehalt an der Oberfläche steigt wieder. Das Aufsteigen des salzhaltigen Wassers von der Sohle zur Oberfläche macht sich in der senkrechten Verteilung der Schwebstoffe bemerkbar. Es zeigt sich an dieser Stelle ein deutliches Maximum des Schwebstoffgehalts, das darauf hinweist, daß Schwebstoff von der Sohle zur Oberfläche emporgerissen wird.

Der Salzgehalt im rd. 100 km langen Nord-Ostsee-Kanal (Abb. 7) ist bei den Schleusen in Kiel-Holtenau am größten und unmittelbar vor der Schleuse in Brunsbüttelkoog am kleinsten (Abb. 21). Er nimmt von Holtenau nach Brunsbüttelkoog ziemlich gleichmäßig ab. Dem Verlauf des Salzgehalts im Nord-Ostsee-Kanal entspricht seine Fauna, die zu etwa 90% aus der Ostsee und nur zu etwa 2% aus der Elbe einwanderte. Der Rest stammt aus in den Kanal einmündenden Zuflüssen.

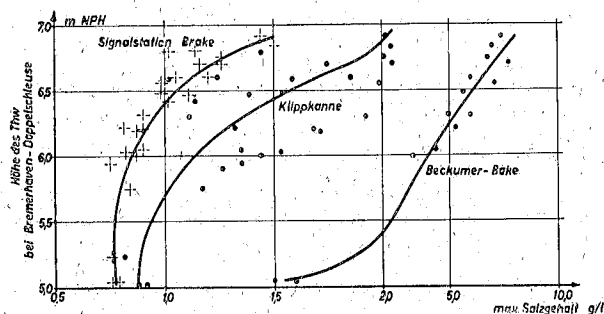


Abb. 19. Salzgehalte in der Weser in Abhängigkeit von der Höhe des Thw.

Die Messung am 18. Mai 1938 fand nach einer mehrwöchigen Trockenperiode statt, während der Messung am 7. Juli 1938 stärkere Regenfälle vorangingen. Im östlichen, durchweg eingeschnittenen Teil des Kanals haben die Niederschläge den Salzgehalt erniedrigt. Der Einfluß der Einmündung der Obereider in den Kanal ist deutlich zu erkennen. Der am 7. Juli 1938 höhere Salzgehalt im vorwiegend im Auftrag liegenden Westabschnitt des Kanals ist auf die verstärkte Längsströmung infolge der stärkeren Zuflüsse im Ostabschnitt zurückzuführen.

4. Einwirkung der bisher ausgeführten Baumaßnahmen auf das Brackwassergebiet.

Die Überlegung, daß die Brackwasserzone mit verringerter Flutwassermenge stromab rückt, wird durch die Folgen der Regelungsarbeiten an der Elbe und Weser bestätigt.

Von 1897 bis 1902 fanden die ersten größeren Baggerungen in der Elbe bei Nienstedten (Abb. 9) statt. Es folgten 1902 bis 1904 Baggerungen bis zur Lüne und 1910 bis 1913 die Regelung des Stromes zwischen Hamburg und Bruns-

hausen, 1925 bis 1936 die Teilregelung bei der Ostebank und 1928 bis 1935 bei dem Pagensand statt. Dadurch hat die Größe der Tidehübe im unteren Stromgebiet ab-, im oberen zugenommen (Abb. 22).

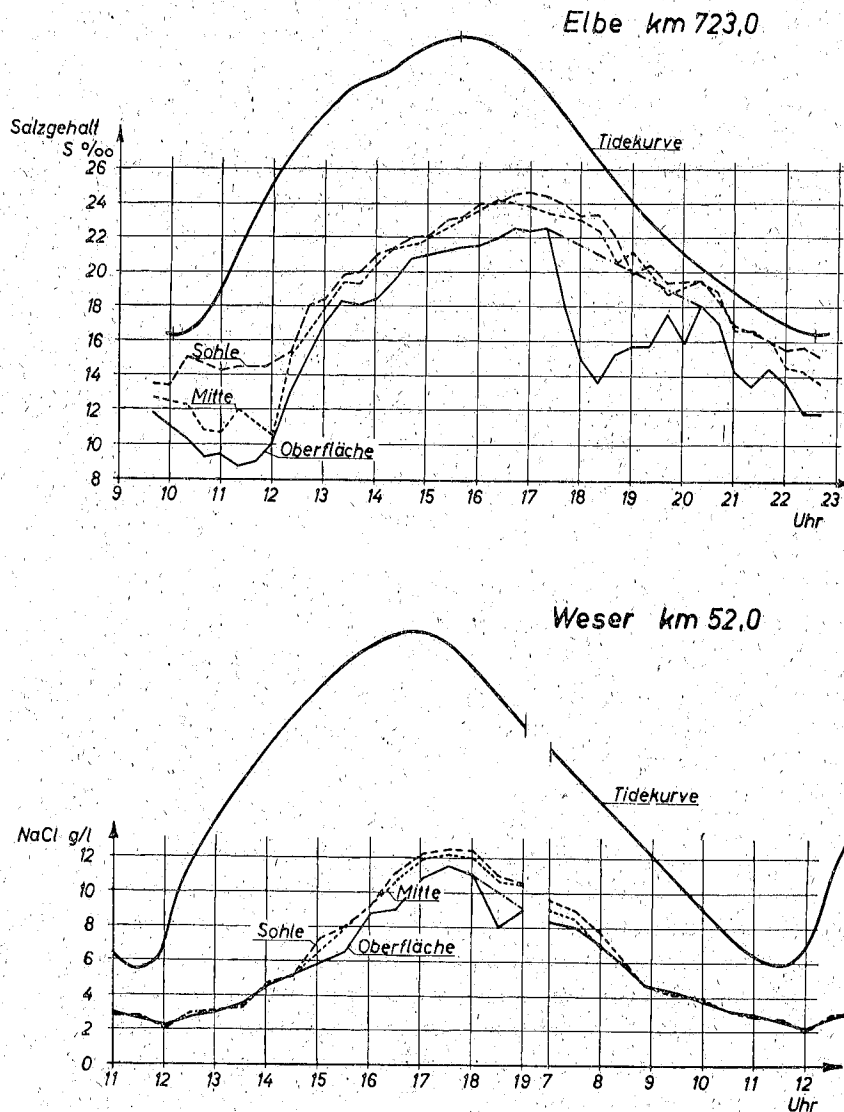


Abb. 20. Verlauf des Salzgehaltes während einer Tide.

Diese Erscheinung ist auf die Reflexion der Tidewelle zurückzuführen. Durch eine vollständige Abdämmung eines Tideflusses wird das Thw gehoben und das Tnw gesenkt (Abb. 23 A). Ein Hindernis im Strom, das dem unbehinderten Auf-
 laufen der Tidewelle entgegensteht, kann einer teilweisen Abdämmung gleich-
 gesetzt werden. Das Hindernis kann bestehen in einer Barre, in einer zu starken
 Krümmung, in einer Strombettverwilderung usw. (Abb. 23 B).

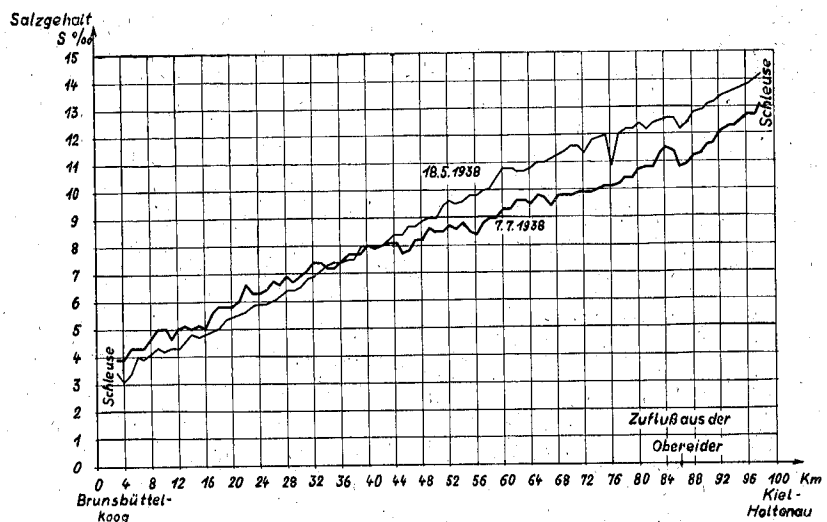


Abb. 21. Salzgehalt im Nord-Ostsee-Kanal.

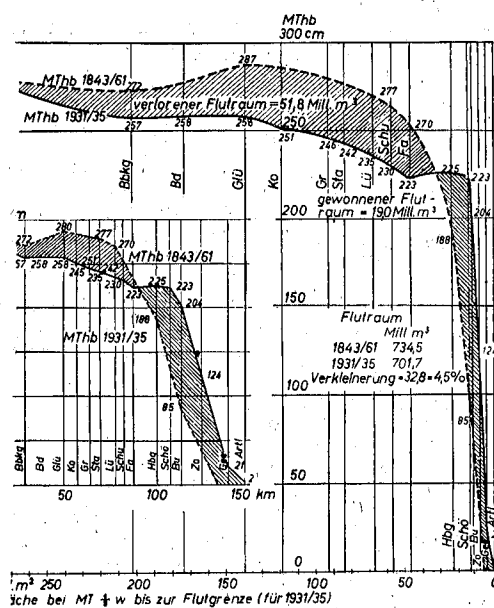


Abb. 22. Änderung des Flutraumes in der Elbe 1843/61 bis 1931/35.

Wird das Hindernis durch eine Regelung beseitigt, so schafft man den umgekehrten Fall einer teilweisen Abdämmung, d. h.

1. unterhalb der Regelungsstrecke wird der Tidehub im allgemeinen durch Senkung des Thw und Hebung des Tnw verringert;
2. oberhalb der Regelungsstrecke wird der Tidehub im allgemeinen durch Hebung des Thw und Senkung des Tnw vergrößert, und
3. die Tidegrenze rückt höher, falls der Tidefluß nicht abgedämmt ist.

Für die Beurteilung der Flutraumänderung ist die über die Oberfläche aufgetragene Darstellung anschaulicher (Abb. 22). Die Flächen zwischen den Verbindungslinien der Tidehübe stellen unmittelbar die Flutraumänderung dar. Die Vergrößerung der Tidehübe im oberen Stromgebiet hat die Verminderung des Flutraumes durch Verkleinerung der Tidehübe im unteren Stromlauf nicht wettgemacht. Insgesamt hat sich der Flutraum der Elbe oberhalb von Cuxhaven um rd. 4,5% verkleinert.

Die Verkleinerung der Tidehübe im Unterlauf der Elbe hat vor allem das Tnw gehoben, ein Umstand, der bei weiterem gleichsinnigen Fortgang für die Entwässerung der Elbemenschen ungünstig werden kann, weil dadurch die Sielzugzeiten verkürzt werden und teilweise bereits verkürzt worden sind.

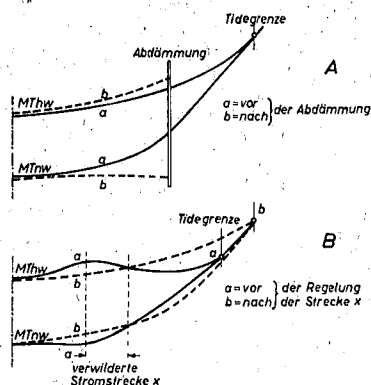


Abb. 23. Änderung des Tidehubes durch Abdämmung und Regelung eines Tideflusses.

Aus der Zeit vor Beginn der Regelungsarbeiten sind keine Messungen über die Lage des Brackwassergebiets in der Elbe bekannt. Diese setzten erst zu Beginn der Regelungen ein. In Abb. 24A sind die Salzgehaltsunterschiede während einer Tide als langfristiges Mittel aus der Zeit zu Beginn und nach dem vorläufigen Abschluß der Strombauarbeiten gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß der größte Salzgehaltsunterschied etwa 10 km stromab gerückt und um 6‰ kleiner geworden ist. An der Alten Liebe in Cuxhaven ist der Salzgehaltsunterschied um 3‰ gefallen. Auch aus einem Vergleich anderer Messungen (Abb. 24B) ergibt sich für Cuxhaven, daß der mittlere Salzgehalt in etwa dem gleichen Zeitraum um 3‰ abnahm.

Die Brackwasserzone hat sich jedoch durch die Verringerung des Flutraumes der Elbe stromab verlagert.

Der W e s e r - A u s b a u ist in folgenden Abschnitten vor sich gegangen:

Jahr	Ausbau für Schiffe mit einem Tiefgang von
1887/95	5 m
1906/11	Abdämmung der Weser durch Wehranlage Bremen-Hemelingen
1913/21	7 m
1922/24	7 m
	(erweiterter Ausbau)
1925/33	8 m

Die Abb. 25 zeigt die Entwicklung der Wasserstände und des Tidehubes von 1880 bis 1950. Besonders die Kurven für den Tidehub lassen die Abhängigkeit des Tidehubes von den Ausbauten und ihren Folgen erkennen. Der stufenförmige

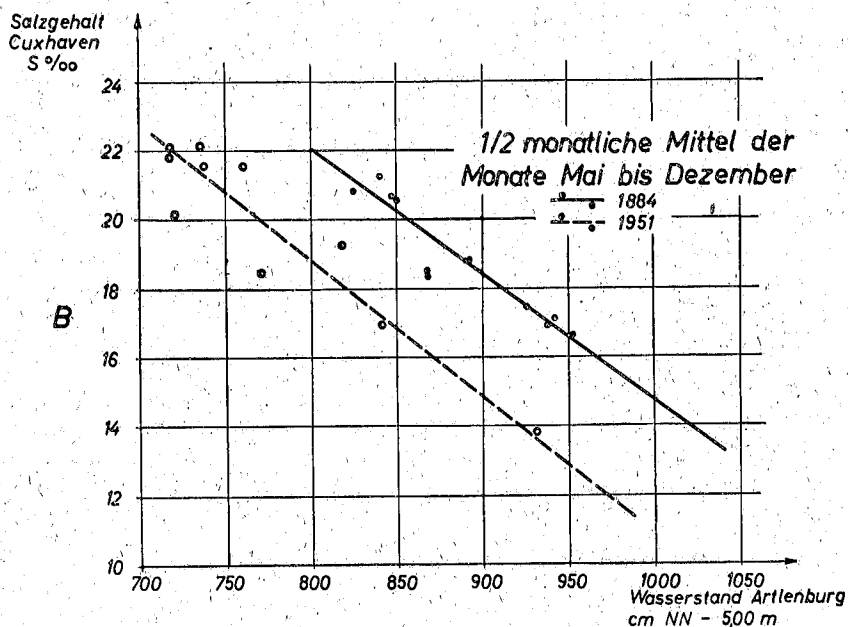
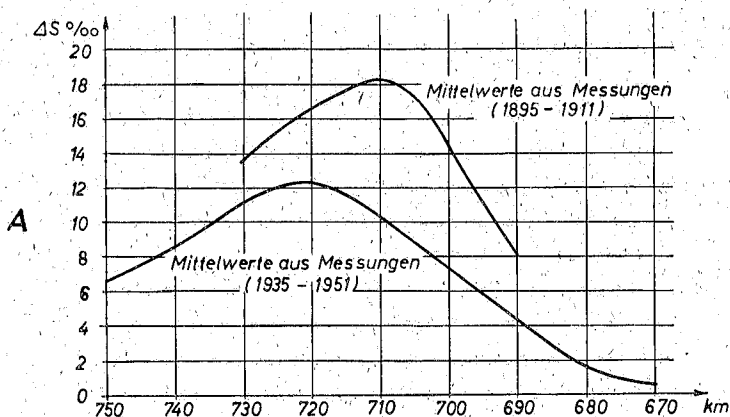


Abb. 24. A. Schwankungen des Salzgehaltes ΔS in der Elbe während einer Tide. B. Zusammenhang zwischen dem Wasserstand in Artlenburg und dem Salzgehalt in Cuxhaven.

Anstieg des Tidehubes ist durch Ausbauabschnitte bedingt. Die Vergrößerung des Tidehubes hätte die Tidewassermenge ansteigen und die Brackwasserzone stromauf rücken lassen müssen. Der Salzgehalt in der Brackwasserzone hätte also steigen müssen. Abb. 26 zeigt jedoch, daß bis 1920 (während des 7-m-Ausbaus)

der Salzgehalt in Bremerhaven, Nordenham und Eljewarden fällt. Erst nach 1920 beginnt er wieder zu steigen. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß

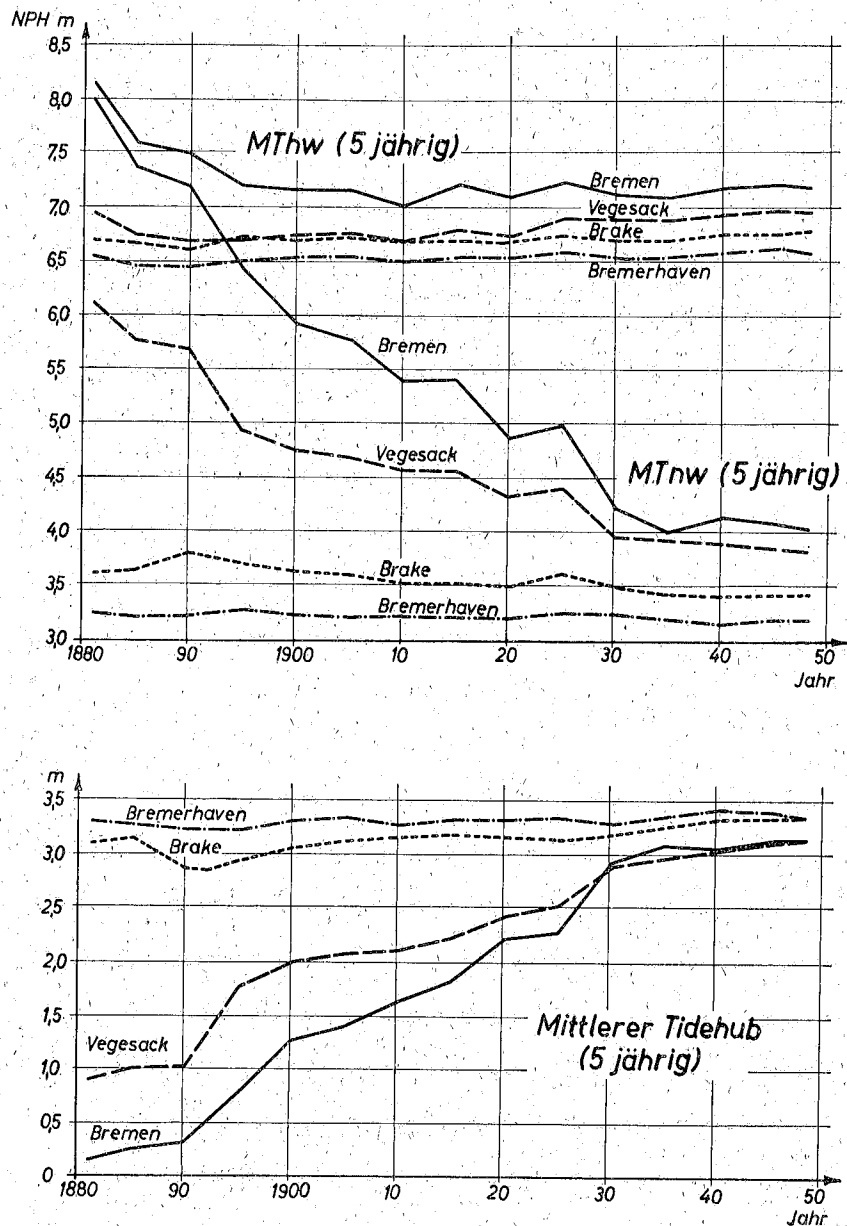


Abb. 25. Entwicklung der Wasserstände und mittleren Tidehübe der Unterweser.

durch die ersten Korrekturen zahlreiche am oberen Ende geschlossene Nebenarme und zwischen Tnw und Thn liegende Flächen verlandeten oder mit Baggergut aufgehöhht wurden. Deswegen nahm die Tidewassermenge entgegen der Erwartung ab und die obere Grenze der Brackwasserzone rückte stromabwärts. Der

Salzgehalt an den Meßstellen nahm ab. Erst nachdem die Altarme und Außen-deichsflächen bis über MThw aufgelandet waren, erhöhte der weitere Ausbau wieder die Tidewassermenge. Dadurch rückte dann auch die obere Brackwassergrenze wieder stromauf.

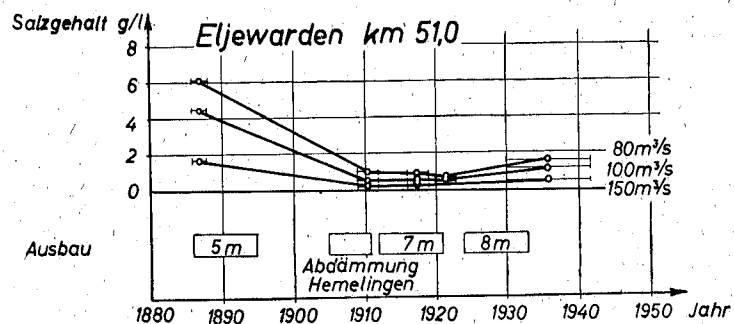
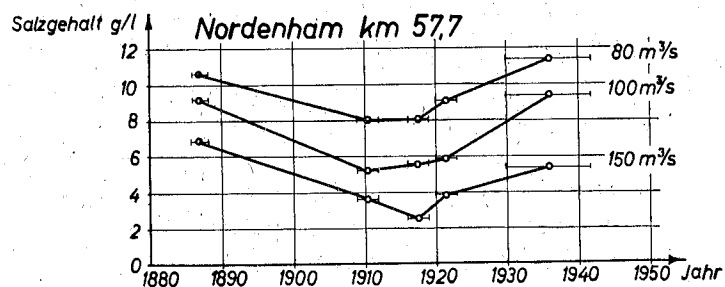
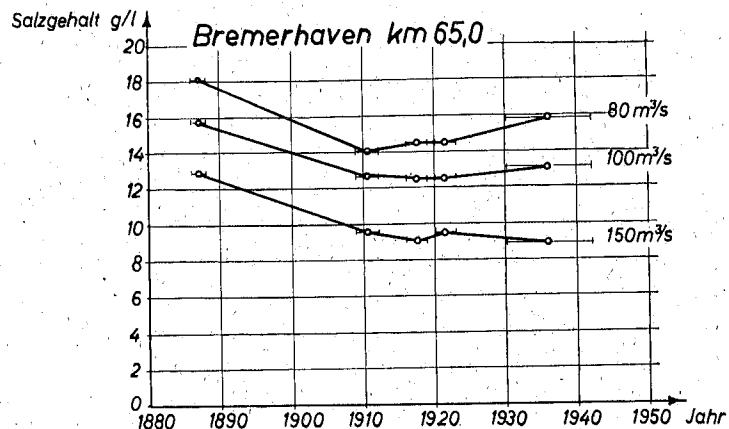


Abb. 26. Veränderung des Salzgehaltes in der Weser seit 1887/88.

5. Der Einfluß auf landwirtschaftlich genutztes Land und auf die Versorgung mit Süßwasser.

Es liegen nur Unterlagen aus dem Wesergebiet vor.

Seit 1888 wurde der Salzgehalt im Boden bestimmter Musterstrecken von Außendeichsländereien festgestellt. Da der Salzgehalt der Oberflächenschichten zu sehr den Zufälligkeiten der Witterung ausgesetzt ist, wurden in Tafel 1 nur die

Tafel 1.

Veränderungen des Bodensalzgehaltes und des landwirtschaftlichen Wertes
von Außendeichsländereien an der Weser von 1888 bis 1936.

Zahl links oben: landwirtschaftlicher Vergleichswert, unbeeinflusstes Vergleichsstück = 100.

Zahl rechts unten: Kochsalzgehalt in g auf 1000 Teile trockenen Boden in 20 bis 60 cm Tiefe.

Unterweser km	1888	1893	1898	1908	1917	1927	1930	1933	1936	Musterstück Nr.
37	130 0,15	130 0,13	85 0,12	— —	— —	95 0,12	140 0,26	110 0,07	105 0,16	M 3 + 2,48 mNN
43,5	165 0,12	140 0,13	100 0,14	— —	— —	135 0,15	170 0,50	110 0,09	— 0,20	M 4 + 2,28 mNN
52	75 0,48	90 0,29	85 0,26	120 0,12	130 0,13	175 0,12	130 0,56	140 0,16	145 0,23	M 9 + 2,38 mNN
57,5	90 1,08	100 1,14	90 0,23	110 0,16	150 0,15	160 0,19	90 0,59	150 0,34	190 0,33	M 17 + 2,18 mNN
61	95 2,03	110 1,43	90 0,56	— —	— —	70 0,50	80 1,46	160 1,22	85 1,09	M 12 + 2,38 mNN
64	85 2,24	110 1,70	65 1,13	105 1,30	90 1,84	120 0,81	110 2,19	140 1,36	— 1,83	M 16 + 2,28 mNN
66	40 7,97	50 8,91	40 3,50	60 2,65	70 3,28	70 1,54	70 3,62	90 1,93	70 1,61	M 22 + 2,48 mNN

Entwicklung für die Schicht in 20 bis 60 cm Tiefe und der landwirtschaftliche Vergleichswert wiedergegeben. Die Tafel zeigt für die Außendeichsländereien von km 52 abwärts nach 1888 abnehmende Salzgehalte. Diese Ländereien sind also dem bis dahin regelmäßigen Einfluß des Seewassers entzogen worden. Es ist anzunehmen, daß die Bodensalzgehalte des Jahres 1930, die durch ihre Unregelmäßigkeit auffallen, durch das Trockenjahr 1929 beeinflusst sind.

Die Bodensalzgehalte in den Außendeichsländereien der Weser haben sich sonst aber wie die Salzgehalte des Flußwassers entwickelt.

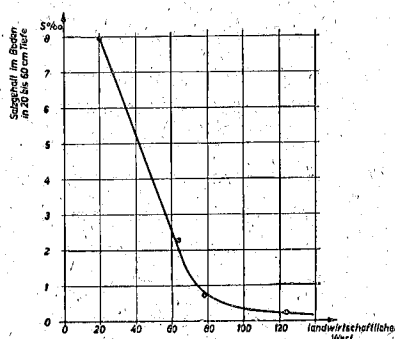


Abb. 27. Beziehungen zwischen landwirtschaftlichem Wert und Salzgehalt des Bodens.

In Abb. 27 sind die aus sämtlichen Meßwerten gebildeten Mittel der Bodensalzgehalte und der landwirtschaftlichen Vergleichswerte zusammengestellt.

Vor Beginn der Ausbauten wurden die Verbreitungsgrenzen der salzfliehenden und salzliebenden Pflanzen bestimmt. Diese Grenzen haben sich wie die Salzgehaltswerte im Boden nach den ersten Ausbauten stromab verschoben. Im Mittel handelte es sich um 5 km. Eine Rückverlagerung wie bei der Brackwasserzone konnte bis 1936 nicht festgestellt werden und ist später nicht untersucht worden.

Beim Entwurf der Unterweser-Korrektion erwartete man, daß die Brackwasserzone stromauf rücken würde. Dadurch wäre möglicherweise die Süßwasserversorgung des Gebietes zwischen Weser und Jadebusen — Butjadingen — gefährdet gewesen. Dort dienen die Siele nicht nur der Entwässerung, sondern auch der Bewässerung. Das in das Marschengebiet eingelassene süße Flußwasser wird nicht nur als Tränkwasser für das Vieh, sondern wurde bis vor kurzem von der Bevölkerung auch als Trinkwasser benutzt. Zur Bewässerung der Ländereien dient das eingelassene Wasser im allgemeinen nicht. Es zeigt sich nämlich immer wieder in Trockenzeiten, daß das Wasser nicht in den am Graben liegenden Boden eindringt. Dies mag an den schweren Böden liegen und auch daran, daß sich in den Gräben aus Sinkstoffen eine nahezu wasserdichte Sohle bildet.

Das Stromaufücken der Brackwasserzone hätte das eingelassene Wasser versalzen. Um die Süßwasserversorgung Butjadingens (rd. 20 000 ha) zu sichern, wurde der Butjadinger Zuwässerungs-Kanal (Abb. 13) gebaut. Damit seine Abmessungen und die Lage der Einmündung in die Weser festgelegt werden konnten, wurden vor der ersten Unterweser-Korrektion Fütterungsversuche mit Binnenlandvieh angestellt. Diese ergaben, daß bei einer Tränkwassermenge je Stück Rindvieh von 30 l/Tag mit einem Salzgehalt von 8,8 g/l und bei einer Versuchsdauer von 38 Tagen keine Schäden zu beobachten waren. Nach diesen Versuchen wurde der höchste zulässige Salzgehalt auf 8 g/l festgelegt. Bei einer

Brackwasseruntersuchung aus dem Trockenjahr 1911 an der Oste (Abb. 9) wurden bei 1,3 ‰ Salzgehalt keine Schäden festgestellt. Für den menschlichen Gebrauch werden im allgemeinen höchstens 2 g/l zugelassen.

Aus der Abb. 11 geht hervor, daß schon geringe Schwankungen der Oberwassermenge die Brackwasserzone in der Weser stark verschieben und damit den Salzgehalt an der oberen Grenze der Brackwasserzone, an der der Butjadinger-Zuwässerungs-Kanal einmündet, stark verändern. Bei kleinen Oberwassermengen ist der Salzgehalt besonders hoch (Abb. 18). In Trockenzeiten, wenn die Weser ein kleines Oberwasser führt und in der Marsch ein großer Wasserbedarf vorhanden ist, erreicht der Salzgehalt am Siel die höchsten Werte. Abb. 18 zeigt, daß auch die Höhe des Thw den Salzgehalt beeinflusst.

Im Zuwässerungs-Kanal gleicht sich der Salzgehalt aus (Abb. 18). Der Salzgehalt schwankt in Atens nur noch wenig, liegt jedoch im ganzen sehr hoch. Ein Salzgehalt zwischen 3 und 4 g/l war für Nordenham, das sein Trinkwasser bis vor kurzem bei Atens aus dem Kanal erhielt, in Trockenzeiten nichts Außergewöhnliches.

6. Maßnahmen gegen das Eindringen von Salzwasser.

Das sicherste, aber auch teuerste Mittel, das Eindringen von Salzwasser in Tideflüsse zu verhindern, ist die Abdämmung. Sie soll hier nicht besprochen werden.

Die Messungen in der Elbe und Weser haben die Überlegungen, die zu der Gleichung $S_f = \frac{T_f - Q_0 \cdot D_f}{F_f \cdot D_f} (D_f + \Delta t_f)$ führten, und die Gleichung selbst bestätigt. Je kleiner der Flutweg S_f ist, desto weiter stromab liegt die obere Brackwassergrenze und desto kleiner ist der Salzgehalt in der Flußmündung.

Die Flutwassermenge T_f läßt sich dadurch verkleinern, daß man einmal den Flutraum, zum anderen den Tidehub verringert.

In der Weser zeigte sich, daß durch folgende Maßnahmen trotz der Vertiefung und Verbreiterung des Fahrwassers der Flutraum kleiner wurde:

Abschneiden und Auflanden von Nebenarmen, Aufhöhen über MThw oder Eindeichen von regelmäßig überfluteten Flächen, Abdämmen von Nebenflüssen und Abschleusen von Hafenbecken.

Die Verkleinerung des Tidehubes im Bremerhavener Stromabschnitt, die durch den Ausbau oberhalb (Abb. 23B) hätte eintreten müssen, wurde überlagert und ausgeglichen durch die Verstärkung des Tidehubes durch Reflexion am Hemelinger Wehr (Abb. 23A).

Diese Verringerung des Tidehubes in einem Stromabschnitt unterhalb einer Regelungsstrecke ist in der Elbe zwischen Cuxhaven und Altona eingetreten, gleichzeitig rückte die Tidegrenze stromauf und der Flutraum oberhalb der Regelungsstrecke wurde größer. Da jedoch in der Elbe die Verkleinerung des Flutraumes die Vergrößerung überwog, wurde die Flutwassermenge der Elbe durch den Ausbau kleiner. Die Brackwasserzone rückte stromab. Es können also auch durch Regelungsmaßnahmen, die oberhalb der Brackwasserzone eine Teilreflexion der Tidewelle beseitigen, die Salzverhältnisse günstig im Sinne der Landwirtschaft beeinflusst werden.

Die Abb. 11 eröffnet eine weitere Möglichkeit, Salzwasserschäden zu vermeiden. Bei $Q_0 = 186 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt die obere Grenze der Brackwasserzone in Höhe vom Beckumer Siel (km 51,5), bei $Q_0 = 75 \text{ m}^3/\text{s}$ noch oberhalb des km 32. Diese

rd. $100 \text{ m}^3/\text{s}$ mehr vermögen also die Brackwasserzone um etwa 20 km stromab zu verschieben. Der Einfluß der Tidehöhe bei diesen Messungen ist nur gering, wie ein Blick auf die in der Darstellung angegebenen Thw und Q₀ bestätigt. Ein dieser Darstellung ähnliches Ergebnis zeigt Abb. 18. Aus ihr ist zu entnehmen, daß der Salzgehalt am Siel bei kleinen Oberwassermengen sehr stark ansteigt. Durch langfristigen Ausgleich der Oberwassermenge könnte man einmal ungewöhnlich hohe Salzgehalte im Bereich zwischen den oberen Grenzen des Brackwassergebietes und der Brackwasserzone vermeiden, zum andern könnte man überhaupt das Brackwassergebiet stromab verschieben.

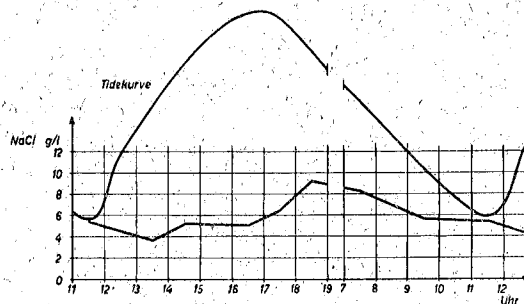


Abb. 28. Salzgehalt während einer Tide am Siel des Butjadinger-Zuwässerungs-Kanal.

Aber auch ohne große Baumaßnahmen, wie Regelung und Bau von Talsperren, lassen sich nachteilige Folgen des Salzwassers, wenigstens zu einem Teil vermeiden. Aus Abb. 28 ist zu entnehmen, daß die Salzgehaltskurve sich wesentlich von der Tidekurve am Siel unterscheidet. Während der Flut bleibt der Salzgehalt fast unverändert; erst nach Thw steigt er steil an und erreicht etwa 2 Stunden nach Thw seinen höchsten Wert. Es ist also zu empfehlen, nicht nach dem Verlauf der Tidekurve, sondern nach dem Verlauf der Salzgehaltskurve zuzuwässern, nach Abb. 28 etwa von Tnw bis Thw. An einem Zuwässerungssiel im Brackwassergebiet ist deshalb ein Salzgehaltsschreiber mindestens ebenso wichtig wie ein Pegel. Außerdem sollte nicht bei hohen Tiden und besonders bei kleinen Oberwassermengen zugewässert werden, da dann die Salzgehalte sehr groß sind. Es ist anzunehmen, daß Oberwasserschwankungen am Pegel Intschede (38 km oberhalb vom Wehr Hemelingen) sich nach 50 bis 60 Stunden am Siel im Salzgehalt auswirken.