

Langzeitige Änderung des Salzgehaltes in der Unterweser

Iris Grabemann, Gunther Krause und Gerold Siedler

UDC 551.465.435; Helgoland Bight, Marsden Square 21638

Zusammenfassung

Anhand hundertjähriger Meßreihen wurden langfristige Salzgehaltsänderungen in der Unterweser und ihre möglichen Ursachen untersucht. Dabei wurde angestrebt, die natürlichen und die anthropogenen Einflüsse auf den Salzgehalt zu trennen. Trotz des unvollständigen Datensatzes konnten der Einfluß des Einzugsgebietes und Salzgehaltsschwankungen des angrenzenden Meeresgebietes nahezu eliminiert werden. Wegen der langzeitigen Änderungen der Gezeiten in der Nordsee waren genaue Aussagen über die Auswirkung der in den letzten hundert Jahren in der Unterweser durchgeführten Baumaßnahmen auf den Salzgehalt nicht möglich. Unsere Ergebnisse geben Hinweise für moderne Meßnetze zur Bestimmung der Wasserqualität.

Long-time changes of salinity in the lower Weser (Summary)

Ever since construction has altered the estuary of the Weser River to make it more navigable, regular water samples were collected at several stations along the river (Fig. 1). Salinities were determined in order to assess possible changes as a consequence of the engineering activities. For almost 100 years the sampling scheme remained unaltered. Today this unique data set (Fig. 3) is of more than local interest. Whereas drastic changes of tidal phenomena are obvious from tidal gauge measurements (Fig. 2), natural fluctuations of salinity hide respective changes of the salinity distribution.

We have tried to separate the natural from the man-made fluctuation of salinity using two simple models to eliminate known causes of natural fluctuations. Difficulties encountered were the incompleteness of the data set and the absence of data averaged over cross sections. Nevertheless it was possible to eliminate, approximately, the influence of the catchment area and salinity variations of the adjacent sea.

Salinity variations as a consequence of the engineering works depend on the quantity $K=H^2/(\bar{A} \cdot \xi_0)$, where H is the depth of a cross-section with area \bar{A} averaged over the tides, and $2 \xi_0$ is the tidal elevation. Because of long-term changes of the tides in the North Sea, it was not possible to isolate the influence of the engineering works.

Conclusions include consequences for modern sampling strategies to determine trends of water quality.

Variation sur une longue période du taux de salinité du cours inférieur de la Weser (Unterweser) (Résumé)

Des séries de mesures effectuées depuis une centaine d'années ont permis d'examiner les variations sur une longue période du taux de salinité du cours inférieur de la Weser et leurs causes possibles. Cette étude s'est efforcé de distinguer les effets naturels des effets anthropogènes sur le taux de salinité. Malgré les données incomplètes, l'influence du bassin de drainage et des variations de salinité des zones maritimes limitrophes a pratiquement pu être éliminée. En raison des modifications du régime des marées en Mer du Nord sur une longue période, il n'a pas été possible de formuler des commentaires précis quant à l'impact sur la salinité des travaux de construction entrepris ces 100 dernières années du cours inférieur de la Weser. Les résultats de nos études fournissent des indications utiles pour la mise en place de réseaux modernes de mesure destinés à déterminer la qualité de l'eau.

Liste der Symbole

- \bar{A} Querschnitt des Ästuars bis zum Mittelwasser
 B dimensionslose Konstante im Austauschkoeffizienten
 D Austauschkoeffizient, $D = B \cdot 2\eta_0 \cdot U_0$
 F Flushing-Zahl, $F = \frac{1}{2 \cdot B \cdot \omega \cdot L} \cdot K \cdot R$ mit $K = H^2 / (\bar{A} \cdot \zeta_0^2)$
 H Tiefe des Querschnittes \bar{A}
 L Länge des Ästuars
 M Gesamtwassermenge in einem Querschnittsvolumen mit Einheitslänge im Ästuar, $M = m_m + m_o$
 m_m Meerwassermenge in einem Querschnittsvolumen mit Einheitslänge im Ästuar
 m_o Oberwassermenge in einem Querschnittsvolumen mit Einheitslänge im Ästuar
 R Festlandabfluß
 S Salzgehalt an einer Schöpfstelle
 S_o Salzgehalt des Oberwassers
 S_s Salzgehalt des Meerwassers
 S_m Salzgehalt an einer Schöpfstelle ohne Oberwasseranteil
 \bar{S}_m zeitlich über den Gezeitenzyklus und räumlich über den Querschnitt gemittelter Salzgehalt ohne Oberwasseranteil
 \bar{u} zeitlich über den Gezeitenzyklus und räumlich über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit
 U_0 Amplitude der Gezeitenströmung
 $2\eta_0$ zurückgelegte Entfernung eines Wasserteilchens während einer Tide
 x Ortskoordinate
- Φ_m advektiver Salzfluß, $\Phi_m = R \cdot \bar{S}_m$
 λ normierte Ortskoordinate, $\lambda = x/L$
 ω Frequenz der Gezeitenwelle
 ρ Dichte des Wassers
 $2\zeta_0$ Tidenhub

1 Einleitung

In der Wesermündung ist die Salzgehaltsverteilung, besonders die Lage der Brackwasserzone, von großer praktischer Bedeutung, da zum einen von der Weser Zuwässerkanäle abzweigen, die in Trockenzeiten weite Landstriche mit Wasser versorgen, und zum anderen Gewässergüte und Selbstreinigungskraft des Flusses vom Salzgehalt abhängen.

In den vergangenen hundert Jahren wurde der Unterlauf der Weser durch zahlreiche Baumaßnahmen zum Wohl der Schifffahrt erheblich verändert. Da befürchtet wurde, daß durch die verstärkte Tidebewegung als Folge der Ausbauten das salzreiche Meerwasser und damit die Brackwasserzone weiter stromaufwärts vordringen würde, wurde in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts mit Salzgehaltsmessungen und anderen Beobachtungen an der Unterweser begonnen, die bis heute weitergeführt werden.

Die Unterhaltung eines Meßnetzes und einer einheitlichen Meßstrategie über fast ein Jahrhundert stellt eine bemerkenswerte Leistung dar, die von den Wasser- und Schifffahrtsämtern im Unterweserraum erbracht wurde. Infolge der großen Längen der Meßreihen kommt dem Beobachtungsmaterial heute mehr als regionale Bedeutung zu. Die Analyse langfristiger Änderungen des Salzgehaltes verspricht Beiträge zur Klimaforschung und insbesondere zur Beurteilung schleichender Veränderungen in der Wasserqualität.

In der vorliegenden Arbeit werden die langfristige Entwicklung des Salzgehaltes und die möglichen Ursachen von Veränderungen untersucht. Sie konzentriert sich insbesondere auf Methoden zur Trennung natürlicher und anthropogener Einflüsse. Infolge der erheblichen Umgestaltung des Flußbettes kann die Analyse nur mit Kenntnis der zahlreichen Baumaßnahmen erfolgen.

2 Beobachtungsmaterial und Baumaßnahmen

Die Tideweser unterteilt sich in 2 Abschnitte, die Unterweser (UW) vom Weserwehr bei Hemelingen bis Bremerhaven und die Außenweser (AW), die etwa 60 km lang ist (Abb. 1). Die UW hat ein beidseitig durch Strombauwerke geführtes relativ schmales Flußbett. Die AW ist trichterförmig und besteht aus einem Doppelrinnensystem mit Querverbindungen und dazwischenliegenden Platen. Innerhalb des Bereiches von UW und AW liegt das Weserästuar. Als Weserästuar wird von Racher [1980] der Bereich zwischen Strohauser Plate und dem Seegebiet nördlich und nordwestlich vom Roten Sand angegeben. Lüneburg, Schaumann und Wellershaus [1975] bezeichneten als Wesermündung den Bereich, in dem Einflüsse von Meerwasser und Oberwasser wenigstens zeitweise gleichzeitig vorkommen: Weserwehr bis etwa $54^{\circ} 00' N$, $07^{\circ} 52' E$.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten seit 1887 durchgeführten Baumaßnahmen, und Abb. 2 zeigt Auswirkungen auf den Verlauf der Gezeitenwasserstände an einigen Orten der UW. Besonders eindrucksvoll ist dabei der Anstieg des Tidenhubs bei Bremen von einigen Dezimetern bis auf 4 m, was hauptsächlich durch das Absinken des Niedrigwassers durch die Vertiefungen hervorgerufen wurde.

6 Wochen vor Beginn des ersten Unterweserausbau wurde zum Zweck der Beweissicherung für die Wirkung der Ausbauten auf die Salzgehaltsverteilung mit Messungen an verschiedenen Schöpfstellen in der UW begonnen. Einzelheiten über das Meßnetz und die benutzte Definition des Salzgehaltes sind in Anhang 1 zusammengestellt. Für die Beurteilung der Salzgehaltsmeßreihen ist vor allem wichtig, zu wissen, daß die Proben einmal pro Woche zur Hochwasserzeit in Oberflächennähe nahe dem Ufer gewonnen wurden.

In Abb. 3 sind die Salzgehalte von 3 Beobachtungsstationen in der UW für die letzten 100 Jahre zusammen mit dem Oberwasser und dem Oberflächensalzgehalt in der südlichen Deutschen Bucht aufgetragen. Im Gegensatz zu den offenkundigen Veränderungen der Wasserstände und Strömungen zeigen die Salzgehaltsmeßreihen keinerlei Zusammenhang mit den Ausbaumaßnahmen. Offensichtlich sind natürlich bedingte Fluktuationen des Salzgehaltes sehr viel größer als die Wirkung von einzelnen Baumaßnahmen.

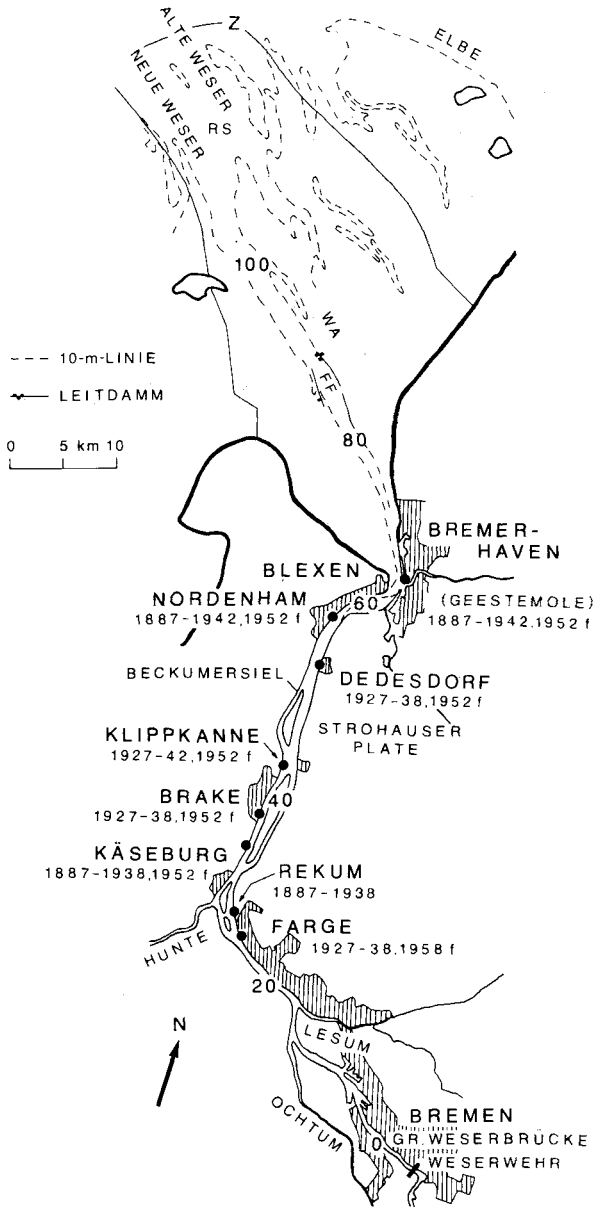


Abb.1. Karte der Wesermündung (nach Lüneburg, Schaumann und Wellershaus [1975]). Die Punkte in der UW zeigen die Lage der Schöpfstellen; die Jahreszahlen unter den Namen weisen auf die jeweilige Gesamtdauer der Salzgehaltsmessungen hin. Die Zahlen im Hauptfahrwasser geben die Unterweser-Kilometer (UW-km) an, die von der Großen Weserbrücke in Bremen bis zur Nordsee zählen

(Z: Begrenzung des Ästuars, RS: Roter Sand, FF: Fedderwarder Fahrwasser, WA: Wurster Arm)

Fig. 1. Map of the Weser Estuary (after Lüneburg, Schaumann and Wellershaus [1975]). The dots within the inner part of the estuary (UW) indicate the positions of the sampling stations. The total duration of salinity measurements is given by the years under the names of the stations. The numbers within the main channel are river-kilometers (UW-km). They are counted from Bremen (Große Weserbrücke) towards the North Sea

(Z: Boder of the estuary, RS, FF and WA denote local names)

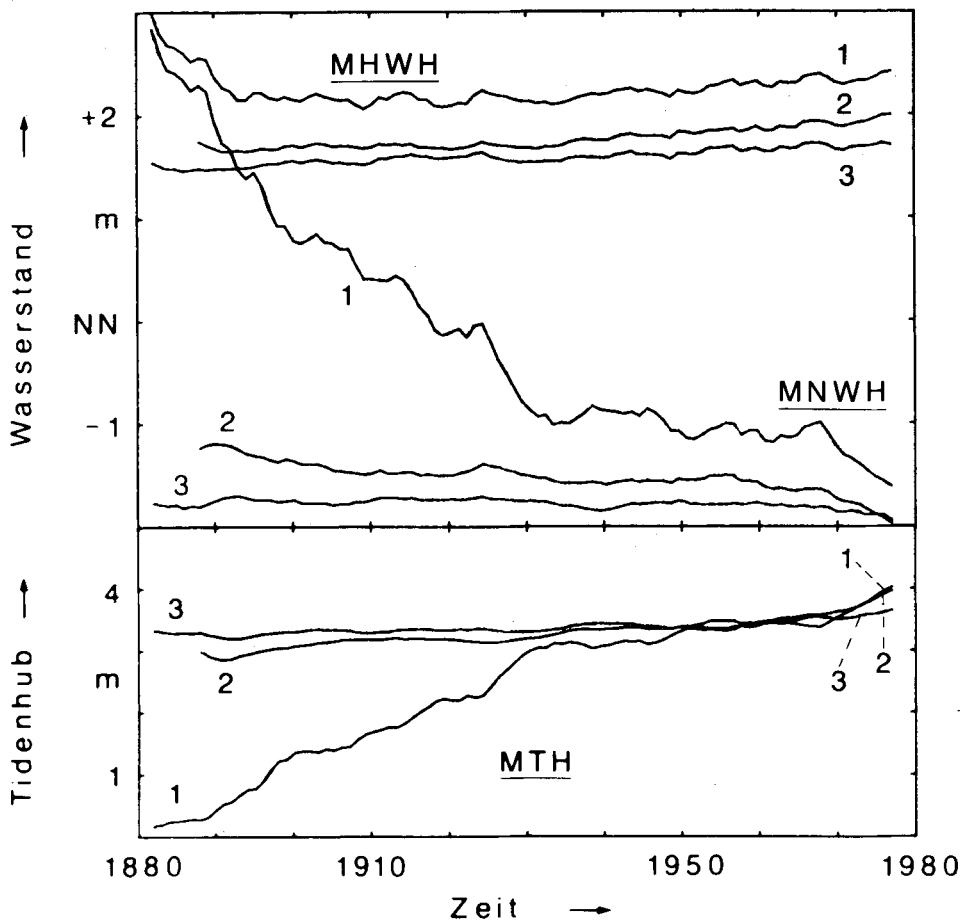


Abb. 2. Übergreifende Fünfjahresmittel der mittleren Hochwasserhöhe (MHW), der mittleren Niedrigwasserhöhe (MNWH) und des mittleren Tidenhubes (MTH) an verschiedenen Pegeln in der Unterweser von 1880 bis 1980 nach Daten des Wasser- und Schiffsamtes Bremen

(1: Bremen, 2: Brake, 3: Bremerhaven)

Fig. 2. Running means over 5 years of mean high water (MHW), mean low water (MNWH) and mean tidal elevation (MTH) measured at various tide gauges in the inner estuary from 1880 to 1980. Data provided by Wasser- und Schiffsamt Bremen

(1: Bremen, 2: Brake, 3: Bremerhaven)

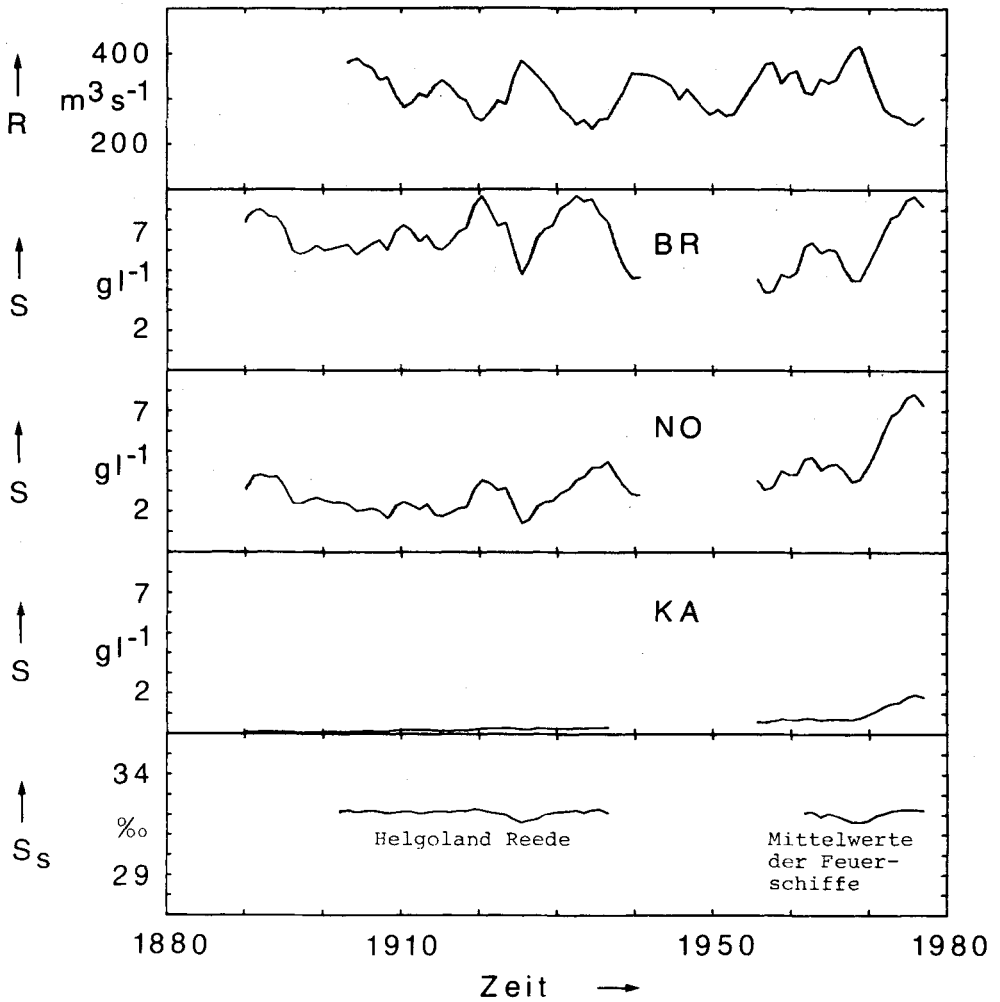


Abb. 3. Oberwassermenge R am Pegel Intschede (übergreifende Fünfjahresmittel) und Salzgehalte S (übergreifende Fünfjahresmittel) an verschiedenen Schöpfstellen in der Unterweser und in der Deutschen Bucht (S_s) von 1880 bis 1980

(Schöpfstellen in der Unterweser: BR: Bremerhaven, NO: Nordenham, KA: Käseburg)

Fig. 3. 5 yearly running means of river run-off R at the gauge of Intschede, and salinity S at various sampling stations in the Weser Estuary and in the German Bight (S_s) from 1880 to 1980

(Sampling stations along the estuary: BR: Bremerhaven, NO: Nordenham, KA: Käseburg)

Tabelle 1
Einige wichtige Baumaßnahmen in der Unterweser

Table 1
Some important engineering works in the inner part of the estuary

Die Meterangaben bei den Bezeichnungen für die verschiedenen Ausbauten beziehen sich nicht alle auf das gleiche Bezugsniveau. Einige Ausbauzustände werden teilweise von verschiedenen Autoren zeitlich etwas anders datiert

Ausbau	Zeit	Art des Ausbaus (und seine Gründe)
5-m-Ausbau (auch: UW-Korrektion, nach Plänen von L. Franzius [1888])	1887–1895	Fahrwasservertiefung, damit Schiffe mit einem Tiefgang von 5 m unter Ausnutzung der Gezeiten Bremen erreichen konnten; Begradigung des Flußlaufes; durch Abdämmen der Nebenarme Beseitigung von Stromspaltungen; Abflachung der Flußkrümmungen; Zusammenfassung der Strömung durch Strombauwerke im Hauptarm
Weserwehr bei Hemelingen (Strom-km 362)	1906–1913	Wehranlage zur Begrenzung des durch den ersten Ausbau hervorgerufenen weiteren Vordringens der Tidewelle, Herstellung des Staus 1911
7-m-Ausbau	1913–1916	Fahrwasservertiefung für Schiffe mit einem Tiefgang von 7 m
erweiterter 7-m-Ausbau	1921–1924	Ausbau des Fahrwassers hauptsächlich im oberen Teil der UW
8-m-Ausbau	1925–1929	Fahrwasservertiefung der im erweiterten 7-m-Ausbau geschaffenen Sohlenlage für Schiffe mit einem Tiefgang von 8 m, Verbreiterung der Fahrwasserrinne oberhalb von Vegesack
Ergänzungen zum 8-m-Ausbau	1930–1939	u. a. Ausbaggerung der Blexer Barre (1936–1940)
8,7-m-Ausbau	1953–1959	Fahrwasservertiefung für Schiffe mit einem Tiefgang von 9,6 m
9-m-Ausbau	1972–1979	Fahrwasservertiefung für Schiffe mit einem Tiefgang von 10,5 m

3 Analyse

Die folgende Analyse zielt darauf ab, die natürlich bedingten Schwankungen des Salzgehaltes schrittweise zu eliminieren und herauszufinden, ob die verbleibenden Restschwankungen mit den geometrischen Veränderungen als Folge der Baumaßnahmen erklärt werden können. Wegen des unvollkommenen Datensatzes werden dabei sehr einfache Modellvorstellungen benutzt, weil aufwendigere numerische Modelle keine besseren Möglichkeiten für den Vergleich von Modellergebnissen und Daten bieten würden.

3.1 Überblick über die Variabilität des Salzgehaltes

In einer aufsteigenden Periodenskala lassen sich Salzgehaltsfluktuationen im Weserästuar wie folgt charakterisieren:

- a) Im Periodenbereich der Gezeiten schwankt der Salzgehalt im Brackwassergebiet um mehrere Promille. Die 1887 gewählte Meßstrategie trägt dem dadurch Rechnung, daß die Proben stets bei einer Gezeitenphase, hier bei Tidehochwasser, gewonnen werden.

- b) Im synoptischen Bereich (2 bis 10 Tage) können, wie Krause [1979] gezeigt hat, ebenfalls Schwankungen um mehrere Promille als Folge des sich mit den vorüberziehenden Wettersystemen ändernden mittleren Wasserstands vorkommen. Diese Schwankungen sind in den Salzgehaltsreihen enthalten. Sie dürften sich jedoch bei langem Mittelungsintervall herausmitteln.
- c) Da die Lage der Brackwasserzone vom Oberwasser abhängt, steigt der Salzgehalt an einem Beobachtungsort in ihrem Bereich in der Regel mit fallendem Oberwasser und umgekehrt. Damit spiegeln sich im Salzgehalt jahreszeitliche und klimatische Änderungen im Einzugsgebiet der Weser wieder. Die darauf zurückzuführenden Fluktuationen des Salzgehaltes bis über 10‰ stellen das stärkste Signal in den Zeiterien dar.
- d) Änderungen des Salzgehaltes in dem an die Weser grenzenden Meeresgebiet führen zu Änderungen des Salzgehaltes im Ästuar. Eine Konstanz des Meerwassersalzgehaltes würde bedeuten, daß der Festlandabfluß den Salzgehalt im Meer nicht merkbar beeinflusst. In der südlichen Deutschen Bucht werden jedoch 4 bis 6jährige Salzgehaltsfluktuationen beobachtet. Becker und Kohnke [1978] und Hill und Dickson [1978] vermuten, daß eine äquiperiodische Variation des Niederschlags über dem Kontinent diese Salzgehaltsanomalien hervorruft. Ein langfristiger Trend wurde bisher nicht beobachtet.
- e) Ebenso wie der Salzgehalt des Meerwassers beeinflusst der Salzgehalt des Oberwassers den Salzgehalt im Ästuar. Der natürliche Salzgehalt des Oberwassers der Weser beträgt etwa 0,08 g/l. Aufgrund der wachsenden Einleitung von Kaliabwässern in die Werra und damit in die Weser steigt der Salzgehalt im Festlandabfluß der Weser weiter an (Abb. 4).
- f) Meeresspiegelschwankungen in geologischen Zeiträumen in dem an das Ästuar grenzenden Meeresgebiet können zu langzeitigen Salzgehaltsänderungen führen. An der deutschen Nordseeküste ist der Meeresspiegel in den letzten hundert Jahren um etwa 0,3 cm pro Jahr angestiegen (Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen [1957]).

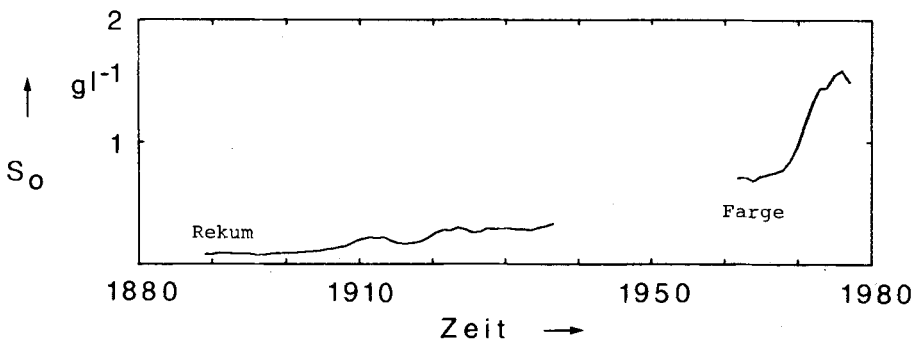


Abb. 4. Entwicklung des Salzgehaltes im Oberwasser (übergreifende Fünfjahresmittel)

1889–1936: Messungen bei Rekum

1961–1976: Messungen bei Farge

Fig. 4. Development of salinity in the waters of the river discharge (5 yearly running means)

1889–1936: Measurements at Rekum

1961–1976: Measurements at Farge

- g) Die größeren Ausbauten in der Unterweser im Rahmen der umfangreichen Baumaßnahmen in der Wesermündung bestanden vor allem in Fahrwasservertiefungen und -verbreiterungen, hauptsächlich oberhalb von Brake (UW-km 39,1) (Tabelle 1). Durch die Ausbauten änderten sich die Tideverhältnisse (Walt her [1954 a und b], Rohde [1970]) und damit die Vermischungsvorgänge, die den Salzgehalt beeinflussen. Die Annahme, daß die Ausbauten den Salzgehalt in der UW änderten, scheint also berechtigt.
- h) In Anbetracht des langen Beobachtungszeitraumes kann die Konstanz des Gezeitenablaufs in der Deutschen Bucht nicht als selbstverständlich vorausgesetzt werden (Siefert [1982], Rohde [1982]).

3.2 Elimination des Einflusses des Oberwassers und seines Salzgehaltes

Im Sinne der Aufgabenstellung sollen zunächst die offensichtlichen Einflüsse, die Oberwassermenge R und ihr Salzgehalt S_o (Anhang 1 und 3), aus den Beobachtungsreihen eliminiert werden. Ist S der an einer Schöpfstelle beobachtete und S_s der Salzgehalt des Meerwassers (Anhang 2) an der äußeren Ästuarergrenze, so ergibt sich der Salzgehalt ohne Oberwasseranteil zu

$$S_m = \frac{(S - S_o)}{(S_s - S_o)} S_s \quad (1)$$

Da an den Ästuarergrenzen Beobachtungen für S_s und S_o nicht vorlagen, wurden die in Anhang 1 und 2 beschriebenen Beobachtungen für S_s und S_o eingesetzt. Das kann bei den folgenden Analysen der langfristigen Trends zu ortsabhängigen Fehlern führen.

Unter der Voraussetzung, daß der Nettosalzfluß durch einen Querschnitt im Ästuar Null ist, daß Gezeitenbewegung und Wasserstand unabhängig vom Oberwasser sind und daß keine langfristig wirkenden äußeren Ursachen für Salzgehaltsänderungen sorgen, ist der advective Salzfluß durch diesen Querschnitt konstant (Bowden [1963], Krause [1979]). Der advective Salzfluß Φ_m gibt damit eine Beziehung zwischen Oberwasser und Salzgehalt:

$$\Phi_m = \rho \cdot \bar{u} \cdot \bar{S}_m \cdot \bar{A} \quad (2)$$

Dabei ist \bar{u} die zeitlich über den Gezeitenzyklus und räumlich über den mittleren Querschnitt \bar{A} gemittelte Strömungsgeschwindigkeit und \bar{S}_m der entsprechend gemittelte Salzgehalt ohne Oberwasseranteil. Die Dichte ρ des Wassers kann gleich 1 gesetzt werden. Die mittlere Strömung sei unabhängig von den Gezeiten, so daß mit der Oberwassermenge R gilt:

$$\bar{u} = R/\bar{A} \quad (3)$$

Damit läßt sich der advective Salzfluß durch einen Querschnitt im Ästuar beschreiben als

$$\Phi_m = R \cdot \bar{S}_m \quad (4)$$

Wegen des unvollkommenen Datenmaterials sind weder gute räumliche noch zeitliche Mittel des Salzgehaltes erhältlich (Anhang 1). Um die 4–6jährigen Anomalien des Salzgehaltes in der südlichen Deutschen Bucht zu unterdrücken, wurde eine übergreifende fünfjährige Mittelung der advektiven Salzflüsse durchgeführt. Die Abbildungen 5a bis c zeigen deren langfristige Entwicklungen bei Bremerhaven, Nordenham und Käseburg. Ursachen für die verbleibenden Fluktuationen können vor allem darin liegen, daß der Salzgehalt in der südlichen Deutschen Bucht nicht unabhängig von den Festlandabflüssen ist. Einen großen Einfluß haben die Oberwassermengen der Elbe. Außerdem ließen Berechnungen der Salzflußgleichung (Bowden [1963]) für einen bestimmten Ort in der Weser (Blexen)

erkennen, daß der Nettosalzfluß für ufernahe Meßstationen nicht Null ist, d. h., daß Messungen an einem Ort kein gutes Querschnittsmittel repräsentieren. Die Salzgehaltsschöpfstellen liegen aber alle in Ufernähe (Anhang 1).

Neben den verbleibenden Schwankungen sind in den Abbildungen 5a bis c gewisse Trends zu erkennen. Bei Bremerhaven sinkt der Salzgehalt langfristig im Zeitraum zwischen 1900 und 1940 und steigt zwischen 1960 und 1980 wieder an. Für Nordenham ist zwischen 1900 und 1930 schwer eine Tendenz zu erkennen. Zwischen 1930 und 1940 und zwischen 1960 und 1980 steigt der Salzgehalt dort wie auch an den hier nicht eingezeichneten Schöpfstellen Dedesdorf, Klippkanne und Brake (an den beiden letzten hauptsächlich zwischen 1960 und 1980) an. Da Käseburg oft nicht im Einflußbereich des Meersalzgehaltes liegt, ist hierfür schwer eine Tendenz abzulesen. Doch auch dort scheint der Salzgehalt zwischen 1960 und 1980 zuzunehmen.

In Abb. 6 sind für ein mittleres Oberwasser um $317 \text{ m}^3/\text{s}$ Salzgehaltslängsverteilungen für verschiedene Jahresgruppen dargestellt. Hiernach nimmt der Salzgehalt in annähernder Übereinstimmung mit den Ergebnissen der obigen Auswertung der advektiven Salzflüsse erst an allen Schöpfstellen ab, Anfang der 30er Jahre nimmt er bei Nordenham und Dedesdorf, später auch bei Bremerhaven und flußaufwärts von Dedesdorf zu. Hensen [1953], Walther [1954a und b] und die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen [1957] fanden ebenfalls zuerst eine Salzgehaltsabnahme und in den 30er Jahren eine Salzgehaltszunahme in der Unterweser.

Nach Ursachen für diese langfristigen Trends des Salzgehalts wird im folgenden gesucht.

3.3 Auswirkungen der Baumaßnahmen in der Unterweser und des Anstiegs des Meeresspiegels

Zur Untersuchung der in Abbildung 5 verbleibenden langzeitigen Salzgehaltsänderungen eignet sich das einfache Modell von Arons und Stommel [1951] für ein rechteckiges Kanalästuar konstanter Tiefe H und Breite b .

Es setzt stationäre Bedingungen voraus und berechnet die mittlere Salzgehaltsverteilung in Längsrichtung x aus der Diffusionsgleichung in der Form

$$\bar{u} \cdot \bar{S}_m = D \cdot (d\bar{S}_m/dx) \quad (5)$$

wobei \bar{S}_m wieder der zeitlich über eine Gezeitenperiode und räumlich über einen Querschnitt gemittelte Salzgehalt und \bar{u} die ebenso gemittelte Geschwindigkeit bedeuten. Sie hängt nach Gleichung (3) vom Oberwasser ab. Die Wirkung der Gezeiten wird im Austauschkoefizienten D parametrisiert:

$$D = B \cdot 2 \cdot \eta_0 \cdot U_0 \quad (6)$$

Ähnlich wie bei Ketchum [1951] wird angenommen, daß auf jeweils der Länge $2\eta_0$, die ein Wasserteilchen während einer Tide zurücklegt, vollständige Vermischung stattfindet. U_0 ist die Amplitude der Gezeitenströmung und B eine dimensionslose Konstante.

Mit den Randbedingungen

$$\begin{aligned} \bar{S}_m &= 0 \text{ für } x = 0 \\ \bar{S}_m &= S_s \text{ für } x = L \end{aligned} \quad (7)$$

erhält man mit der normierten Ortskoordinate $\lambda = x/L$ die Lösung

$$\bar{S}_m/S_s = \exp(F(1 - 1/\lambda)), \quad (8)$$

wobei

$$F = (1/(2 \cdot B \cdot \omega \cdot L)) \cdot K \cdot R$$

mit

$$K = H^2/(\bar{A} \cdot \zeta_0^2) \quad (9)$$

die „Flushing-Zahl“ ist, und ζ_0 die Amplitude und ω die Frequenz der Tidewelle bedeuten.

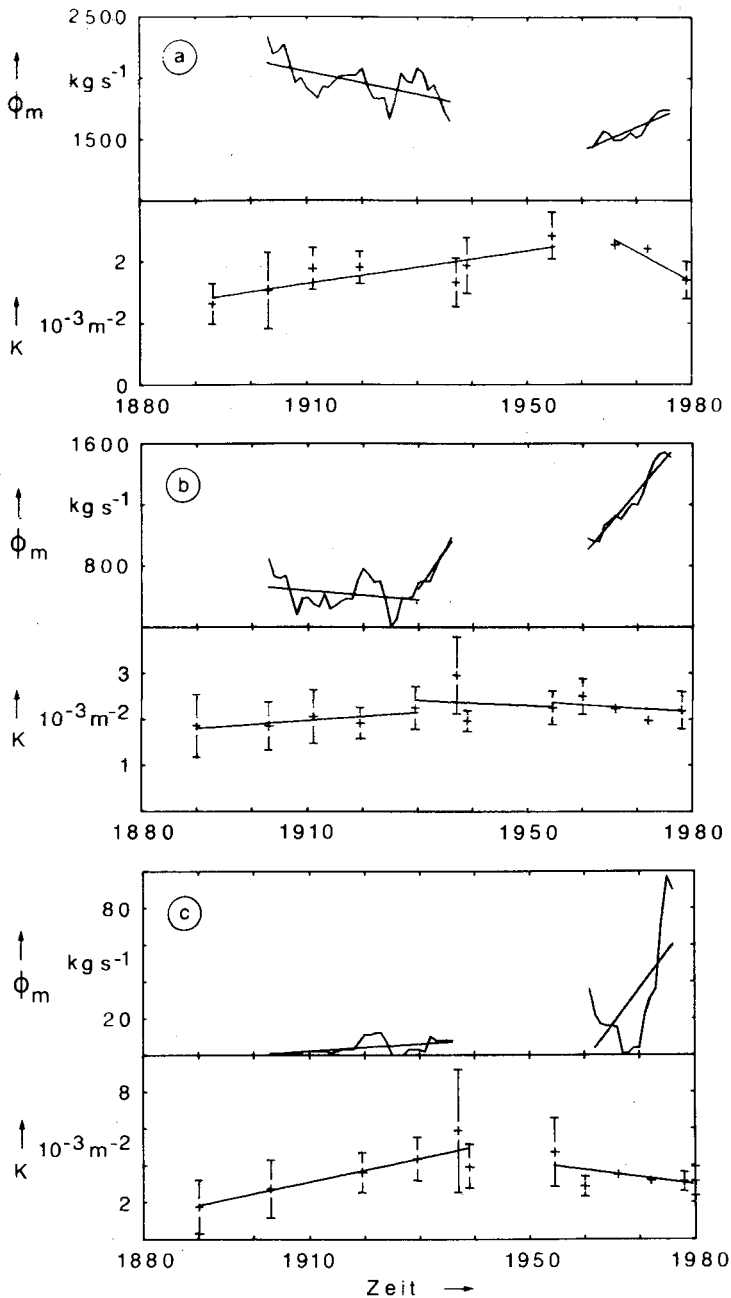


Abb. 5. Entwicklung des advektiven Salzflusses ohne Oberwasseranteil (Φ_m) für verschiedene Schöpfstellen (übergreifende Fünfjahresmittel) mit Ausgleichsgeraden für ausgewählte Zeiträume. Entwicklung für K für entsprechende Querschnitte der Unterweser mit Ausgleichsgeraden für ausgewählte Zeiträume und Fehlergrenzen

(a) Bremerhaven, (b) Nordenham, (c) Käseburg

Fig. 5. Development of advective salt fluxes with zero salinity of the river discharge (Φ_m) for various sampling stations (5 yearly running means) with regression lines for selected times. Development of K for respective cross-sections of the estuary with regression lines for selected times and error bars

(a) Bremerhaven, (b) Nordenham, (c) Käseburg

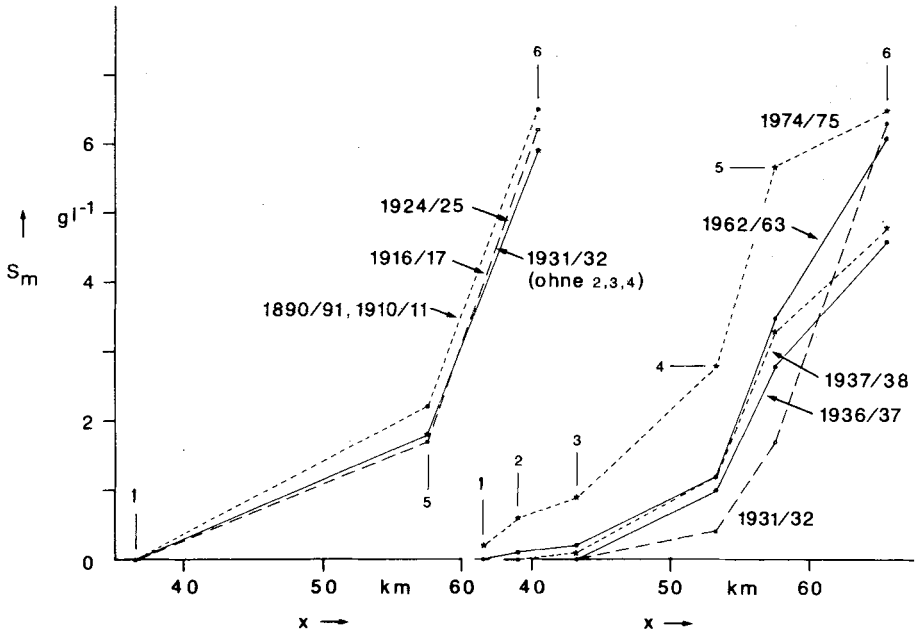


Abb. 6. Entwicklung der Salzgehaltslängsverteilungen in der Unterweser für ein mittleres Oberwasser von $317\ m^3/s$

(x : Entfernung von der Großen Weserbrücke in Bremen, Schöpfstellen in der Unterweser: 1: Käseburg, 2: Brake, 3: Klippkanne, 4: Dedesdorf, 5: Nordenham, 6: Bremerhaven)

Fig. 6. Development of the down-estuary salinity distribution within the inner part of the estuary for a mean river discharge of $317\ m^3/s$

(x : Distance from Große Weserbrücke in Bremen, sampling stations: 1: Käseburg, 2: Brake, 3: Klippkanne, 4: Dedesdorf, 5: Nordenham, 6: Bremerhaven)

K setzt sich aus den von den Ausbauten abhängigen Größen zusammen. Das Modell gilt unter der Voraussetzung, daß die Ästuarlänge L klein gegen die Länge der Tidewelle ist, so daß die Gezeit einheitlich und simultan im gesamten Ästuar auftritt.

Für die gesamte trichterförmige Wesermündung kann dieses einfache Modell natürlich nicht gelten, im Bereich zwischen den Unterweser-Kilometern (UW-km) 30 und 70, in dem die meisten Salzgehaltsmeßstellen liegen, stellt es jedoch eine brauchbare Näherung dar.

Grundlage für die folgende Analyse langfristiger Trends ist die Annahme, daß die Wesermündung stets als gut durchmischtes Ästuar gelten kann, so daß die „Vermischungskonstante“ B in Gleichung (6) unabhängig von Umgestaltungen des Flußbettes ist. Aufgrund des linearen Zusammenhangs der Flushing-Zahl mit dem Oberwasser läßt sich dann für einen Referenz-Zeitraum eine empirische Beziehung zwischen diesen beiden Größen herleiten. Benutzt man diese für andere Zeiträume, so lassen sich mögliche Veränderungen aufzeigen.

Dieses Verfahren läßt bis Anfang der 30er Jahre keine Tendenz in der Salzgehaltsverteilung erkennen, danach ergibt sich Übereinstimmung mit den vorangegangenen Ergebnissen.

Zur Aufspürung der Ursachen läßt sich der in Gleichung (9) von den Baumaßnahmen abhängige Faktor K getrennt betrachten, da die zeitliche Entwicklung der Wassertiefe, der Flußquerschnitte und der Gezeitenamplitude bekannt sind. In den Abbildungen 5a bis c ist diese Einflußgröße K für 3 Querschnitte in Form von Ausgleichsgeraden der Entwicklung des Salzgehaltes gegenübergestellt. Entsprechend den Gleichungen (8) und (9) bedeutet ansteigendes K abnehmenden Salzgehalt und umgekehrt.

Aus der Übereinstimmung dieses gegenläufigen Verhaltens von K und den Salzgehaltsentwicklungen könnte man nur dann einen Zusammenhang mit den Baumaßnahmen herleiten, wenn die Anregung der Gezeit in den letzten 100 Jahren gleich geblieben wäre. Siefert [1982] hat jedoch bemerkenswerte Änderungen des Gezeitenverlaufs an den Küsten der Deutschen Bucht nachgewiesen. Rohde [1982] hat gezeigt, daß sich in den letzten 10 Jahren der Gezeitenhub bei Helgoland um fast 10 cm vergrößert hat. Simultan traten seit 1968 an Pegeln in der Ems, Weser und Elbe beträchtliche Vergrößerungen des Gezeitenhubs auf. Eine Trennung dieses Effektes von dem der Baumaßnahmen ist mit dem vorhandenen Beobachtungsmaterial nicht möglich. Ebenso ist die Auswirkung des säkularen Wasserstandsanstiegs nicht zu erfassen.

4 Diskussion und Schlußfolgerung

Unsere Analyse des Beobachtungsmaterials zur Salzgehaltsentwicklung in einem für die Nordseeküste typischen Ästuar hat gezeigt, daß im Verlauf etwa eines Jahrhunderts beträchtliche Schwankungen vorkommen, die in einsichtiger Weise auf Fluktuationen des Festlandabflusses als Folge meteorologischer und klimatischer Erscheinungen zurückzuführen sind. Daneben sind sehr langfristige Trends offenkundig, zu deren Erklärung eine einzige Ursache nicht ausreicht. Bemerkenswert ist die Feststellung, daß die erhebliche Umgestaltung des Flußbettes der Weser sich nicht eindeutig in der Entwicklung des Salzgehaltes nachweisen läßt.

Trotz der aufgezeigten Mängel des Beobachtungsmaterials ist der hier analysierte Datensatz eine wertvolle Referenz zur Beurteilung von Trends in der Konzentration anderer Stoffe und für die Entwicklung der Wasserqualität. Im Hinblick auf die mögliche Feststellung gegenläufiger Trends sollte dieses „klassische“ Meßnetz weiter unterhalten werden.

Die Ergebnisse unserer Analyse geben auf die Ausgestaltung moderner Meßnetze zur Überwachung der Wasserqualität im Küstenraum eine Reihe von Hinweisen zur Meßstrategie. Zur Ermittlung langfristiger Trends sind Meßstationen an den Ästuar Grenzen notwendig. Notwendig sind auch Untersuchungen zur Repräsentativität jeder Meßstelle für den jeweiligen Querschnitt. Wünschenswert sind integrierende Verfahren bei der Probennahme.

Anhang 1

Salzgehaltsmessungen in der Unterweser

Am 4. Juni 1887 begann die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen (heute Wasser- und Schifffahrtsamt) mit der Entnahme von Wasserproben zur Salzgehaltsbestimmung. Dies erfolgt einmal in der Woche (früher sonnabends, heute freitags) mit einem einheitlichen, erst unter Wasser zu öffnenden Gefäß in 1,5 m Tiefe an festen Meßstationen (Abb. 1) bei Tidehochwasser zwischen 6.00 und 18.00 Uhr. Der Salzgehalt wird durch eine chemische Analyse nach Mohr bestimmt. Der Gesamtchloridgehalt und die unbedeutenderen Gehalte an Bromiden und Jodiden werden mit dem Faktor 1,652 auf Kochsalz umgerechnet; im folgenden wird dieser von der üblichen Definition abweichende Begriff mit Salzgehalt bezeichnet. Wegen der spezifischen Aufgabenstellung – wie salzreich ist das Wasser, das der Bewässerung dient? – wurde die Wassertiefe von 1,5 m als ausreichend angenommen, da die Wahrscheinlichkeit, daß Wasser aus größeren Tiefen durch die Siele fließt, klein ist. Ende 1942 wurden die Messungen an den letzten Schöpfstellen eingestellt – 10 Jahre nach Beendigung des 8-m-Ausbaus, wie vertraglich vereinbart – und erst am 8. August 1952 im Hinblick auf den 8,7-m-Ausbau an einigen, später an mehreren Orten, wieder aufgenommen.

Die einzelnen Schöpfstellen haben besondere Eigenschaften. Wegen der spezifischen Aufgabenstellung liegen die Schöpfstellen oftmals nicht am Flußufer, sondern in Sielen und Zuwässerungskanälen. In Sielen wird ein anderer Salzgehalt gemessen als am Flußufer. Aus diesem Grund werden nur die Daten der folgenden Schöpfstellen für unsere Analysen verwertet: Farge, Rekum, Käseburg (nur kurzes Außentief), Brake, Klippkanne, Dedesdorf, Nordenham und Bremerhaven (Geestemole). Da nur vereinzelt Salzgehaltsmessungen in verschiedenen Tiefen, an verschiedenen Stellen über die Breite des Flusses oder zu verschiedenen Tidephasen vorgenommen wurden, können keine zeitlich über den Gezeitenzyklus und räumlich über den Querschnitt gemittelte Werte gewonnen werden. Als Ausweg bietet sich die langzeitige Mittelung über sehr viele Tiden an, die zumindest den Gezeiten effekt weitgehend beseitigt. Für unsere Untersuchungen wurden deshalb aus den vorhandenen wöchentlichen Salzgehaltsdaten Jahresmittelwerte von November bis Oktober (Hydrologisches Jahr) gebildet.

Der Salzgehalt des Oberwassers wirkt sich nicht immer in voller Höhe am Rand der Brackwasserzone aus. Übersteigt die Oberwasserführung einen bestimmten Betrag, so ist z. B. in Käseburg (in den 50er Jahren für R etwa $400 \text{ m}^3/\text{s}$) kein Einfluß des Salzgehaltes der Deutschen Bucht zu spüren; dann sollte dort der Salzgehalt des Oberwassers gemessen werden. In solchen Fällen kann der Salzgehalt in Bremen jedoch größer sein als in Käseburg, da Zuflüsse aus Ochtum, Lesum und Hunte, Nebenflüssen der Weser mit salzarmen Oberwassern, das salzreichere Weserwasser dort verdünnen können.

Der Anteil des Salzgehaltes des Oberwassers an dem im Ästuar gemessenen Salzgehalt kann mit Hilfe einer einfachen Vermischungsgleichung für vollständige Vermischung eliminiert werden.

$$m_{oi} S_o + m_{mi} S_s = (m_{oi} + m_{mi}) S_i$$

m_{oi} ist die Oberwassermenge in einem vert. Querschnittsvolumen mit Einheitslänge am Ort x_i im Ästuar

m_{mi} ist die Meerwassermenge in einem vert. Querschnittsvolumen mit Einheitslänge am Ort x_i im Ästuar

S_o ist der Salzgehalt des Oberwassers

S_s ist der Salzgehalt des Meerwassers

S_i ist der Salzgehalt am Ort x_i nach vollständiger Vermischung von Ober- und Meerwasser bzw. der an den Schöpfstellen gemessene Salzgehalt

$M_i = m_{oi} + m_{mi}$ ist die Gesamtwassermenge im Querschnittsvolumen mit Einheitslänge am Ort x_i .

Flußaufwärts über x_0 dringe kein Meerwasser, flußabwärts über x_L kein Oberwasser vor. Für $x \leq x_0$ gelte damit $S = S_0$ und für $x \geq x_L$ sei $S = S_s$. Die Koordinate x_i liege im Bereich $x_0 \leq x_i \leq x_L$. Mit Hilfe einiger Umformungen der obigen Gleichung wird der Gesamtsalzgehalt S_i an der Stelle x_i im Ästuar in den Anteil des Salzgehaltes des Oberwassers und den des Meerwassers, S_{mi} , aufgespalten. Für S_{mi} , d. h. für den an den Schöpfstellen gemessenen Salzgehalt ohne Oberwasseranteil, ergibt sich

$$S_{mi} = \frac{(S_i - S_0)}{(S_s - S_0)} S_s \quad (1)$$

Für S_0 werden die Salzgehalte von Rehum (1888 bis 1938) und Farge (1959 bis 1978) eingesetzt. Dort wird in der Regel der Salzgehalt des Oberwassers gemessen, da diese beiden Schöpfstellen nur selten im Einflußbereich des Meerwassers liegen. Allerdings kann der Salzgehalt dort durch Oberwasser aus den Nebenflüssen beeinflusst sein. Die Salzgehaltswerte werden als Jahresmittelwerte (Hydrologisches Jahr) benutzt.

Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze stammen aus den im Literaturverzeichnis genannten Berichten, Meßprotokollen und Zeichnungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen [1937, 1943, 1957, 1965, 1969, 1970, 1974]. Eine ausführlichere Diskussion der Daten ist bei Grabemann [1981] zu finden.

Anhang 2

Salzgehalt in der südlichen Deutschen Bucht

Für den Oberflächensalzgehalt in der Deutschen Bucht liegen Messungen von Helgoland-Reede und von verschiedenen Feuerschiffen vor.

- | | |
|-----------|--|
| 1888–1938 | Jahresmittel des Salzgehaltes von Helgoland-Reede
(Goedecke [1954, 1956]) |
| 1959–1970 | Mittelwert der Jahresmittelwerte des Salzgehaltes von den Feuerschiffen
„Weser“, „Elbe“, „P8“ und „P12“
(Deutsches Hydrographisches Institut [1959–1970]) |
| 1971–1978 | Mittelwert der Jahresmittelwerte des Salzgehaltes von den Feuerschiffen
„Weser“, „Elbe“ und „Deutsche Bucht“
(Deutsches Hydrographisches Institut [1971–1978]) |

Die Jahresmittel beziehen sich auf das Hydrologische Jahr. Diese Salzgehaltswerte werden für S_s eingesetzt.

Anhang 3

Oberwasser und Wasserstand

Oberwasserwerte für den Pegel Intschede (Mittelweser) liegen ab 1900 vor (Bundesanstalt für Gewässerkunde [1975]; Landesstelle für Gewässerkunde [1972–1980]). Mit Wasserstandsaufzeichnungen an verschiedenen Pegeln in der Unterweser wurde in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts begonnen. Die Pegelzahl wurde später vermehrt (Meßprotokolle des Wasser- und Schifffahrtsamtes Bremen).

Die Jahresmittel für die mittlere Hochwasserhöhe (MHW), die mittlere Niedrigwasserhöhe (MNWH), den mittleren Tidenhub (MTH) und die Oberwassermenge (R) wurden für das Hydrologische Jahr gebildet.

Anhang 4

Mittlere Querschnittsflächen und Querschnittstiefen für die Unterweser

Für einige Flußquerschnitte in der Unterweser wurden für verschiedene Jahre bzw. Jahresgruppen die Querschnittsflächen bis zum mittleren Mittelwasser (MMW) und die räumlich gemittelten Wassertiefen unter MMW hauptsächlich aus Querschnittsprofilen der Wasser- und Schiffsämter Bremen und Bremerhaven bestimmt. Die Flächenbestimmung der Querschnitte erfolgte mit Hilfe eines Planimeters, die Berechnung der mittleren Wassertiefe durch Mittelwertbildung der in bestimmten Abständen abgelesenen Wassertiefe.

Es trat eine Reihe von Problemen auf. Unter anderem wurde das MMW aus MHHW und MNWH gebildet; waren diese für Orte x_i im Ästuar nicht bekannt, so wurden sie durch Interpolation aus den benachbarten Meßorten gewonnen. Die Peilungen gingen oftmals nicht bis zum Ufer und mußten bis dahin extrapoliert werden.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dipl.-Ing. A. Bergmann vom Wasser- und Schiffsamt Bremen und Herrn Dr.-Ing. V. Barthel vom Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven für die Bereitstellung zahlreichen Datenmaterials und der im Literaturverzeichnis genannten Berichte.

Literatur

- Arons, A. B. and H. Stommel, 1951: A mixing length theory of tidal flushing. *Trans. Amer. Geophys. Un.* **32**, 419–421.
- Becker, G. and D. Kohnke, 1978: Long-term variations of temperature and salinity in the Inner German Bight. *Rapp. P.-v. Cons. Explor. Mer.* **172**, 335–344.
- Bowden, K. F., 1963: The mixing processes in a tidal estuary. *Air Water Pollut.* **7**, 343–356.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz. (Hrsg.) 1975: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Allgemeiner Teil. 1966/70. 101 S.
- Deutsches Hydrographisches Institut, 1959 bis 1978: Meereskundliche Beobachtungen und Ergebnisse. Hamburg.
- Franzius, L., 1888: Die Korrektur der Unterweser. Bremen.
- Goedecke, E., 1954: Mean values of temperature and salinity derived from periodic observations made at Helgoland Roads. *Ann. Biol.* **11**, 46–49.
- Goedecke, E., 1956: Über das Verhalten des Oberflächensalzgehaltes in der Deutschen Bucht während der Jahre 1873–1944 in Verbindung mit langjährigen Salzgehaltsreihen der südlichen Nordsee. *Ber. Dt. Wiss. Komm. Meeresforsch.* **14**, 109–146.
- Grabemann, I., 1981: Langzeitige Änderungen des Salzgehaltes im Weser-Ästuar. Diplomarbeit, Universität Kiel. 92 Seiten.
- Hensen, W., 1953: Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in Seekanäle und in Häfen. *Mitt. Franz. Inst.* **3**, 20–50.
- Hill, H. W. and R. R. Dickson, 1978: Long-term changes in the North Sea hydrography. *Rapp. P.-v. Cons. Explor. Mer.* **172**, 310–334.
- Ketchum, B. H., 1951: The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries. *J. Mar. Res.* **10**, 18–38.
- Krause, G., 1979: Grundlagen zur Trendermittlung des Salzgehaltes in Tide-Ästuarien. *Dt. hydrogr. Z.* **32**, 233–247.
- Landesstelle für Gewässerkunde. Hannover. (Hrsg.) 1972–1980: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Weser- und Emsgebiet. 1971 bis 1979.
- Lüneburg, H., K. Schaumann und S. Wellershaus, 1975: Physiographie des Weserästuars. *Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh.* **15**, 195–226.
- Rachor, E., 1980: Weserästuar und Wattenmeer. In: Exkursionen in Nordwestdeutschland und angrenzenden Gebieten. Kiel: Hirt. S. 109–114.
- Rohde, H., 1970: Entwicklung der Wasserstraßen im Bereich der deutschen Nordseeküste. *Küste.* **20**, 1–44.
- Rohde, H., 1982: Zur Geschichte des Pegels Helgoland. *Dt. gewässerkdl. Mitt.* **26**, 117–124.
- Siefert, W., 1982: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. *Küste.* **37**, 1–36.
- Walther, F., 1954a: Wasserstände und Gezeiten der Unterweser. *Weser.* **28**, 133–136.
- Walther, F., 1954b: Veränderungen der Wasserstände und Gezeiten in der Unterweser als Folge des Ausbaues. *Hansa.* **91**, 942–949.
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen, 1937: Der Salzgehalt des Weserwassers und seine Veränderungen durch die Unterweserausbauten.
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen, 1943: Allgemeine Untersuchungen über die Veränderungen des Salzgehaltes im Weserwasser bis 1942.
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion Bremen, 1957, 1965, 1969, 1970, 1974: Die Entwicklung der Salzgehaltsverhältnisse in der Unterweser seit Beginn des Ausbaus. *Gewässerkundliche Grundlagensammlung*
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion (heute -amt) Bremen und Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven: Meßprotokolle, Zeichnungen und Peilkarten.

Eingegangen am 10. Dezember 1982

Angenommen am 23. Juni 1983

Anschrift der Verfasser:

I. Grabemann, Dr. G. Krause

Institut für Meeresforschung, Am Handelshafen 12, 2850 Bremerhaven 1

Dr. G. Siedler

Institut für Meereskunde, Düsternbrooker Weg 20, 2300 Kiel 1