

**Sonderdruck aus  
Deutsche  
Gewässerkundliche  
Mitteilungen**

39.1995 H. 4/5 - Seite 134-137

# Die Lage der oberen Brackwassergrenze im Elbeästuar

## The Upper Limit of the Brackish Water on the Elbe Estuary

von Michael Bergemann

DK 551.468.6.(282.243.3)

Die Lage der oberen Brackwassergrenze im Elbeästuar wurde aus Chloridmessungen der Jahre 1953 bis 1994 ermittelt. Es wird die Abhängigkeit der Lage vom Oberwasserabfluß und die zeitliche Entwicklung gezeigt.

The upper limit of the brackish water on the Elbe estuary was determined by chloride concentrations of the years 1953 to 1994. It is shown the relation between the location of the limit and the fresh water discharge and the development in the time serie.

### 1 Allgemeines

#### 1.1 Einleitung

Der Ausbau des Fahrwassers der Unterelbe hat die Morphologie und die Hydrologie der Tideelbe deutlich verändert [1 bis 3]. Von ursprünglich weniger als 3 m im flachsten Bereich bei Hamburg (Karte von Sörensen, 1695, bezogen auf KN) wurden die Fahrwassertiefen in Stufen auf 10 m (1936-1950), 11 m (1957-1962), 12,5 m (1964-1969) und schließlich auf 13,5 m unter MTnw (1974-1978) gebracht. Die Strömung wurde, von den Nebenarmen weg, gezielt auf das Fahrwasser konzentriert, um die Räumkraft der Tidebewegung für den Erhalt der erreichten Wassertiefen zu nutzen. Die Fahrwasservertiefungen und Begradigungen verringerten die Rauigkeit des Strombettes und die Teilreflexionen der Tidewelle mit der Folge, daß ein größerer Anteil der Tidewellen-Energie bis in den oberen Bereich des Ästuars gelangte, die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sich erhöhten, bei Hamburg das MTnw deutlich abnahm und das MThw zunahm [4]. Als Resultat stieg der Tidenhub am Pegel St. Pauli von ca. 1,5 m (um 1840) auf ca. 3,5 m. Die Transportprozesse im Elbeästuar wurden somit erheblich beeinflusst. Es liegt der Schluß nahe, daß sich die Lage der Brackwasserzone, die das Ergebnis der Vermischung des stromab transportierten Süßwassers und des stromauf transportierten Meerwassers ist, ebenfalls verschoben hat. Da ein Nachweis über Naturmessungen hierfür bisher noch nicht berichtet wurde, soll in dieser Arbeit durch vorhandene Naturmeßdaten überprüft werden, ob sich bei bestimmten Randbedingungen die Lage der Brackwasserzone tatsächlich verändert hat.

#### 1.2 Beschreibung der Brackwasserzone

Die Brackwasserzone eines Tidegewässers ist der aktuelle Mischungsbereich zwischen dem Süßwasser und dem Meerwasser. Der Brackwasserbereich ist die Flußstrecke, in der Brackwasser immer oder zeitweise vorkommt. Neben dem Salzgehalt ist eine spezielle (anpassungsfähige) Biozönose kennzeichnend [5, 6]. Die Lage der Brackwasserzone wird von der Größe und Dauer des Oberwasserabflusses, der Stärke der einschwingenden Tide (einschließlich des Windeinflusses) und der Tidephase bestimmt. Ein Tideweg (zwischen der Kenterung des Flut- und Ebbestromes) beträgt in der Elbe im Mittel zwischen 15 und 20 km. Um diesen Betrag wird die Brackwasserzone zweimal täglich hin- und herbewegt. Dabei sind die Salzgehalte horizontal und vertikal in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeitsprofile ungleich verteilt. Im Schwerpunkt der Brackwasserzone kommt es nach der Kenterung des Ebbestromes zeitweilig zu einer Schichtung von dichterem von See her einströmenden Salzwasser an der Sohle und (leichterem) Süßwasser an der Oberfläche. Bei voll laufender Strömung bauen sich Turbulenzen und Wirbel auf, die die unterschiedlichen Salzzonen zunehmend wieder mi-

schen. Das Wechselspiel zwischen der Salzzonierung und den Mischungsvorgängen führt dazu, daß sich bei über mehrere Wochen anhaltend niedrigem Oberwasserabfluß die Brackwasserzone sehr langsam stromauf bewegt. Eine feste Lage, aufgrund eines Gleichgewichts der Transportströme, stellt sich in der Natur praktisch nie ein.

Eine Hochwasserwelle, die in die Tideelbe gelangt, wirkt sich in zwei Schritten aus. Der Impuls der Hochwasserwelle verschiebt die Brackwasserzone innerhalb weniger Tiden seawärts. Die verdünnende Wirkung des erhöhten Abflusses setzt an der oberen Brackwassergrenze erst nach 5 bis 10 Tagen ein, wenn das Wasser die Strecke vom Wehr Geesthacht bis zur oberen Brackgrenze durchlaufen hat.

### 2 Auswertung

#### 2.1 Methode

Die genaue, reproduzierbare Lokalisierung der oberen (und unteren) Brackwassergrenze ist schwierig, weil sich an den Rändern der Salzgehalt nur schleichend verändert. Einzelne Meersalzen gelangen stromauf weit über den Bereich hinaus, in dem diese meßtechnisch erfasst werden können. Da eine praktikable Definition der Brackwassergrenze nicht aus natürlichen Gegebenheiten herleitbar ist, wurden von etlichen Autoren [7, 8] verschiedene Konventionen gesetzt, die meistens einen Schwellen- oder Grenzwert für eine Salzmeßgröße (Salzgehalt, Chloridgehalt) festlegten, oder die Auswirkung des Salzanstieges auf die Gewässerbiologie beschrieben [9].

Für diese Arbeit wurde die obere Brackwassergrenze als der Anstieg des Chloridgehaltes um 30 mg/l Cl<sup>-</sup> über die mittlere Konzentration des angrenzenden Süßwasserbereiches festgelegt (Abb.1) [10]. Dieser Mittelwert wird für jedes auszuwertende Chloridlängsprofil neu berechnet, weil nur so die große oberwasser- und einleitungsbedingte Schwankungsbreite der Chloridgehalte im Süßwasserbereich der Elbe von 40 bis 740 mg/l Cl<sup>-</sup> (Auswertung von 1926 bis 1994) berücksichtigt wird. Beginnend mit der Meßstelle Teufelsbrück (Strom-km 630) wird schrittweise stromab der arithmetische Mittelwert des Chloridgehaltes berechnet, bis der nächstfolgende Meßwert den Mittelwert um mindestens 30 mg/l Cl<sup>-</sup> überschreitet. Zwischen den letzten beiden Meßwerten wird dann linear interpoliert, um die genaue Lage der Grenzwertüberschreitung (Mittelwert + 30 mg/l Cl<sup>-</sup>) festzustellen.

Die Festlegung über den Chloridgehalt geschah, weil Chlorid seit langer Zeit die gebräuchlichste Meßgröße für Salz ist und somit sehr viele Messungen in der Elbe vorliegen. Die Konvention setzt die Grenze soweit nach oberstrom, wie es die Schwankungsbreite der Werte zulässt. Außerdem hat diese Konvention den Vorteil, für Auswertungen leicht anwendbar zu sein.

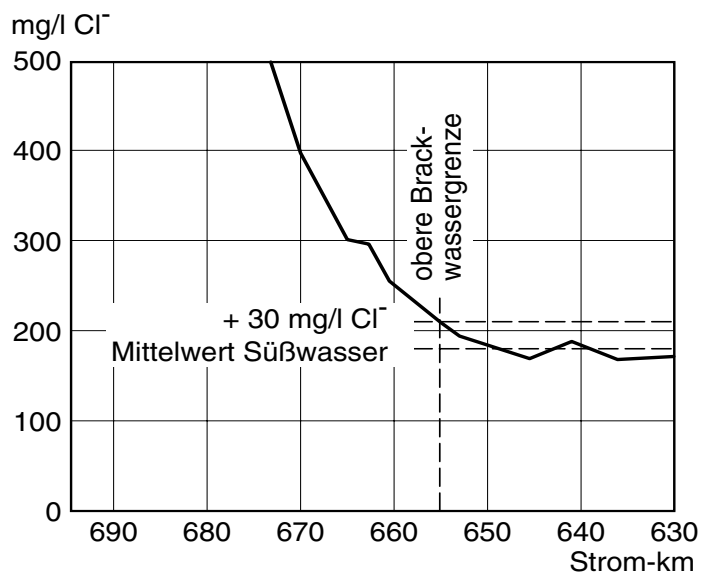


Abb. 1 Ermittlung der oberen Brackwassergrenze - Chloridprofil vom 6.8.1993  
Evaluation of the upper limit of the brackish water - chloride profil on 8.6.1993

2.2 Datengrundlage

Die größte Veränderung der Brackwasserzone könnte sich vermutlich aus einem Vergleich der Situation des letzten Jahrhunderts mit den aktuellen Verhältnissen ergeben. Es wurde deshalb intensiv nach geeigneten historischen Daten gesucht. Die Bedingungen für die Verwendbarkeit waren:

- Erfassung des oberen Brackwasserbereichs und des angrenzenden Süßwasserbereichs durch mehrere Meßstellen
- Randbedingungen bekannt: Datum, Uhrzeit, Tidezeit, Oberwasserabfluß.

Vereinzelte Chloridmessungen wurden in der Elbe seit 1852 durchgeführt und veröffentlicht [11]. Sie dienten später hauptsächlich zur Beschreibung der zunehmenden Versalzung des Elbewassers durch die aufblühende Kaliindustrie am Ende des letzten Jahrhunderts. Ab 1926 wurden von dem „Flußwasser-Untersuchungsamt zu Magdeburg“ für diesen Zweck zweitägliche Chloridmessungen in der Elbe bei Aken und Tangermünde sowie in der Saale bei Groß-Rosenburg durchgeführt.

Durchgängige Chloridmessungen in der Brackwasserzone, die eine Beschreibung der Lage zulassen, gibt es bis auf einzelne Längsprofilmessungen erst ab 1953. Diese Chloridmessungen wurden monatlich von der „Untersuchungsstelle für die Wassergüte der Elbe“, im Rahmen von Längsprofilbeprobungen, von Schnackenburg bis Cuxhaven durchgeführt. Die oberflächennahe Beprobung erfolgte von einem Meßschiff aus, das die Strecke innerhalb von 2-3 Tagen befuhr. Im Winter endete die Fahrt bei Glückstadt, im Sommer bei Cuxhaven.

Seit 1977 wurden diese Längsprofilmessungen von den Dienststellen der Bundesländer fortgeführt, die zur „Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe“ gehören. Ab 1979 wurde zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Meßergebnisse die Probenentnahme für alle Meßstellen im Ästuar auf den gleichen Tidezeitpunkt von ca. 1h vor Tnw festgelegt, weil zu dieser Zeit die relativ beste Durchmischung des Wasserkörpers vorliegt. Diese tidephasengleiche Beprobung war mit Schiffen, wegen des engen Zeitrahmens, nicht zu erreichen. Es wurde deshalb ein Hubschrauber eingesetzt, der, mit der von See her einschwingenden Tidewelle, stromauf flog und so alle Meßstellen, innerhalb von ca. 4,5 Stunden bei voll laufendem Ebbstrom, zum annähernd gleichen Tidezeitpunkt erreichte.

Von 1953 bis 1994 wurden insgesamt 457 Chloridlängsprofile in der Fahrwassermittle durchgeführt. Über den gesamten Zeitraum wurde als Meßmethode die Titration nach Mohr angewandt.

2.3 Bestimmung und Normierung der Lagewerte

Von den Längsprofilmessungen, die bis Glückstadt reichten, erfassten ein Teil den oberen Abschnitt der Brackwasserzone nicht, weil die Brackwasserzone nur bei Oberwasserabflüssen unterhalb von 600 m<sup>3</sup>/s in diesem Bereich begann. So wurden letztlich von den 457 Chloridlängsprofilen 282 ausgewertet. Im ersten Schritt wurde für jedes Längsprofil der Süßwassermittelwert der Chloridgehalte berechnet (siehe 2.1) und die Lage der Grenzwertüberschreitung (Mittelwert + 30 mg/l Cl<sup>-</sup>) festgestellt. Dieser Lagewert wurde im zweiten Schritt auf einen einheitlichen Tidezeitpunkt umgerechnet. Da ein großer Teil der Längsprofilmessungen (1979-1994) ca. 1h vor Tnw stattfand und die Lage dieser Messungen für eine Normierung nur geringfügig korrigiert werden mußte, wurde als einheitlicher Tidezeitpunkt 1h vor Tnw gewählt. Die Lage wurde um den Tideweg korrigiert, der der Differenz zwischen dem Probenentnahmezeitpunkt und dem Zeitpunkt 1 h vor Tnw entsprach. Hierfür wurde mit einem mathematischen Modell der Elbe der Tideweg einer mittleren Tide für verschiedene Abflußklassen berechnet.

Die Lage der Brackwasserzone ist stark von dem Oberwasserabfluß abhängig. Die jeweilige Lage ist das Ergebnis des Abflußgeschehens der vorangegangenen Tage. Um die Abflußwerte (des Abflußpegels Neu Darchau) sinnvoll zusammenzufassen, wurde ein gewichteter Mittelwert der letzten 3 Wochen gebildet, wobei der Abfluß am Meßtag das höchste Ge-

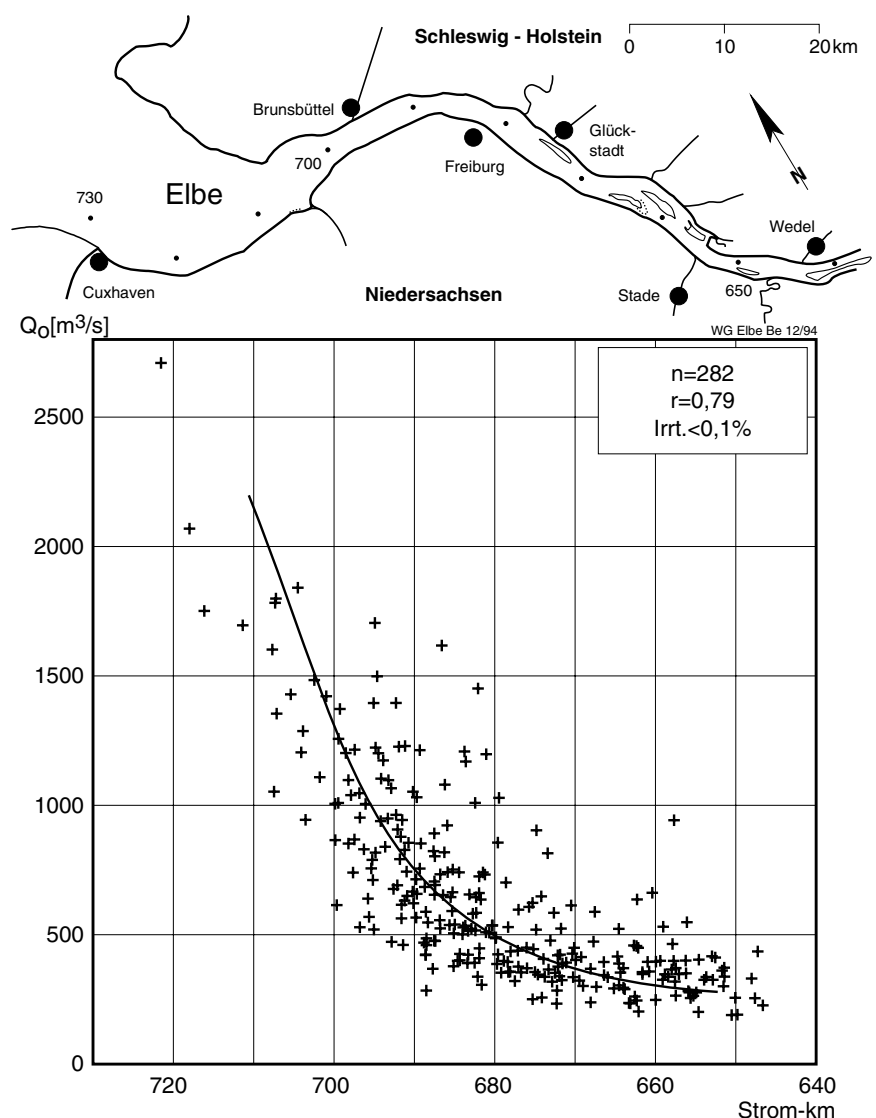


Abb. 2 Die Lage der oberen Brackwassergrenze (1h vor Tnw) in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluß  
The location of the upper limit of the brackish water in relation to the fresh water discharge

wicht und der Abfluß 3 Wochen vor der Messung, entsprechend dem Einfluß auf die Lage der Brackwasserzone, das kleinste Gewicht zugewiesen bekam. Es wurde ebenfalls der Trend des Abflusses in diesem Zeitraum (steigend, gleichbleibend, fallend) festgestellt.

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Beziehung zwischen Lage und Oberwasserabfluß

In Abb. 2 ist die Lage der oberen Brackwassergrenze gegen das gewichtete Abflußmittel des Pegels Neu Darchau aufgetragen. Die Darstellung zeigt, daß das Lagemaß, je nach hydrologischen Randbedingungen, eine Strecke von fast 80 km überstreicht. Der Oberwasserabfluß ist im Vergleich zu den tidebedingten großen Durchflüssen im Elbeästuar (z. B. bei Glückstadt 15 000 bis 20 000 m<sup>3</sup>/s) sehr klein. Trotzdem bewirkt allein der Oberwasserabfluß (einschließlich der seitlichen Zuflüsse) den Nettotransport gelöster Stoffe in Richtung Nordsee. Die Darstellung läßt einen logarithmischen Zusammenhang zwischen dem Abfluß und der Lage der Brackwasserzone erkennen, der sich maßgeblich aus der entsprechenden Ausweitung der Querschnittsflächen der Elbe in Richtung Nordsee ergibt. Die starke Streuung der Werte bei gleichem Oberwasserabfluß ist auf das unterschiedliche Tidegeschehen (Springtide, Nipptide, Windeinfluß) zurückzuführen, das, bis auf die Tidephase, im Rahmen dieser Auswertung nicht normiert wurde.

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, wurden alle Lagewerte auf die Tidezeit 1h vor T<sub>nw</sub> umgerechnet. Für ökologische Bewertungen ist die Lage der oberen Brackwassergrenze in ihrer obersten Position bei Kenterung des Flutstromes (K<sub>f</sub>) wichtig. Die derzeitige Position (Anfang der 90er Jahre) bei K<sub>f</sub> wurde deshalb für 3 Abflußsituationen abgeschätzt und in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle Abschätzung der aktuellen Lage der oberen Brackwassergrenze bei K<sub>f</sub>

Estimation of the current loaction of the upper limit of brackish water at slack water time of flood current

Abflußsituation (m <sup>3</sup> /s)	ca. Strom-km
niedrig (< 400)	645
mittel (um 700)	670
hoch (> 1000)	690

2.4.2 Zeitliche Entwicklung der Lage

Die Auswertung der Lagewerte bei mittleren und hohen Abflüssen ergab keinen statistisch abgesicherten Trend. Bei mittleren Abflüssen lag die Grenze in den 90er Jahre in dem gleichen Bereich, wie in den 50er und 60er Jahren. Bei hohen Abflüssen war die Lage in den 90er Jahren, gegenüber den 50er und 60er Jahren, leicht stromab verschoben. Für eine derartige Verschiebung fehlt jedoch eine funktionale Erklärung. Eine Unsicherheit kommt dadurch in die statistische Auswertung, daß bei mittleren und hohen Werten die jeweils über drei Wochen gewichteten Abflüsse während dieses Zeitraumes in 90% der Fälle steigenden oder fallenden Trend hatten. Niedrige Abflüsse waren dagegen zu 50% beharrend. Eine Auswertung, bei der die Lagewerte nach dem Abflusstrend sortiert wurden, ergab keine Verbesserung der Korrelation, allein schon weil die sich ergebenden Wertekollektive zu klein waren.

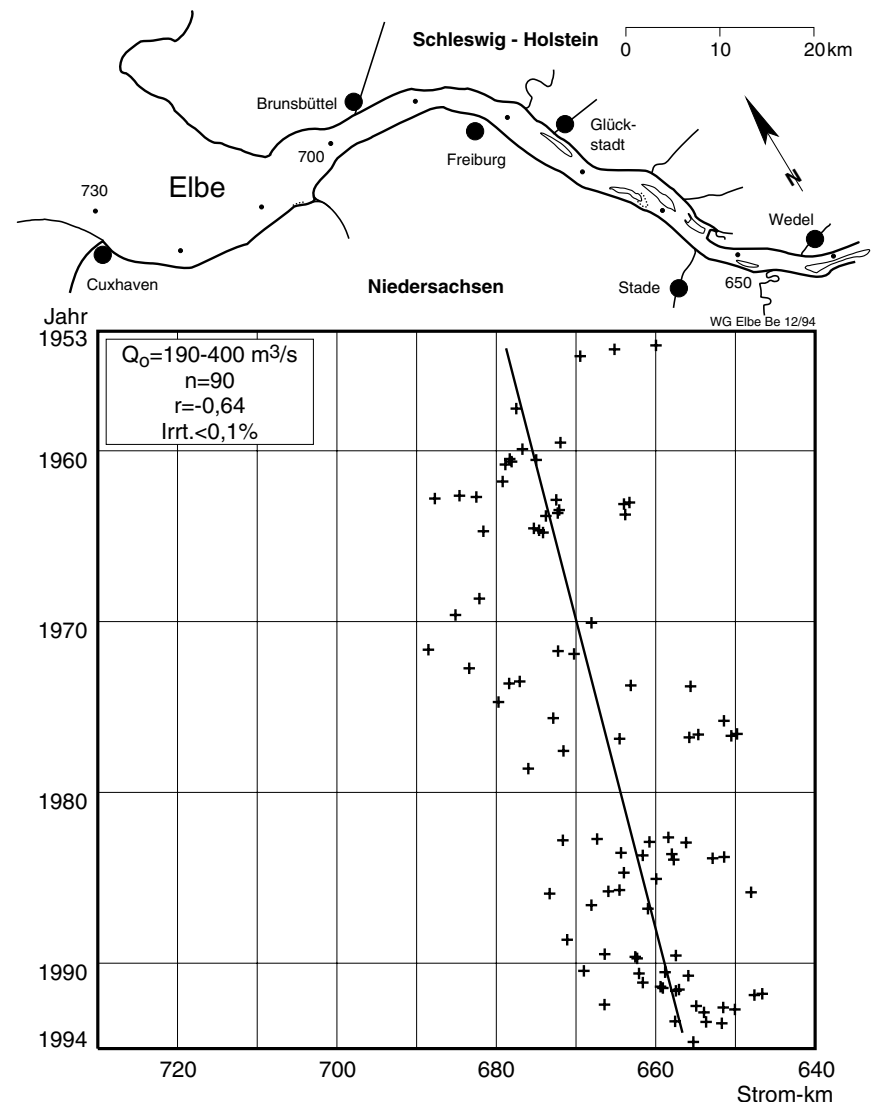


Abb. 3 Zeitliche Entwicklung der Lage der oberen Brackwassergrenze (1h vor T<sub>nw</sub>) bei niedrigen Abflüssen  
Development of the location of the upper limit of the brackish water in the time serie

Die Abb. 3 zeigt die zeitliche Entwicklung der Lage der oberen Brackwassergrenze bei niedrigen Abflüssen, die für den Sommer typisch sind. Die Zeit wurde unüblicherweise auf die y-Achse gelegt, um den Bezug zwischen der Lage und der Karte herstellen zu können.

Die Jahre von 1989 bis 1993 waren im Elbeeinzugsgebiet sehr trocken. Man könnte annehmen, daß diese Serie trockener Jahre maßgeblich die Lage der Brackwasserzone beeinflusst hat. Anfang 1994 wurde die Serie durch 3 Hochwasserwellen von jeweils über 2 000 m<sup>3</sup>/s unterbrochen. Die Brackwassergrenze lag in dieser Zeit unterhalb von Strom-km 700. Mit fallendem Abfluß wanderte die Brackwassergrenze wieder stromauf, bis genau in den Bereich, der auch in den trockenen Vorjahren erreicht wurde. Dieses zeigt der letzte eingezeichnete Wert vom 16.8.1994 bei Strom-km 655. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Lage maßgeblich nur von dem Abfluß der letzten Wochen beeinflusst wird. Der für diese Auswertung gewählte Zeitraum von 3 Wochen scheint in der richtigen Größenordnung zu liegen.

In dem Zeitbereich der Auswertung wurden große morphologische Änderung in der Tideelbe vorgenommen. Das Fahrwasser der Unterelbe wurde von 1957 bis 1978 für die Schifffahrt stufenweise von 10 m auf 13,5 m unter MT<sub>nw</sub> vertieft. Es kann jedoch nicht erwartet werden, daß sich die Ausbaustufen in den Werten abbilden, weil grundsätzlich nach dem Abschluß von Ausbauarbeiten, während eines „morphologischen Nachlaufs“, kleinere Verschiebungen stattfinden, bis sich das Flußbett an die veränderten Strömungsverhältnisse angepasst hat. Insgesamt ist in dem betrachteten Zeitraum ein stromauf gerichteter Trend der Lage der oberen Brackwassergrenze bei niedrigen Abflüssen zu beobachten. Dieser Trend ist statistisch abgesichert.

### Zusammenfassung

Für die Bestimmung der oberen Brackwassergrenze wurde eine Konvention festgelegt und nach dieser Konvention die Lage der oberen Brackwassergrenze aus Chlorid-Längsprofilmessungen der Elbe aus den Jahren 1953 bis 1994 ermittelt. Die starke Abhängigkeit der Lage vom Oberwasserabfluß wurde dargestellt. Die obere Brackwassergrenze variierte in einem Bereich von fast 80 km. Die zeitliche Entwicklung der Lage bei mittleren und hohen Abflüssen ergab keinen statistisch abgesicherten Trend. Bei niedrigen Abflüssen hingegen hat sich in dem beobachteten Zeitraum von 1953 bis 1994 die Lage der oberen Brackwassergrenze um ca. 5-20 km stromauf verlagert. Es besteht wahrscheinlich ein Zusammenhang mit dem in diesem Zeitraum erfolgten Ausbau der Unterelbe von 10 m auf 13,5 m unter MTnw.

### Summary

A convention was set for the upper limit of the brackish water and was used for determining the location of the upper limit out of chloride profiles of the Elbe River in the years 1953 to 1994. A strict relation between the location of the upper limit and the fresh water discharge was shown. The location varied in a range of nearly 80 km. The time series at mean and high fresh water discharge did not show a statistical trend. At low fresh water discharge however the location of the upper limit of the brackish water had moved upstream about 5-20 km during the period of the years 1953 to 1994. A link to the deepening of the Elbe estuary from 10 m to 13.5 m below mean low tide during this period was pointed out.

### Literaturverzeichnis

- [1] Rohde, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtstraße - Hannover 1971. (Mitteilung des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 36, Eigenverlag)
- [2] Dahl, H.-J. und H. Heckenroth: Ornitho-ökologische Untersuchungen zu Baggerarbeiten in der Unterelbe und zu geplanten Aufspülungen im Bereich Brammerbank. - Hannover 1983 (Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen - Beiheft, Heft 6, S. 114)
- [3] ARGE Elbe: Gewässerökologische Studie der Elbe - von Schnackenburg bis zur See - Hamburg 1984. (Hrsg.)
- [4] Siefert, W. 1991 (zitiert in [9])
- [5] Kühl, H.: Oceanograph. Mar. Biol. Ann. Rev. 10 (?16), 1972. S. 225-309
- [6] Riedel-Lorjé, J.-C., U. Kohla, B. Vaessen: Das Vordringen ausgewählter Bodentiere im Elbe-Ästuar als Indikation für eine Verlagerung der oberen Brackwassergrenze - (DGM eingereicht)
- [7] Caspers, H.: Vorschläge einer Brackwassernomenklatur („The Venice System“) - 1959 (Int. Rev. ges. Hydrobiol. 44, S. 313-316)
- [8] Remane, A. und C. Schlieper: Biology of Brackish Water - 1971 (In Thienemann, A: Biology of Brackish Water - Die Binnengewässer 25, S. 1-372)
- [9] Riedel-Lorjé, J.-C., N. Möller-Lindenhof, B. Vaessen: Salzgehalts- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe - Hamburg 1992. (ARGE Elbe Hrsg.)
- [10] ARGE Elbe: Schwermetalldaten der Elbe - von Schnackenburg bis zur See - Hamburg 1988, (S. 147, Hrsg.)
- [11] Wibel, F.: Die Schwankungen im Chlor-Gehalte und Härtegrad des Elbwassers bei Hamburg - Ein Beitrag zum Studium der Flußwässer und ihrer Verunreinigungen - Hamburg 1887. (Sonder-Abdruck aus der Festschrift zur Feier des 50jährigen Bestehens des Naturwissenschaftlichen Vereins in Hamburg. Band X der „Abhandlungen aus dem Gebiete der Naturwissenschaften“).

Weitere Literatur zu dem Thema „Brackwasser“ ist in [9] zu finden.

Anschrift des Verfassers:  
Ing. grad. Michael Bergemann  
in der Wassergütestelle Elbe  
Neßdeich 120  
21129 Hamburg