ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR DIE REINHALTUNG DER ELBE
DER LÄNDER HAMBURG – NIEDERSACHSEN – SCHLESWIG-HOLSTEIN
- ARGE ELBE -

Salzgehalts- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe

Wassergütestelle Elbe
Juli 1992

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR DIE REINHALTUNG DER ELBE
DER LÄNDER HAMBURG – NIEDERSACHSEN – SCHLESWIG-HOLSTEIN
- ARGE ELBE -

Salzgehalts- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe

ARGE ELBE

Der Minister für Natur, Umwelt und
Landesentwicklung
des Landes Schleswig-Holstein
Grenzstraße 1 - 5
2300 KIEL 14

Die Niedersächsische Umweltministerin
Archivstraße 2
3000 HANNOVER 1

Freie und Hansestadt Hamburg
Umweltbehörde Hamburg
Steindamm 22
2000 HAMBURG 1

Autoren

Dr. Jeannette Cornelie Riedel-Lorjé
Dr. Nico Möller-Lindenhof
Bernd Vaessen

Juli 1992

V O R W O R T

Mit dem Sonderbericht "Salzgehalts- und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe" stellt die Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe der Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (ARGE ELBE) erstmalig einen umfassenden Überblick über die hydrobiologische Situation zur Lage der Brackwassergrenze im Elbeästuar dar. Ausgehend von einer umfangreichen systematischen Literaturrecherche mit Auswertung der Elbe-Literatur seit 1863 werden frühere Daten als auch die seit Beginn der ARGE ELBE ermittelten Befunde ausgewertet. Durch die vielfältigen anthropogenen Veränderungen der Strommorphologie in den vergangenen Jahrzehnten hat sich eine weiträumige Verschiebung der Brackwassergrenze elbeaufwärts ergeben. Während der Bereich Lühesand-Nord in oberwasserreichen Jahren in der unteren Süßwasserzone liegt, verlagert sich die obere Grenze der Brackwasserzone als auch die Trübungszone in Zeiten mit niedrigem Oberwasserabfluß deutlich bis in den Bereich Lühesand. Zukünftig ist Lühesand-Nord anstelle von Glückstadt allgemein als Bezugsort für die obere Brackwassergrenze anzusetzen.

Der Vorsitzende der ARGE ELBE

(Kesting)

Der Leiter der Wassergütestelle Elbe

(Dr. Reincke)

Die vorliegende Studie widmet die Erstautorin

ihrem Doktorvater

Herrn Prof. Dr. H. Caspers

Ehemalig

Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaften, Hamburg

zum Beginn seines 80. Lebensjahres am 1. November 1992.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1
2. Entstehung von Brackwasser 3
3. Salzgehalts- und Chloridverhältnisse der Elbe in der Vergangenheit 5
4. Brackwasserregionen der Elbe 14
5. Definition der oberen Brackwassergrenze 17
6. Hydrologische Bedingungen für die Lage der oberen Brackwassergrenze 21
   6.1 Tide 24
   6.2 Oberwasserabfluß 35
   6.3 Salzfracht 42
   6.4 Zufall der Probenahme 46
7. Biologie 49
   7.1 Allgemeines 49
   7.2 Indikatorarten 57
8. Schwebstoffe 67
   8.1 Entstehung und Zusammensetzung 69
   8.2 Hydrographie und Schwebstofftransport 75
   8.3 Lage des Trübstoffmaximums 88
9. Lage der oberen Brackwassergrenze im Ästuar 98
10. Diskussion 105
   10.1 Rechtsvorschriften 105
   10.2 Konsequenzen der Definitionen der oberen Brackwassergrenze für ihre Lage 106
   10.3 Abschließende Betrachtungen 107
11. Zusammenfassung 120
12. Literatur 122
   Anhang

Unseren ganz herzlichen Dank möchten wir denen aussprechen, die mit Ihrer Hilfe in Form von Anregungen und Kritik, Abbildungen und Daten zu dieser Studie beigetragen haben:

Dipl. Ozean. R. Annutsch[1], Bio. Ing. M. Bergemann[2],
Dipl. Geol. M. Bernhard[3], Dr. U. Brockmann[4], R. Dierking[5],
Dr. K. Duwe[6], U. Ehrhorn[2], Dr. H.-U. Fanger[7], Dr. G. Flügge[8],
H.D. Franke[9], Dr C. Gätje[10], Dr. M. Gaul[1],
Dipl. Biol. T. Gaumert[2], D. Glaser[5], Dr. N. Greiser[11],
R.-A. Herrmann[12], Dr. J. Kappenberg[7], Prof. Dr. H. Kausch[5],
T. Kielau[8], Prof. Dr. L. Kies[11], Dipl. Biol. H.-J. Krieg[13],
T. Langmarck[14], Prof. Dr. H. Mann[15], Prof. Dr. W. Nellen[5],
Dr. I. Nöthlich[16], Dipl. Biol. J. Oellerich[17],
Dr. K. Pfeiffer[6], Dr. H. Reincke[2], Prof. Dr. W. Siefert[17],
Dr. R. Thie1[5], W. Vagts[3], Dr. H. Wismar[18].

---

1 Bundesanstalt für Schiffahrt und Hydrographie, Hamburg (BSH)
2 Wassergütestelle Elbe der Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (ARGE ELBE)
3 Wasser- und Schiffahrtsamt, Hamburg (WSA)
4 Sonderforschungsbereich 327 Tide-Elbe, Universität Hamburg (SFB)
5 Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaften, Universität Hamburg (IHF)
6 Hydromod, Wedel
7 GKSS-Forschungszentrum Geesthacht
8 Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg (BAW)
9 Wasserwirtschaftsamt, Stade (WWA)
10 Nationalparkamt für das Schleswig-Holsteinische Wattenmeer, Tönning (NPA)
11 Institut für allgemeine Botanik, Universität Hamburg
12 Ökolimna, Burgwedel
13 Umweltbehörde, Hamburg
14 Amt für Land- und Wasserwirtschaft, Itzehoe (ALW)
15 Bundesforschungsanstalt für Fischerei, Hamburg (BUFO), emeritiert
16 Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
17 Strom- und Hafenbau (Behörde für Wirtschaft und Verkehr), Hamburg
18 Wasser und Schiffahrtdirektion Nord

Autoren

Dr. J. C. Riedel-Lorjé[l],
Dr. N. Möller-Lindenhof[2],
B. Vaessen[1]

1 Institut für Frischwasser- und Abwasserbiologie, Rainvilleterrasse 9, 2000 Hamburg 50
2 Wassergütestelle Elbe, Focksweg 32a, 2103 Hamburg 95

1. Einleitung

Das Elbe-Ästuar ist durch eine weitreichende Brackwasserzone mit einem hohen Gehalt an Schwebstoffen und Plankton gekennzeichnet, die eine starke Trübung verursachen.

"Nach REMANE ist die Brackwassergrenze ein lebensfeindlicher Raum und bildet eine Grenze, die in der Jetztzeit - von verschwindenden Ausnahmen abgesehen - weder von marinen noch von limnischen Pflanzen und Tieren überschritten werden kann" HILTERMANN (1966). Die Lage dieser Grenze zwischen Süß- und Brackwasser unterliegt Lang- und Kurzzeitschwankungen.

Die obere Brackwassergrenze wurde zwischen 1937 und 1972 in der Elbe für den Bereich von Glückstadt angesetzt. In den letzten Jahren hat sich die obere Brackwasserzone und das Trübstoffmaximum offensichtlich elbeaufwärts verschoben. Gleichzeitig haben regelmäßige Befischungen mit dem Hamen vor Lühesand-Nord in Phasen extrem niedriger Oberwasserabflüsse das Auftreten des Herings und der Nordseekrabbe in diesem Gebiet belegt. Eine Überprüfung der Lage der oberen Brackwassergrenze und des Trübstoffmaximums erweist sich als erforderlich.

Neben Verschiebungen gibt es heute eine Reihe neuer Definitionen der oberen Brackwassergrenze, deren Folge eine uneinheitliche Beschreibung und Festlegung dieser Grenze ist. Daher ist es für die Zukunft nötig die gültige Definition anzugeben. Die obere Brackwassergrenze ist nicht nur für die biologischen und hydrologischen Fragestellungen von Bedeutung. Sie findet auch Anwendung in einer Reihe von Rechts- und Verwaltungsvorschriften und ist für wasserrechtliche Genehmigungen sowie im Rahmen der Beweissicherung von großer Bedeutung.

In dieser Studie soll versucht werden, die obere Brackwassergrenze für das Elbe-Ästuar eindeutig festzulegen.

2. Entstehung von Brackwasser

In der Elbe (vgl. Abb. 2.1) mischen sich im Mündungsbereich Flußwasser und Nordseewasser. Ein derartiges Eindringen von Meerwasser in ein Gewässer führt zur Entstehung von Brackwasser.

Es gibt unterschiedliche Brackwasser-Typen: das o.g. marine (thalassogene) Brackwasser und solches, das z.B. geologischen Salzdepots entstammt und als nicht marines oder binnenländisches (athalassogenes) Brackwasser bezeichnet wird (vgl. hierzu u.a. REMANE & SCHLIEPER, 1971). Süßwasser der humiden gemäßigten Zonen, auch als Carbonat-Gewässer beschrieben, und marine Bereiche, Chlorid-Gewässer, werden aufgrund der unterschiedlichen lonenzusammensetzung (vgl. Tab. 2.1) von speziellen Lebensgemeinschaften besiedelt (vgl. Kap. 7).

Tab. 2.1: Ionenzusammensetzung im Meerwasser, in verschiedenen Brackwässern und in unbelastetem Flußwasser

	1	2	3	4	5
Ion mg/l	Meer	Elbe	Elbe	Fluß	Kali
Na^{+}	10.750	97	3.940	10-15	5.447
Ca^{++}	416	85	211	30-70	
K^{+}	390	13	1	2-4	
Cl^{-}	19.345	234	9.003	20-50	$3*10^{8}$
$SO4^{--}$	2.701	170	1.238	30-60	32.240

1) Meerwasser bei 35 ‰ (KALLE & DIETRICH, 1965)
2) Elbewasser von Strom-km 630,1 = Hamburg-Teufelsbrück; Mittelwert vom Jan., Mai, Aug. und Dez. 1990 (ARGE ELBE, 1990)
3) Elbewasser von Strom-km 727,0 = Cuxhaven; Mittelwert vom Jan., Mai, Aug. und Dez. 1990 (ARGE ELBE, 1990)
4) normales unbelastetes Flußwasser (FLÜGGE et al., 1989)
5) Kaliendlauge (ALBRECHT, 1954)

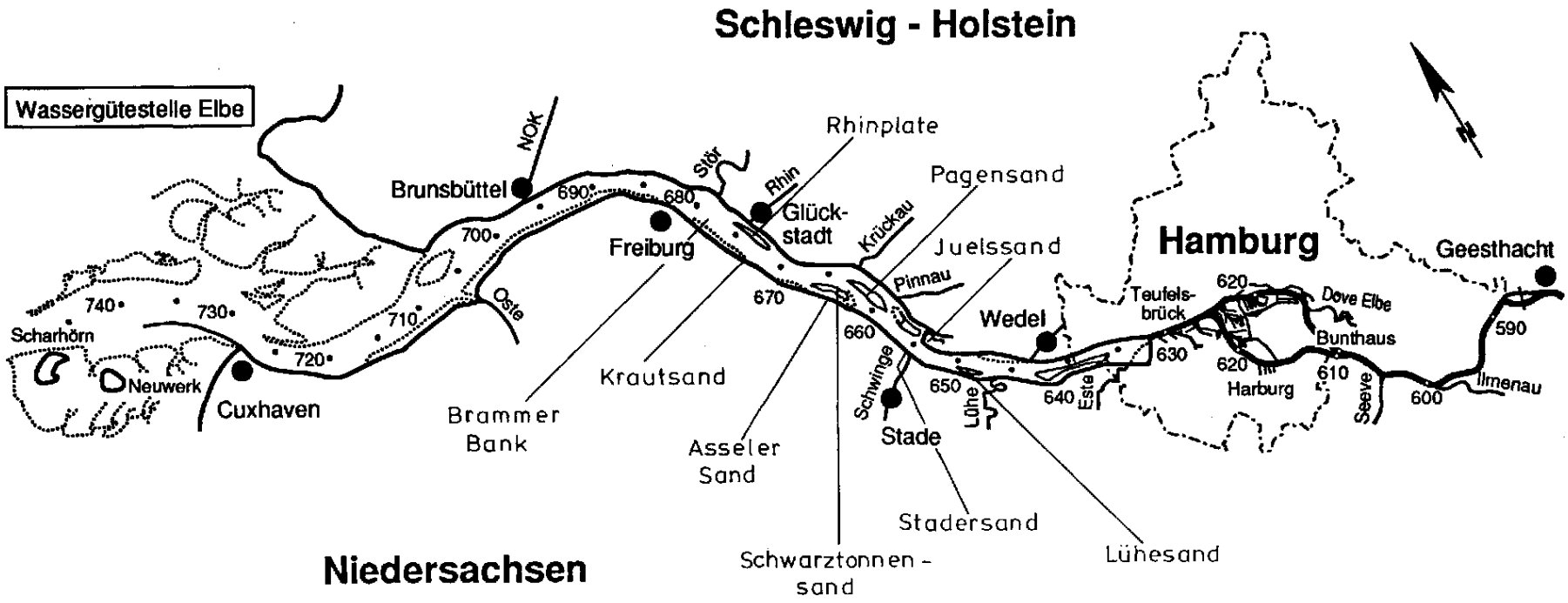


Abb. 2.1: Die Unterelbe zwischen Geesthacht und Scharhörn
(verändert nach ARGE ELBE, 1992, unveröffentlicht)

3. Salzgehalts- und Chloridverhältnisse der Elbe in der Vergangenheit (aus RIEDEL-LORJÉ & GAUMERT, 1982)

Der Salzgehalt der Elbe wird durch natürlichen und anthropogenen Eintrag bestimmt. Die natürlichen Werte liegen im limnischen Bereich bei etwa 20 - 30 mg Chlorid/Liter (vgl. VOLK, 1908).
Erste biologische Untersuchungen in der Unterelbe wurden 1858-1860 von KIRCHENPAUER (1862) durchgeführt. In seiner Arbeit über "Die Seetonnen in der Elbemündung" beschrieb er den reichen Aufwuchs zwischen dem Schaarhörn Riff (Strom-km 745) und St. Margarethen (Strom-km 689):

"Der eigentliche Zweck der ganzen Arbeit war nicht genau vorher bestimmt. Handelte es sich um die Bereicherung einer Sammlung, so war derselbe schnell erfüllt, denn die Ausbeute ergab, so endlos auch die Zahl der Individuen war, nur eine geringe Anzahl von Arten: anderthalb Dutzend animalischer Species und etwa zweimal so viel vegetabilischer. In dieser Beziehung war die Erwartung getäuscht. Aber abgesehen davon, daß es doch immer auch der Mühe wert schien, einen derartigen Beitrag zur Kenntnis der submarinen Flora und Fauna der Elbmündung zu erhalten und zu liefern, schien es von besonderem Interesse das Verhalten derselben gerade dort zu beobachten, wo die Einwirkungen maritimer Einflüsse ganz allmählich denen des Flusses Platz machen. Es ist ja bekannt, dass gewisse Thiere und Pflanzen ausschließlich dem süssen Wasser, andere ausschließlich dem Meere angehören. Viele der Letzteren aber auch mit einem Gemisch von Beiden, dem Braakwasser, vorlieb nehmen; zu ermitteln war, ob nicht im Braakwasser selbst noch Abstufungen sich finden.
Der District der Elbe, dessen Tonnen untersucht wurden, enthält nur Salzwasser; trinkbar wird das Elbwasser erst in der Gegend von Glückstadt; der Salzgehalt ist aber auch in jenem District verschieden; er nimmt natürlich ab, je mehr man sich stromaufwärts von der offenen See entfernt. Hat diese Abnahme einen Einfluß auf die Vegetation und die animalische Bevölkerung? Es ist ja immerhin möglich, dass die ganze Reihe der Seetonnen dieselben Organismen beherbergte, oder doch nur zufällige Verschiedenheiten aufwies, nämlich so dass ungefähr dieselben Thiere und Pflanzen bei Neuwerk wie bei Brunsbüttel vorkämen, wenn auch andere auf den dazwischen liegenden Tonnen gefunden würden. Ergab sich dies, so hatte damit die ganze Untersuchung ihr hauptsächliches Interesse verloren. Mit Spannung wurde deswegen, während eine Tonne nach der andern bald von unten bald von oben herangebracht und deren Bewohnerschaft registriert ward, dem endlichen Abschluss entgegen gesehen - das Resultat war ein anderes als das eben angedeutete.
Soweit bis jetzt die Tonnen untersucht wurden - im Ganzen 123 Tonnen - kann als feststehend angenommen werden, nicht nur dass ein Unterschied stattfindet, sondern auch dass derselbe kein bloss zufälliger

ist, dass er vielmehr nach der grösseren oder geringeren Entfernung von der See sich richtet, sich gewissermassen abstuft. Es liessen sich bald für das Vorkommen einzelner Species bestimmte Grenzen feststellen, Grenzen bis zu welcher die eine oder die andere Art in dem Strom hinaufsteigt, wie es scheint aber nicht umgekehrt; wenigstens liess sich nicht so bestimmt angeben, bis zu welcher Grenze eine vielleicht mehr dem Brackwasser angehörige Species der See sich nähert. Durch jene ersterwähnten Grenzen aber liess sich der ganze District in gewisse Regionen eintheilen und als zweckmässigster Eintheilungsgrund bot sich von selbst das Vorkommen gewisser Hydroid-Polypen dar, weil diese an den meisten Tonnen am augenfälligsten und in grösster Menge sich finden und zwar an fast allen Tonnen derselben Region dieselben Arten, die sich also als für die Region charakteristisch bezeichnen lassen. Solcher Regionen wurden demnach 4 angenommen, welche in der Richtung stromaufwärts so folgen:

I. Region der *Sertularia argentea* LX.
II. Region der *Tubularia Larynx* ELLIS.
III. Region der *Laomedea gelatinosa* LX.
IV. Region der *Cordylophora Albicola* (n. sp.)

was indessen, wie ausdrücklich wiederholt werden muss, so zu verstehen ist dass die Sertularia nicht in der Region der *Tubularia*, die *Tubularia* nicht in die Region der *Laomedea* hinaufsteigt, wohl aber umgekehrt die *Laomedea*, die *Tubularia* auch in den weiter unten belegenen Regionen vorkommen (wenngleich seltener)."

Bemerkenswert ist, daß die von KIRCHENPAUER beschriebene Lebensgemeinschaft in der Elbe unterhalb von Brunsbüttel mit der heute weiter elbeaufwärts anzutreffenden übereinstimmt: der von KIRCHENPAUER beschriebenen Art *"Balanus crenatus"* entspricht wahrscheinlich *B. improvisus; "Cordylophora Albicola" C. caspia* und *"Gammarus locusta" - Gammarus zaddachi.*
Aufgrund des unterschiedlichen Salzgehaltes und der Besiedlung teilte KIRCHENPAUER die Unterelbe in eine "vom Meer beeinflußte Region" und einen Süßwasserbereich ein. Nach seinen Beobachtungen wies die Brackwasserzone, deren obere Grenze er zwischen Böschrücken und Oste annahm, eine Artenarmut auf. Außerdem stellte er fest, daß an den Tonnen im Übergangsbereich vom Brackwasser zum Süßwasser eine vertikale biologische Zonierung ausgebildet war: Auf den Tonnen selbst setzte sich ein Bewuchs aus überwiegend limnischen Arten zusammen, dagegen auf den Ankerketten bevorzugt marine Organismen, z.B. *Tubularia larynx*. Diese vermuteten Salzgehaltszonierungen aufgrund der Verteilung von Organismen konnten im folgenden Jahr durch Salzgehaltsanalysen bestätigt werden: Messungen von LORENZ (1863) ergaben, daß von See her einströmendes salzhal-

tiges Wasser als weitreichender Keil an der Flußsohle bis etwa Glückstadt gelangte (vgl. Kap. 8.2). Auch er beschrieb das Phänomen der vertikalen Tonnenbesiedlung im Bereich zwischen Brunsbüttel und Glückstadt (zur Wirkung des Salzgehaltes und der Gezeiten auf Organismen in der Elbe vgl. auch DAHL, 1893; HENTSCHEL, 1923 und BROCKMANN, 1929).

1888-1889 beobachtete DAHL (1893) "die Thierwelt der Unterelbe": An 179 Stationen zwischen Hamburg und dem Feuerschiff ermittelte er 152 Arten im freien Wasser, Benthos und Aufwuchs: Mollusken, Bryozoen, Arthropoden, Crustacea, Vermes, Echinodermata und Coelenterata sowie Fische und andere Vertebraten. DAHL wies auf das Vorkommen einer reichen Molluskenfauna hin und erwähnte besonders die Dreikantmuschel: "auf dem Holzwerk der Schleuse von Colmar" (Kollmar, Strom-km 665) "befanden sich nur Dreissena polymorpha". Nach seinen Feststellungen besiedelten Hydroidpolypen die Hartsubstrate des gesamten Unterelbegebietes, wobei auf *Cordylophora caspia* im Salzwasser *Tubularia larynx* folgte. "Gamarus locusta" (nach SEXTON, 1912 und 1942, identisch mit G. z. *zaddachi) trat* massenhaft auf:

"Der Flohkrebs ist von Hamburg bis in die Nordsee hinein eines der gemeinsten Tiere und ist als Fischnahrung von ganz besonderer Bedeutung".

Aus DAHL's Stationslisten ergibt sich eine Zonierung der Arten entsprechend der jeweiligen Halinitätssituation (vgl. auch BUBENDEY, 1897). Er bestätigte damit die von KIRCHENPAUER (1862) festgestellte Abhängigkeit der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft vom Salzgehalt (vgl. hierzu auch SCHUCHT, 1904; KOLUMBE, 1931). Darüber hinaus stellte DAHL die Hypothese auf, nach der "der Salzgehalt den Fischen im Brackwasser als orientierungshilfe dienen könne."

1884 untersuchte LENTZ (1888) sehr umfangreich die Salzgehaltssituation bei Brunsbüttel. KÜHL (1972) zeigte in einer Übersicht alter Elbeuntersuchungen, daß die Lage der oberen Brackwassergrenze bei Glückstadt gelegen hat (vgl. Abb. 3.1).

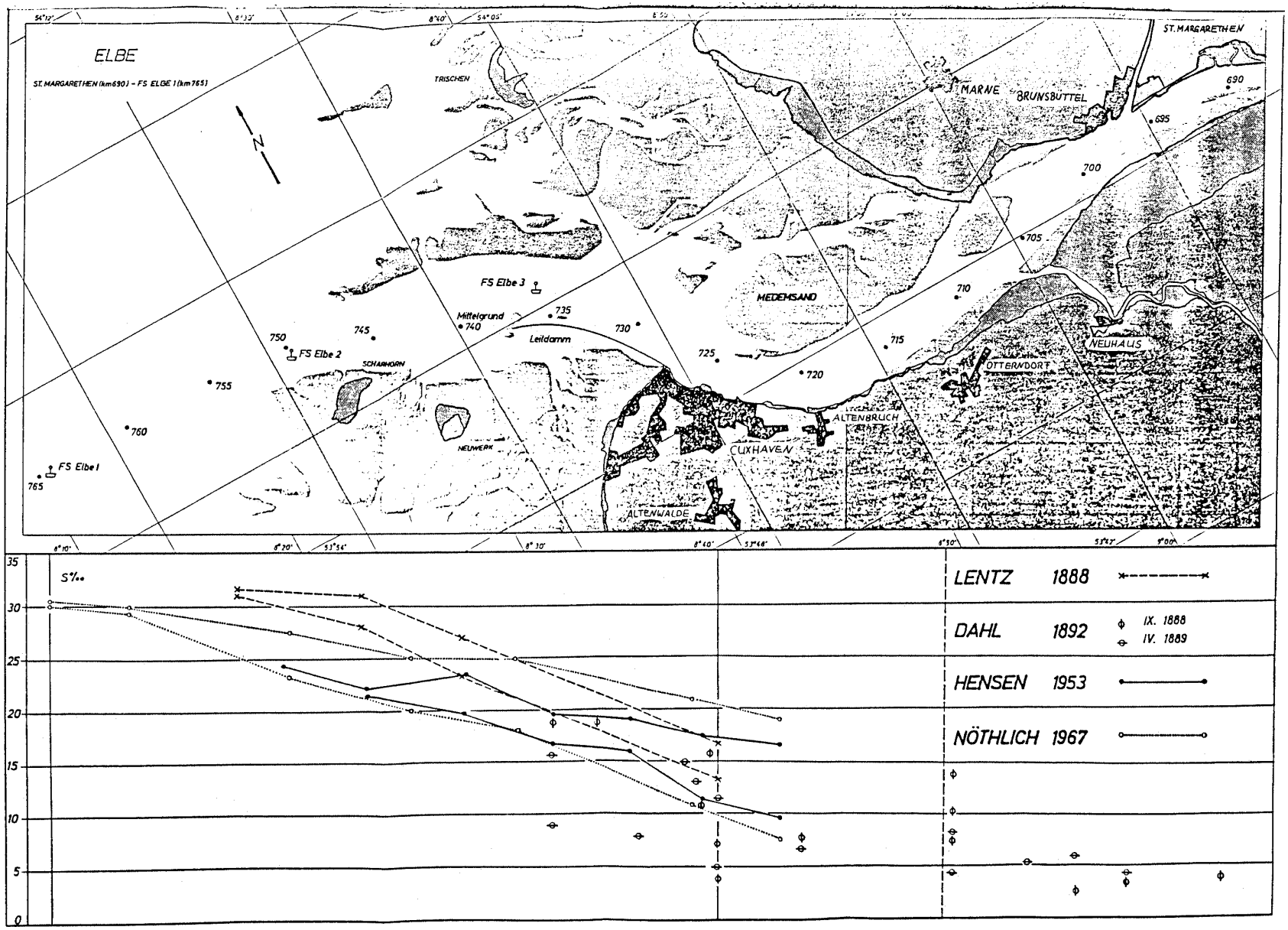


Abb. 3.1a: Lage der oberen Brackwassergrenze 1861-1967 (KÜHL, 1972)

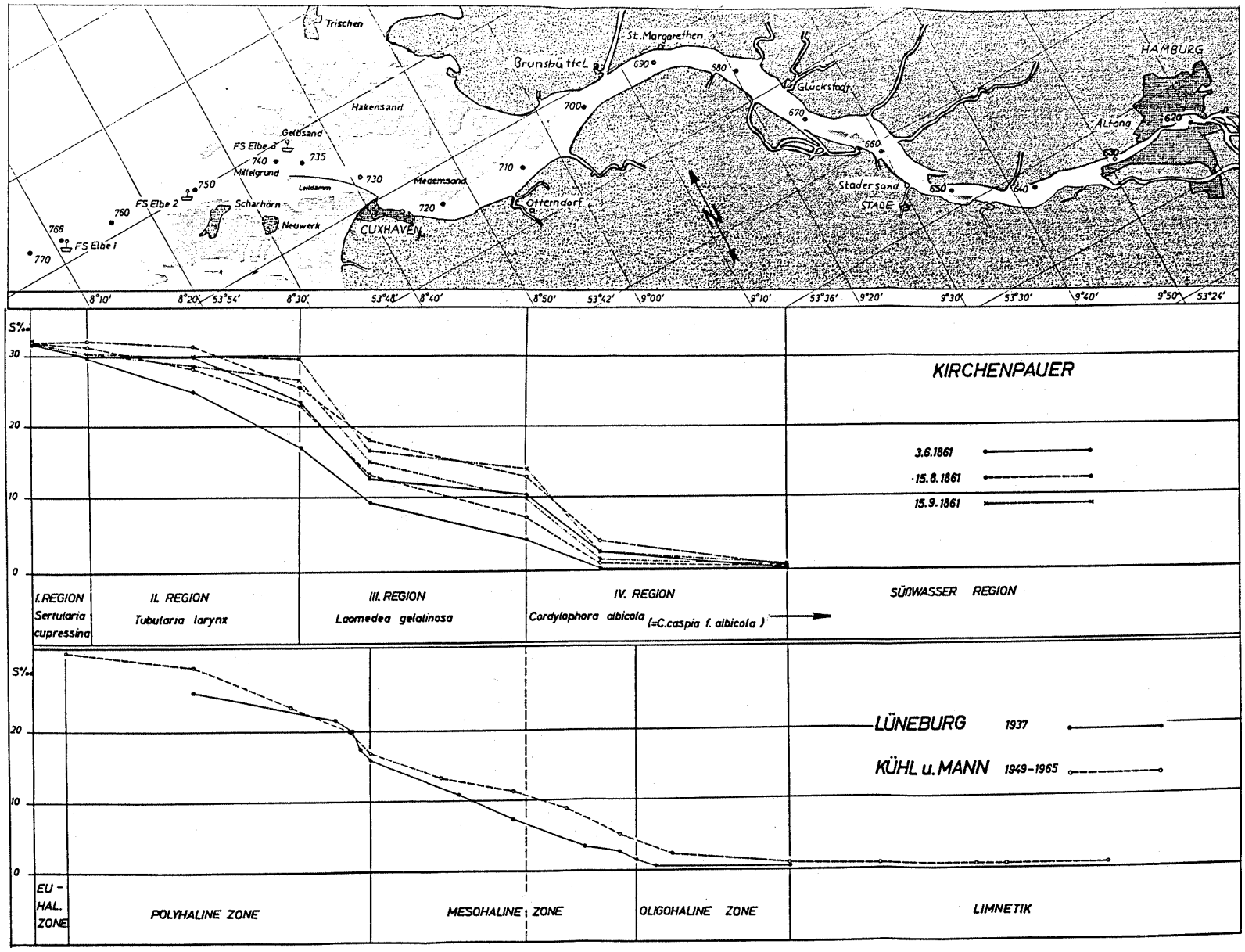


Abb. 3.1b: Lage der oberen Brackwassergrenze (KÜHL, 1972)
Regionen nach REDECKE (1922) und LÜNEBURG (1939)

Während KIRCHENPAUER (1862) und LORENZ (1863) die obere Brackwassergrenze bei Glückstadt bzw. St. Margarethen (ca. Strom-km 689) festsetzten, gab DAHL (1893) aufgrund des Einflusses der unterschiedlichen Oberwassermenge in der Elbe einen Schwankungsbereich der Brackwassergrenze zwischen Brunsbüttel und Glückstadt an. VOLK (1906) beobachtete bereits im trockenen Sommer 1904 ein Vordringen der oberen Brackwassergrenze bis kurz unterhalb von Hamburg. 1911 müssen ähnliche Verhältnisse geherrscht haben (BONNE, 1912a; FICK, 1943). THIEMANN (1934) beschrieb die obere Brackwassergrenze sehr weit elbeabwärts (vgl. Abb. 3.2). Autoren, welche nach 1936 Untersuchungen durchführten, stellten die obere Brackwassergrenze bis 1976 überwiegend bei Glückstadt fest (u.a. KÜHL & MANN, 1953; CASPERS, 1958; vgl. Kap. 4, 5 und 10.3).

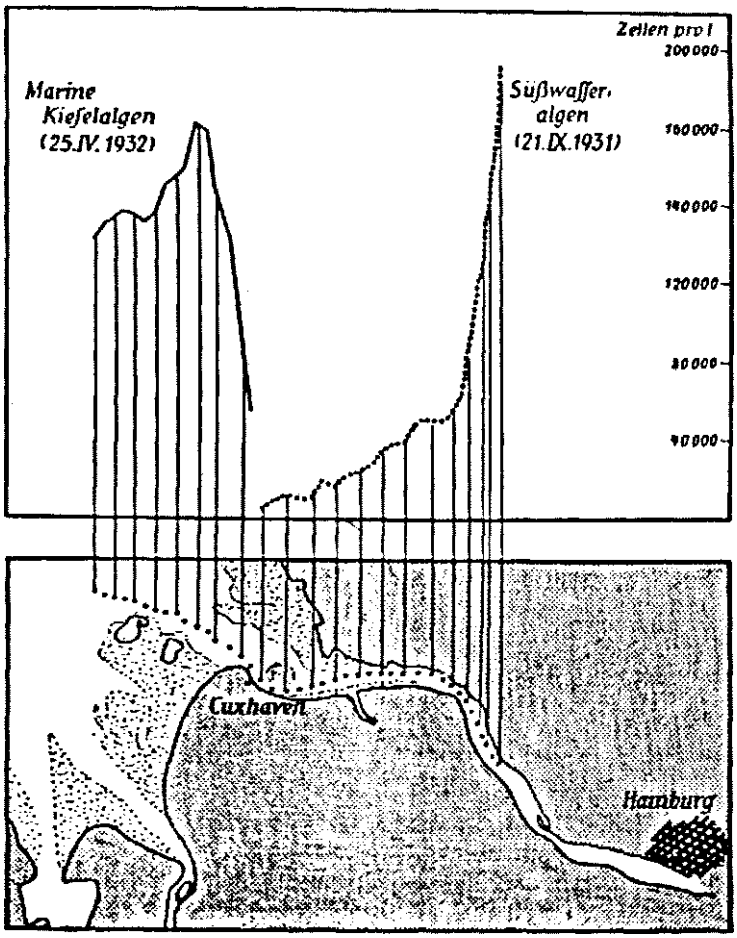


Abb. 3.2: Verteilung von marinen Kieselalgen und Süßwasserphytoplankton im Elbe-Ästuar 1931/32 (THIEMANN, 1934)

Seit der industriellen Revolution wurde die natürliche Salzkonzentration (WIBEL, 1887) durch Einleitungen der Montanindustrie in die Oberelbe aufgestockt (ANONYMUS, 1892, 1894a,b, 1900; KRAUT, 1884, 1886, 1888, 1890, 1899; KRAUT & LAUENHARDT, 1888; BONNE, 1912b). VOLK (1908) schilderte die diesbezügliche Entwicklung folgendermaßen:

"Aus einer großen Reihe älterer Untersuchungen des Elbwassers bei Hamburg, von 1852 bis zum Beginn meiner eigenen Feststellungen, gewinnt man übrigens - abgesehen von zeitweiligen Schwankungen - in der jahrzehntelang beobachteten andauernden Steigerung des Chlorgehaltes gewisse Anhaltspunkte für das Einsetzen und die Entwicklung der Kaliindustrie im Saalegebiet. Vor 1871 war das Elbwasser bei Hamburg normal salzig, sein natürlicher Chlorgehalt war lediglich von der Menge der atmosphärischen Niederschläge abhängig und bewegte sich nach den aus der Zeit von 1852 bis 1870 vorhandenen Analysen zwischen 18,5 und 29,7 mg Chlor im Liter. 1871 fand ULEX dagegen schon 59,3, 1875 SCHORER 85,2, 1887 WIBEL 116,0, WOHLWILL 1889 bereits 218,4 und 1892 gar 483,0 mg. Durch die Wasserhaltung der Mansfelder Gruben in Verbindung mit den Staßfurter u.a. Laugen stieg plötzlich im Januar 1893 der Chlorgehalt auf 693,1 mg, welche einer Salzmenge entsprechen, die sich um so mehr durch den Geschmack des Wassers geltend macht, als es sich hierbei nicht nur um Kochsalz, sondern auch um einen namhaften Gehalt an Chlormagnesium handelt. Nach einem rapiden Fallen im Frühjahr stieg der Chlorgehalt im August desselben Jahres noch einmal auf 605,1 mg, doch wurden meines Wissens solche Zahlen seitdem nicht wieder beobachtet, obwohl die Elbe von der Einmündung der Staßfurter usw. Laugen abwärts dauernd als abnorm salzig und überhaupt als der salzhaltigste Strom Europas zu gelten hat. ... Ein Vordringen des Chlorgehaltes aus der Brackwasserregion bis in die Gegend von Hamburg ist ausgeschlossen, ja selbst in der Trockenperiode 1904 konnte ich nicht einmal bei dem 17 km stromabwärts gelegenen Schulau auf chemischem Wege ein Vorrücken des Brackwassers bis zu dieser Stelle nachweisen - bei Schulau 367,2 mg Chlor gegen 157,5 in der gleichen Zeit (September) des folgenden normalen Jahres."

Bereits vor der Jahrhundertwende wurden in der Öffentlichkeit Klagen über die zunehmende Verunreinigung laut; bald nahm die Versalzung des Elbewassers derart zu, daß sich das Wasser vielerorts nicht mehr zum Trinken eignete (RUBNER, 1895; OHLMÜLLER, 1896; HANAMANN, 1898). KLEES (1896) veröffentlichte hierzu im "Hamburger Correspondenten" den Bericht einer Sitzung des Deutschen Reichstages am 1. Januar 1896 mit der Bemerkung, daß "das Magdeburger Elbewasser durch die Abflüsse der Fabriken total für den menschlichen Gebrauch unbrauchbar" sei.

Ein Zeitungskorrespondent (ANONYMUS, 1892) schilderte drastisch die Mißstände:

"Zur Zeit ist das Wasser der Elbe und das aus derselben geschöpfte Wasser unseres Wasserwerkes trotz der guten Sandfiltration so stark versalzen, schmeckt so schlecht und scharf, daß es ohne Ekel überhaupt nicht getrunken werden kann. Kaffee und Thee, aus Leitungswasser zubereitet, sind ebenfalls ungenießbar; Hülsenfrüchte können mit diesem Wasser kaum noch weich gekocht werden. Infolge dessen ist unter unserer Einwohnerschaft ein Mangel an brauchbarem Wasser ausgebrochen, wie er größer gar nicht gedacht werden kann."

Seit der Jahrhundertwende wurde vom Hygienischen Institut in Hamburg regelmäßig der Chloridgehalt der Elbe bestimmt und als erhöht bewertet (vgl. 3. Bericht des Hygienischen Instituts, KNISTER, 1907). Die Salzbelastung blieb in den Folgejahren etwa gleich (u.a. WENDEL, 1911).

Als sich trotz vieler Einsprüche die Verhältnisse nicht besserten, riefen Elbefischer zu einer Protestversammlung gegen die weitere Ansiedlung der Kali-Industrie auf, da diese den Einzugsbereich der mittleren Elbe und ihrer Nebenflüsse durch die Endlaugen belastet (Protestversammlung, 1911). In den zwanziger Jahren folgten dann weitere Gutachten von DUNBAR (1918 und 1921) und vom Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene Berlin, aus denen die anhaltende starke Versalzung der Elbe hervorgeht.

Während noch zu Beginn des Jahrhunderts der Chloridgehalt Werte von 500 - 600 mg/l in der unteren Süßwasserstrecke erreichen konnte und um 1910 der Anteil an Kochsalz 600 - 700 mg/l betrug (BONNE, 1912a), sanken die Werte in den 50er Jahren auf durchschnittlich 400 - 500 mg/l (vgl. Kap. 6.3).

Da im Laufe der Zeit die Meßgrößen und Meßmethoden zur Bestimmung des Salzgehalts im Elbewasser verändert wurden, sollen sie in der folgenden Zusammenstellung aufgeführt und erklärt werden (vgl. Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Meßgrößen und Meßmethoden zur Bestimmung des Salzgehalts in der Elbe

Meßgröße	Meßmethode	Umrechnung	Ref.
Specifisches Gewicht [Dichtigkeit]	Aerometer		LORENZ 1863 LENTZ 1888
Salzgehalt S [mg/l] oder ‰	Best. des Abdampf-rückstandes Berechnet aus Cl^-	S ‰ = 1000 S [mg/l] $S ‰ = \frac{Cl^-[mg/l] \times 1{,}805 + 0{,}03}{1000}$ (Knudsen-Formel)**	CASPERS 1959 CASPERS nach 1959*
Chloridgehalt Cl^- [mg/l]	Titration nach MOHR DEV D 1		CASPERS NÖTHL. 1972 ARGE ELBE
Leitfähigkeit LF [µS/cm] bei 25°C Elbe Süßwasser Elbe Brackwasser Nordseewasser	Meßsonde	1 ‰ S ≈ 3333 µS/cm LF 200 mg/1 Cl^- ≈ 1200 µS/cm LF 1 ‰ S ≈ 2000 µS/cm LF 200 mg/1 Cl^- ≈ 1092 µS/cm LF*** 200 mg/1 Cl^- ≈ 690 µS/cm LF**** 1 ‰ S ≈ 1429 µS/cm LF	ARGE E. WWA STD (1992) ARGE ELBE (1992)
Praktischer Salzgehalt PSU oder P_S)		1 PSU ≈ 1 ‰ S, wenn ‰ nach bestimmter Formel berechnet	SCHULZ 1990 BLMP 1992

* Aufgrund abweichender Analyseverfahren zur Ermittlung des Cl^--Gehalts muß für die obere Brackwassergrenze nach CASPERS ein Bereich zwischen 300 und 350 mg/1 Cl^- festgesetzt werden (vgl. auch Angabe eines Grenzbereichs anstatt einer Grenzlinie z.B. in Abb 6.28).

** Die KNUDSEN-Formel (1901) gilt nur für Meerwasser. Im Mischbereich von Fluß- und Meerwasser, liegen die Ionen in anderen Mengenverhältnissen vor, so daß hier der Salzgehalt einen höheren Abstand vom Chloridwert besitzt. Soweit es sich um ein nicht verunreinigtes marines Brackwasser handelt, ist die Differenz gegenüber der KNUDSEN-Formel gering und geht kaum über 0,1 ‰ hinaus (REMANE & SCHLIEPER, 1958).

*** Gemessen Stadersand 1991

**** Gemessen Brunsbüttel 1991

4. Brackwasserregionen der Elbe

Die Elbe hat eine Länge von 1092,64 km und umfaßt ein Einzugsgebiet von 148.155 km^2 (mündl. Mitt. ARGE ELBE, 1992 und Abb. 4.1), vor einigen Jahren noch 148.268 km^2 (ARGE ELBE, 1990). Das große Einzugsgebiet stromaufwärts von Hamburg weist auf die Bedeutung der Oberwasserführung für den Elbeabschnitt unterhalb von Hamburg und damit die Lage der oberen Brackwassergrenze und des Trübstoffmaximums hin (vgl. Kap. 6.2 und 9 sowie Kap.8.2, 8.3 und 9).

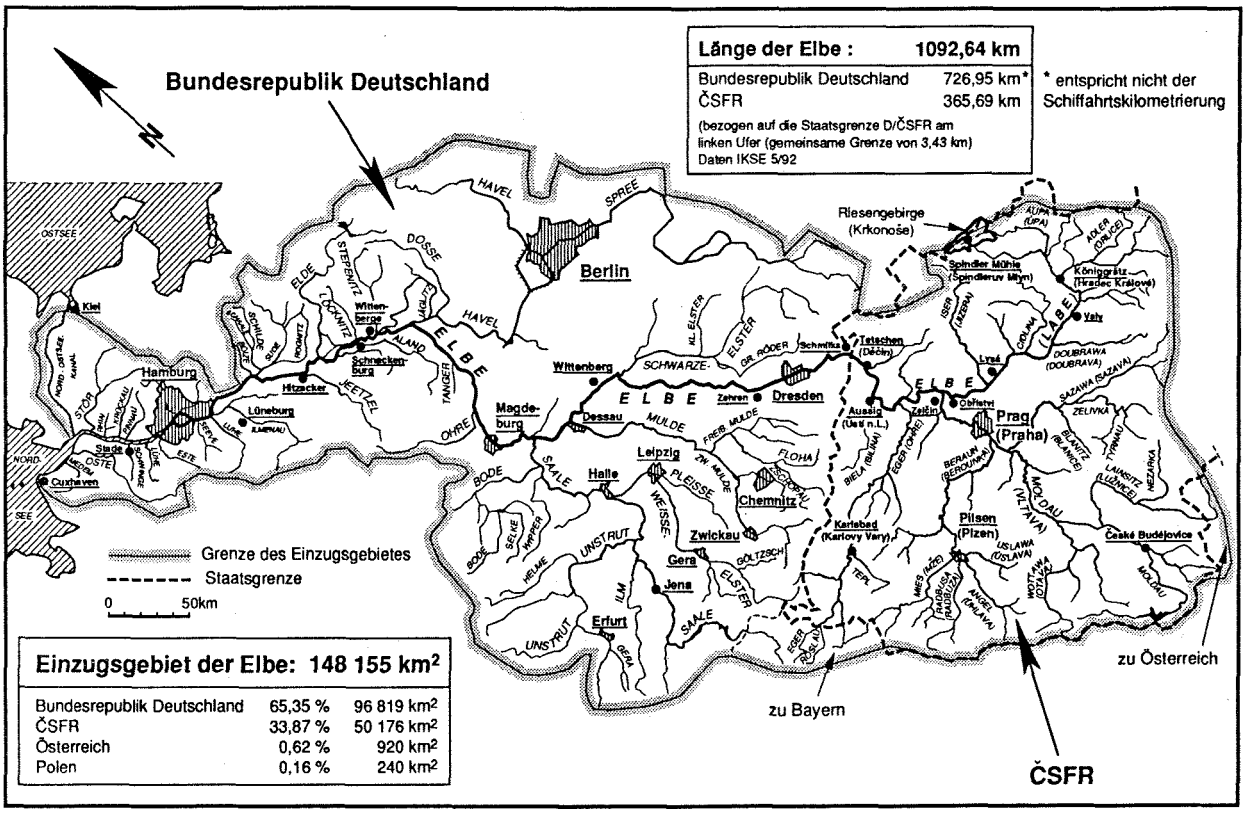


Abb. 4.1: Das Einzugsgebiet der Elbe (ARGE ELBE, 1992, unveröffentlicht)

Die Elbe wird nach ROHDE (1971) in folgende Abschnitte gegliedert: obere Elbe, Mittelelbe und Tideelbe. Der von der Tide beeinflußte Abschnitt wird Ästuar (Aestuar) genannt. Hier treffen Süß- und Salzwasser aufeinander. Hierzu formuliert BARG (1979):

"Als Brackwasserzone bezeichnet man den Teil eines Tideaestuars, in dem sich im Verlauf einer Tide der Salzgehalt von Ort zu Ort und periodisch mit der Zeit ändert. Die Brackwassergrenzen geben die Endpunkte der Brackwasserzone an, d.h. an den Grenzpunkten bleibt der Salzgehalt während einer Tide konstant. Die untere Brackwassergrenze der deutschen Tideflüsse liegen außerhalb der Mündungsgebiete in der Nordsee, ihre Lage ist nicht genau zu definieren. Wesentliche Bedeutung kommt der oberen Brackwassergrenze zu, die meist weit oberhalb der Mündung des Aestuars liegt.

Die Ausdehnung der Brackwasserzone hängt von der Geometrie und Morphologie (z.B. Tideriffel) des Tideaestuars, der Tidebewegung und der Oberwasserführung des Tideflusses ab. Ändern sich diese Größen, so verschiebt sich die Brackwasserzone. Als Brackwassergebiet bezeichnet man den Gesamtbereich des Flusses, in dem sich die Brackwasserzone periodisch oder aperiodisch nach oberstrom und unterstrom bewegt.

Eine weitergehende Unterteilung der Brackwasserzone des Weseraestuars in Halinitätszonen läßt sich z.B. nach dem Venice-System vornehmen" (s. Kap. 5).

Das untere Tidegebiet ist über eine weite Strecke neben dem Einfluß der Gezeiten durch die Vermischungsvorgänge von Fluß- und Salzwasser geprägt (vgl. Kap. 9). In diesem Bereich ist auch eine außerordentlich hohe Trübung mit einem oder mehreren Maxima zu beobachten (vgl. Kap. 8). Während noch KÜHL & MANN (1953) einzelnen Elbeabschnitten bestimmte, weitgehend starre Brackwasserregionen in Abhängigkeit vom Salzgehalt zuwiesen (vgl. Abb. 4.2), beschrieb CASPERS (1959a,b) deutlich die Dynamik dieser Bereiche (vgl. Kap. 5). POSTMA & KALLE (1955) ordneten wiederum der obersten, stromaufwärts gelegenen Salzgehaltsregion die höchste Trübung zu (vgl. Kap. 8 und 10.3)

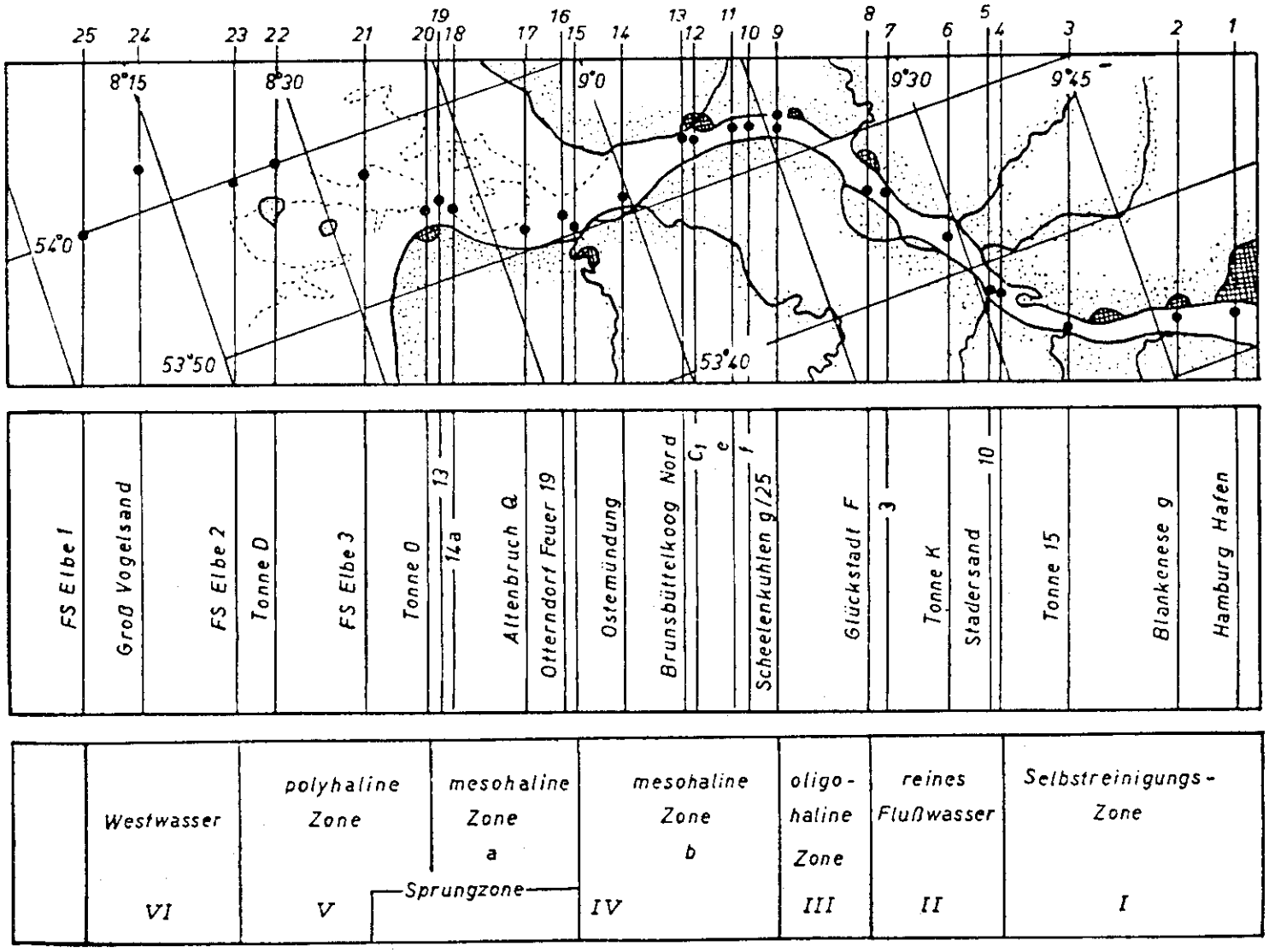


Abb. 4.2: Übersichtsplan der Unterelbe mit Einteilung in Salzgehaltszonen (KÜHL & MANN, 1953

5. Definition der oberen Brackwassergrenze

Auf dem "Venedig Symposium" über Brackwasser definierte CASPERS (1959a) die obere Brackwassergrenze in einem Ästuar folgendermaßen: "in der Salzgehalts-Klassifikation des Venedig-Systems ist die Grenze der mixo-oligohalinen Zone zum limnischen Bereich bei 0,5 ‰ Salzgehalt". Nach seinen Angaben endet daher in der Elbe der Süßwasserbereich etwa bei Glückstadt. Da dort die Brackwasserzone beginnt (vgl. Tab. 5.1), liegt die obere Brackwassergrenze folglich bei Glückstadt. Eine Verlagerung elbeabwärts ist möglich (vgl. Abb. 5.1).

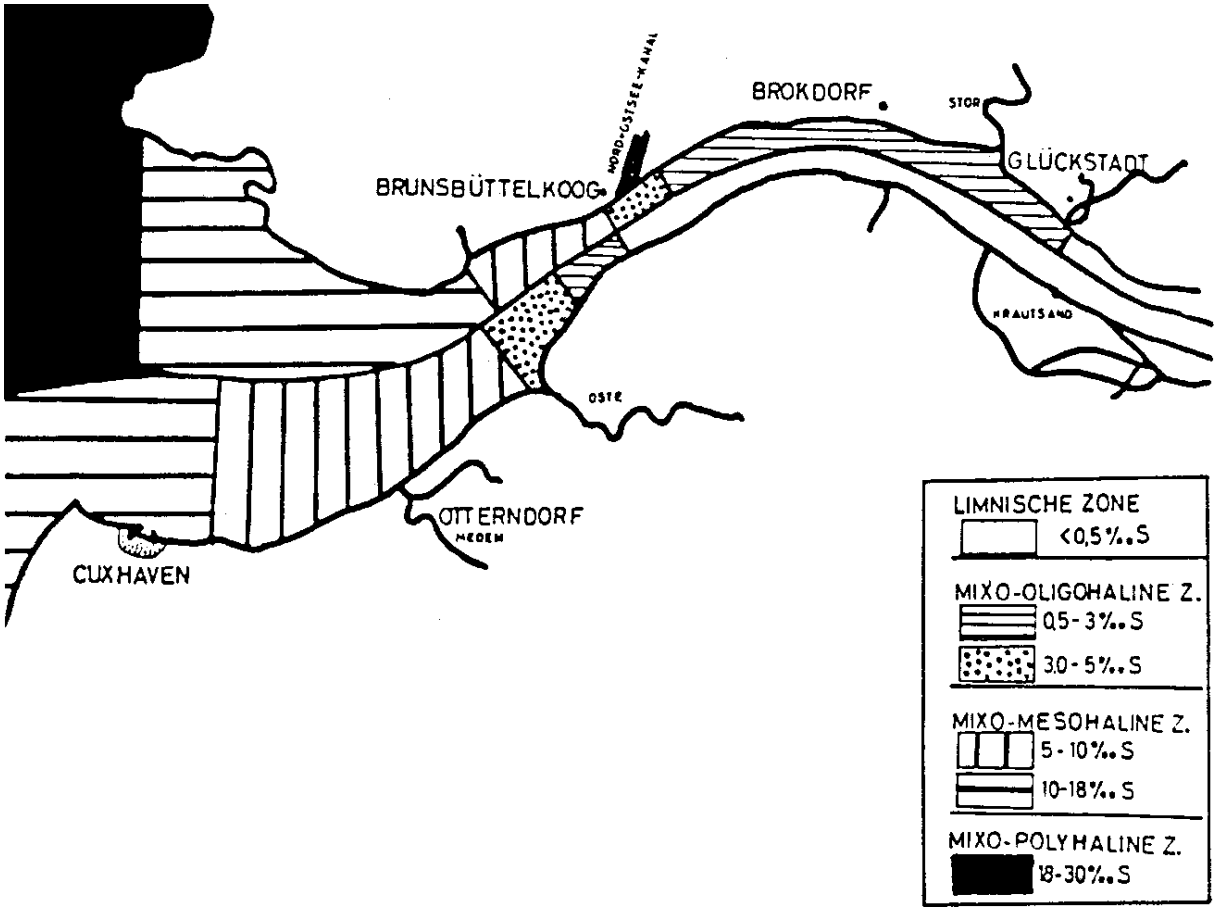


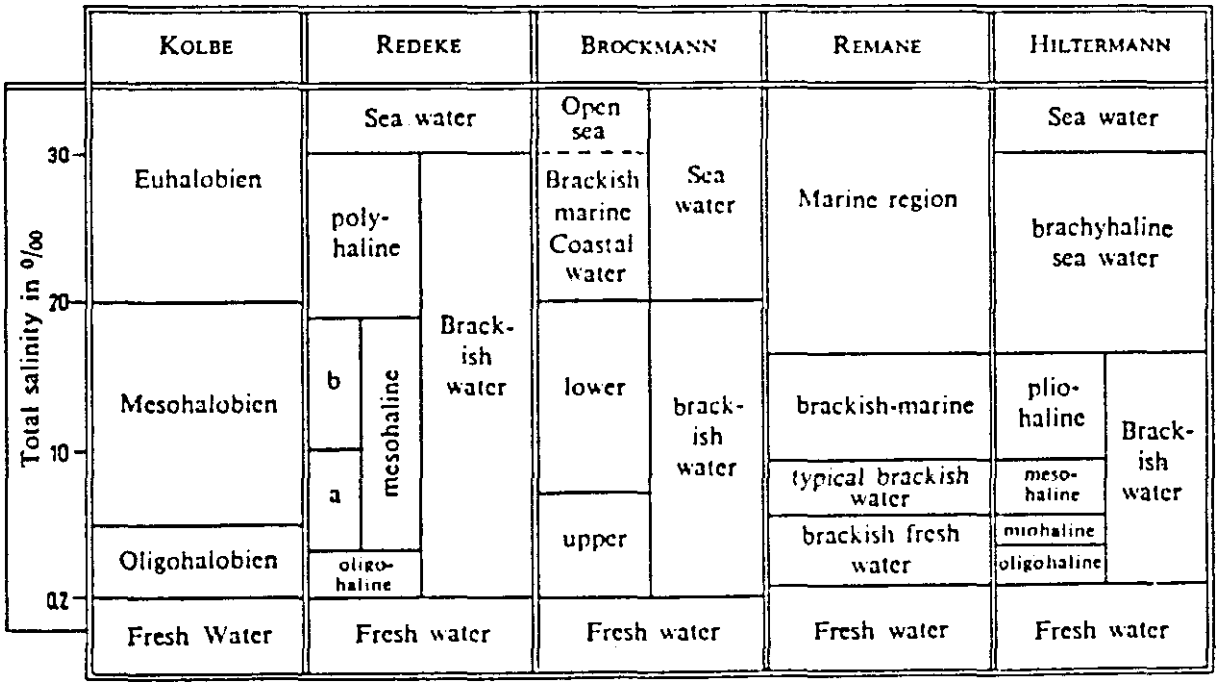
Abb. 5.1: Hydrographische Gliederung des Elbe-Ästuars nach dem Salzgehalt (CASPERS, 1959a)

Tab. 5.1: "Venice-System" (verändert nach CASPERS, 1959b)

Zone	Salinität (‰)
Hyperhaline	> 40
Euhaline	40 - 30
Mixohaline	(40) 30 - 0,5
Mixoeuhaline	> 30 aber < als das vorgelagerte euhaline Meer
(Mixo-)polyhaline	30 – 18
(Mixo-)mesohaline	18 – 5
(Mixo-)oligohaline	5 - 0,5
Limnisch (Süßwasser)	< 0,5

REMANE & SCHLIEPER (1971) zitieren verschiedene Autoren (BROCKMANN, 1908; REDEKE, 1922; KOLBE, 1927, 1932; REMANE, 1934; HILTERMANN, 1949, 1966 und SEGERSTRALE, 1959) nach deren Ansicht die obere Brackwassergrenze einen feststehenden Wert oder Bereich hat, z.B. bei 0,2 ‰ (vgl. Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Verschiedene Einteilungen der Zwischenregionen zwischen Meer und Süßwasser (ROTTGART, 1952, zitiert in REMANE & SCHLIEPER, 1971)



Nach LUCHT (1964) ist mit der Brackwasserzone der Elbe "das Gebiet gemeint, in dem sich das Brackwasser durch die Vermischung von Fluß- und Meerwasser bildet. Es beginnt vom Oberlauf der Elbe her gesehen im Querschnitt etwas oberhalb von Glückstadt."

BARG (1979): "Als Brackwasserzone bezeichnet man den Teil eines Tide-Ästuars, in dem sich im Verlauf einer Tide der Salzgehalt von Ort zu Ort und periodisch mit der Zeit ändert. Die Brackwassergrenzen geben die Endpunkte der Brackwasserzone an, d.h. an den Grenzpunkten bleibt der Salzgehalt während einer Tide konstant." BARG definiert weiterhin die obere Brackwassergrenze als den Beginn des Salzgehaltsanstiegs oberhalb des Salzgehaltes des Oberwassers (vgl. Abb. 5.2).

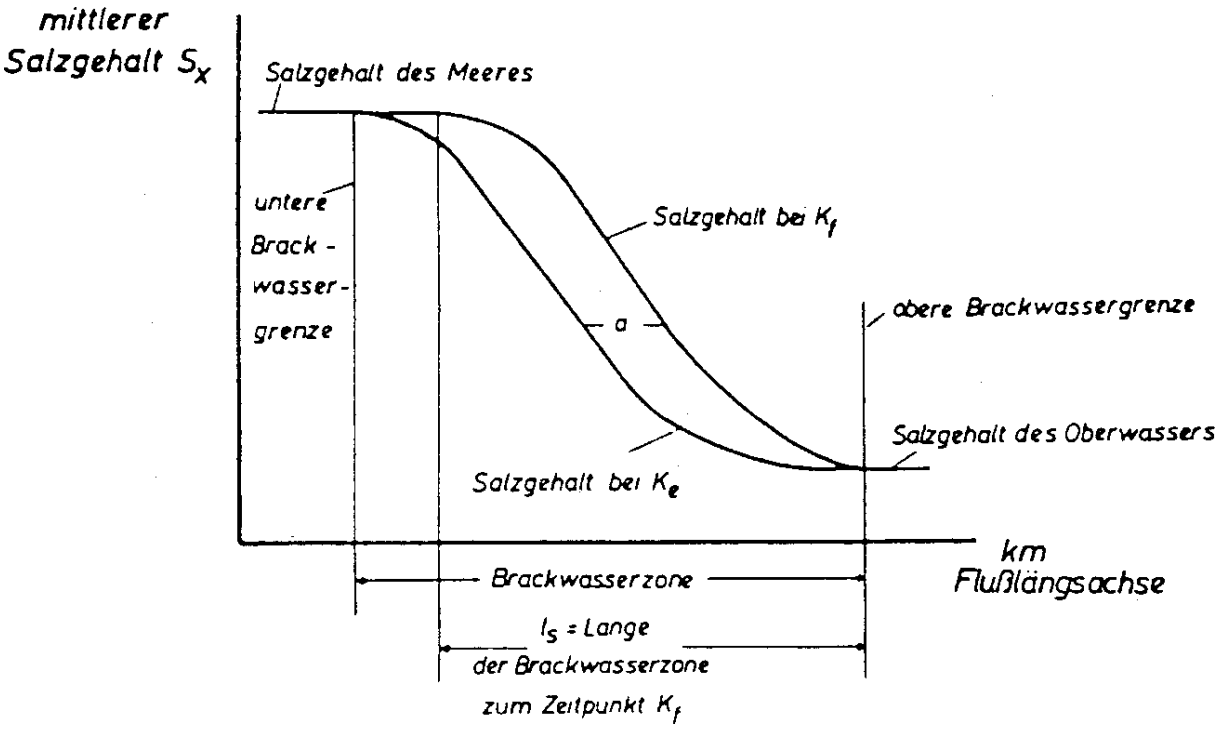


Abb. 5.2: Verteilung des Salzgehalts über die Flußlängsachse zum Zeitpunkt des Kenterns von Flut- und Ebbstrom K_e, Kenterpunkt Ebbe, K_f Kenterpunkt Flut (BARG, 1979)

Die ARGE ELBE (1988) legt in der Elbe "für die obere Brackwassergrenze einen Anstieg des Chloridgehaltes von 30 mg/1 Cl^- über das limnische Niveau hinaus ... zugrunde". Vereinfacht wird der Brackwasserbereich mit Chloridgehalten zwischen 300 und 3000 mg/1 Cl^- beschrieben (ARGE ELBE, 1988).

Die Pariser Konvention / Paris Commission (PARCOM, 1987) definiert ... vom Meer aus gesehen... "als Süßwassergrenze das Querprofil im Tideästuar, an dem bei anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen noch ein signifikanter Anstieg des Salzgehaltes bei Ebbe durch das Meerwasser eintritt".

Im Rahmen des Bund/Länder-Meßprogramms (BLMP, 1986/87) haben sich die beteiligten Institutionen der PARCOM-Definition angeschlossen. Allerdings wird die Süßwassergrenze bei allgemeinen Betrachtungen etwa mit 1 PSU (practical salinity unity oder Sp, praktische Salzgehaltseinheit) festgesetzt (BLMP, 1990/91).

- SCHULZE (1988 zitiert in SCHULZE, 1990) konnte zeigen, "daß aus Sicht des Ingenieurs die Definition des praktischen Salzgehalts Sp [-] zur Angabe des Salzgehalts S [‰] von Wasserproben aus der Brackwasserzone der Ems hinreichend genau ist".

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 1985) schließt sich der PARCOM-Definition an: "Süßwassergrenze ist die Stelle im Wasserlauf, an der bei Ebbe und zu einer Zeit schwachen Süßwasserabflusses aufgrund des Vorhandenseins von Meerwasser eine erhebliche Zunahme des Salzgehaltes festzustellen ist."

Neben den chemisch/physikalischen Parametern sind auch biologische Indikatoren, wie z.B. Seepocken, gut geeignet, die Lage der oberen Brackwassergrenze zu belegen (u.a. KÜHL, 1972). Diese Mechanismen werden ausführlich in Kap. 7.2 beschrieben.

Die sich aus den unterschiedlichen Definitionen der Lage der oberen Brackwassergrenze ergebenen Konsequenzen sind in Kap. 10. 2 und 10.3 dargestellt.

6. Hydrologische Bedingungen für die Lage der oberen Brackwassergrenze

In den letzten Jahrhunderten erfolgte in der Elbe eine sich vielfältig auswirkende Veränderung der Fahrwassertiefen (vgl. Abb. 6.1). Seit den Untersuchungen von KIRCHENPAUER (1862; vgl. Kap. 3) haben sich dabei auch die Brackwasserzonen deutlich verschoben. So war die von ihm beobachtete Salzwasserzunge über der Elbesohle noch sehr weitreichend. Nach LANG (1990) gilt das Elbe-Ästuar allerdings heute als mesotidal; es erfolgt somit kein wesentliches bodennahes Vordringen des Meerwassers stromaufwärts (vgl. Abb. 6.2 und Kap. 8.1). Die Schichtung des Meerwassers in der Flußmündung beschreibt BARG (1979) allgemein als Keil (vgl. Abb. 6.3). Dennoch rechnet er das Elbe-Ästuar zu den gut durchmischten, in denen es zu keiner wesentlichen vertikalen Zonierung des Salzgehaltes kommt. Messungen ergaben hierzu unterschiedliche Befunde: ein Salzwasserkeil (vgl. Kap. 6.4) oder auch keine vertikale Schichtung (vgl. Abb. 6.4).

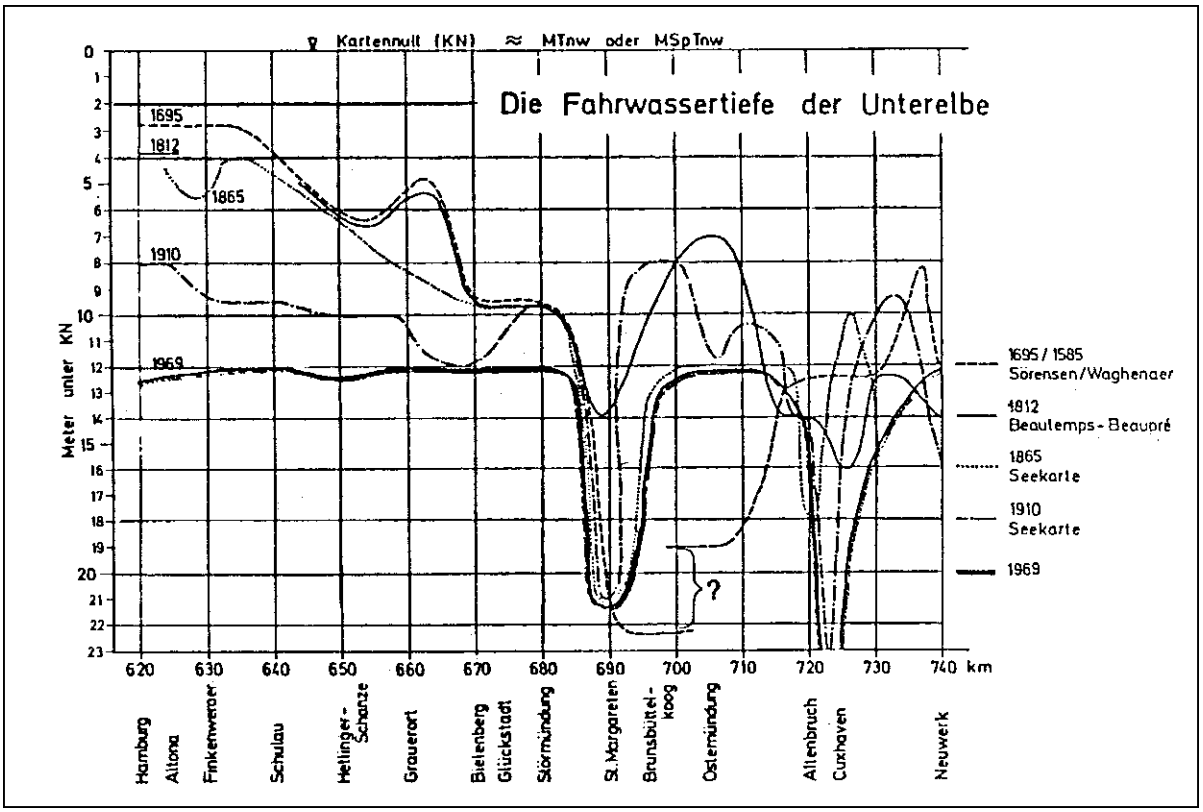


Abb. 6.1: Die Fahrwassertiefe der Unterelbe (ROHDE, 1971)

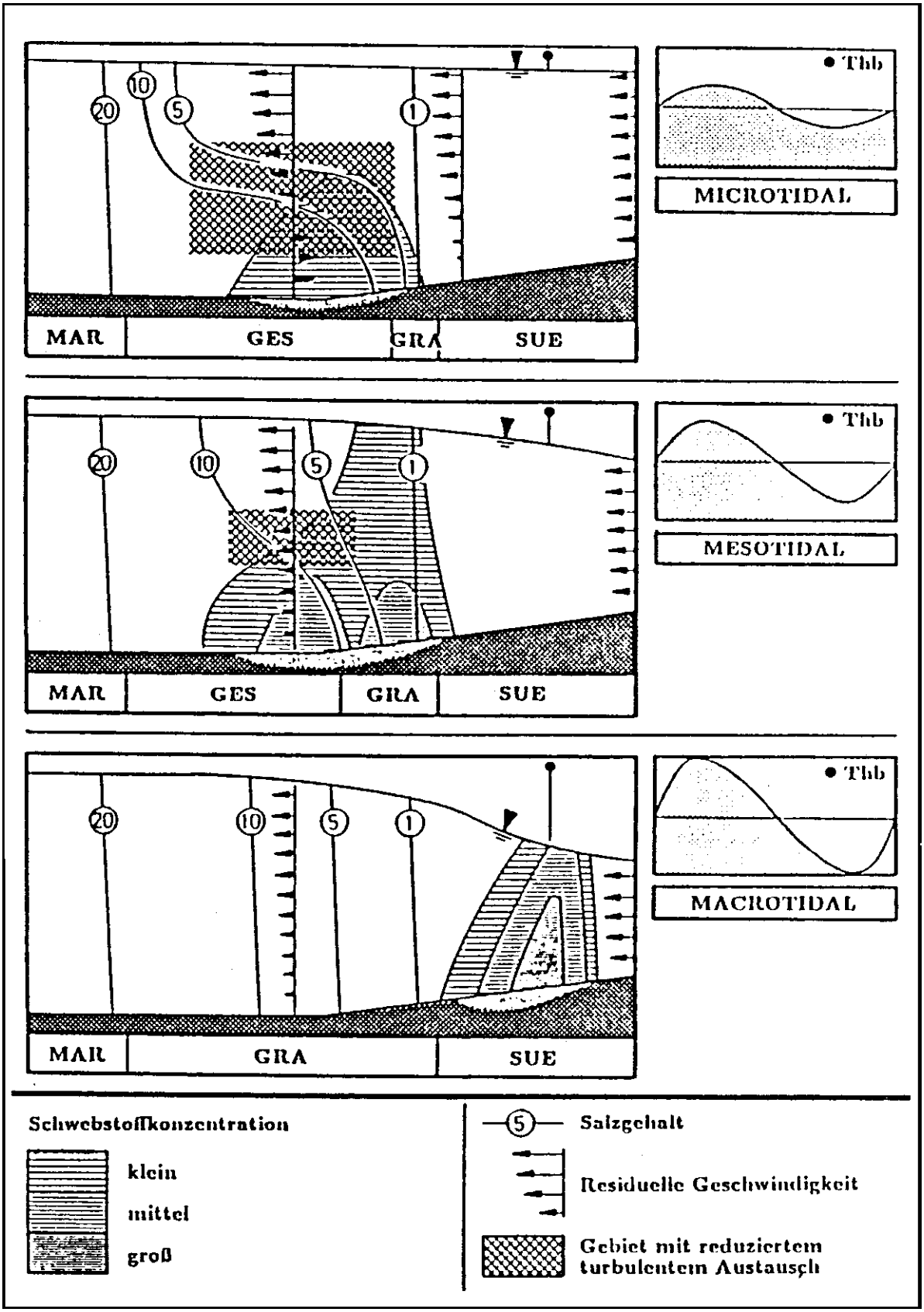


Abb. 6.2: Schematische Darstellung der Klassifizierung von Ästuarien unterschiedlichen Tidetyps (LANG, 1990) MARine Zone, GESchichtete Zone, GRAdienten Zone, tideinduzierte SUEßwasserzone

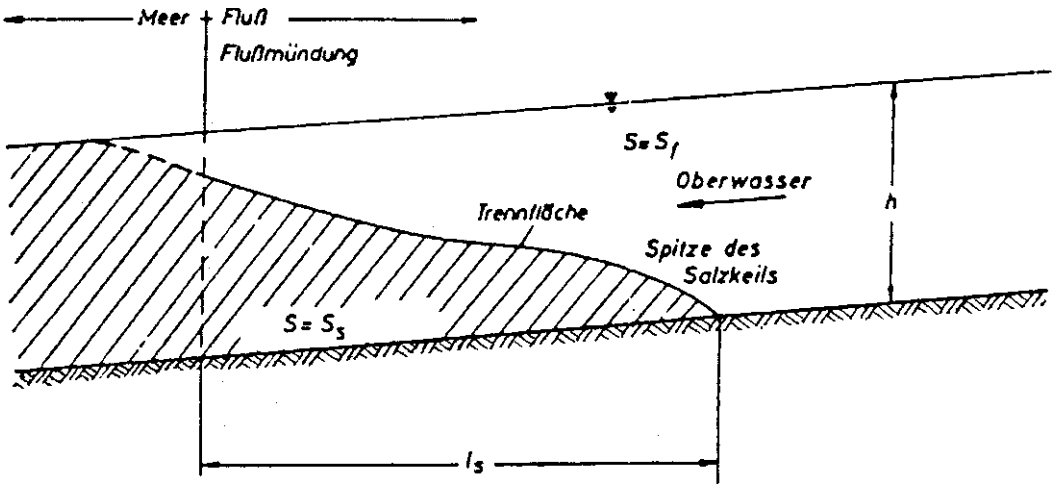


Abb. 6.3: Einmischung von Seewasser in das Elbe-Ästuar

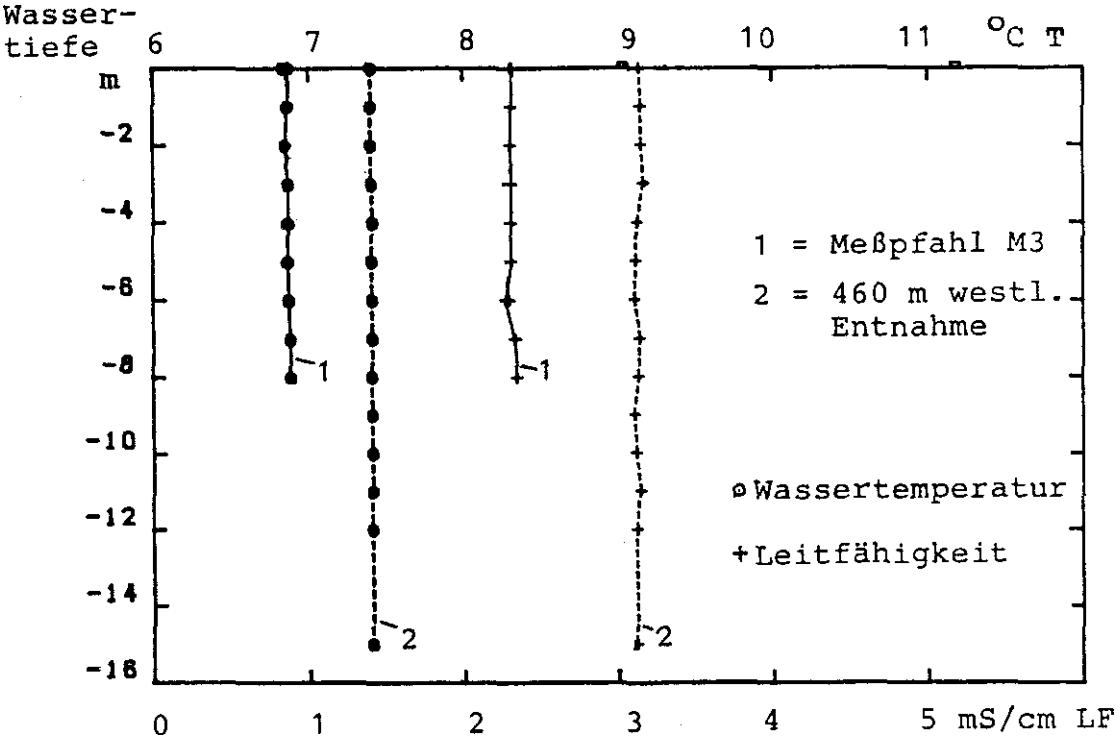


Abb. 6.4: Vertikalprofil der Leitfähigkeit vor Brokdorf am 13.11.1985 (verändert nach ÖKOLIMNA, 1985)

Auch im Querprofil verläuft die Ausbreitung der Wasserkörper nicht geradlinig (vgl. Abb. 6.5). Ursache hierfür sind, besonders die bei verschiedenen Wassertiefen, sehr unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten.

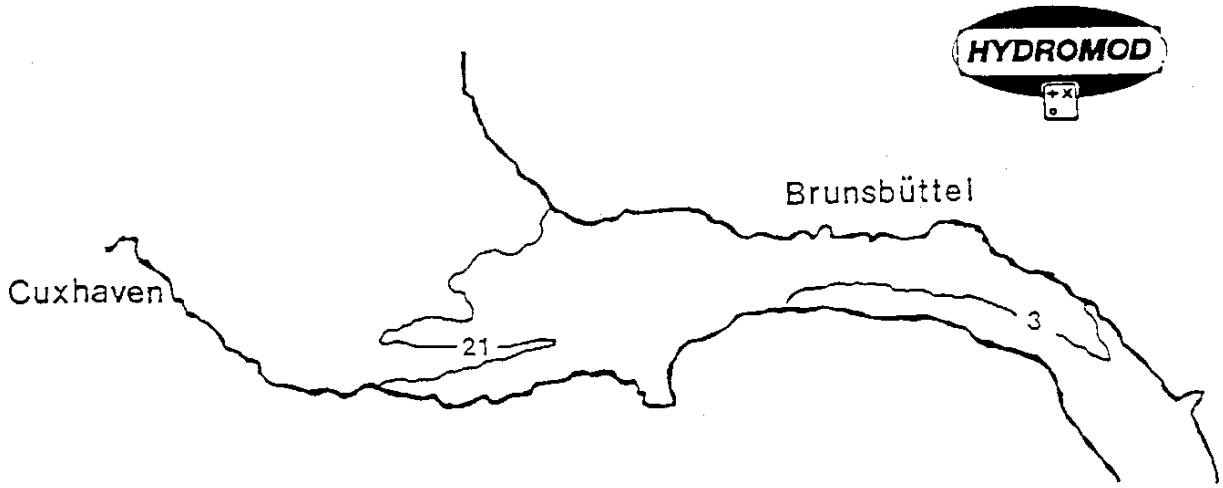


Abb. 6.5: Salzgehaltsisolinien in der Unterelbe bei mittleren Tideverhältnissen und mittleren Abfluß, Oberflächenwerte aus Modellrechnungen (HYDROMOD, 1992)

6.1 Tide

Im Längsprofil des Ästuars bilden sich durch die Gezeiten lange Tidewellen aus (vgl. Abb. 6.6 und 6.7). Ebbe und Flut bewirken bei unveränderten meteorologischen und hydrologischen Verhältnissen an einem Ort periodisch schwankende Wasserstände gleicher Amplitude. Eine Einengung des Elbequerschnitts stromaufwärts führt zu abweichenden Tidewasserständen, die sich wiederum auf die Strömungsgeschwindigkeiten auswirken. ROHDE (1971) beschreibt die Verhältnisse in der Elbe zwischen 1956 und 1965, die ARGE ELBE (1992) für die letzten Jahre, schematisch dar (vgl. Abb. 6.8).

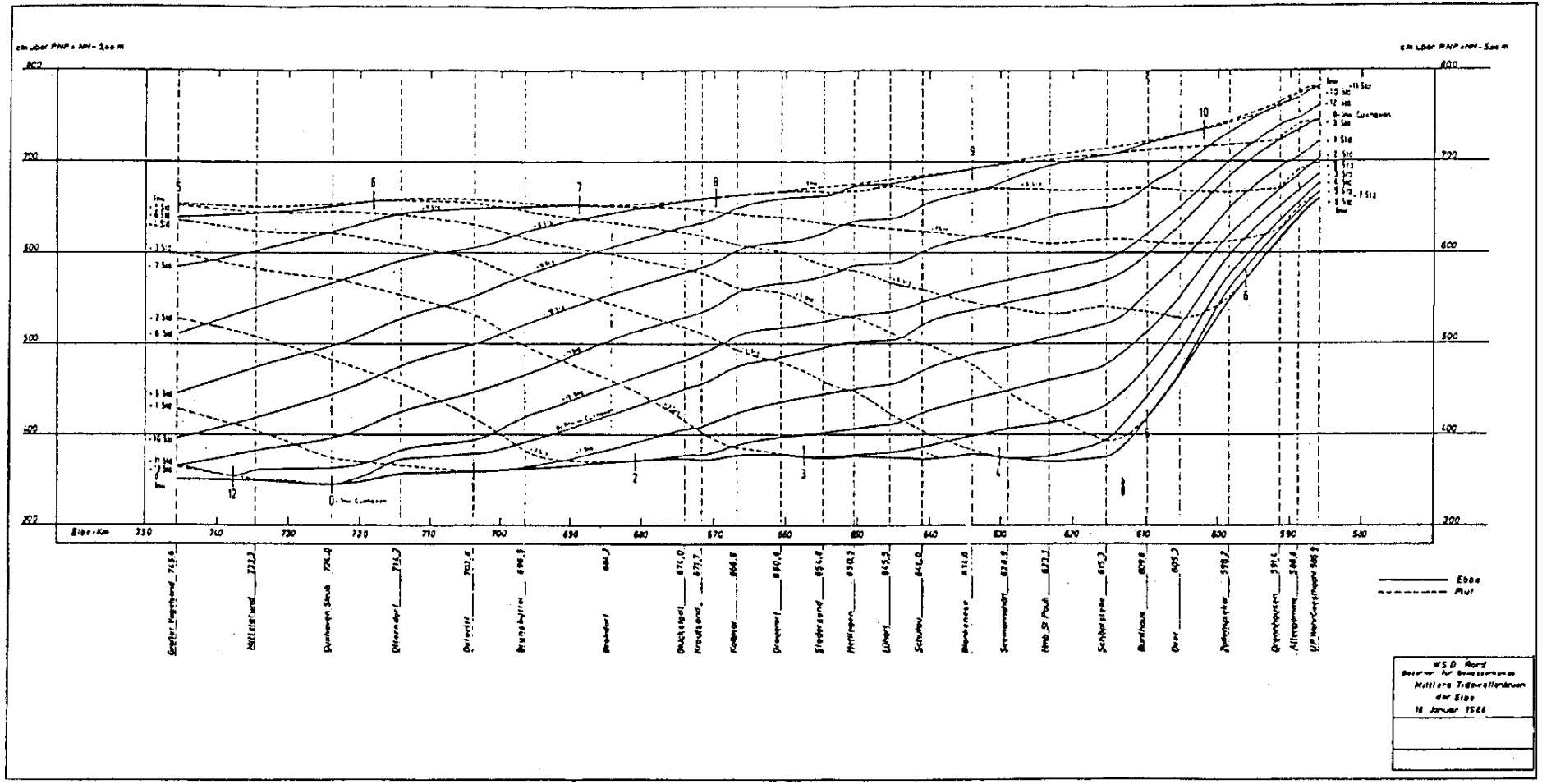


Abb. 6.6: Tidewellen in der Elbe (MEYER & CROTOGINO, 1990)

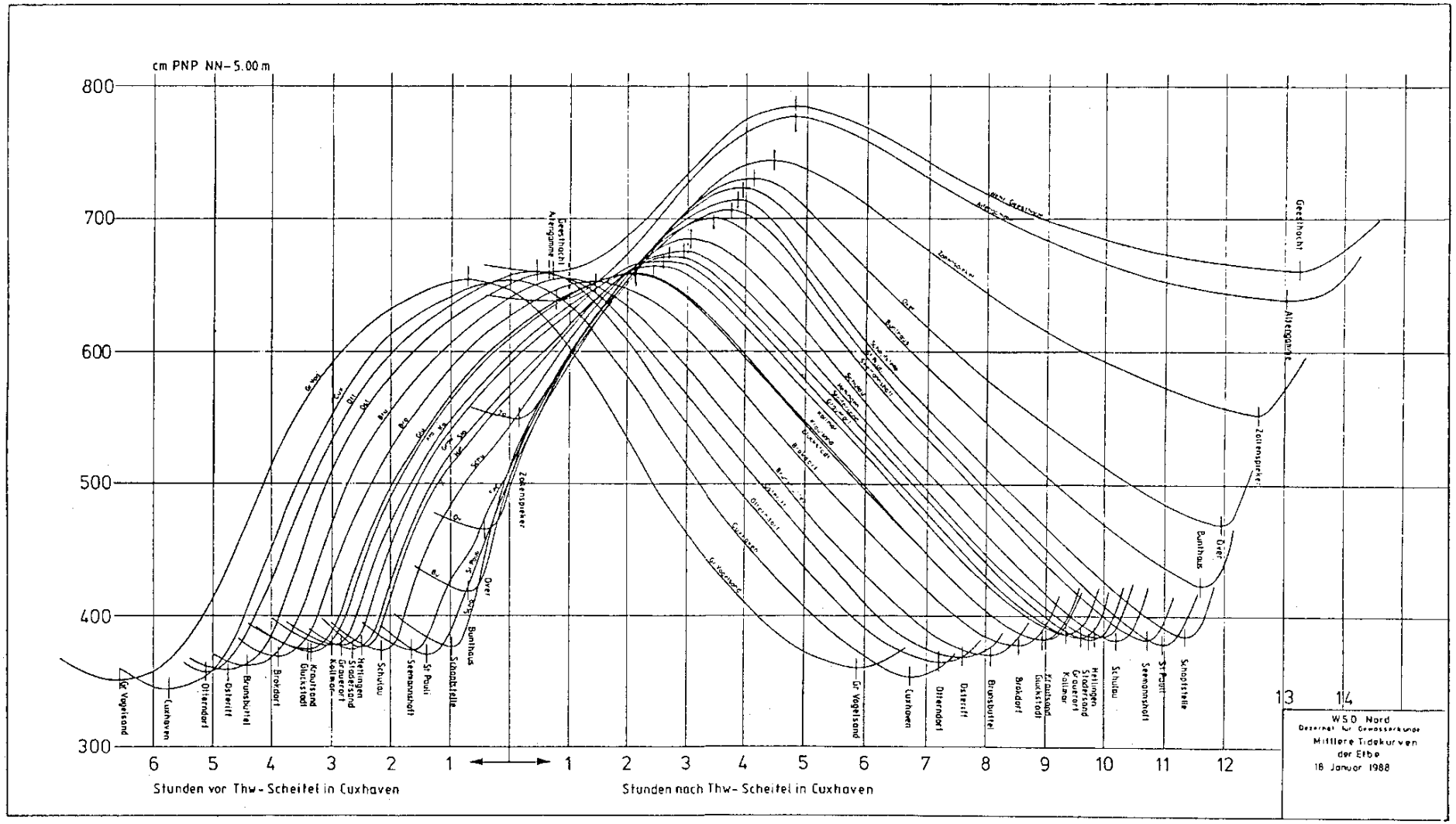


Abb. 6.7: Zeitlicher Verlauf einer Tide (WSD Nord, 1988)

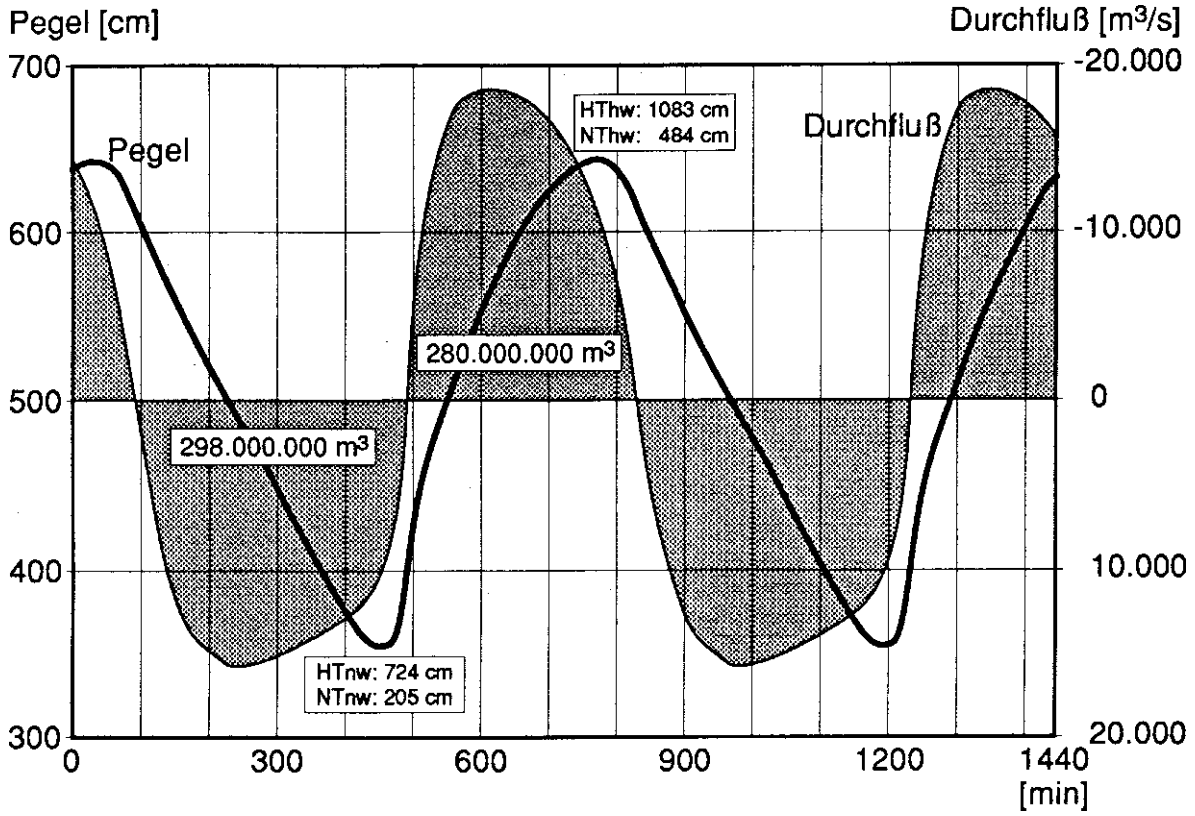


Abb. 6.8: Mittlere Tide der Elbe am Pegel Glückstadt bei 350 m^3/s Oberwasserabfluß am Pegel Neu Darchau (ARGE ELBE, 1992, unveröffentlicht)

Meteorologische Bedingungen führen zu Säkularveränderungen (Änderung in 100 Jahren) des Wasserspiegels (JENSEN, 1992; WITTE, 1992) (vgl. Abb. 6.9 und 6.10 sowie Tab. 6.1 und 6.2). Neben den weitgehend natürlichen Säkularveränderungen bewirkt der Stromausbau veränderte Tidehübe (ROHDE, 1971; mdl. Mitt. FLÜGGE, 1992) und damit veränderte Strömungsgeschwindigkeiten (vgl. auch Kap. 6.2).

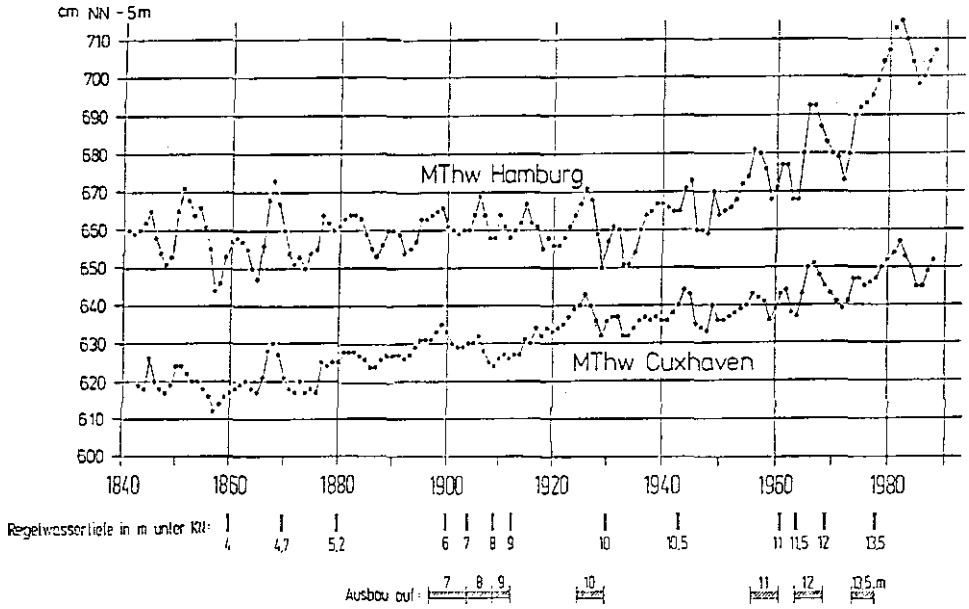


Abb. 6.9: Entwicklung der MThw in Hamburg und Cuxhaven als 3jähriges übergreifendes Mittel (SIEFERT, 1991)

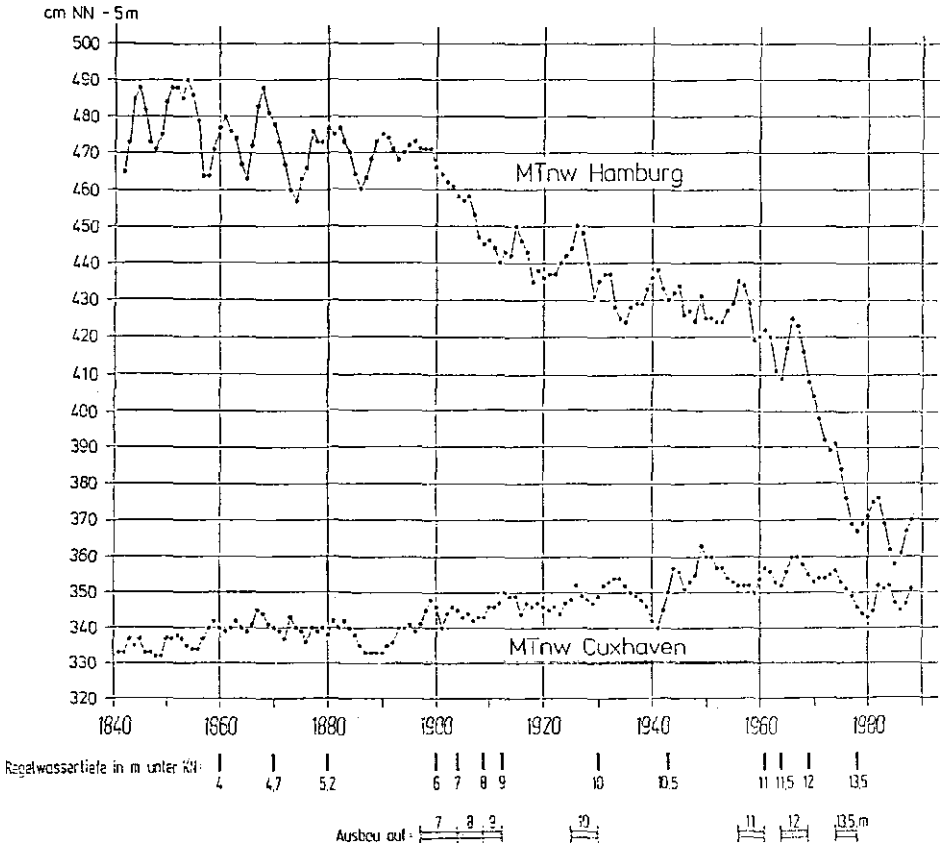


Abb. 6.10: Entwicklung der MTnw in Hamburg und Cuxhaven als 3jähriges übergreifendes Mittel (SIEFERT, 1991)

Tab. 6.1: Entwicklung der Wasserstände an Pegel Cuxhaven (nach SCHÖNFELD & JENSEN, 1990) [MThb = mittlerer Tidehub]

	1953-89	1971-89
MTnw	-0,19 cm/a	-0,16 cm/a
MThw	+0,37 cm/a	+0,69 cm/a
MThb	+0,56 cm/a	+0,85 cm/a

Tab. 6.2: Trends des Tidehubs in Cuxhaven und an 13 Nordseepegeln (nach SCHÖNFELD & JENSEN, 1990)

	1953-89	1971-89
Cuxhaven	0,56 cm/a	0,85 cm/a
13 Pegel	0,47 cm/a	0,30 cm/a
Differenz	0,09 cm/a	0,55 cm/a

Zwischen MThw und MTnw läuft die Tide in der Ebbphase bei St. Pauli ca. 7 - 7,5, bei Cuxhaven um 6,5 Stunden und in der Flutphase zwischen MTnw und MThw bei St. Pauli etwa 5 und Cuxhaven 5,5 Stunden. Die Tidewasserstände und -laufzeiten variieren stark durch Mondphasen, Oberwasser und Windstau (vgl. Abb. 6.11).

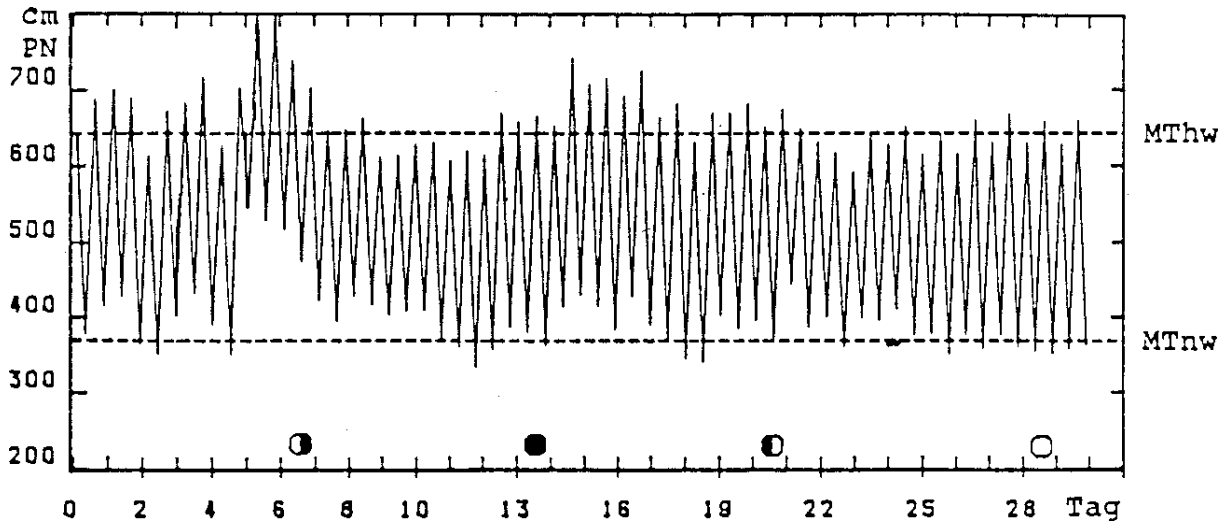


Abb. 6.11: Tidewasserstände bei Brokdorf im September 1985 (verändert nach ÖKOLIMNA, 1985)

Die Kenterpunkte Ebbe (K_e) und Flut (K_f) liegen gegenüber dem Mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) und dem Mittleren Tidehochwasser (MThw) zeitlich verschoben (vgl. Abb. 6.12). Die Tide führt zu einer sägeartigen Verschiebung der Wasserkörper (vgl. Abb. 6.13; ARGE ELBE, 1988).

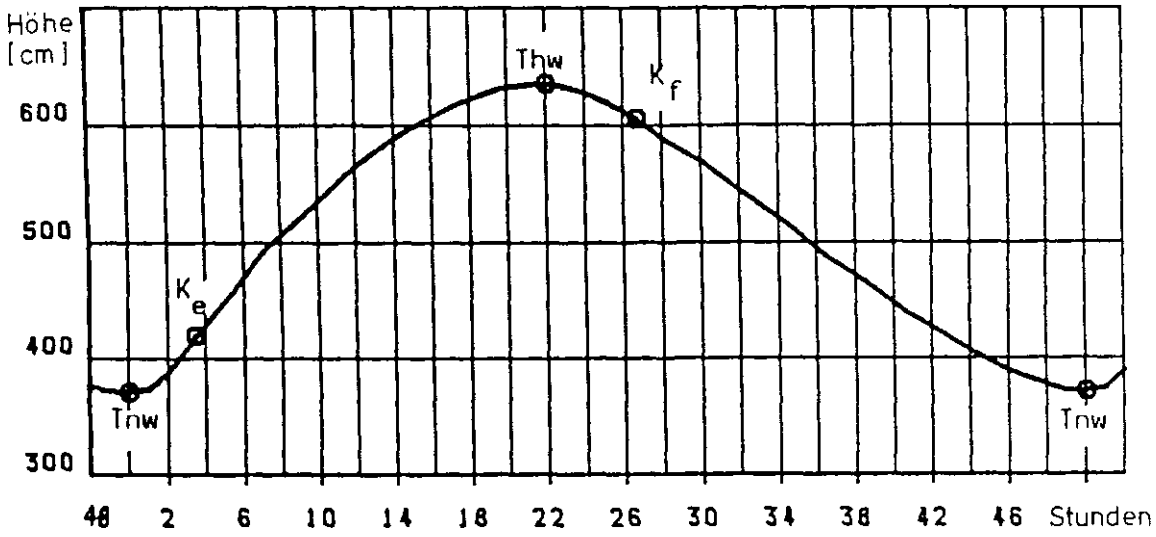


Abb. 6.12: Tidekurve am Pegel Brokdorf (ÖKOLIMNA, 1985)

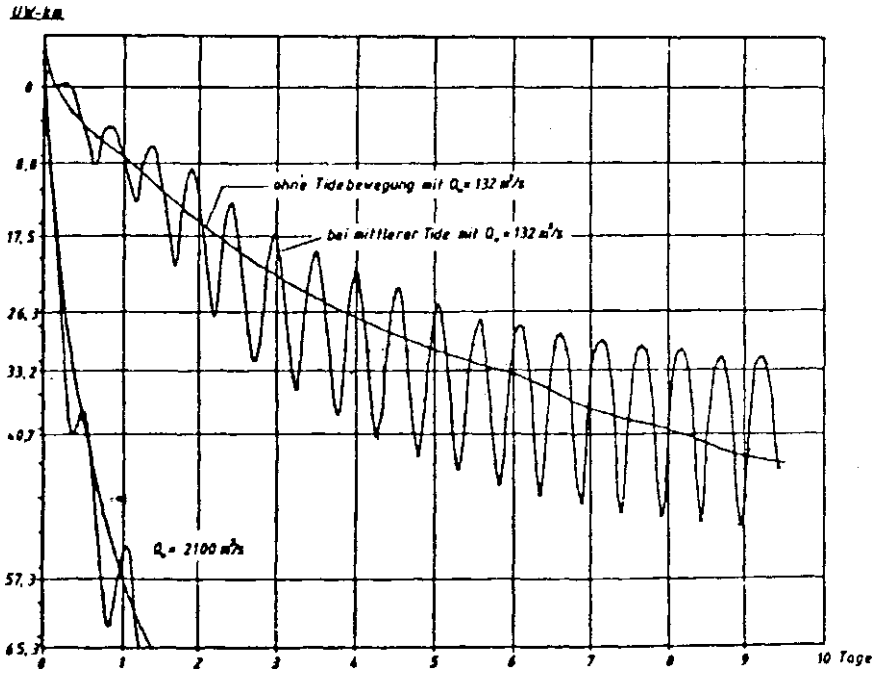


Abb. 6.13: Tidebedingte Verschiebung eines Wasserkörpers in der Weser (BARG, 1979)

Allerdings ist dieser Säge-Mechanismus sehr differenziert zu sehen (u.a. DUWE & PFEIFFER / HYDROMOD, 1992) (vgl. Abb. 6.14). Dies zeigt die Abbildung: Position von Wasserinhaltsstoffen 1, 9 und 13 Stunden nach ihrer Freisetzung (1 Std. nach Hochwasser) in der Fahrrinne der Unterelbe bei Pagensand.

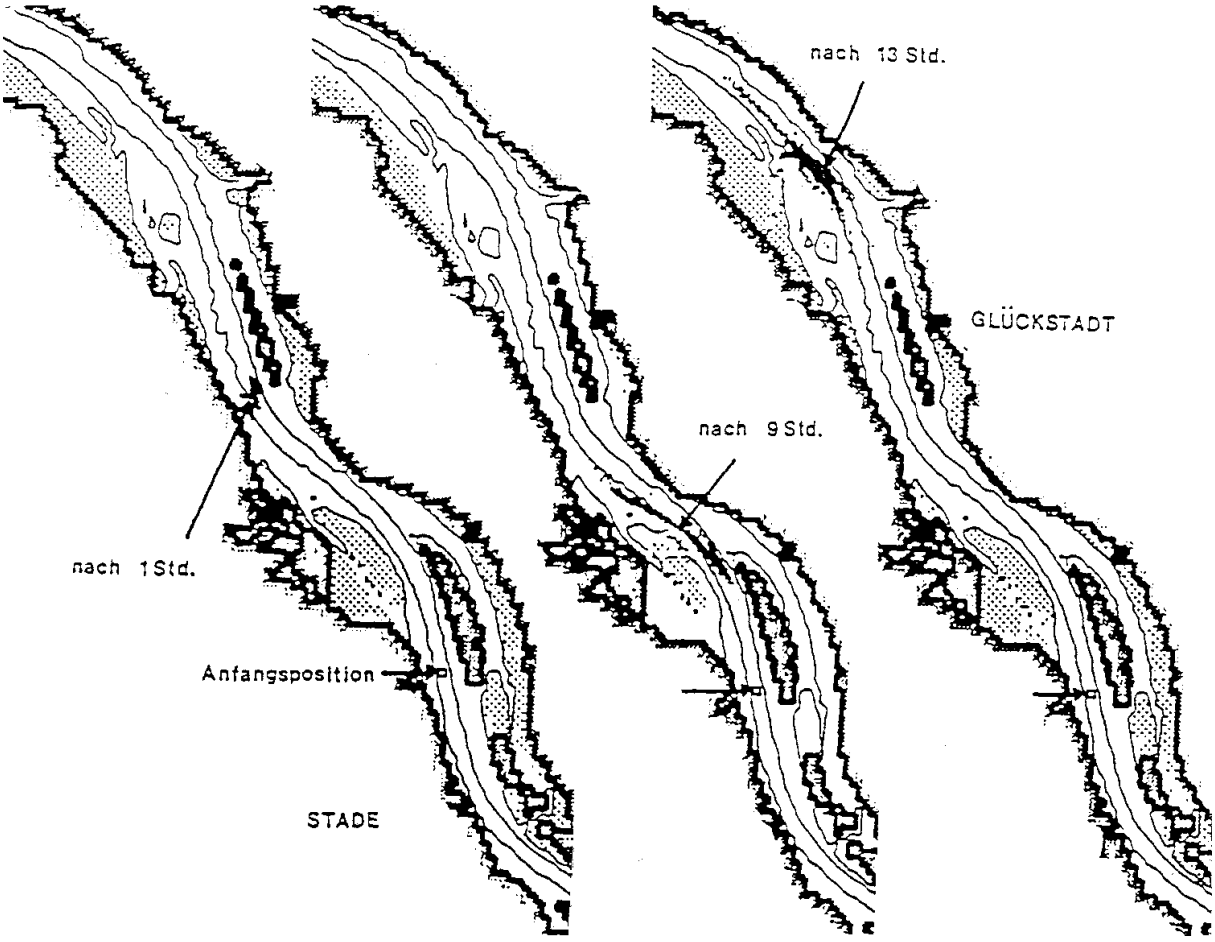


Abb. 6.14: Pendeln eines Wasserkörpers in der Elbe bei mittleren Tiden und Abflüssen (verändert nach HYDROMOD, 1992)

Die Strömung ändert sich in Abhängigkeit von Ebbe und Flut (vgl. Abb. 6.15). Aus den Strömungsgeschwindigkeiten läßt sich der Transportweg von Wasserkörpern ableiten (vgl. Kap. 9).

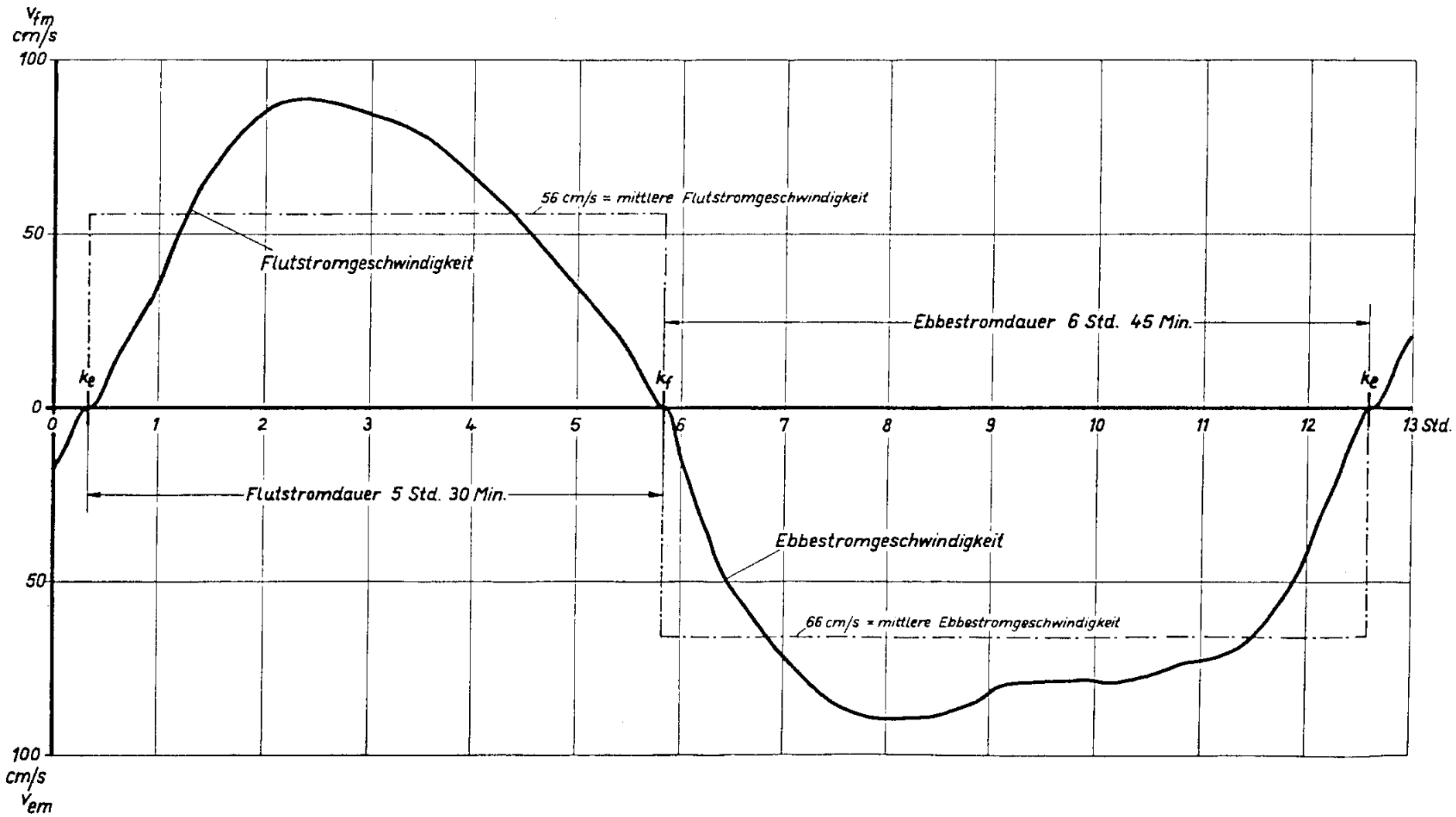


Abb. 6.15: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche bei Stadersand (Strom-km 657, Mittelwert aus 6 Stichproben von April 1971 bis Februar 1972) (HENSEN, 1972)
K_e = Kenterpunkt Ebbe; K_f = Kenterpunkt Flut

Modellversuche von ROHDE (1971) zeigen deutlich, daß bei gleichem Oberwasserabfluß die Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Stellen der Elbe unterschiedlich ist (vgl. Abb. 6.16). Wenn auch die Verhältnisse in der Elbe durch den Ausbau verändert und damit die von ROHDE ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten nicht mehr aktuell sind, müssen regionale Abweichungen bei der Darstellung der Lage der oberen Brackwassergrenze berücksichtigt werden (vgl. Kap. 9).

Die Variabilität der Strömungsgeschwindigkeiten ist neben anderen Einflüssen wesentlich von dem Querprofil der Elbe abhängig (vgl. Abb. 6.17).

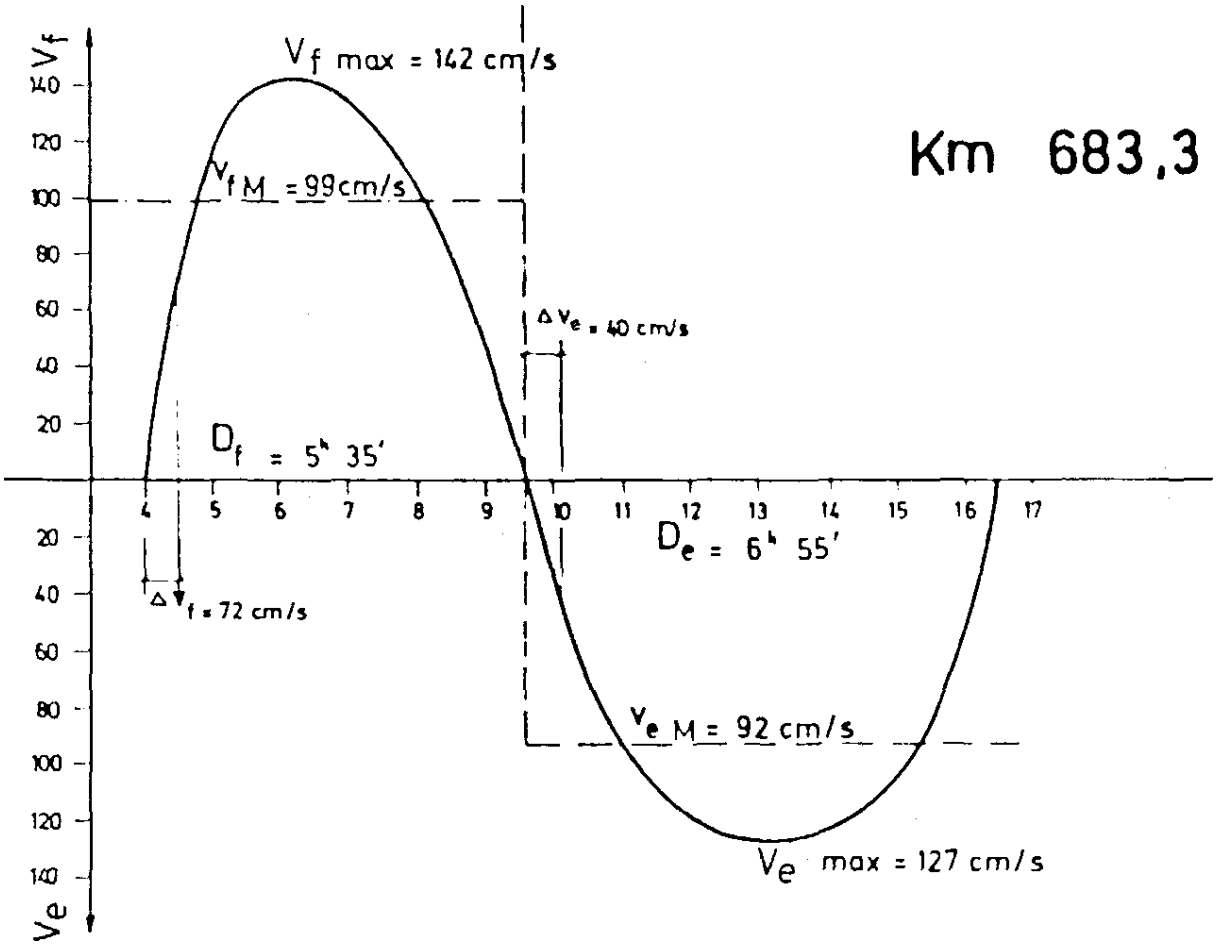


Abb. 6.16: Gemittelte Ganglinien der Strömungsgeschwindigkeiten im Modellversuch bei Qo = 600 m3/s (ROHDE, 1971)
V_e und V_f Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe und Flut
D_e und D_f Dauer von Ebbe und Flut

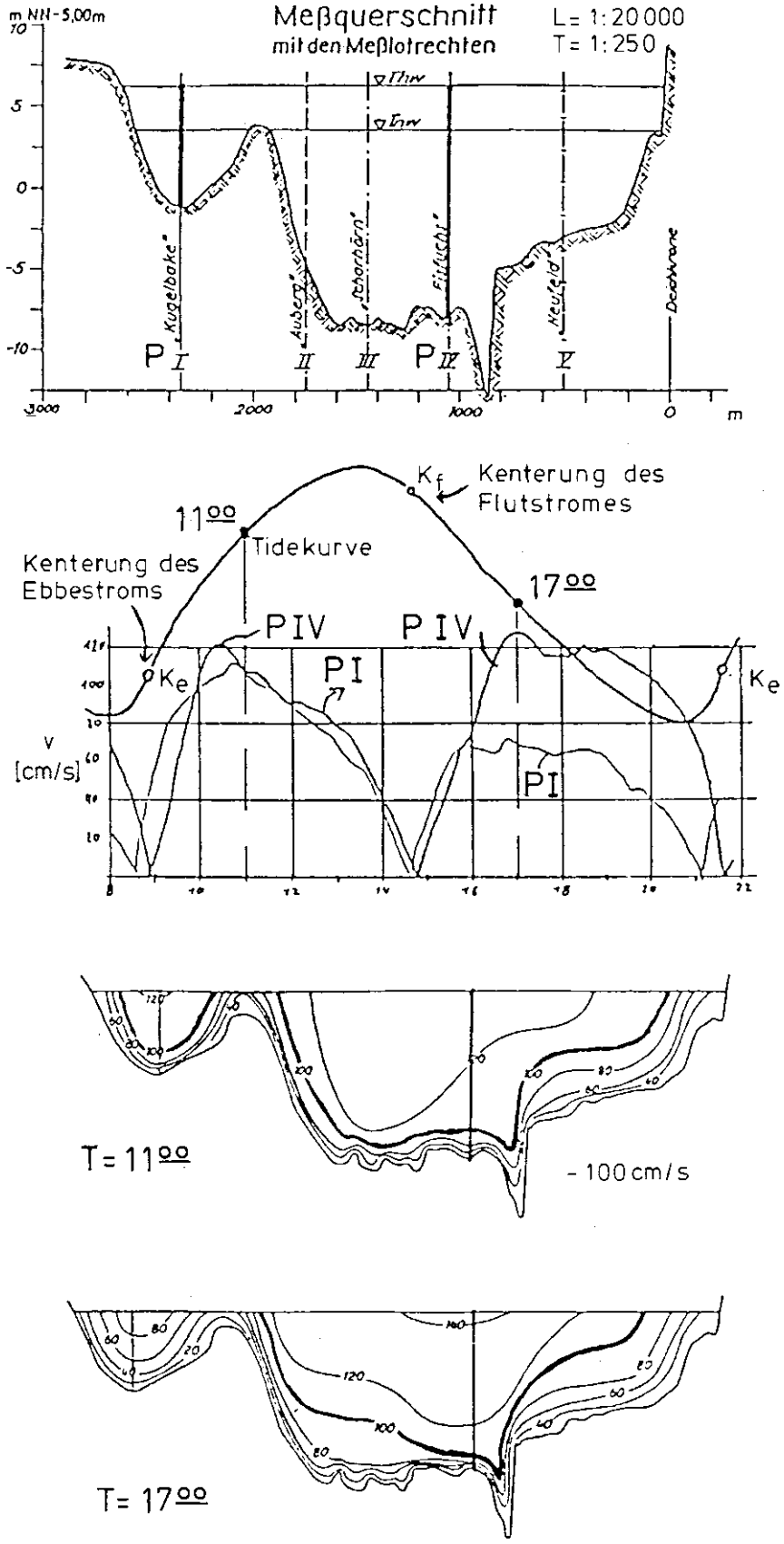


Abb. 6.17: Variabilität der Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt Brokdorf am 1.1.1959 (verändert nach Klein, 1960)

6.2 Oberwasserabfluß

Für die Lage der oberen Brackwassergrenze ist neben der Tide die Oberwasserführung von ausschlaggebender Bedeutung (CASPERS, 1962; LUCHT, 1964; ARGE ELBE, 1988). So verschieben sich die Tideverläufe und der Tidehub in Abhängigkeit vom Oberwasser (vgl. Abb. 6.18 und 6.19).

ARGE ELBE (1988): "In dem Abschnitt von Teufelsbrück bis Glückstadt (mittleres Tidegebiet) werden die Wasserstände und Strömungen in erster Linie durch die Gezeitenbewegung bestimmt. Die Wasserkörper pendeln mit der Tidebewegung (Flutstrom und Ebbstrom) ‚sägeartig' stromauf und stromab. Die resultierende seewärts gerichtete Verdriftung der Wasserkörper und damit auch die Verweilzeit in einem bestimmten Bereich werden durch die Höhe des Oberwasserabflusses bestimmt. Bei niedrigen Oberwasserabflüssen ergibt sich für eine bestimmte Fließstrecke eine große Verweilzeit ... "

"Die Geschwindigkeit der seewärts gerichteten Restströmung und die damit verbundene Verweilzeit der Wasserkörper in einem bestimmten Bereich der Elbe ergeben sich in erster Linie durch die Höhe des Oberwasserabflusses" (LUCHT, 1964).

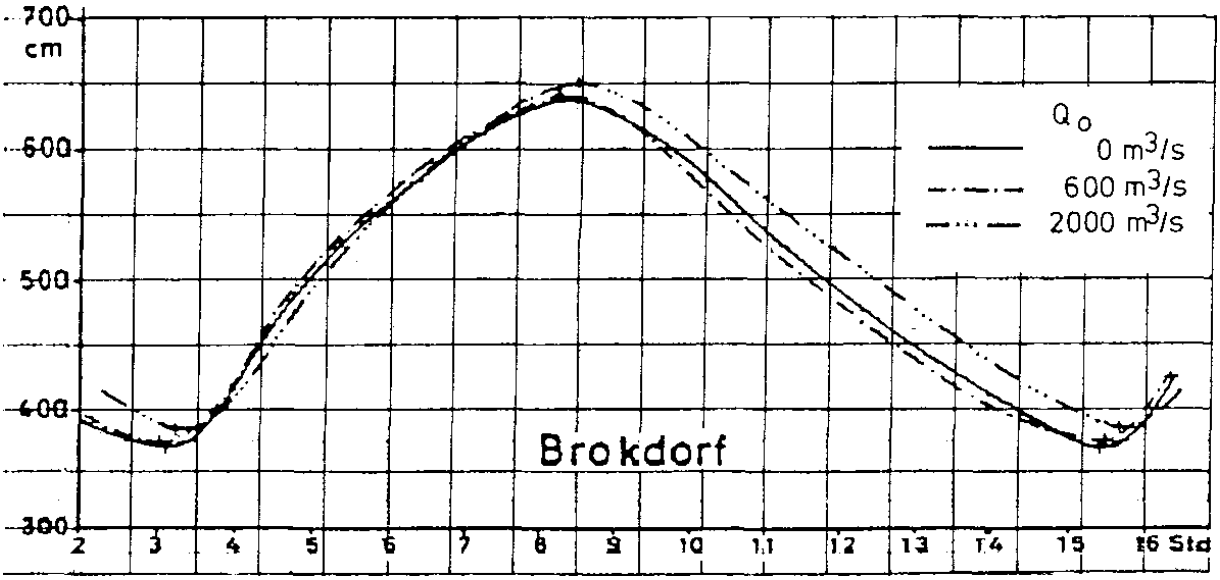


Abb. 6.18: Tidekurven bei verschiedenen Oberwassermengen (verändert nach ROHDE, 1971)

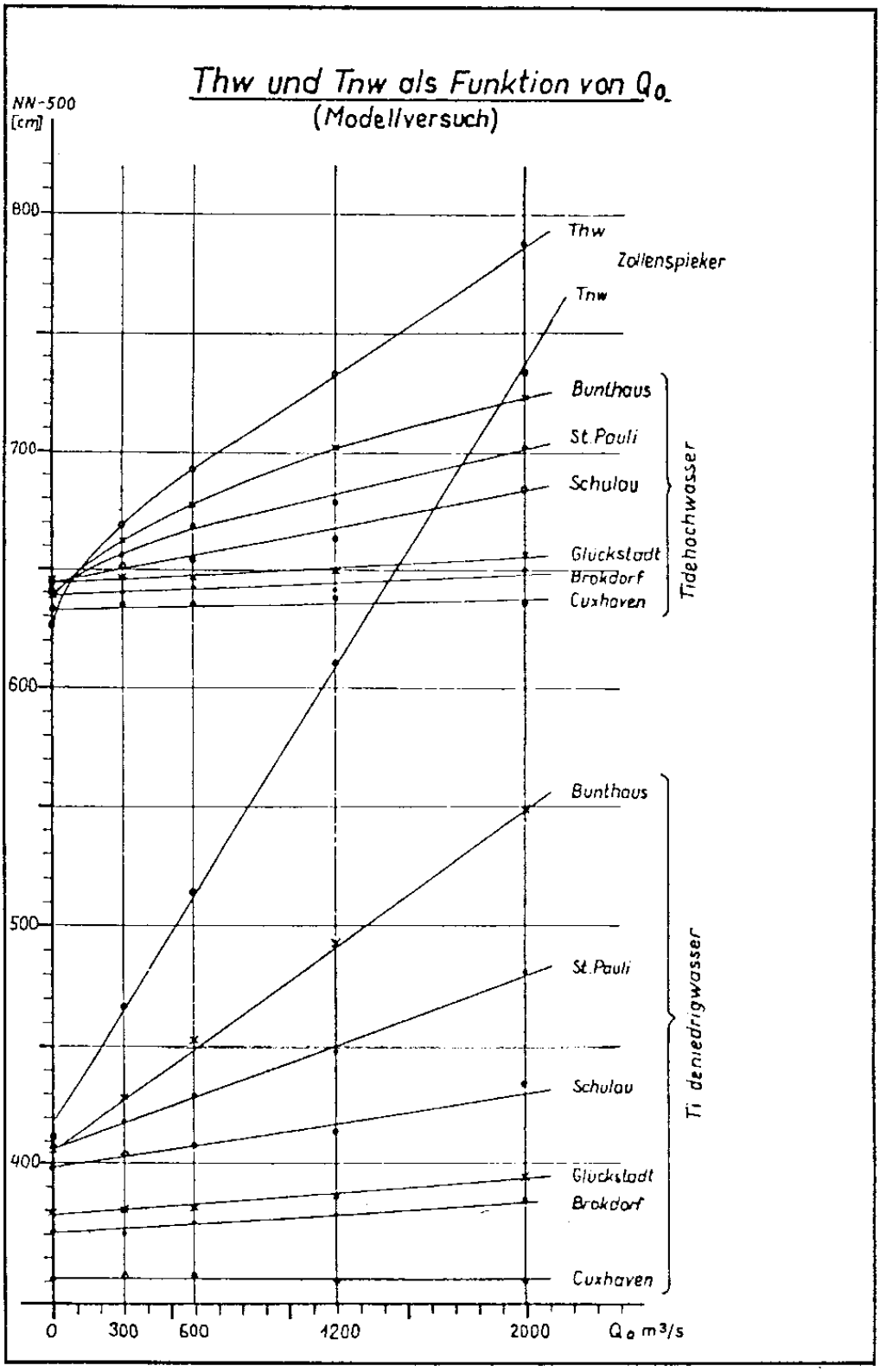


Abb. 6.19: Tidehochwasser (Thw) und Tideniedrigwasser (Tnw) als Funktion von Q, (ROHDE, 1971)

Der Oberwasserabfluß ist abhängig von den Niederschlägen im Ein¬zugs¬gebiet der Elbe (ARGE ELBE, 1990; vgl. Kap. 2 Abb. 2.1). ROHDE (1971) stellte die langfristigen mittleren Ab¬flüsse der Elbe von 1875 bis 1970 zusammen (vgl. Abb. 6.20). Die oberwasserabflüsse bei Neu Darchau (Strom-km 536,4) er¬reichen nach extremen Schneeschmelzen oder starken Regen¬fällen Spitzen¬werte, z.B. 1988 ca. 3.600 m^3/s (vgl. Abb. 6.21). Sehr trockene Sommer wie 1991 führen dagegen zu Phasen mit niedri¬gen Oberwasserabflüssen unter 300 m^3/s. Im lang¬jähri¬gen Mittel beträgt der Oberwasserabfluß bei Neu Darchau 719 m^3/s (Deu¬tsches Gewässerkundliches Jahrbuch, 1985).

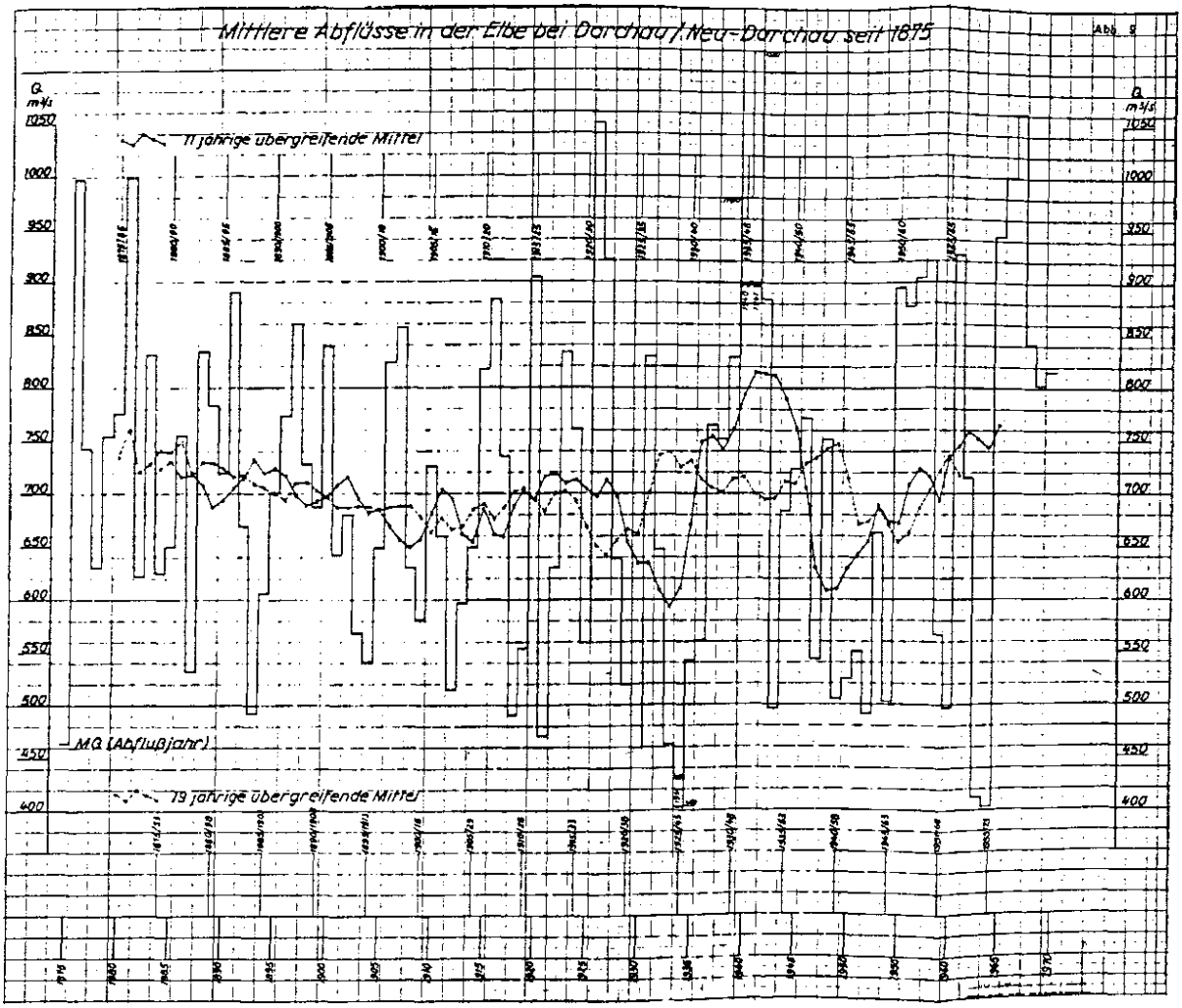


Abb. 6.20: Abflüsse in der Elbe bei Darchau/Neu Darchau, 11 und 19jährige übergreifende Mittel 1875 - 1970 (ROHDE, 1971)

Das Oberwasser beeinflußt auch die Verschiebung der Wasserkörper sowie den Transport von Inhaltsstoffen (vgl. Kap. 9). Generell gilt, daß die Laufzeiten des Wassers im tidefreien Elbeabschnitt im Vergleich zur Tideelbe (vgl. Kap. 8.1) kurz sind (ARGE ELBE, 1988; vgl. Tab. 6.3).

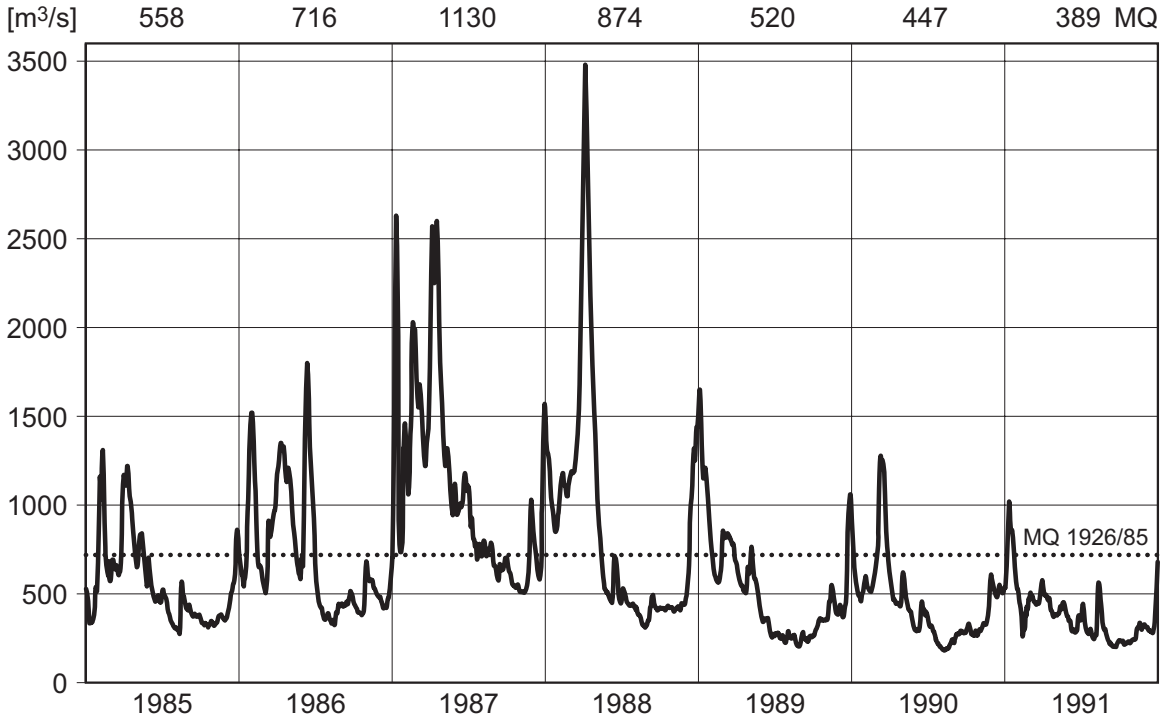


Abb. 6.21: Abfluß der Elbe am Pegel Neu Darchau (Strom-km 536,4) 1985 - 1991 (ARGE ELBE, 1992)

Tab. 6.3: Laufzeiten eines Wasserkörpers in der Elbe in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluß (ARGE ELBE, 1988)

Oberwasserabfluß Pegel Neu Darchau (m^3/s)	Schnackenburg bis Geesthacht ≈110 km (Tage)	Geesthacht bis Brunsbüttel ≈110 km (Tage)
150	2,5	70
300	2,25	36
500	2,0	22
700	1,75	17
1000	1,5	12
2000	1,25	8
3000	<1	4

Der Oberwasserabfluß wird in Neu-Darchau (Strom-km 536,4) gemessen, also in erheblicher Entfernung von der oberen Brackwassergrenze. Die Laufzeit eines Wasserkörpers von Neu-Darchau bis zur oberen Brackwassergrenze beträgt selbst bei hohen Oberwasserabflüssen einige Tage. Nur wenn während dieser Zeit der Oberwasserabfluß konstant ist, kann die Abflußmessung vom Tag des Längsprofiles mit der Lage der oberen Brackwassergrenze sinnvoll verglichen werden. Längere konstante Abflüsse sind stets an langanhaltende Trockenperioden gebunden. Hohe Oberwasserabflüsse treten eher als Spitzen auf, d.h. daß sie selten über längere Zeit anhalten. Daher ist insbesondere ein Vergleich zwischen hohen Oberwasserabflüssen und der oberen Brackwassergrenze problematisch.

Die Auswertung des Längsprofiles (Probenahme eine Stunde vor Tideniedrigwasser) vom 19. April 1988 ergab als obere Brackwassergrenze (nach ARGE ELBE/Flügge) ca. Strom-km 714. Der in Neu-Darchau gemessene Abfluß betrug an diesem Tag 2150 m^3/s. Bei konstantem Abfluß liegt die Laufzeit von Neu-Darchau bis Stromkilometer 717 bei ca. 9 Tagen. D.h. daß das Oberwasser am 10. April 1988 Neu-Darchau passiert haben müßte, um bei konstantem Abfluß am 19. April die obere Brackwassergrenze (ARGE ELBE-Definition) erreicht zu haben. Am 10. April betrug der Abfluß jedoch 3050 m^3/s, mit der Folge, daß sich die obere Brackwassergrenze noch weiter flußabwärts verschiebt.

Die Auswertung des Längsprofiles vom 19. September 1989 ergab als obere Brackwassergrenze (ARGE ELBE-Definition) ca. Stromkilometer 673. Der in Neu-Darchau gemessene Abfluß betrug an diesem Tag 233 m^3/s. Die Laufzeit für diesen Abfluß liegt bei ca. 42 Tagen. D.h. daß das Oberwasser am 8. August Neu-Darchau passiert haben müßte, um bei konstantem Abfluß am 19. September die obere Brackwassergrenze erreicht zu haben.

Am 8. August betrug der Abfluß 255 m^3/s. Vom 8. August bis 19. September schwankte der Abfluß zwischen 202 und 284 m^3/s.

Nach Angaben von LUCHT (1977) und der ARGE ELBE (1988) besteht ein Zusammenhang zwischen Oberwasser und Salzgehalt der Unterelbe. Dies betrifft sowohl den limnischen Bereich als auch die Brackwasserzone. LUCHT beschreibt die Verschiebung der oberen Brackwassergrenze in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluß linear (vgl. Abb. 6.22). Hierbei sind allerdings die Laufzeiten der Wasserkörper von Neu Darchau bis in die Unterelbe zu berücksichtigen. Trotz des Ausbaus der Elbe und einer möglichen Veränderung der Salzgehaltsverhältnisse behält die Darstellung generell ihre Gültigkeit.

Die WSD NORD (1991) gibt eine Übersicht über die Salzgehaltsverhältnisse und den Abfluß in der Elbe von 1989 bis 1990 (vgl. Abb. 6.23).

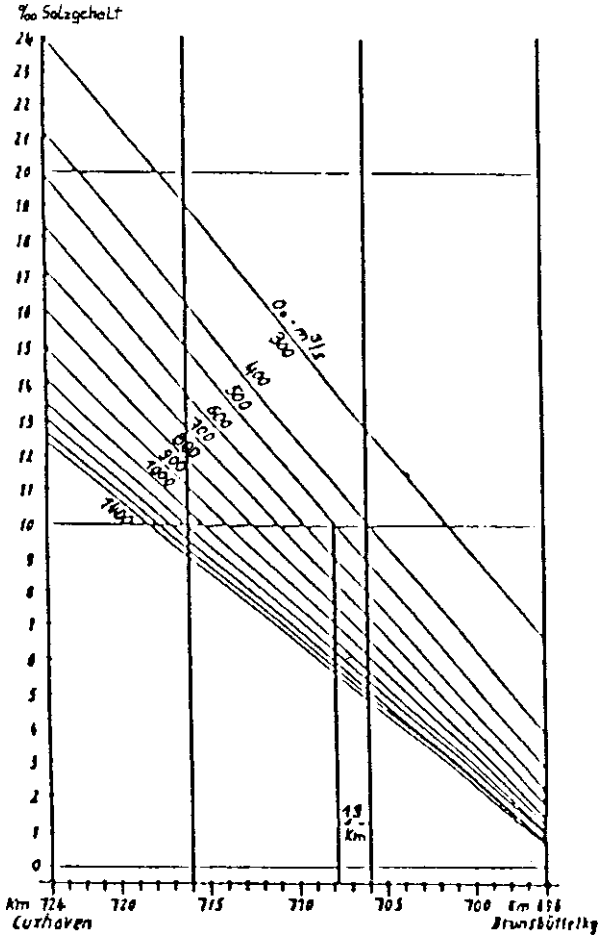


Abb. 6.22: Verschiebung des Brackwassers durch das Oberwasser (Qo) in m^3/s (LUCHT, 1977)

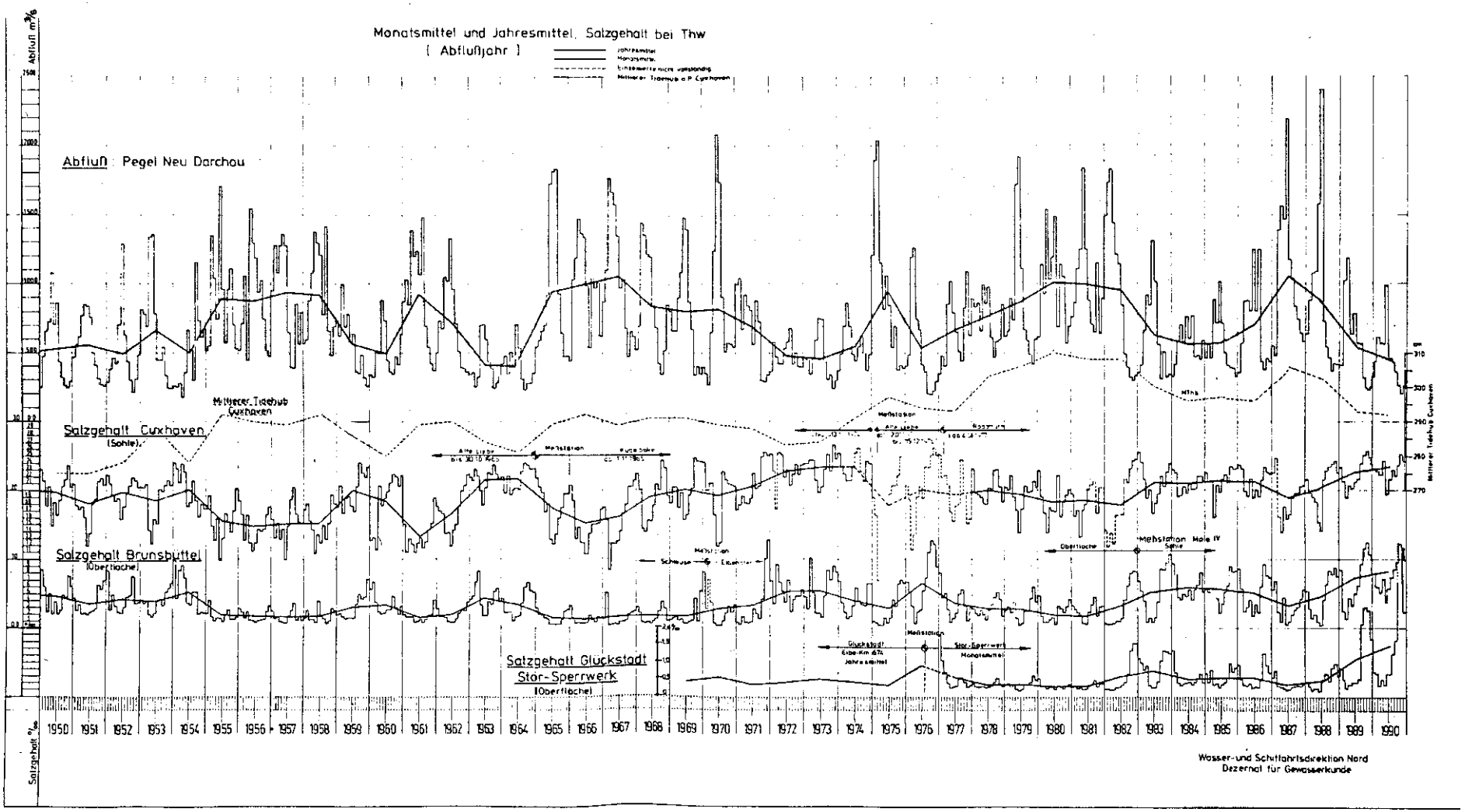


Abb. 6.23: Ganglinien des Salzgehaltes und des Abflusses in der Elbe von 1950 bis 1990 (WSD NORD, 1991)

6.3 Salzfracht

Neben der Ablußmenge des Oberwassers wird die Lage der oberen Brackwassergrenze von der Salzfracht aus der Oberelbe beeinflußt. Flügge et al. (1989) charakterisieren die Wasserqualität der Tideelbe mithilfe der Ionen, die die Salzbelastung der Elbe ausmachen. Die Salzfracht unterlag in der Vergangenheit großen Schwankungen (vgl. Abb. 6.24), war aber etwa seit der sechziger Jahre bis 1990/1991 relativ konstant.

In der Oberelbe stieg 1976 der Salzgehalt wegen des anhaltend geringen Abflusses an. Obwohl die Fracht relativ gering war (LUCHT, 1977), wurde bei Geesthacht eine Salz-Konzentration von 0,79 ‰ gemessen, die sonst erst in der Unterelbe bei Glückstadt zu finden war. Ähnliche Verhältnisse herrschten auch in den trockenen Jahren 1989 bis 1991.

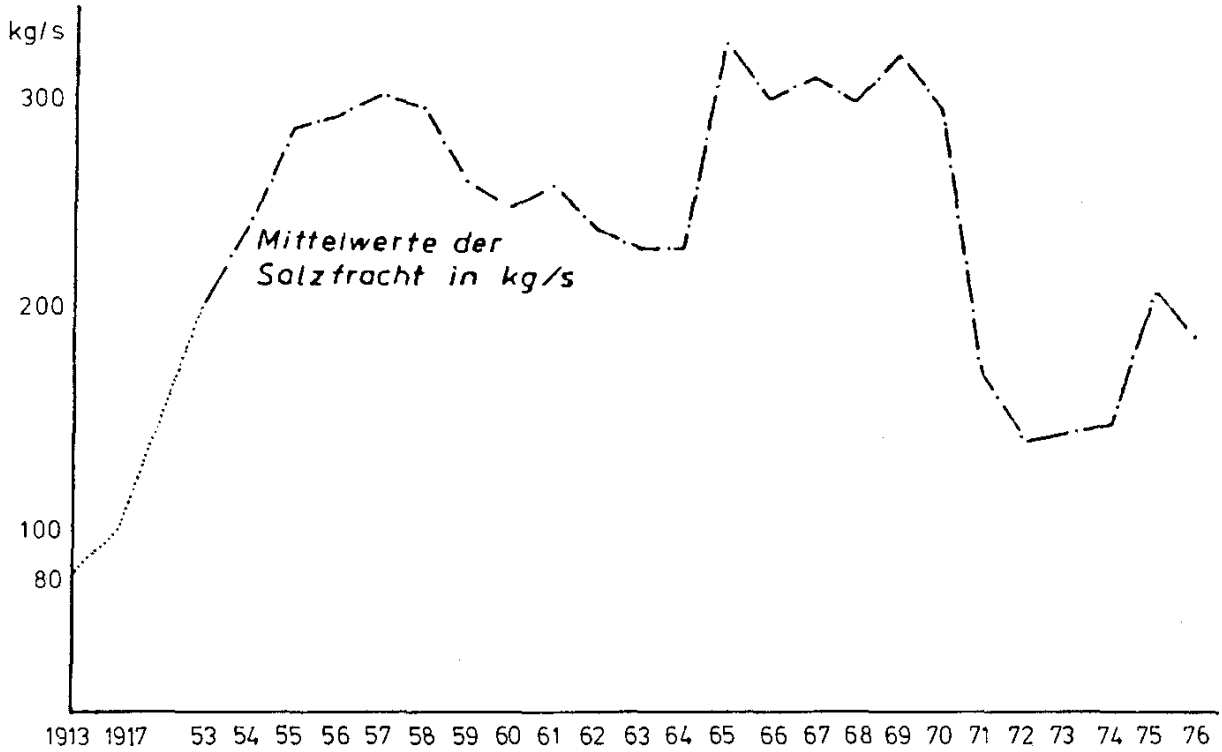


Abb. 6.24: Mittelwert der Salzfracht in der Elbe bei Lauenburg (Strom-km 570) (verändert nach LUCHT,1977)

Aufgrund der Verdünnung besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Chloridkonzentration in Geesthacht und der Oberwasserführung bei Neu Darchau (vgl. Abb. 6.25 und 6.26). Allerdings besteht keine lineare Abhängigkeit, wie Berechnungen der theoretischen Verdünnungskurve bei konstanter Fracht zeigen (FLÜGGE et al., 1988; vgl. Abb. 6.27).

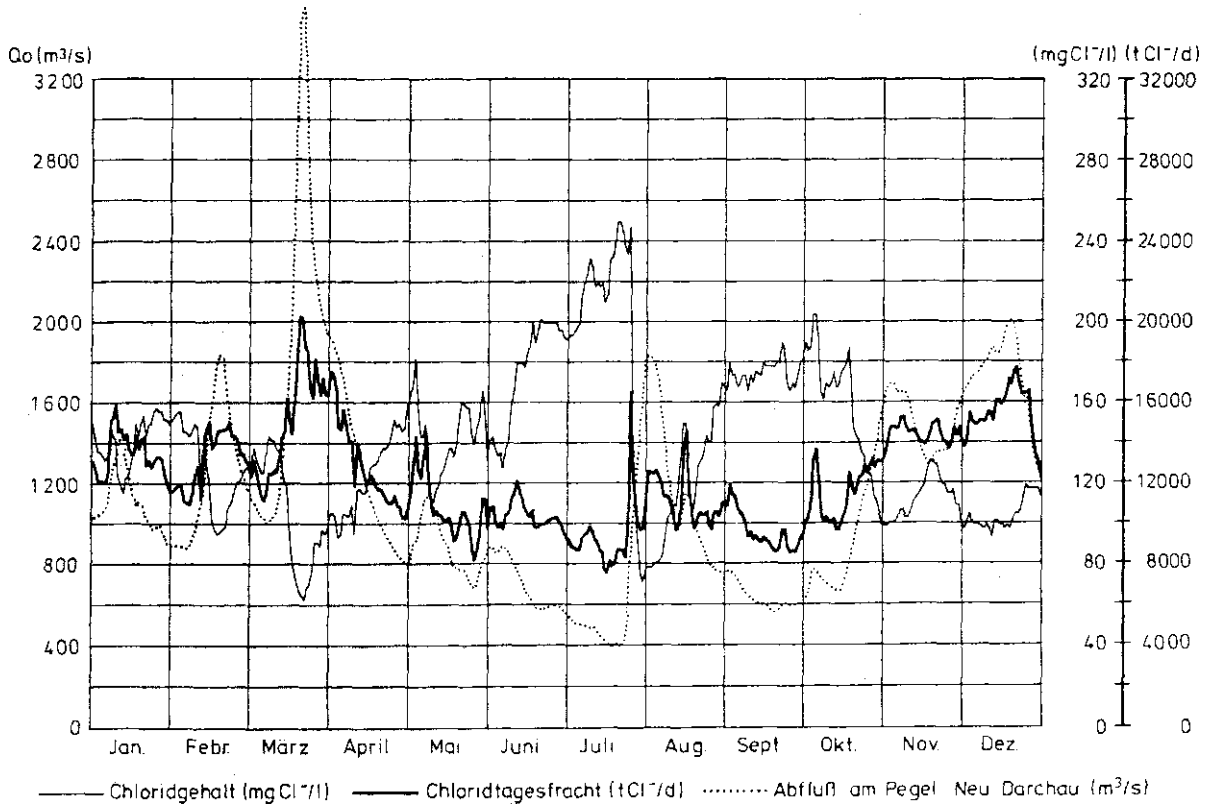


Abb. 6.25: Jahresganglinie des Chloridgehaltes und der Chloridfracht 1981 am Wehr Geesthacht (ARGE ELBE, 1981)

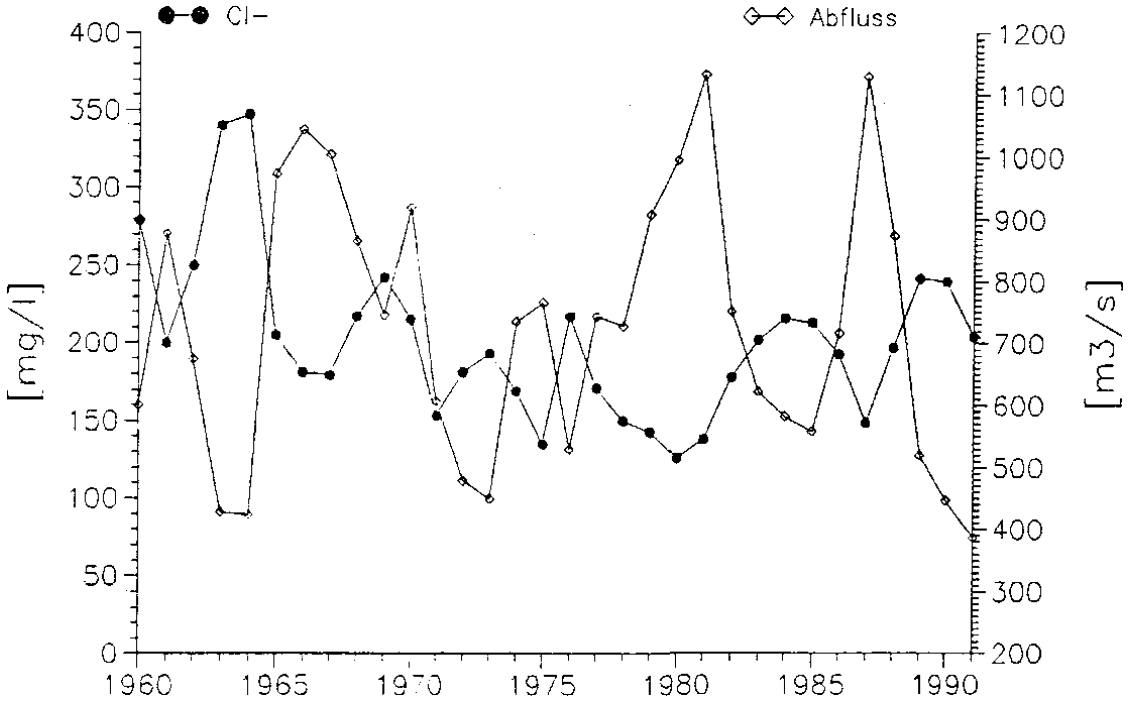


Abb. 6.26: Chloridgehalt und Abfluß (Jahresmittel aus Monatsmittelwerten) der Jahre 1960-1991 (Daten LUCHT / ARGE ELBE, 1960-1991)

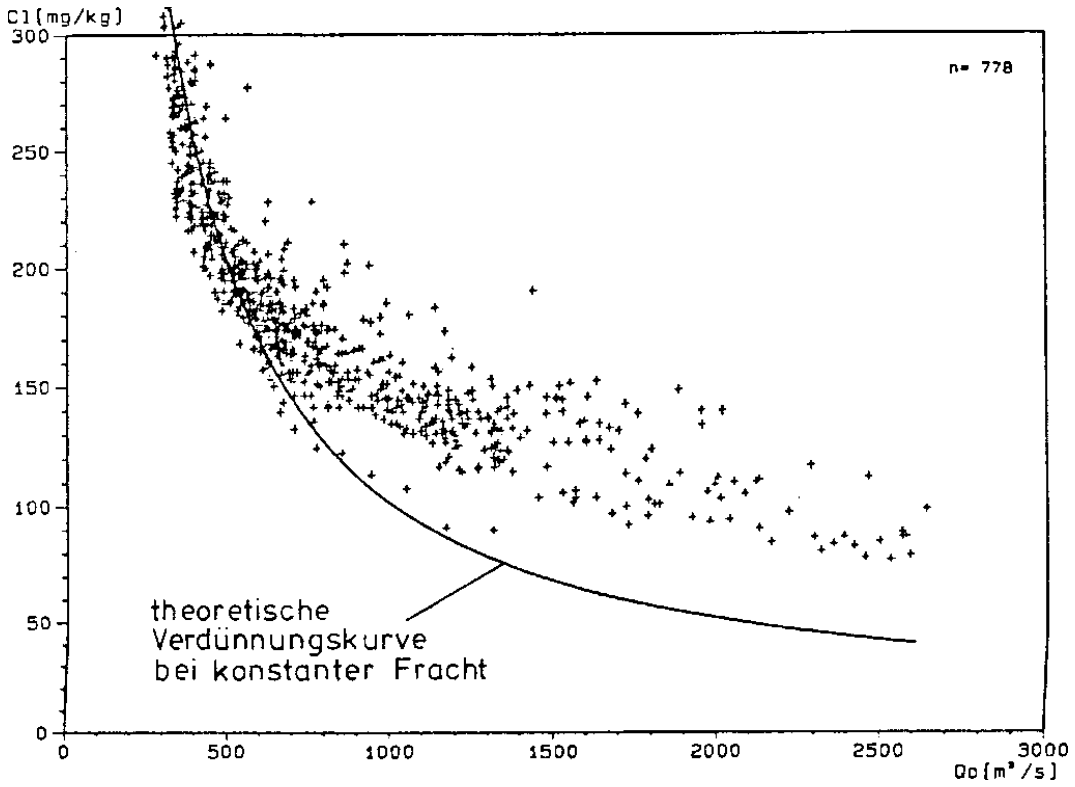


Abb. 6.27: Chloridgehalt in Abhängigkeit vom Oberwasserabfluß am Wehr Geesthacht 1985-1987 (FLÜGGE et al., 1989)

In Phasen niedrigen Oberwasserabflusses beeinflußt der Salzgehalt des Oberwassers den unteren limnischen Bereich erheblich. So überschritten im August 1990 die Chloridwerte oberhalb von Hamburg bereits die 330 mg/l-Marke (vgl. Abb. 6.28). Dieses Phänomen führt zu Schwierigkeiten bei der Angabe der oberen Brackwassergrenze nach einem festgelegten Chloridgehalt (vgl. Kap. 10.3). Nur die Kenntnis über die Herkunft der Salze durch Bestimmung der Ionenzusammensetzung (vgl. Kap. 2) läßt eine Aussage zu, ob hier noch eine Versalzung durch das Oberwasser vorliegt oder die Brackwassergrenze derart weit stromaufwärts vorgedrungen ist.

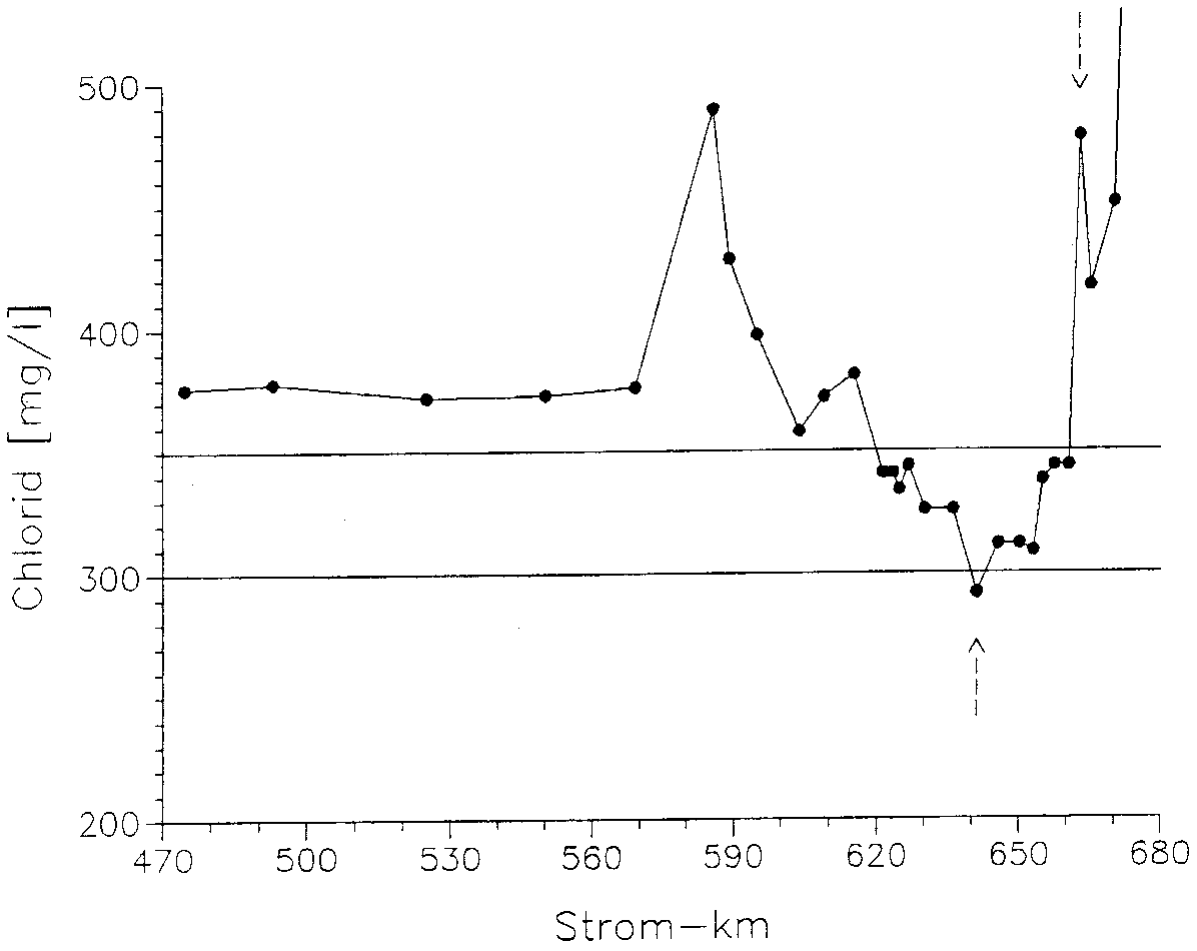


Abb. 6.28: Chloridgehalt in der Elbe im August 1990 bei einem Oberwasserabfluß von 184 m3/s (Daten ARGE ELBE, 1990)

Peaks und Einbrüche der Kurve können durch Einleitungen NaC1-haltiger Abwässer oder durch eine Verdünnung mit Wasser aus Nebenflüssen hervorgerufen werden.

6.4 Zufall der Probenahme

Bei den Probenahmen entnimmt die ARGE ELBE Oberflächenwasser an den Fahrwassertonnen. Mögliche Abweichungen im Quer- und Vertikalprofil (vgl. Abb. A.4 und 6.5 in Kap. 6) müssen bei der Verwendung der Daten berücksichtigt werden (vgl. Abb. 29).

Die Meßwerte des Monatsprofils der ARGE ELBE stellen Stichproben dar. Der Chloridgehalt / Salzgehalt des Elbewassers kann daher im betreffenden Monat deutlich höhere bzw. niedrigere Werte erreichen (vgl. Abb. 6.30). 1.100 µS/cm Leitfähigkeit entsprechen in der Unterelbe bei Stadersand (1991) etwa 200 mg/1 Chlorid (mdl. Mitt. ARGE ELBE, 1992; vgl. Tab. 3.1 in Kap. 3).

Entsprechend der Tidephase gibt es im Längsprofil des Ästuars einen ansteigenden Salzgradienten. Anders betrachtet, verändert sich infolge der Tide in der Brackwasserzone der Salzgehalt an jedem festgelegten Meßpunkt periodisch (vgl. Abb. 6.31).

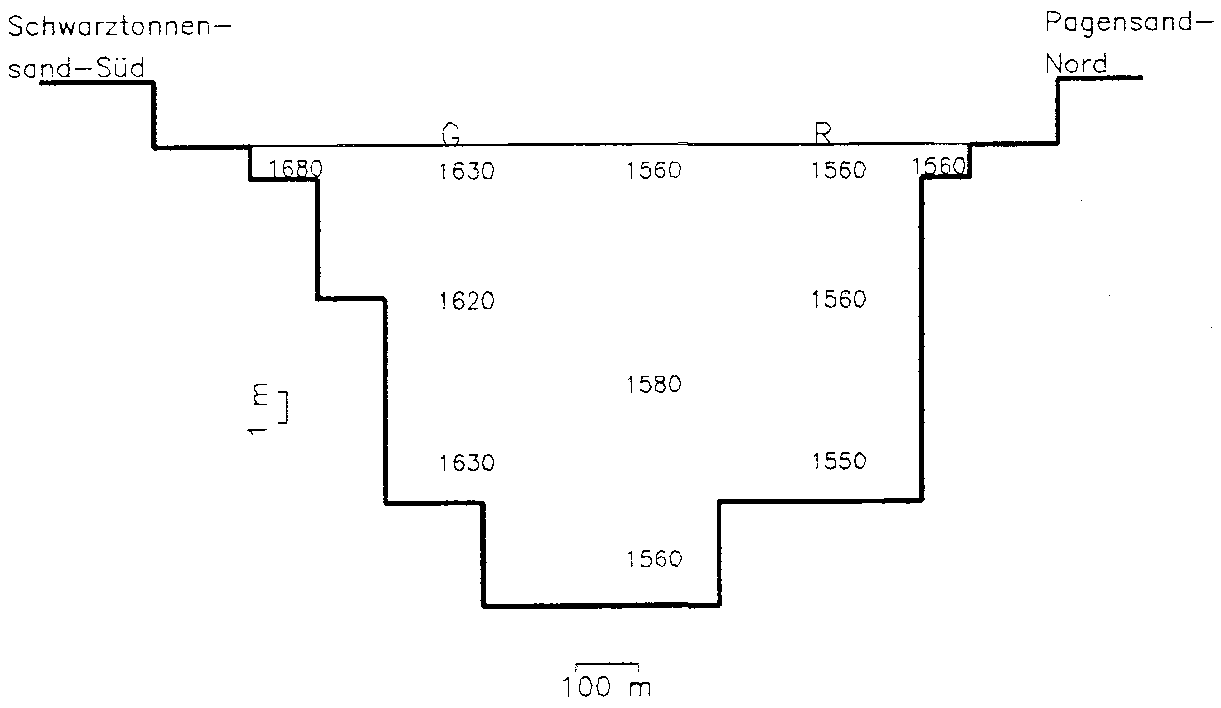


Abb. 6.29: Leitfähigkeit im Quer- und Vertikalprofil (schematisiert nach Seekarte INT 1454) zwischen Pagensand und Schwarztonnensand am 24.10.1991 (Daten ARGE ELBE, 1992), G = grüner Tonnenstrich, R = roter Tonnenstrich

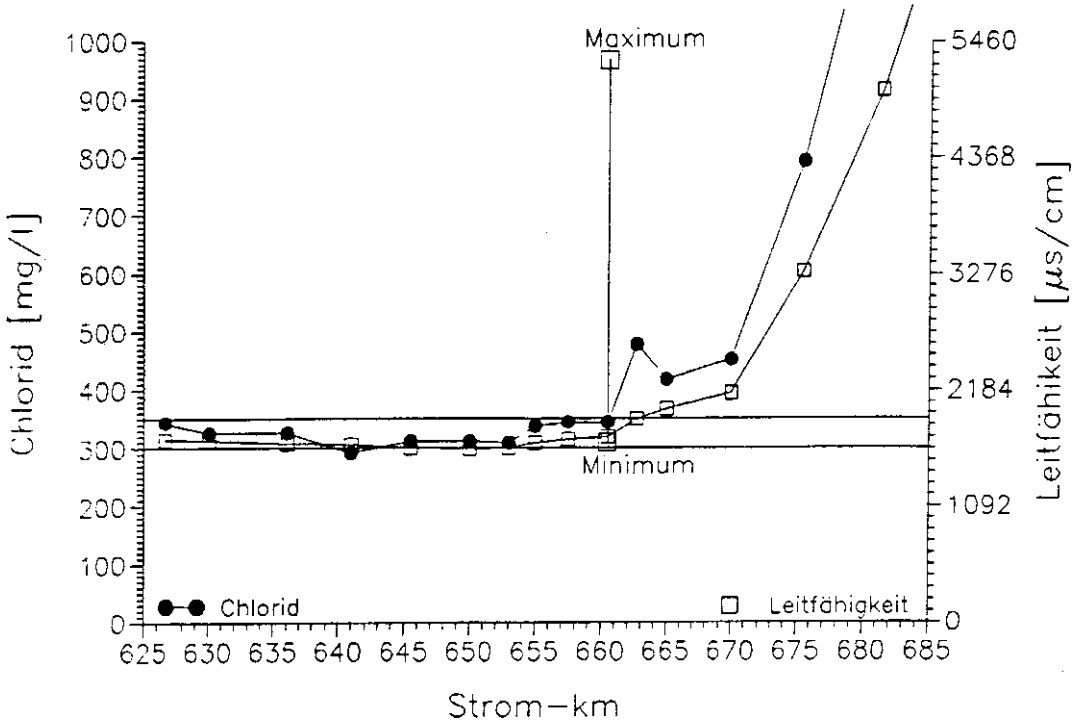


Abb. 6.30: Elektrische Leitfähigkeit und Chlorid im August 1990 im Elbelängsschnitt (7.8.1990) im Vergleich zu den Leitfähigkeits-Extremwerten von August an der Meßstation Grauerort (Strom-km 660,5) (Daten ARGE ELBE, 1990)

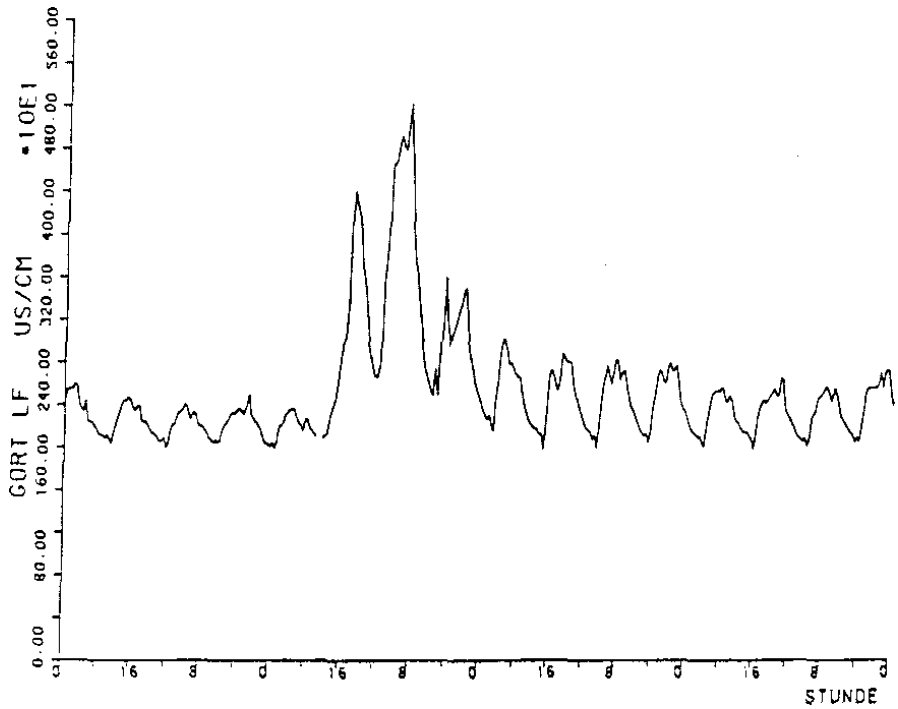


Abb. 6.31: Tagesganglinie der Leitfähigkeit (18.8.- 25.8.1990) am Ufer vor Grauerort (verändert nach WWA Stade, 1992)

Betrachtet man nicht einen Fixpunkt, über den das Elbewasser mit schwankenden Salzgehalten strömt, so pendelt ein Wasserkörper gleichen Salzgehalts und damit auch die obere Brackwassergrenze mit jeder Tide um ca. 15 km (mdl. Mitt. ARGE ELBE, 1992) sägeartig stromauf und -ab (vgl. Kap. 9).

7. Biologie des Brackwassers

7.1 Allgemeines

Brackwasser kann verschiedener Herkunft sein. Aufgrund der speziellen Ionenzusammensetzung (vgl. Kap. 2) werden thalassogenes und athalassogenes Brackwasser von sehr unterschiedlichen Lebensgemeinschaften geprägt. Angaben über Vorkommen und Salzgehaltstoleranz von Organismen sind in der Literatur unter verschiedenen Stichpunkten zu finden, z.B.: Kaliabwässer aus dem Bergbau, natürliche athalassogene Brackwässer, z.B. Natronseen, und thalassogene Brackwässer wie Strandseen (u.a. Étangs), Bodden, Haffs oder Rockpools an Meeresküsten.

Über die Besiedlung natürlicher binnenländischer Brackwässer berichtete u.a. RUTTNER-KOLISKO (1971).

Kaliabwässer werden heute noch in Süßwasserbereiche von Flüssen eingeleitet und führen dort zu erheblichen biologischen Problemen (u.a. MEIJERING, 1977 und HERBST, 1979). Die Untersuchungen von ALBRECHT (1954) belegen, daß Schäden durch einseitige Salzkonzentrationen durch Zugabe anderer Salze gemindert werden können:

"Besonderer Bedeutung kommt in dieser Beziehung dem Kalium (EBERLING, 1933) zu. Schon HIRSCH (1920) wies darauf hin, daß nicht die Höhe der Salzkonzentration als solche das Bild der Fauna ausschlaggebend beeinflußt, sondern daß das unausgeglichene Überwiegen eines einzelnen Elementes in der Versalzung eine Schädigung der Fauna herbeiführt. Die Versuche von EBERLING (1933) haben ... ergeben, daß die Kalisalze in erster Linie durch direkte Giftwirkung des Kalium-Ions und in geringem Maß des Magnesium-Ions Schädigungen an Fischen und niederen Wassertieren herbeiführt. Es handelt sich hier also weniger (erst bei sehr hohen Konzentrationen) um osmotische Vorgänge, wie sie durch starke Salzlösungen (hoher Chloridgehalt) und beim plötzlichen Wechsel vieler Tiere von Süß- in Meerwasser hervorgerufen werden können. Derartig unausgeglichene Salzlösungen können durch die Gegenwart eines anderen Stoffes entgiftet werden. So gelang es EBERLING (1933), eine n/100 KCl-Lösung in gleicher Weise wie eine 100fach verdünnte Endlauge (231 mg/1 K, 833 mg/1 Mg) mit einer n/20 $CaCl_2$-Lösung zu entgiften. Dies bedeutet also für die Praxis, daß die Wirkung besonders der Kalium-Ionen - solange die Konzentrationen nicht zu hoch sind - durch den natürlichen Kalkgehalt der Gewässer weitgehend aufgehoben werden kann."

Über die Lebensgemeinschaften in marinem Brackwasser und die Salztoleranzen einzelner Arten sei u.a. auf BRAARUD (1951), AX & AX (1960), BICK (1968), REMANE & SCHLIEPER (1971), BAKKER & DE PAUW (1975), MORRIS et al. (1978), BRAND (1984), RAVAIL & ROBERT (1985), RIJSTENBIL (1987), SELLNER et al. (1988) und THIEL et al. (1989) verwiesen.

BICK (1964) vergleicht (in einem Experiment) die Toleranz von (Süßwasser-) Ciliaten gegenüber Süßwasser, Meerwasser, thalassogenem Brackwasser, Kaliversalztem Flußwasser und binnenländischem Natronsee-Wasser (athalassogenes Brackwasser). Seine Versuche zur Verträglichkeit der Ciliaten einerseits gegenüber ansteigendem Salzgehalt und andererseits verschiedenen Versalzungstypen ergaben, daß die meisten Süßwasserarten bei steigendem Salzgehalt ausfallen. Viele Arten haben dabei ihre Grenzkonzentration im binnenländischen Brackwasser eher bei geringeren Salzgehalten erreicht, als im marinen Brackwasser.

Brackwässer werden von toleranten Süßwasserarten, euryhalinen marinen Organismen oder endemischen Brackwasserarten besiedelt. Allgemein ist die Zahl der Arten, die im Brackwasser leben, geringer als die mariner oder limnischer Gebiete mit gleichen Lebensräumen. REMANE & SCHLIEPER (1971) schematisieren das im Brackwasser auftretende Artenminimum (vgl. Abb. 7.1). Die Verringerung der Artenvielfalt aufgrund ungünstiger, lebensfeindlicher Bedingungen (THIENEMANN, 1939) wirkt sich in tidebeeinflußten Brackgewässern mit schwankendem Salzgehalt extremer aus, als in stagnierenden Bereichen, z.B. eingedeichten Becken an der Wattenmeerküste (RIEDEL-LORJÉ, 1992, unveröffentlicht).

Während in der Elbe seeabwärts die Zahl der linnischen Arten schon bei schwacher Versalzung des Wassers abnimmt, verringert sich stromaufwärts die Zahl mariner Arten wesentlich langsamer (u.a. RIEMANN, 1966; FIEDLER, 1991). Im mittleren Bereich (Mesohalinikum -vgl. Kap. 4) kann es zur Ausbildung echter Brackwasserarten kommen. Das Artenminimum liegt nicht in der Mitte zwischen Süß- und Meerwasser, sondern ist deutlich zum Süßwasser hin verschoben, etwa bei 2 - 7 ‰ (REMANE & SCHLIEPER, 1971) (vgl. Abb. 7.2).

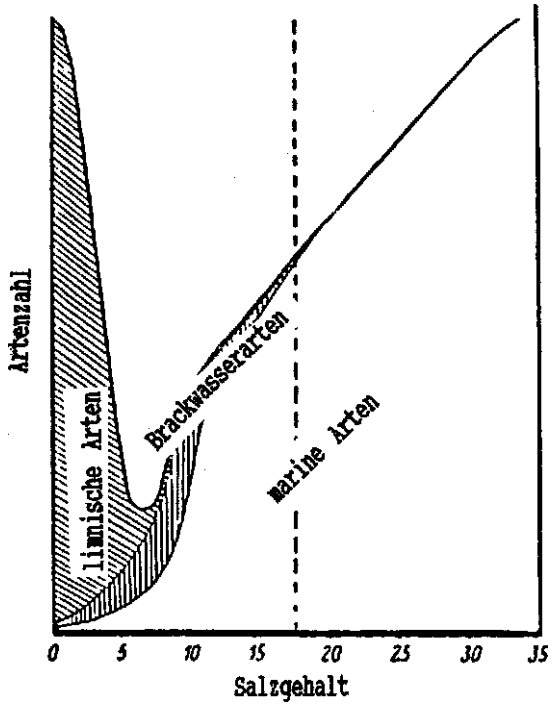


Abb. 7.1: Verteilung limnischer, brackiger und mariner Organismen in Abhängigkeit vom Salzgehalt (verändert nach REMANE, 1934)

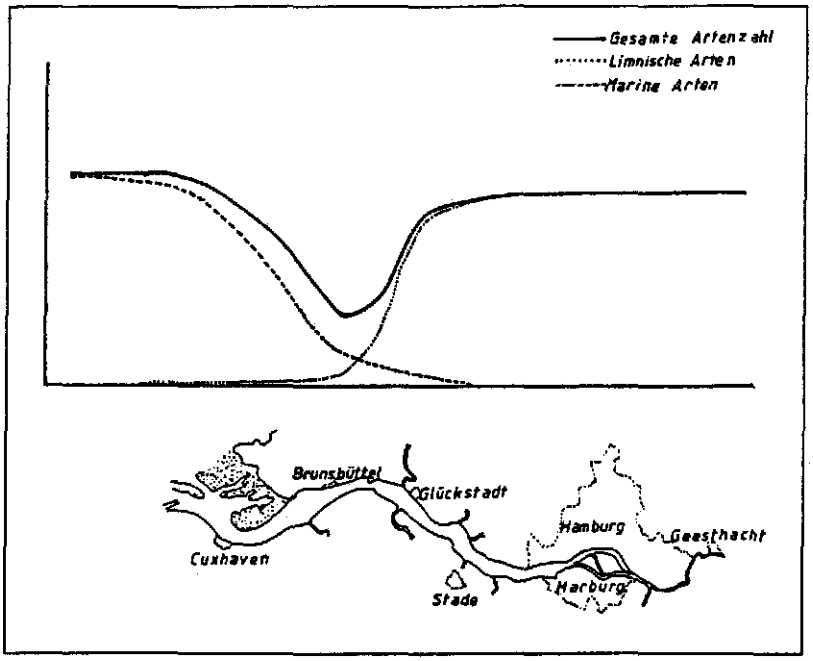


Abb. 7.2: Theoretische Verteilung der Artenzahl des Zoobenthos mit dem Artenminimum im Elbe-Ästuars - bei hohen Oberwasserabflüssen (vgl. Kap. 6.2) - HECKMAN (1992).

Im Bereich des Artenminimums ist eine Reduzierung der Algen durch den Abfall der Pigmente gekennzeichnet (vgl. Abb. 7.3). Neben der Wirkung des Salzgehalts ist auch auf die hier ungünstigen Lichtverhältnisse durch Schwebstoffe hinzuweisen (vgl. Abb. 7.4 und dazu 7.5).

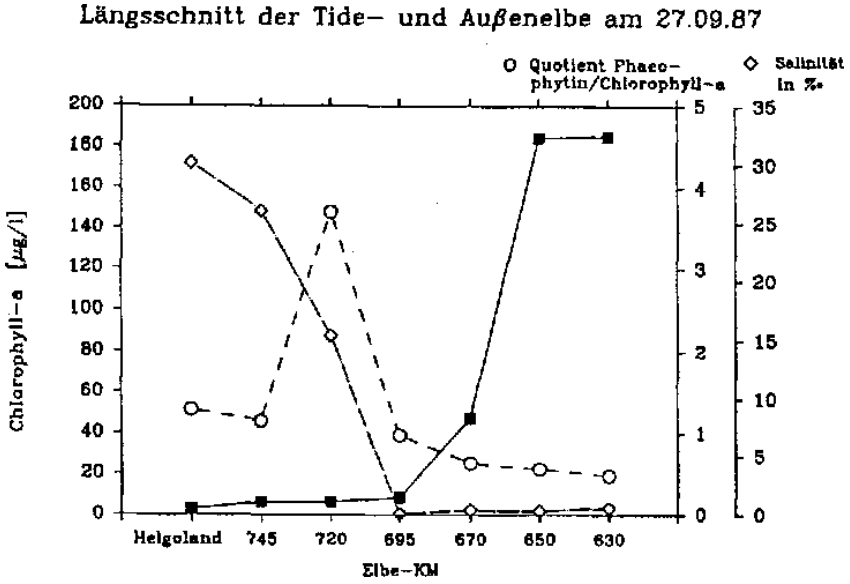


Abb. 7.3: Abfall der Algenpigmente in der Elbe im Bereich des Artenminimums am 27.9.87 (KIES et al., 1992)

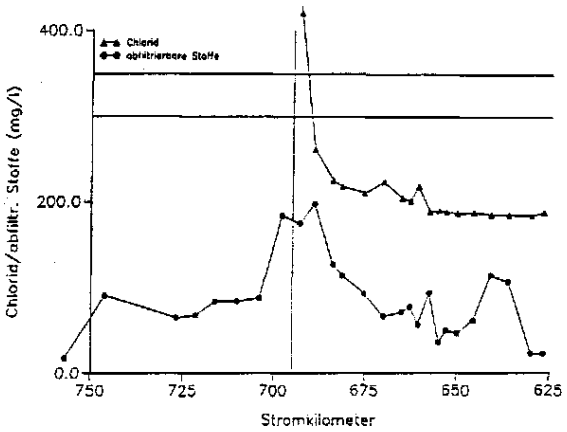


Abb. 7.4: Chlorid- und Schweb stoffgehalt im September 1987 (Neu Darchau Q = 581 m^3/s) (Daten ARGE ELBE, 1987)

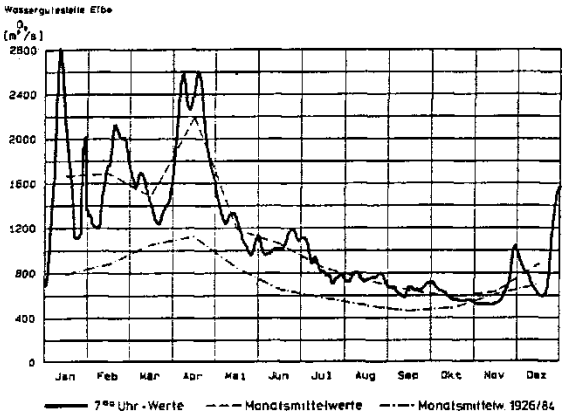


Abb. 7.5: Der Oberwasserabfluß (Q) Neu Darchau (ARGE ELBE, 1987) zeigt die konstante Situation im September 87

Je nach Herkunft und Toleranz können bestimmte Arten niedrige oder hohe Salzgehalte ertragen, einige sogar extreme Schwankungen; geringere Toleranz weisen stenohaline Arten auf. Eine Anpassung des Salzhaushaltes der Organismen erfolgt durch osmoregulation (u.a. REMANE & SCHLIEPER, 1971 und KIRST, 1985). Weisen die Organismen eine hohe Toleranz gegenüber wechselnden Salzgehalten auf, werden sie - je nach Herkunft - als limnisch oder marine euryhaline bezeichnet (vgl. Abb. 7.6). Aufgrund ihrer Euryökie (große Toleranz gegenüber Umweltbedingungen) eignen sie sich nicht als Indikatoren (vgl. Kap. 8.4).

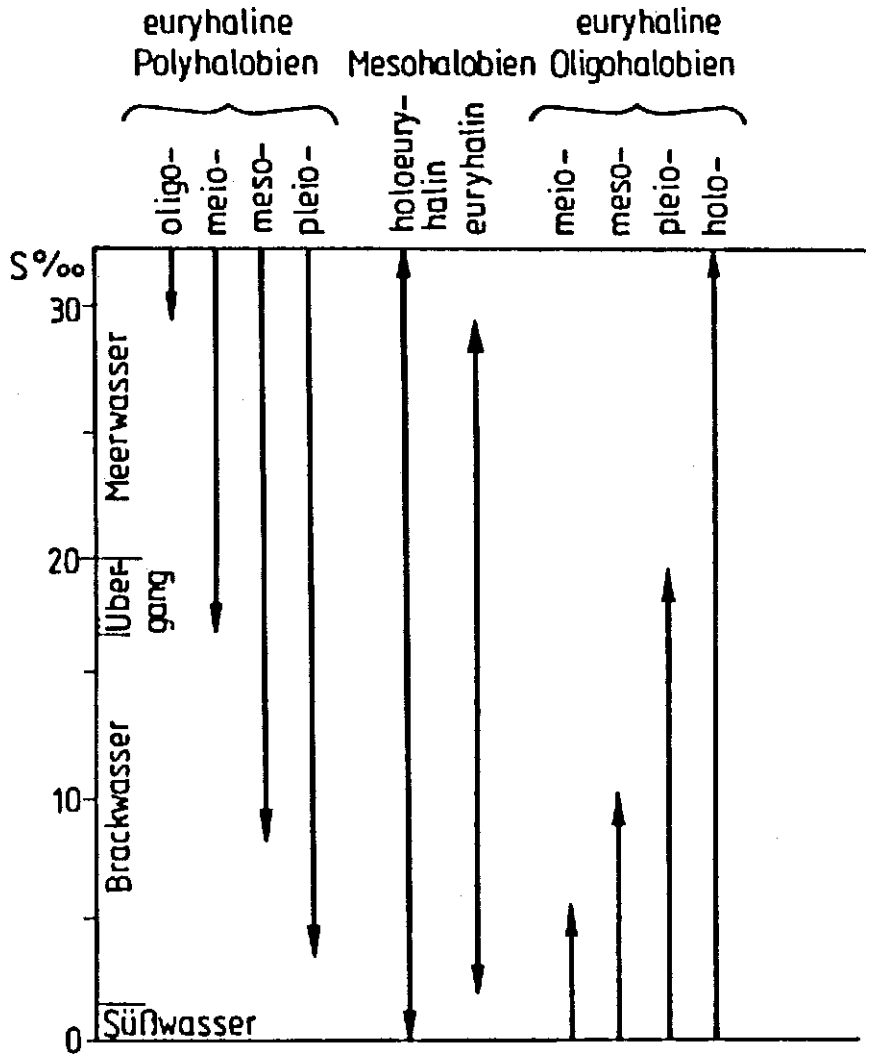


Abb. 7.6: Einteilung der Salztoleranz der Brack- und Salzwasserorganismen (verändert nach SIMONSEN, 1962)

Die Unterelbe weist eine horizontale (längs und quer) und vertikale Gliederung mit unterschiedlichen Lebensräumen auf: freies Wasser, Ufer mit Sand-, Misch- und Schlickwatten und stellenweise Röhricht sowie die Tiefwasserbereiche der ausgebaggerten Fahrrinnen (vgl. u.a. ARGE ELBE, 1984). Die Besonderheiten der unterschiedlichen Biotope sollen in dieser Studie nicht weiter erörtert werden.

Im Längsprofil ist das Elbe-Ästuar besonders durch die Salzgehaltszonierung gekennzeichnet: vom Süßwasser über den oligohalinen Bereich, in dem häufiger Süßwasser und Brackwasser wechseln, und dem Mesohalinikum bis zum äußeren Grenzbereich vom Fluß zu Meer (vgl. Kap. 4). Die Organismen in der unteren Süß- und oberen Brackwasserregion der Elbe sind in besonderem Maße an die hier schwankenden Verhältnisse angepaßt (RIEDEL-LORJÉ, 1981). Dies bezieht sich nicht nur auf den Salzgehalt, sondern auch auf das sich stets mit der Tide und Brackwassergrenze verschiebende hohe Schwebstoffangebot (vgl. Kap. 6 und Kap.8).

Die Trübstoffe bewirken bereits in geringer Wassertiefe starke Beschattung, die zu einer Hemmung der Assimilation von Pflanzen und damit der Sauerstoffproduktion führt (GÄTJE, 1991) (vgl. Abb. 7.7), dies gilt besonders für das Schwebstoffmaximum in der oberen Brackwasserzone (vgl. Kap. 8)

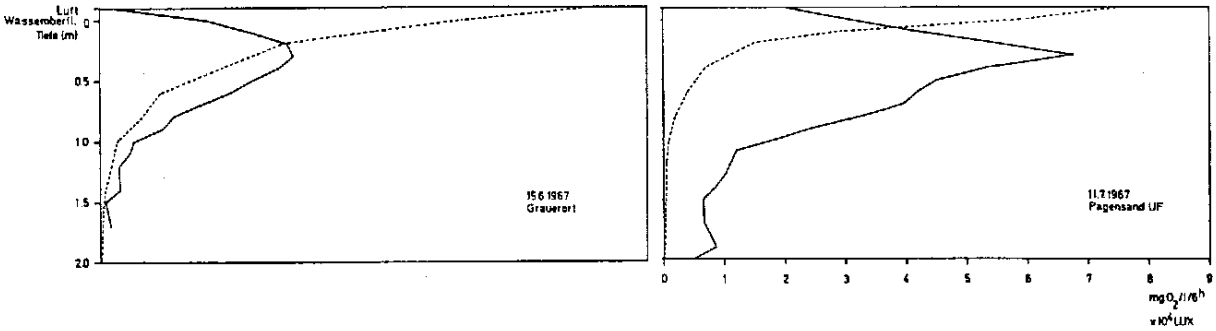


Abb. 7.7: Sauerstoffproduktion (NÖTHLICH, 1972b)

Neben dieser nachteiligen Wirkung stellen aber die Schwebstoffe auf grund ihrer Struktur und Zusammensetzung (vgl. Kap. 8; GREISER, 1991) auch ein großes Nahrungsangebot für filtrierende und strudelnde Organismen aus Plankton und Benthos dar (vgl. Abb. 7.8).

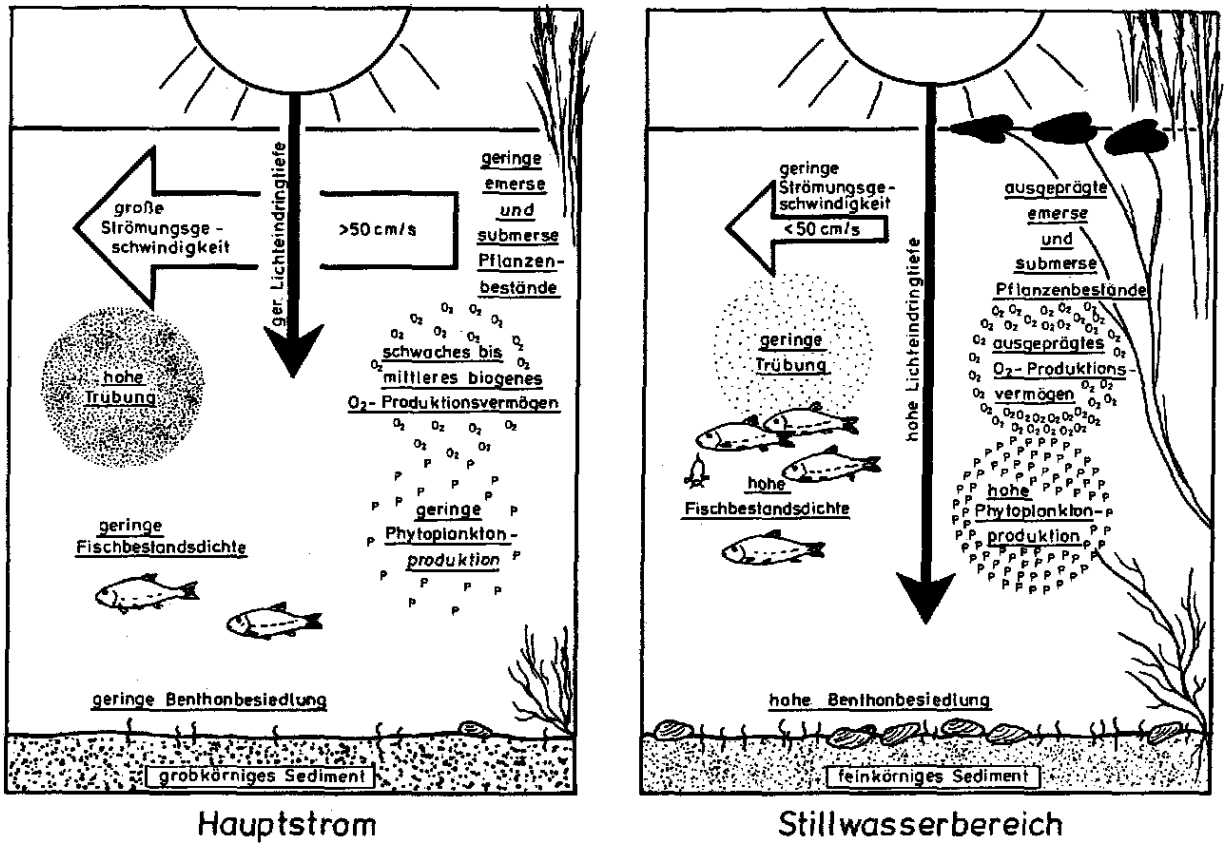


Abb. 7.8: Bedeutung von Licht und Schwebstoffen im Hauptstrom der Elbe (links) und in Stillwasserbereichen (rechts) (ARGE ELBE, 1990)

Ausführliche Angaben über Vorkommen und ökologie von Plankton und Benthos im Elbelängsschnitt sind u.a. SCHULZ (1961), RIEMANN (1966), FIEDLER (1991) und der ARGE ELBE (1991) zu entnehmen.

Die komplexen Zusammenhänge von abiotischen und biotischen Faktoren in der Elbe haben KAUSCH et al. (1991) schematisch dargestellt (vgl. Abb. 7.9).

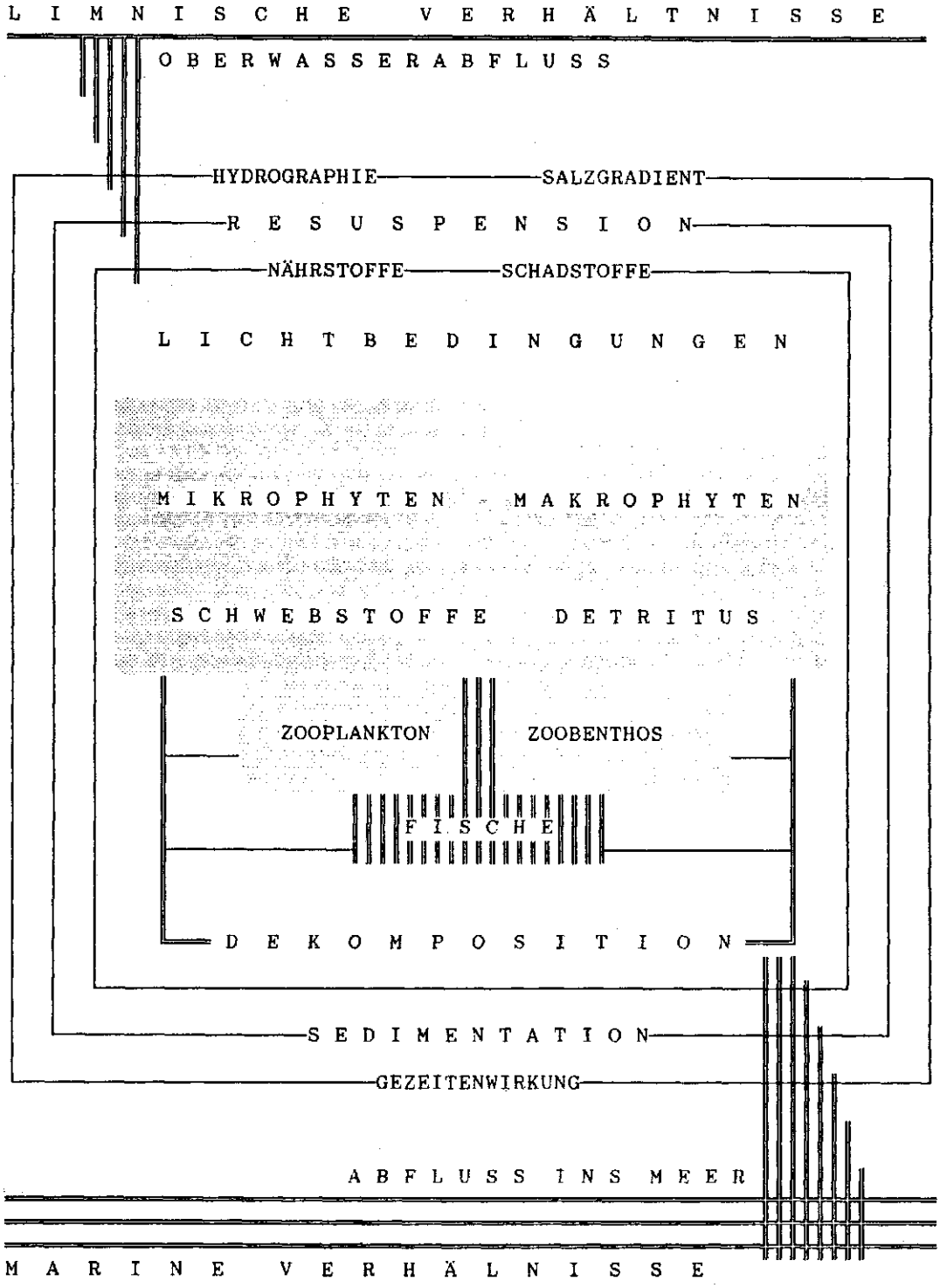


Abb. 7.9: Schematische Darstellung Ökosystem Unterelbe (KAUSCH, 1992, unveröffentlicht)

7.2 Indikatorarten

In der Unterelbe gibt es verschiedene Lebensgemeinschaften: sesshafte Pflanzen und Tiere (Benthos) (vgl. Abb. 7.10), weitgehend standorttreue Tiere (Fische: DIERCKING & WEHRMANN, 1991), verdriftende Organismen (Plankton),auf Nahrungswanderung gehende Fische (Hering, Dorsch und Zander: FIEDLER, 1991), oder zum Laichen wandernde Arten wie Stint (LILLELUND, 1960), Wollhandkrabbe (RIEDEL-LORJÉ & GAUMERT, 1982) oder der Krebs *Eurytemora affinis* (PEITSCH, 1992). Umfangreiche Angaben über die Biologie der Elbe, besonders in Abhängigkeit von den Salzgradienten, sind bei KÜHL & MANN (1953) und KÜHL (1972) zu finden.

Aus den Elbe-Untersuchungen läßt sich ableiten, daß der überwiegende Teil der Organismen im oligohalinen und mesohalinen Bereich euryhalin ist. Es sind meist die marinen Arten des Planktons, Benthos oder Nektons (Fische), die aktiv oder passiv im Ästuar vom Meer aus bis an oder sogar in das Süßwasser vordringen und dort leben können (u.a. AX, 1957; CASPERS, 1958; SCHULZ 1961; RIEMANN, 1966; GIERE, 1968; NÖTHLICH, 1972b; FIEDLER, 1991; GÄTJE 1991; THIEL, 1992). Sie eignen sich aufgrund ihrer Salzgehaltstoleranz nicht als Indikatoren für die obere Brackwassergrenze. Das gleiche gilt für Plankter, die über eine weite Strecke mit der Tide verdriften (PEITSCH, 1992).

Nur wenige Arten sind geeignet, eindeutig den Süß- vom Brackwasserbereich der Elbe zu trennen (FLÜGGE et al., 1989): es sind stenohaline (vgl. Kap. 7.1) Organismen des Aufwuchses, z.B. Ciliaten und Seepocken (*Balanus improvisus*) und Bodenorganismen, z.B. einige Fadenwürmer (RIENUN, 1966; SCHMIDT, 1989) sowie in Ausnahmen aktiv schwimmende Fische und Krebse. FIEDLER (1991) und die ARGE ELBE (1991) fand im Oligohalinikum keine limnischen Asseln (*Asselus aquatcus*) mehr (vgl. Tab. 7.1). Diese Art zeigt also die einsetzende Versalzung der oberen Brackwassergrenze an.

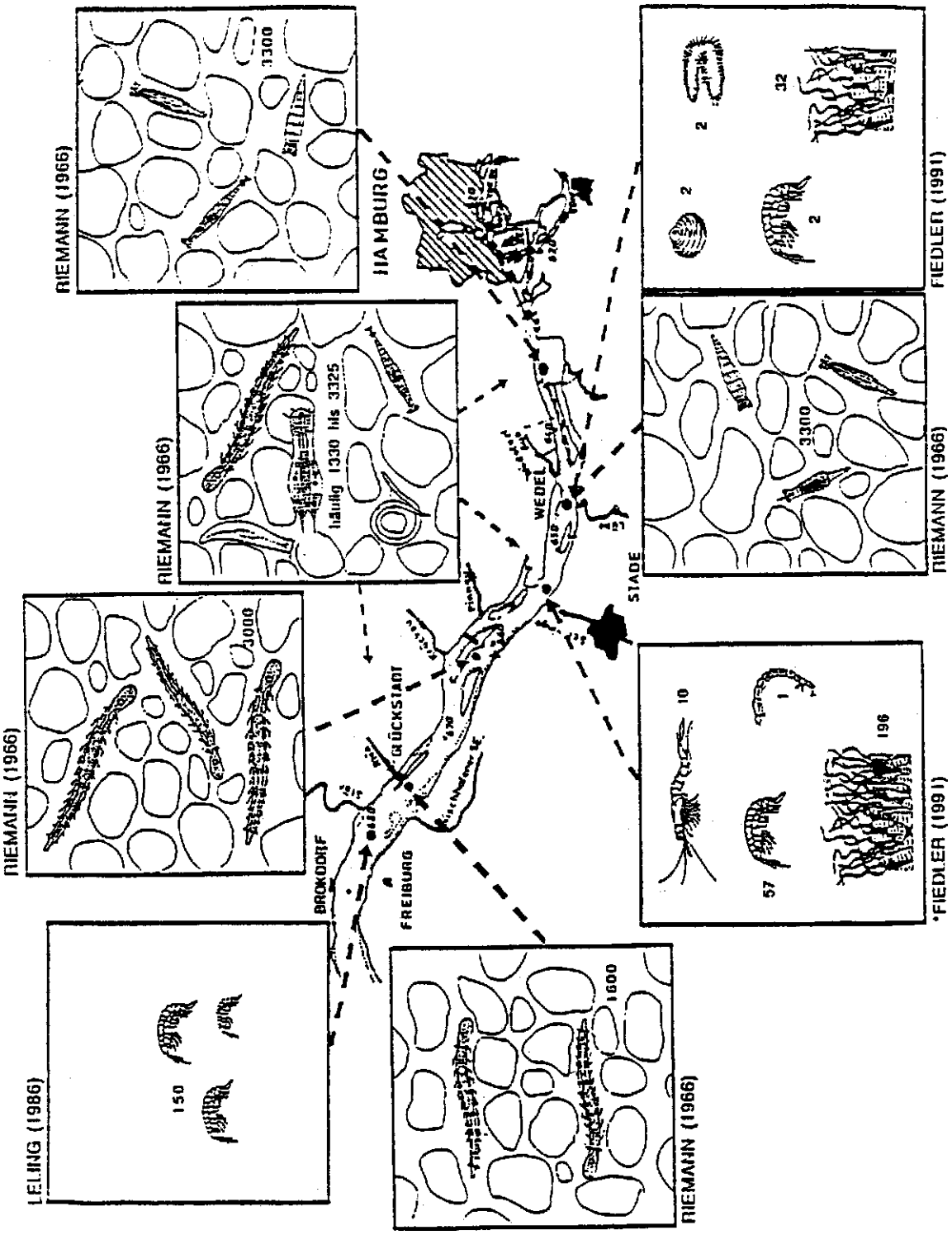


Abb. 7.10: Bodenbesiedlung der Elbefahrrinne, Bereich Freiburg bis Hamburg (ca. 150 m neben der Fahrrinne, KAUSCH et al., 1991)

Nach NÖTHLICH (1980) stellen *Cordylophora caspia, Balanus improvisus* und einige Gammariden Indikatoren für das Vordringen der oberen Brackwassergrenze in das Ästuar dar. *Cordylophora caspia* dringt allerdings bis in das Süßwasser vor (RIEDEL-LORJÉ, 1981). Gleiches gilt für *Gammarus zaddachi* (FIEDLER, 1991; vgl. Abb. 7.11)

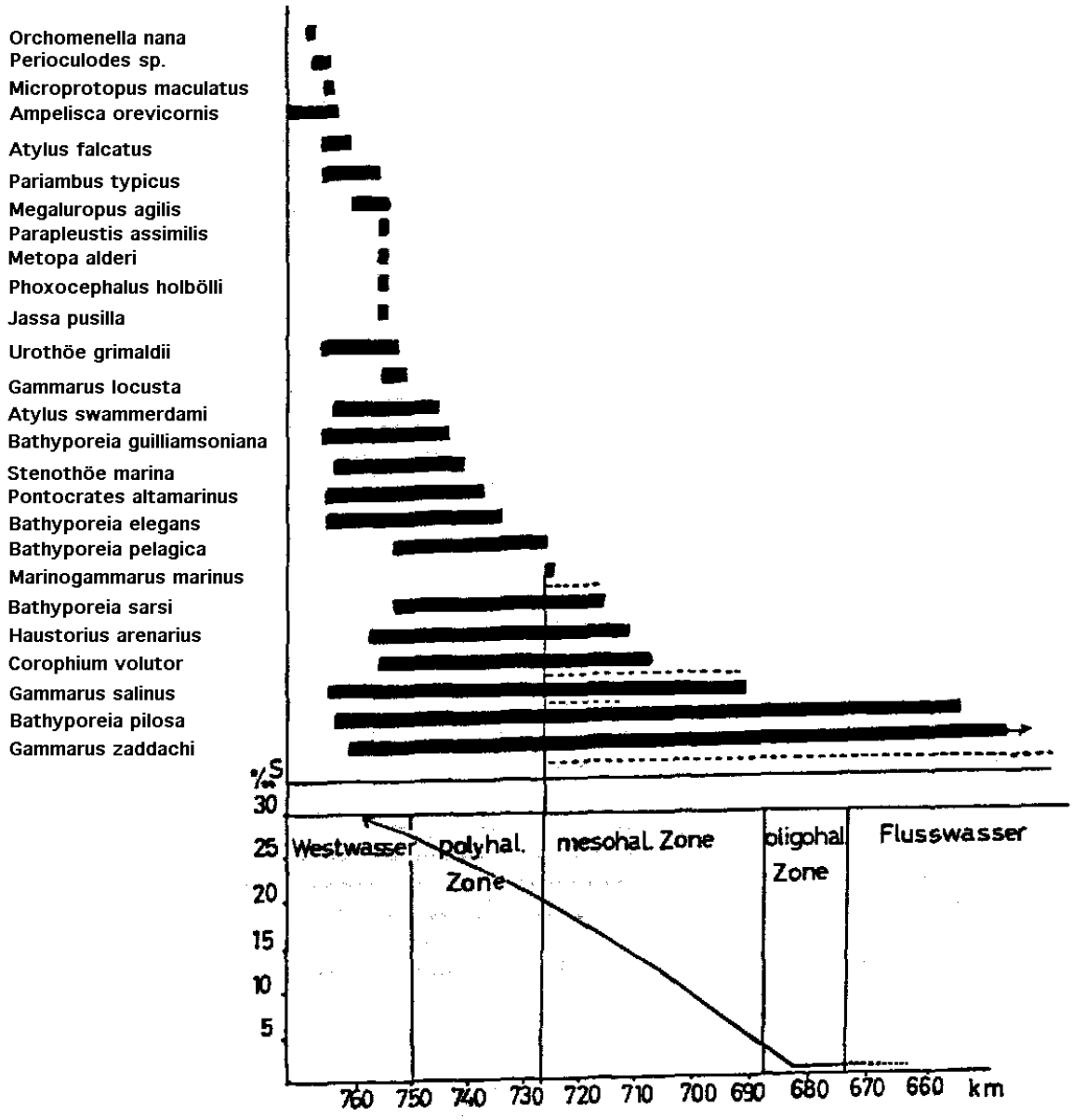
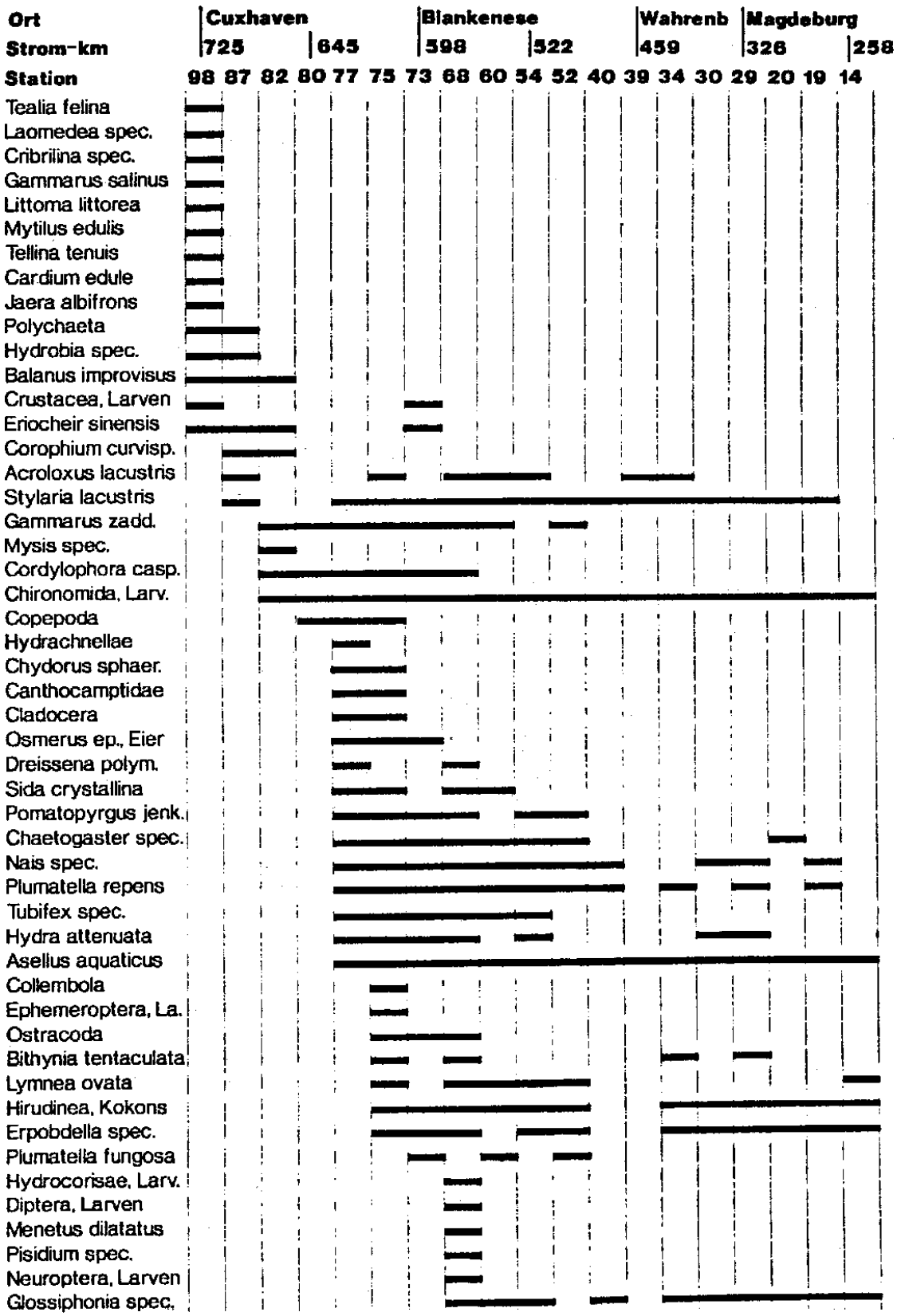


Abb. 7.11: Verbreitung der Amphipoden im Elbe-Ästuar (MOVAGHAR, 1964)

Tab. 7.1: Verbreitung der Arten(gruppen) des Zoobenthos auf Steinschüttungen in der Elbe 1990 (verändert nach ARGE ELBE, 1991)



KAUSCH (1991) beschreibt eine Veränderung der Lage der Brackwasserzone mit Hilfe des Benthos (vgl. Kap. 9):

"Das Benthos der Brackwasserzone ist im Laufe der letzten 100 Jahre zunehmend das Elbe-Aestuar hinaufgewandert. Diese Aussage läßt sich auf der Grundlage der in Abb. 7.12 dargestellten Verbreitungsgrenzen mariner Benthosarten in den letzten Jahrzehnten ableiten. Aufgrund dieser Literaturauswertung ist es allerdings problematisch auszusagen, ob es sich dabei um einen kontinuierlichen Prozeß oder um natürliche Schwankungen handelt. Die beobachteten Organismen sind Lebensformen, die im Laufe ihrer Entwicklung stark und weit verdriften werden können. Durch zeitlich nicht ausreichend dichte Untersuchungen könnte eine Verschiebung der Populationsgrenze dadurch vorgetäuscht sein, daß gerade solche Fluktuation gefunden wurde. Generell muß jedoch festgestellt werden, daß sich im Laufe der Jahre eine Erhöhung des Salzgehaltes in das Aestuar hinein tatsächlich ergeben hat und eine Berechnung für die Auswirkung der neuen Maßnahme auch in diese Richtung weisen. Es ist daher zu vermuten, daß ein Verlust an limnischem Lebensraum zugunsten des Brackwasserlebensraums in Laufe der Zeit stetig stattgefunden haben dürfte. Die Maßnahmen, die jetzt geplant sind, könnten diese Tendenz unter Umständen weiter verstärken."

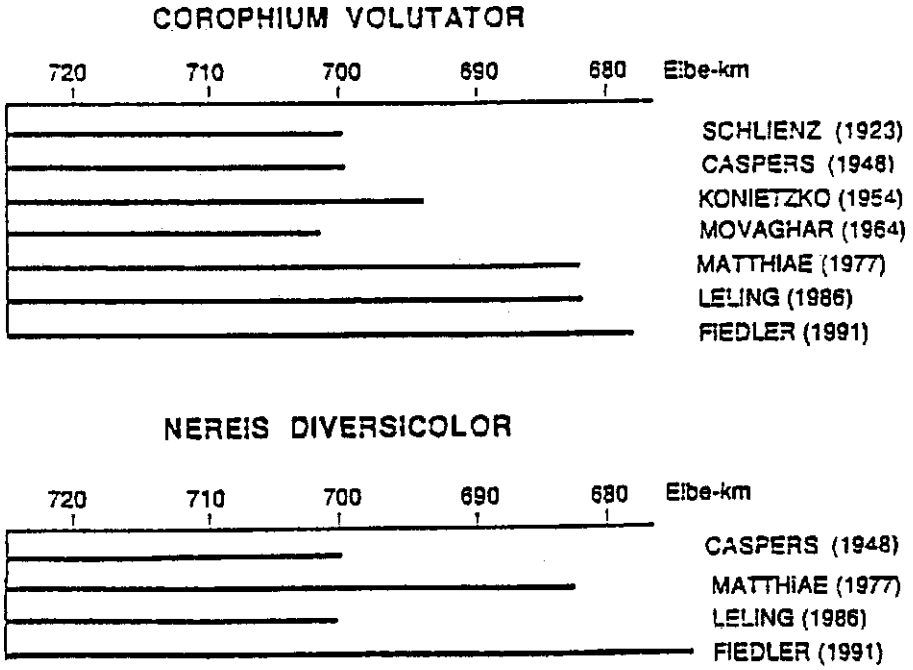


Abb. 7.12: Verbreitungsgrenzen mariner Benthosarten im Elbe-Ästuar nach Literaturangaben (verändert nach KAUSCH et al., 1991)

Zum Indikationswert von Arten stellt die ARGE ELBE (1991) fest: "An einfachsten läßt sich der Einfluß des Salzgehaltes dokumentieren. *Mytilus edulis* und *Balanus improvisus* sind die auffälligsten Indikatorarten für das Vordringen von Nordseewasser in die Unterelbe."

Während *Mytilus* nicht bis an die obere Brackwassergrenze vordringt, erreicht *Balanus* diese Zone. KÜHL (1972) nennt eine obere Verbreitungsgrenze für *Balanus improvisus* bis hin zur oberen Brackwassergrenze, damals bei Glückstadt (vgl. Abb. 7.13).

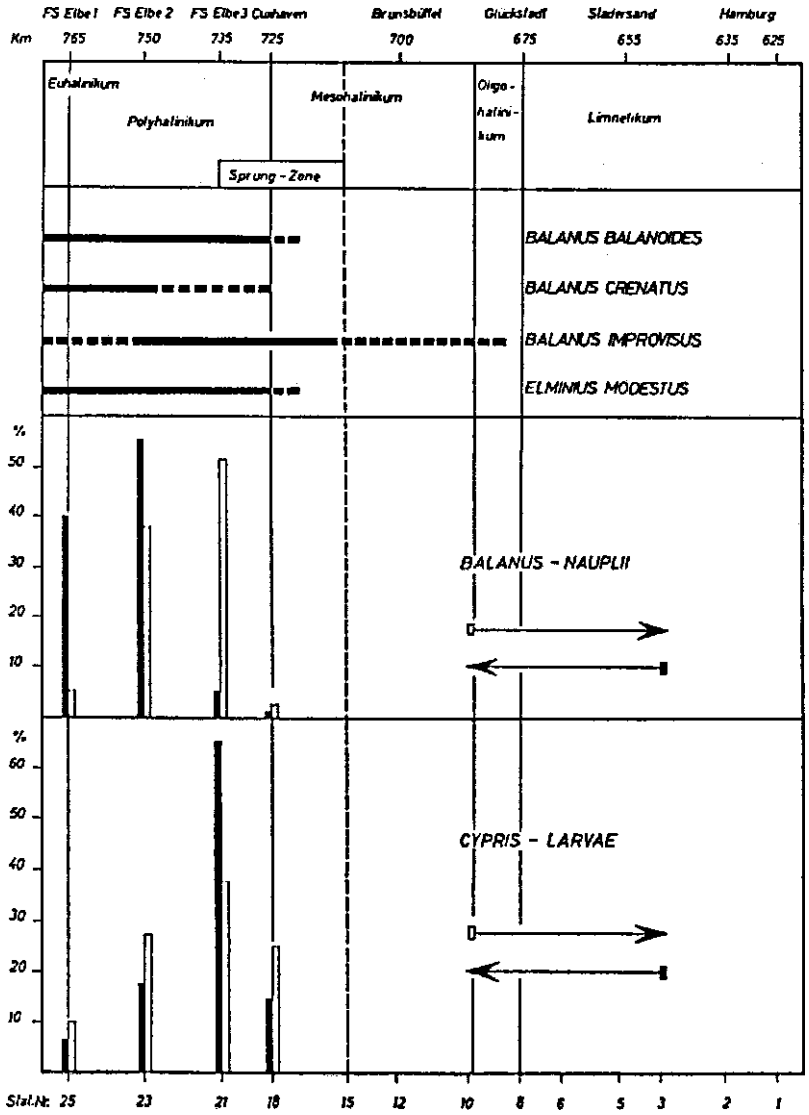


Abb. 7.13: Verbreitung von Seepocken-Arten im Elbe-Ästuar (KÜHL, 1972)

Die Seepocken, von denen *Balanus improvisus* am weitesten ins Ästuar vordringt, benötigen einen Transport ihrer planktischen Larven mit einen Brackwasserschub und folgend eine ein- bis mehrwöchige Ansiedlungsphase bei erhöhtem Salzgehalt von ca. 6 ‰. Später können sessilen Tiere im Süßwasser leben (u.a. SCHÜTZ, 1969; KOHL, 1972).

Die von KÜHL ermittelte Temperaturabhängigkeit der Seepocken-larven-Ansiedlung in der Elbe (vgl. Abb. 7.14) bedeutet, daß *Balanus improvisus* erst oberhalb von 10°C als Indikator für einen mittelfristigen Brackwassereinschub geeignet ist. Diese Art ist ein guter Anzeiger für den oberen Brackwasserbereich, da die Seepockenlarven in der wärmeren Jahreszeit ihr Optimum haben, also meist bei geringen Oberwasserabflüssen zum Ansatz kommen. Da die Lage des oberen Brackwasserbereiches von der Abflußmenge abhängt, kennzeichnen Larvenansatz und Vorkommen von Seepocken an den Tonnen das Eindringen des Brackwassers in das Elbe-Ästuar.

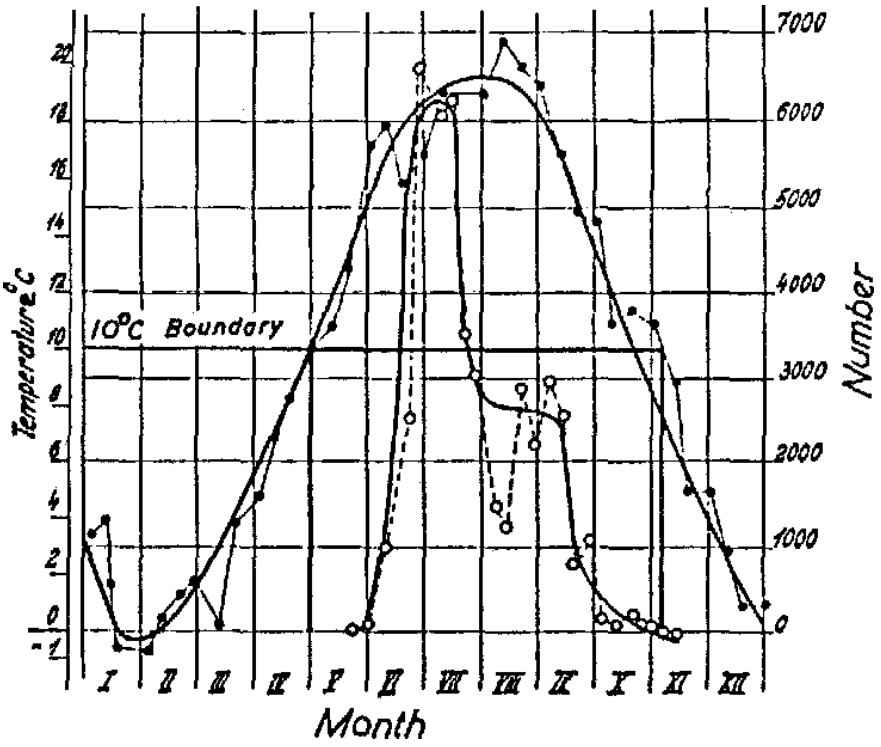


Abb. 7.14: Wassertemperatur • und Ansatz von Seepocken-Larven (Balanus improvisus) o in der Unterelbe 1965 (KÜHL, 1972) Meßdaten und geglättete Kurven

Aus Untersuchungen von u.a. WILKENS & KÖHLER (1977), MÖLLER (1989), MÖLLER & DIECKWISCH (1991), WEIGELT (1991) und THIEL (1992) läßt sich ableiten, daß sich nur wenige Fischarten als Indikatoren für die obere Brackwassergrenze eignen. Und selbst diese überwandern zeitweise sogar noch die Salzgehaltsbarriere. Als Süßwasserarten kommen Plötze und Aland in Betracht, als marine Arten Hering, Sprotte, Seezunge und Sandnadel (vgl. Abb. 7.15). Die Angaben über den Salzgehalt in der Abbildung berücksichtigen allerdings keine Schwankungen (vgl. Kap. 6).

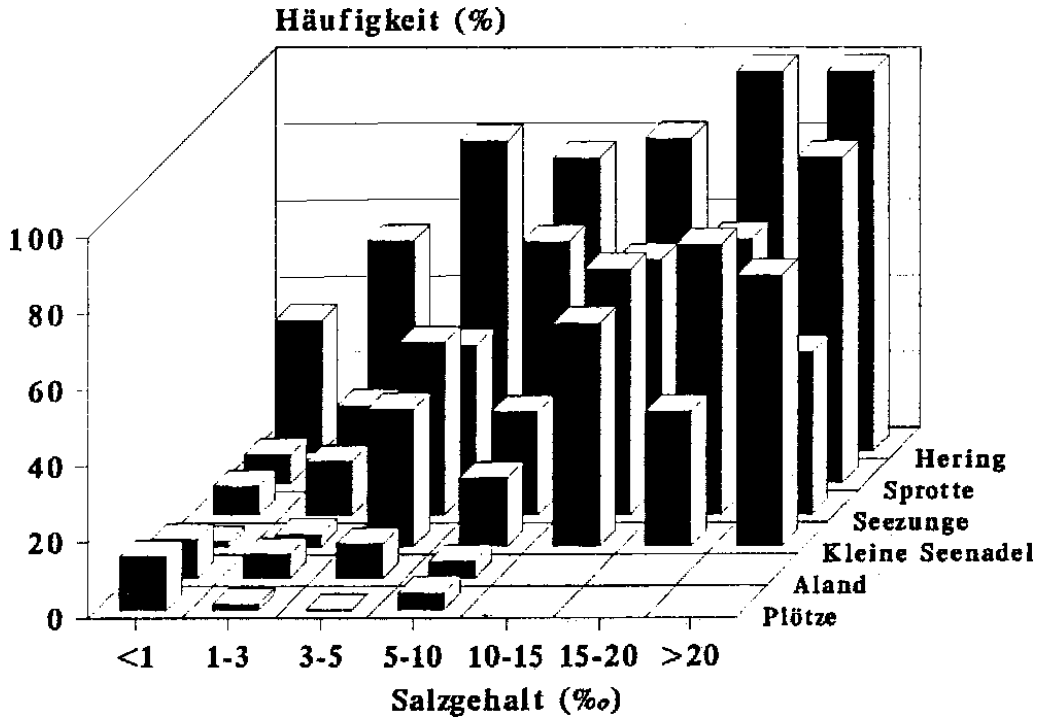


Abb. 7.15: Prozentuale Häufigkeit einiger Fischarten in der Unterelbe in allen Hols (THIEL, 1992, unveröffentlicht)

Regelmäßige Befischungen mit den Hamen haben gezeigt, daß in den Jahren 1989 (-1991) in den Monaten mit extrem niedrigem Oberwasserabfluß im Elbestrom bei Lühesand-Nord (obere Brackwassergrenze 1989 - 1991 vgl. Kap. 8.3) marine Fische, wie der Hering (vgl. Abb. 7.16) und die marine Krabbe *Crangon crangon*, - nicht die aus dem Mittelmeerraum eingeschleppte Süßwassergarnele *Atyaephrya desmaresti* - anzutreffen waren (WEIGELT, 1991, und mdl. Mitt. von Hafenfischern an DIECKING, GAUMERT und KRIEG, 1992).

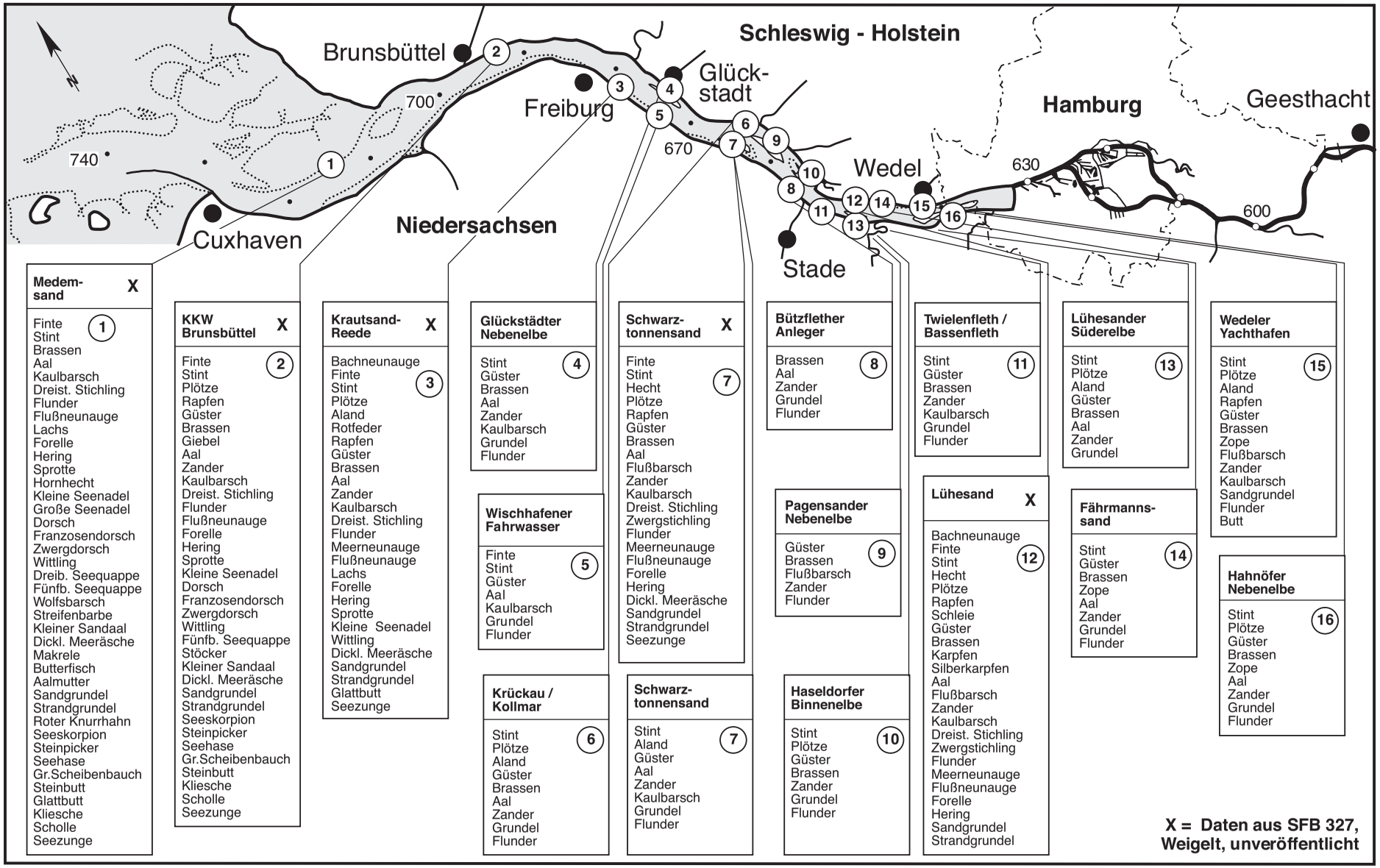


Abb. 7.16: Fischarten der Elbe 1990 im Bereich unterhalb Hamburgs (Beifang im Rahmen von Probebefischungen auf Brassen (ARGE ELBE, 1991)

EHRENBAUM (1890) und DAHL (1893) stellten fest, daß ausgewachsene Exemplare von *Crangon vulgaris* stromaufwärts bis in die limnische Zone (km 660) einwanderten. In den oberwasserreichen Jahren 1985/1986 wurde die Krabbe nur bis Glückstadt beobachtet (PIEDLER, 1991). Das Vordringen dieser marinen Organismen in den oberwasserarmen Jahren 1989 - 1991 bis in den Bereich von Lühesand Nord (WEIGELT, 1991) zeigt, daß sich der marine Einfluß längerfristig ausgedehnt hat.

Die Elbe stellt ein vielfältiges System dar, in den Schwebstoffe und Salzgehalt besonders stark die Lebensgemeinschaften des Ästuars beeinflussen (vgl. Abb. 7.17). Hierbei wirkt sich der niedrige und schwankende Salzgehalt der obere Brackwasserzone und die hohe Trübung im Bereich des Schwebstoffmaximums selektierend aus. Aufgrund der astatischen Verhältnisse in der oberen Brackwasserzone eignen sich nach bisherigen Erkenntnissen nur wenige stenohaline sessile oder aktiv wandernde Organismen als Bioindikatoren für die obere Brackwassergrenze.

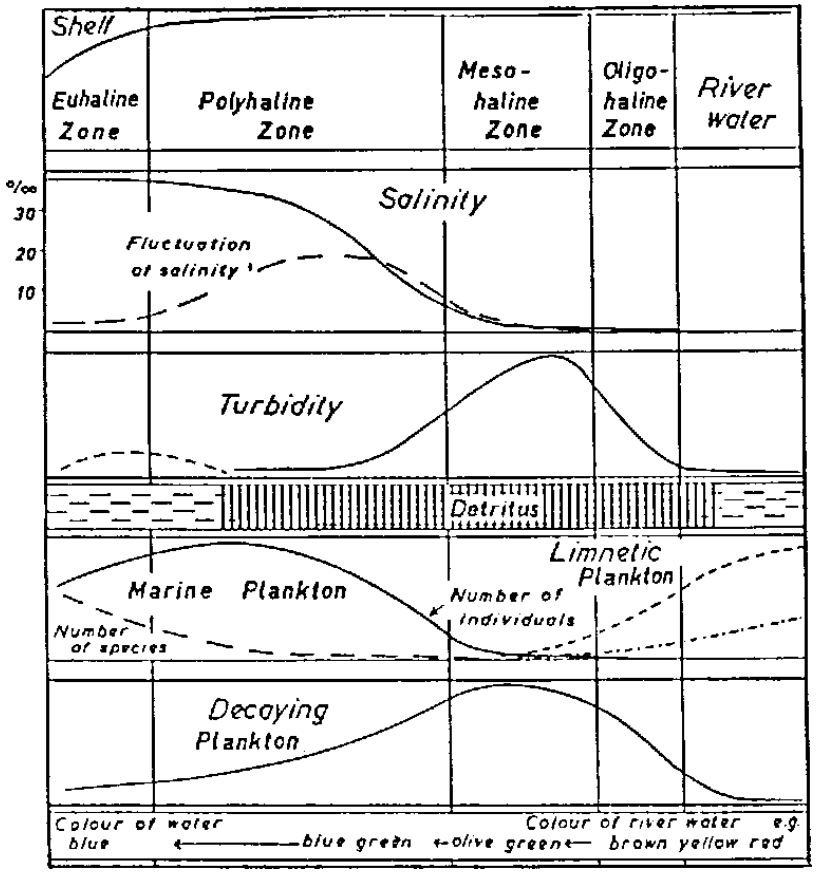


Abb. 7.17: Salzgehalt, Trübung und Plankton im Elbe-Ästuar (verändert nach KOHL, 1963 und 1972)

8. Schwebstoffe

Im Unterlauf von Flüssen, welche dem Gezeiteneinfluß des Meeres ausgesetzt sind, finden sich häufig Zonen besonders hohen Trübstoffgehaltes. Diese Erscheinung findet ihre maximale Entfaltung dort, wo sich der Mischungsvorgang des Flußwassers mit dem Meerwasser durch das schwache Ansteigen des Salzgehaltes zu erkennen gibt. So war bereits Forschern wie VOLK (1903, 1906), HENTSCHEL (1917) und THIEMANN (1934) die starke Trübung im Brackwassergebiet der Elbe bekannt; es wurde von einer "Trübungszone" gesprochen. LÜNEBURG (1939, 1956) dokumentierte eine solche Zone in der oberen Brackwasser-Region der Elbe. In der Folgezeit wurde diese Beobachtung bestätigt (u.a. LUCHT, 1953a, 1964; KÜHL & MANN, 1953; POSTMA & KALLE, 1955; CASPERS, 1958, 1968; SCHULZ, 1961; RAMMING, 1971; NÖTHLICH, 1972a) (vgl. Abb. 8.1).

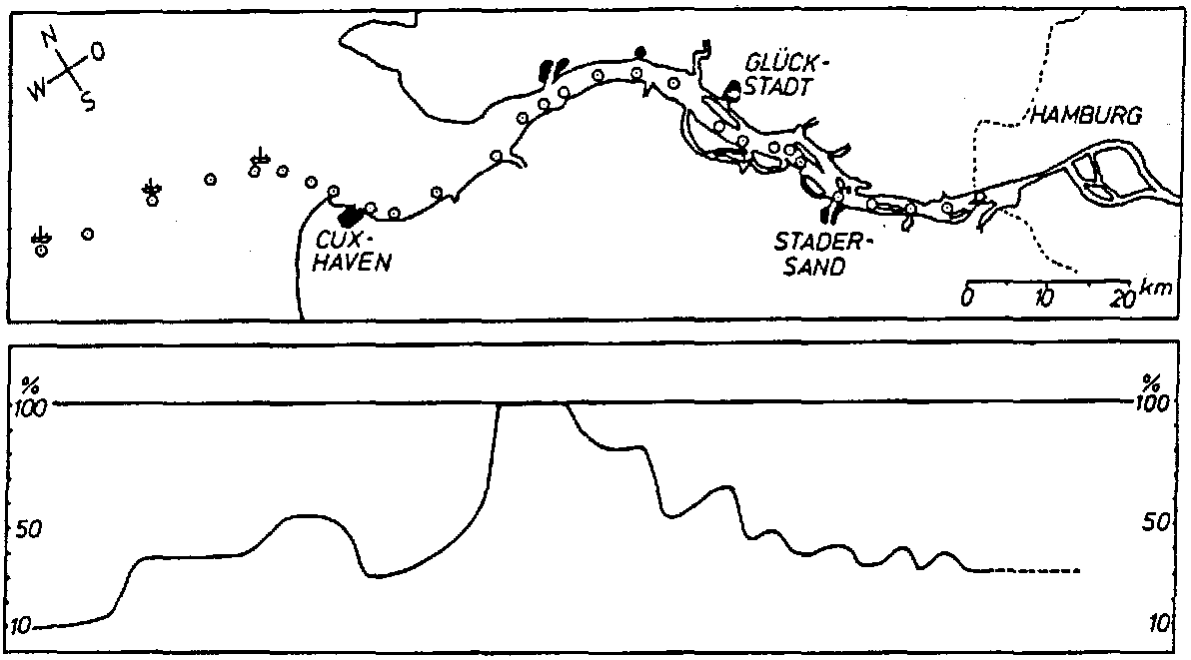


Abb. 8.1: Trübungsverteilung im Elbe-Längsschnitt bei normaler Oberwasserführung und normalem Windstau (schematisch nach NÖTHLICH, 1972a).

Die Beobachtung, daß sich Teilchen einer feinen Tonsuspension schneller absetzen wenn Salzwasser zugesetzt wird, machte man sich bereits vor der Jahrhundertwende zunutze. So berichteten KÜHL & MANN (1953), daß zur Zeit der Segelschiffahrt gerade das trübe Wasser an der oberen Brackwassergrenze für Trinkwasserzwecke genommen wurde, da die Trübe sich sehr rasch absetzte und dabei viele Keime mit sich riß.

Die in den Elbeuntersuchungen angewandten Schwebstoff-Begriffe und Meßmethoden sind in Tab 8.1 und 8.2 zusammengestellt.

Tab. 8.1: Erläuterung einzelner Begriffe für die Schwebstoff untersuchung in der Elbe

Begriff	**Erläuterung**
Detritus	abgestorbenes organisches Material
Sestongehalt	Gehalt an partikulären Wasserinhaltsstoffen (Summe aus Sink- und Schwebstoffgehalten), als Trockengewicht angegeben
Trockengewicht	Rückstand des Trocknungsverfahrens
Glühverlust und Glührückstand	Bestimmung des Anteils an organischem Material durch Glühen des Trocknungsrückstandes
Absetzbare Stoffe	nur Sinkstoffe
Abfiltrierbare Stoffe	Summe aus Sink- und Schwebstoffen, siehe "Sestongehalt"
Fluoreszenzmikroskopische Sestonuntersuchung	Methode zur Unterscheidung zwischen Detritus, lebenden Zellen und mineralischen Partikeln im Seston

Tab. 8.2: Methoden zur Bestimmung von Trübung und Schwebstoffen im Elbewasser (Angaben aus Literaturdaten)

Meßgröße	Meßmethode	Ref.
Durchsichtigkeit		LORENZ 1863
Seston	Filtration über Membranfilter/ Mikrosieb, Mikroskopische Unterscheidung der Partikel als lebende Planktonorganismen, tote Kieselschalen und Pflanzenfasern	NÖTHL. 1967
Trübung	photometrische Messung	POSTMA & KALLE 1955 NÖTHL. 1972a DEV
Abfiltrierbare Stoffe	Filtration mit Glasfaserfilter (ca. 0,5 µm), Trocknung im Mikrowellenofen (früher in Muffelofen) Vakuumfiltration mit Membranfilter	ARGE ELBE DEV
Absetzbare Stoffe	Sedimentation im Absetzglas(Imhoff-Trichter)	DEV

8.1 Entstehung und Zusammensetzung

Bis zum Ende der 50-er Jahre nahm man an, daß das Auftreten der Trübungszone in erster Linie durch die im Experiment nachweisbare Ausflockung gelöster Kolloide durch den Ionengehalt des Meerwassers hervorgerufen würde (vgl. Kap. 8.3), während dynamische Vorgänge hierbei nur eine untergeordnete Rolle

spielen sollten (LUCHT, 1953a; LÜNEBURG, 1956). An Trübungsmessungen von verschiedenen Punkten aus der Unterelbe wurde später wahrscheinlich gemacht, daß die Verhältnisse gerade umgekehrt liegen. Durch die eigenartigen Strömungs- und vermischungsvorgänge, in solchen dem Gezeiteneinfluß unterliegenden Ästuarien, bildet sich eine Art "sinkstoff-Falle". sie finge die Trübungsstoffe aus dem Flußwasser in der Mischzone ab, indem sie diese in einem ständigen vertikalen Kreislauf herumführe (vgl. Abb. 8.2), während das Wasser selbst ungehindert ins Meer abflösse. Der chemische Vorgang der Ausflockung dagegen schien, wenn überhaupt, nur eine untergeordnete Rolle bei der Ausbildung dieser Zonen zu spielen.

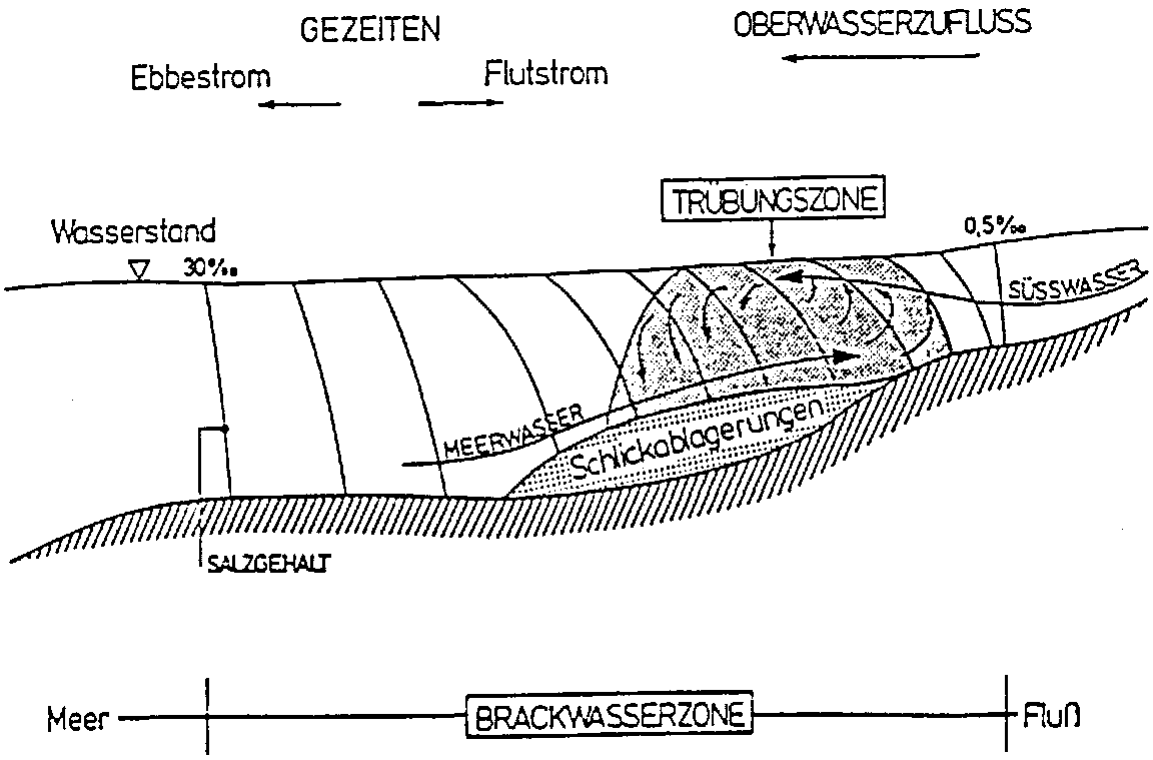


Abb. 8.2: Walzenbildung der Trübstoffe in Ästuar (SCHULZE, 1990)

Bereits LÜNEBURG (1956) und POSTMA & KALLE (1955) vertraten die Ansicht, daß die tatsächlich vorhandene kolloid-chemische Ausflockung für derart hohe Trübungskonzentrationen, wie sie die Unterelbe aufweist, nicht ausreicht. SCHULZ (1961) konnte aufgrund mikroskopischer Untersuchungen nachweisen, daß ein großer Teil des Sestonmaterials eindeutig geformt ist. LUCHT

(1964) maß den biologischen Anteil der Sinkstoffe Bedeutung für die Schlickbildung im oberen Brackwasserbereich zu und wies auf die zusätzlich trübende Wirkung durch das Absterben limnischer Organismen hin. CASPERS (1958, 1959a, 1968) und CASPERS & SCHULZ (1964) sprachen sogar von einer "Sterbezone" für limnische Organismen. Hinzu kommt, daß wegen der starken tidebedingten Turbulenzen auch viel anorganisches Material - hauptsächlich Feinsand und Schluff (vgl. Abb. 8.3) - aufgewirbelt und somit die Trübung verstärkt wird (vgl. LUCHT 1954, 1964; BURSCHE, KÜHL & MANN, 1958).

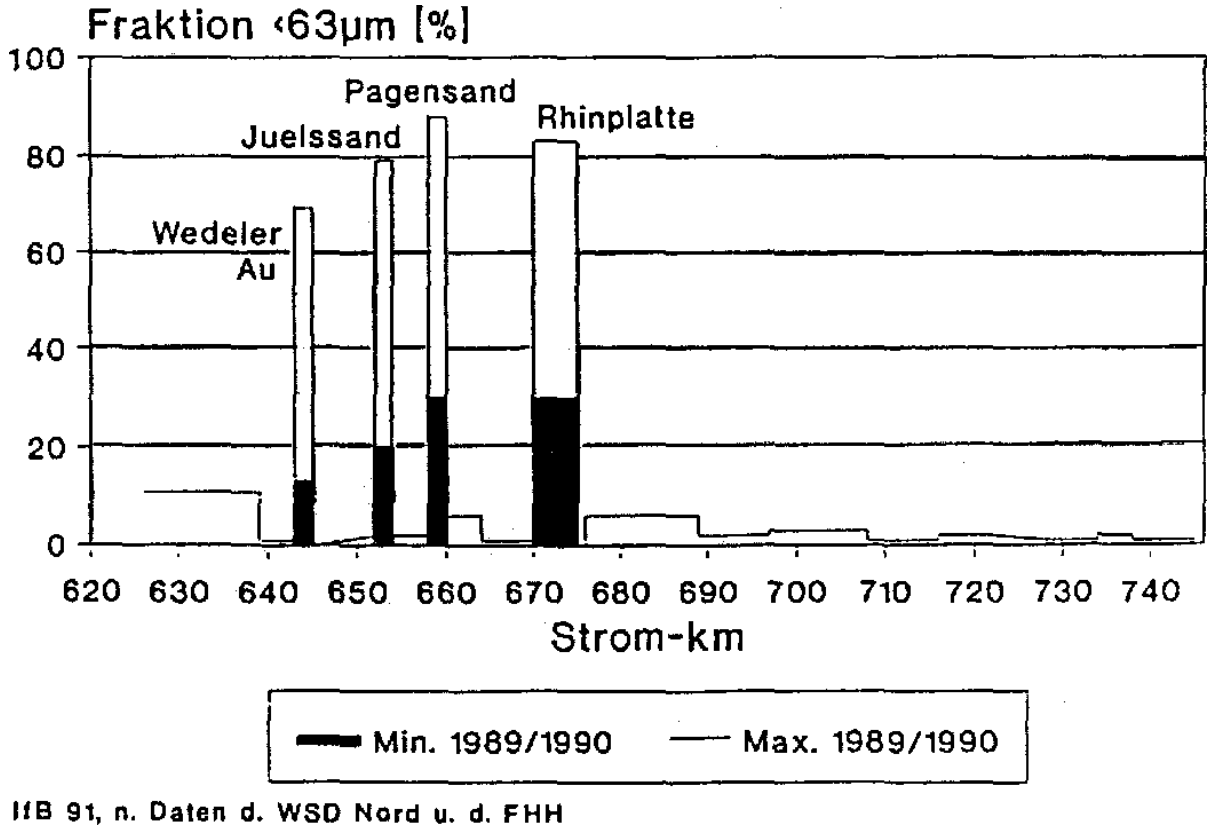


Abb. 8.3: Anteile von Ton und Schluff (<63 µm) (Min/Max) in Sedimenten der Fahrrinne der Unterelbe 1989/90 (verändert nach MIEHLICH, 1991)

In der Trübungszone der Elbe bestehen die Schwebstoffe aus unterschiedlichen Bestandteilen: geformte und nicht geformte Partikel: Tonpartikel, Sand, Bakterien und Pilze, lebende und tote Plankter (Schwebeorganismen) sowie zerriebenes organisches Material, z.B. Blätter (vgl. Abb. 8.4). Die genannten Elemente werden auch Trübstoffe genannt, wobei das Seston (das

Absiebbare) sowohl das lebende Plankton (vgl. Abb. 8.5) als auch das nicht lebenden Detritus umfaßt (CASPERS, 1968; NÖTHLICH, 1972a; GREISER, 1988).

Etwa 65 - 85% des Trockengewichts bleiben als Glührückstand übrig, ca. 15 - 35% verbrennen, d.h. nur ein relativ geringer Prozentsatz des Sestongehaltes der Elbe ist organisches Material. Der Anteil schwerer Partikel nimmt elbeabwärts immer mehr zu. Dies bezieht sich nicht nur auf Feinsände, sondern auch auf groben Detritus und aufgewirbelte Schlickpartikel, die im Bereich Brunsbüttelkoog das Trübungsbild bestimmen. Demgegenüber dominiert Feindetritus an den Stationen im Süßwasserbereich der Elbe (NÖTHLICH, 1972a).

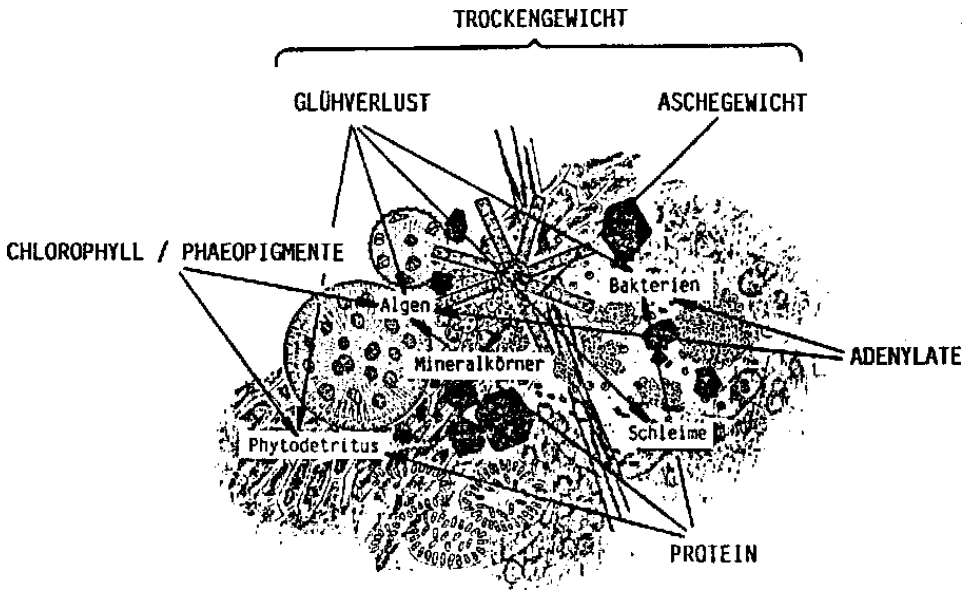


Abb. 8.4: Schematische Darstellung einer Schwebstoff-Flocke (GREISER, 1991)

Mit dem Einsetzen der Vegetationsperiode wird der Sinkstoffgehalt durch anfallenden Detritus vermehrt, so daß in Kombination mit dem nachlassenden Hochwassereinfluß wieder mehr Trübungsmaterial zur Verfügung steht. Im Sommer ist die Trübungsintensität deutlich höher als im Frühjahr. Maximale Werte werden im Herbst und Winter gefunden.

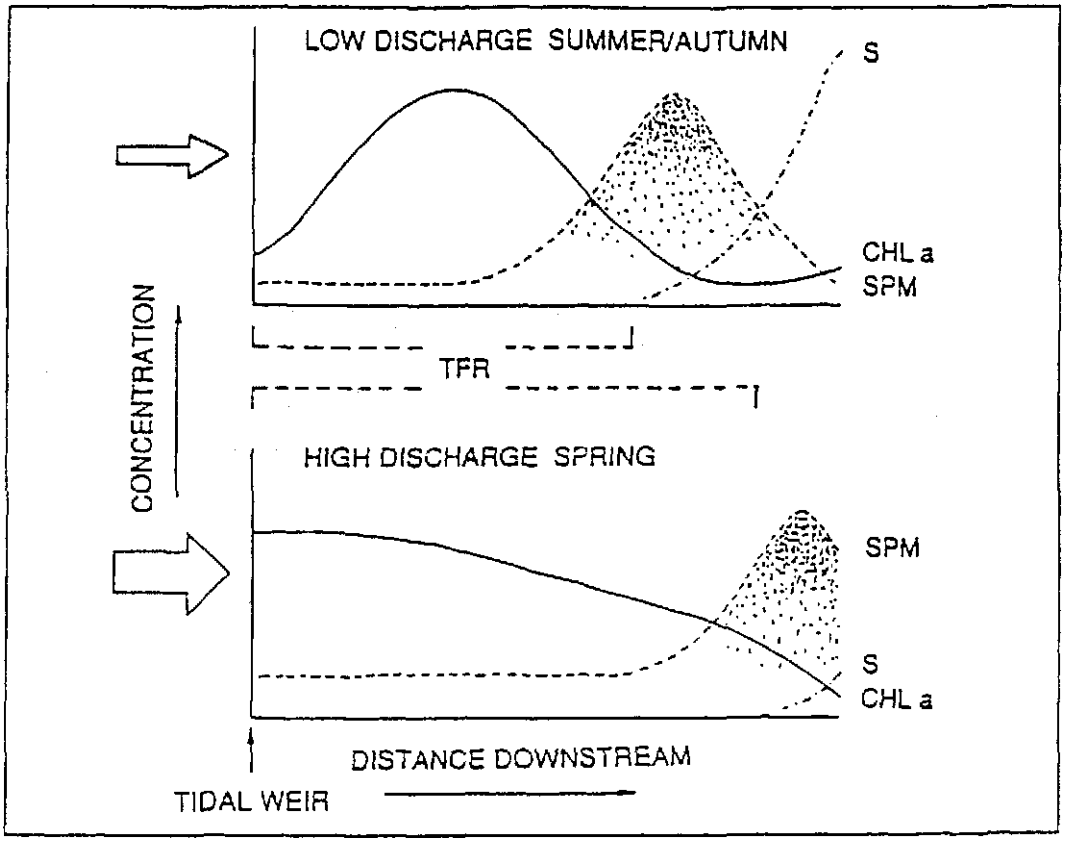


Abb. 8.5: Verschiebung der Trübstoffwolke und Ausdehnung des Süßwasser-Tidebereichs ("Tidal Fresh Reaches" - TFR) bei geringen (oben) und hohem Oberwasserabfluß (unten) Phytoplanktonbiomasse (CHL a), Schwebstoffe (SPM), Salinität (S) (SCHUCHARDT, 1990)

Diatomeenschalen und Zooplanktonfragmente fallen als Folge natürlicher Mortalitat in diesem Gebiet an (vgl. Kap. 7). Besonders robuste Diatomeenschalen werden immer wieder aufgewirbelt, so daß sie auch weit von dem Ort ihrer Entstehung entfernt anzutreffen sind.

Eine Zusammenballung von feinem Detritus durch Bakterien zu größeren Einheiten wurde von KOSKE et al. (1966) vermutet. EISMA (1986) und GREISER (1991) belegen die Bedeutung von bakteriellen Prozessen bei der Bildung von Trübstoffen.

In der Elbe ist es schwer, Aussagen über die Herkunft des Seston und besonders der ungeformten Teile zu machen. Hierzu sind Indikatoren wie Schwermetalle oder Diatomeen von wesentlicher Bedeutung (ARGE ELBE, 1988; WILKEN et al., 1991).

Bei Diatomeen lassen sich aus dem Vorkommen der Schalen und ihrer artlichen Zugehörigkeit oft Rückschlüsse auf die Verdriftung dieser Formen und damit auch auf den Sedimenttransport ziehen (HUSTEDT, 1939; HALLIK, 1959; NÖTHLICH, 1972a; GREISER, 1991). In Bodennähe wird sogar aufgewirbeltes limnisches oder marines Material stromaufwärts transportiert (vgl. Kap. 8.2 und SCHULZE, 1990; GREISER, 1991; mdl. Mitt. FLÜGGE, 1992). Der Eintrag mariner Sedimente und Kieselalgen in den Brackwasserbereich wird bereits von SIMON (1952, 1953, 1961) und LUCHT (1954) belegt. So wurden die widerstandsfähigen Schalen von *Biddulphia mobiliensis*, ein typischer Vertreter des marinen Diatoraeenplanktons, an der oberen Brackwassergrenze gefunden (NÖTHLICH, 1972a,b).

Zu dem limnischen Material aus den stromaufwärts liegenden Elbeabschnitten und dem marinen Eintrag kommen Abschwemmungen aus der Marsch, Abwassereinleitungen und Sinkstoff-Aufwirbelungen durch Baggertätigkeit sowie Verklappungen von Baggergut in der Elbe hinzu. Darüber hinaus bewirkt das stellenweise noch übliche Eggen von Hafenbecken sowie das Aufspülen auf Spülfelder die Bildung lokaler starker Trübungswolken. Allerdings bilden sich im Hauptstrom auch Bereiche herabgesetzten Schwebstoffgehaltes aus (vgl. Kap. 8.2). vielfach bilden sich Stromkanten unterschiedlich getrübter Wasserkörper aus, die auch hinsichtlich ihres Gehaltes an Organismen eine abweichende Zusammensetzung aufweisen (vgl. GIERE, 1964, 1968).

Da die Entstehung der Trübstoffzonen in Ästuarien auf sehr komplexe weise an dynamische Vorgänge gekoppelt ist, werden diese im Zusammenhang mit den hydrologischen Verhältnissen beschrieben. Ein Eintrag von Sinkstoffen aus Nebenflüssen spielt im Tidebereich der Elbe nur bei verstärktem Abfluß eine Rolle (ARGE ELBE, 1988).

8.2 Hydrographie und Schwebstofftransport

Einerseits ist im Längsschnitt des Elbe-Ästuar zu einem bestimmten Zeitpunkt eine unterschiedliche Trübstoffkonzentration festzustellen (vgl. Abb. 8.6), andererseits sind aber auch an einem Ort zu unterschiedlichen Zeitpunkten verschiedene Schwebstoffdichten zu beobachten (vgl. Abb. 8.7). Die Schwebstoffverteilung ist also dynamisch.

"Der Transport von Schwebstoffen - als Transportmedium für Schadstoffe - unterliegt in den Ästuarien der Tideflüsse gleichzeitig ablaufenden hydrodynamischen, elektrochemischen und mikrobiologischen Prozessen, die zueinander in sehr komplexen Wechselbeziehungen stehen. Das Auftreten der einzelnen Prozesse ist unumstritten, jedoch ist die quantitive Bedeutung, die den einzelnen Vorgängen sowie der, die ihren Wechselwirkungen zukommt, bis heute nicht eindeutig geklärt....
Die Kenntnis der Zusammenhänge der verschiedenen Einflußgrößen auf den Schwebstoffgehalt und ihrer Wechselbeziehungen in dem sehr komplexen System der Brackwasserzone ist bis heute nur sehr begrenzt." (SCHULZE, 1990)
"Der Schwebstofftransport, und damit auch ein Hauptteil des Schadstofftransports, wird in einem Tidegewässer durch ein Multiparameterfeld bestimmt, bei dem viele Einflußgrößen zwar bekannt, ihre Wechselwirkungen untereinander aber noch weitgehend unbekannt sind. ... Die bekannten Parameter wie Landabtrag, Oberwasserabfluß, Resuspendierung aus Sedimentdepots sind ergänzt worden durch eine differenzierte Betrachtung der Schwebstoffzusammensetzung, der Flockendynamik und der biologischen Einflüsse auf Schwebstoffbildung und -umsetzung. Jahreszeitliche und meteorologische Faktoren haben sicherlich auch einen Einfluß auf die Schwebstoffeigenschaften und das Schwebstoffverhalten, können aber noch nicht quantifiziert werden." (WILKEN et al., 1991)

POSTMA & KALLE (1955) beschreiben den Bereich an der oberen Brackwassergrenze, an dem das limnische Seston, abgefangen und angereichert wird, also das Schwebstoffmaximun, als "Sinkstoff-Falle". Gleichzeitig sollen marine Sinkstoffe, insbesondere Feinsand, am Gewässergrund flußaufwärts verfrachtet und ebenfalls im Brackwassergebiet konzentriert werden (SIMON, 1952, 1953). Sinkstoffe, die dann durch Turbulenzen in obere Wasserschichten gelangen, bilden charakteristische Trübungswolken. Bei geringer Stromgeschwindigkeit, etwa gegen Ende der Flut bzw. Ebbphase, sinken gröbere Partikel wieder ab. Bei der nächsten Flutphase werden sie wieder erfaßt und elbeaufwärts

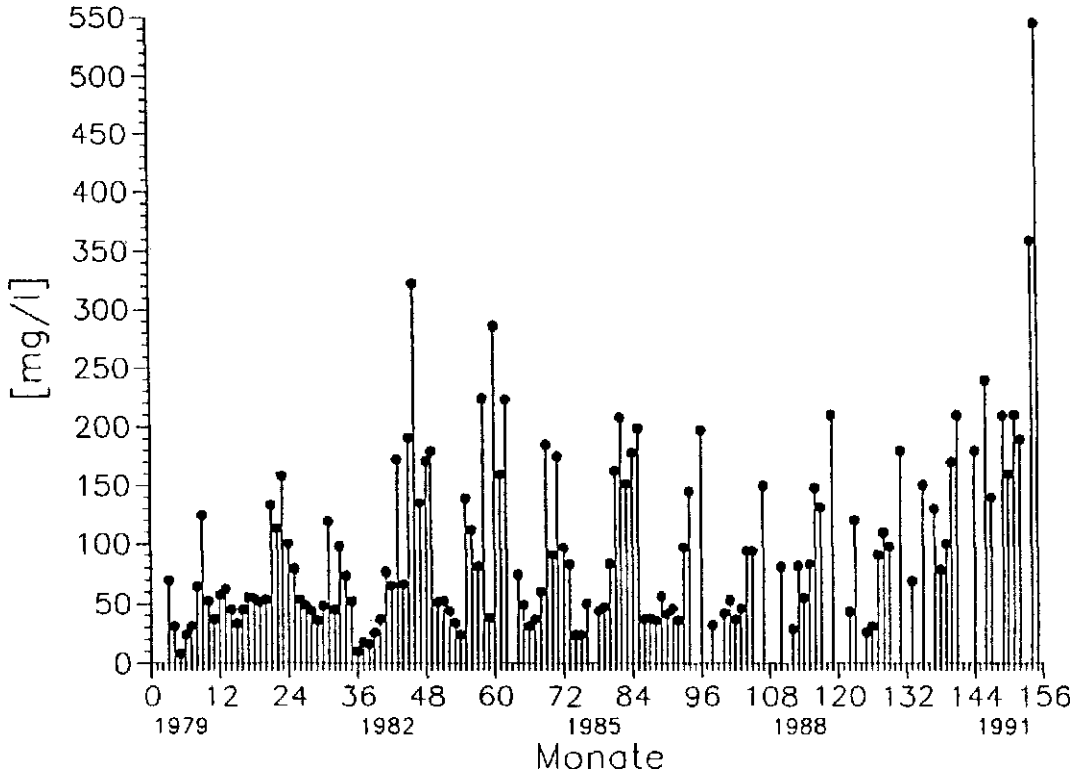


Abb. 8.6: Schwebstoffkonzentrationen an einem festen Ort (Elbe-km 657,5) jeweils 1 h vor MTnw (Daten ARGE ELBE, 1979-91)

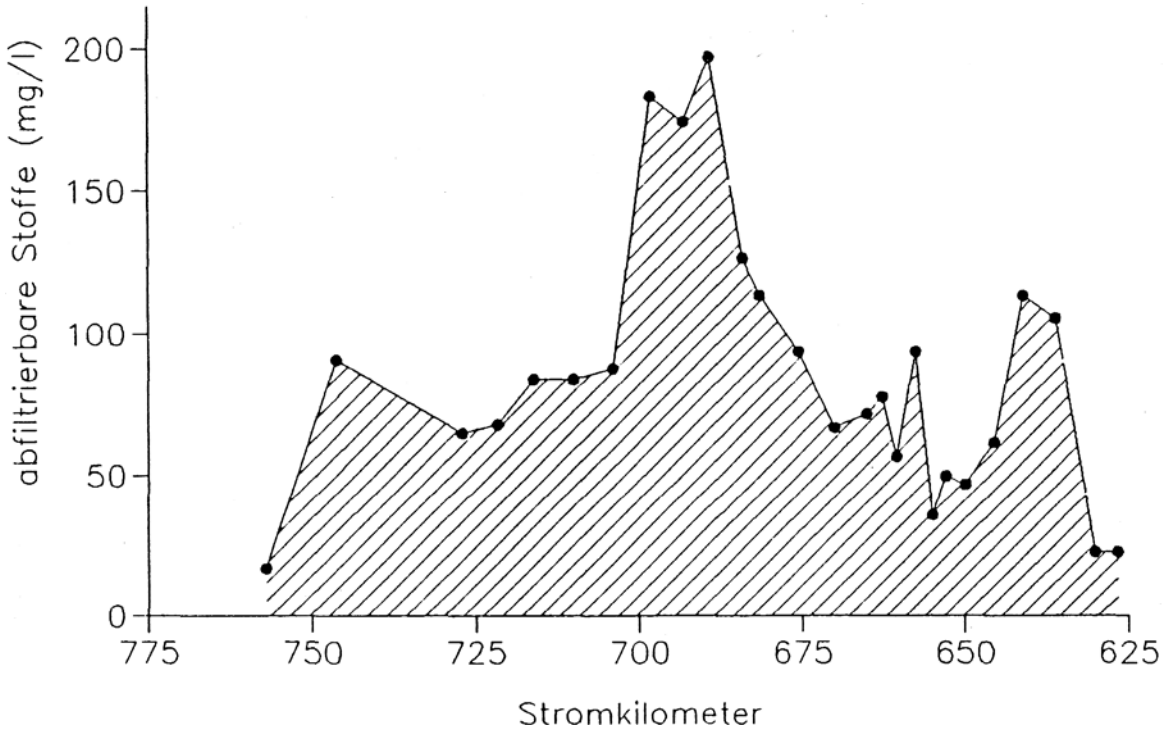


Abb. 8.7: Schwebstoffverteilung in Elbe-Längsprofil zu einem festen Zeitpunkt im September 1987 (Daten ARGE ELBE, 1987)

transportiert, so daß sie geraume Zeit in der Mischzone Fluß/ Meerwasser zirkulieren. Während die schweren Bestandteile des Sestons infolge rascher Sedimentation zur Kenterzeit an der Flußsohle angereichert und von der Dynamik des einsetzenden Flutstromes etappenweise bis zum Gleichgewichtspunkt der Gezeitenströme verfrachtet werden, sinken feine Fraktionen kaum ab, so daß sie vorwiegend elbeabwärts transportiert werden (vgl. LUCHT, 1954, 1964). Insgesamt werden die partikulären Stoffe in der Trübungszone stark angereichert, aber auch hier liegt ein Fließgleichgewicht vor, indem der Überschuß an Material wieder abtransportiert wird (LUCHT, 1953a, b, 1954).

Die Tide bewirkt, daß die partikulären Inhaltsstoffe in der Tideelbe im Vergleich zum tidefreien Oberlauf eine längere Verweilzeit haben. Aufgrund der tidebedingten Turbulenzen im Wasserkörper und dem damit verbundenen vertikalen Austausch von Wassermassen erfolgt der Transport der Sinkstoffteilchen vorwiegend in der Suspensionsphase, wobei die Flut- bzw. Ebbwege entsprechend der Morphologie des Ästuars und der unterschiedlichen Reflexion der Gezeitenwelle verschieden lang sind (LUCHT, 1964). Dies hat zur Folge, daß die transportierende Kraft des Flut- bzw. Ebbstromes regional unterschiedlich ist. Auch in der Vertikalen sind Unterschiede festzustellen: so ist der Transport an der Flußsohle als Resultierende aus Flut- und Ebbstrom bis zu einem bestimmten Punkt im Ästuar elbeaufwärts gerichtet, während in den oberen Wasserschichten eine Verdriftung elbeabwärts erfolgt (u.a. HENSEN, 1953a).

Die Schwebstoffverteilung ist sowohl im Längsprofil (vgl. Abb. im Anhang), als auch im Quer- und Tiefenprofil des Flusses sehr unterschiedlich (vgl. Abb. 8.8 und 8.9).

Je nach Stärke der Turbulenz im Waserkörper treten Wolken auf, die wesentlich mehr Trübung als das umgebende Wasser aufweisen (vgl. Abb. 8.10) und auch in ihrem Schwebstoffgehalt deutlich höher liegen. Die Bildung der Trübungswolken wird merklich durch die besondere Morphologie des Flußbettes, z.B. durch Kolke und Bodenschwellen beeinflußt.

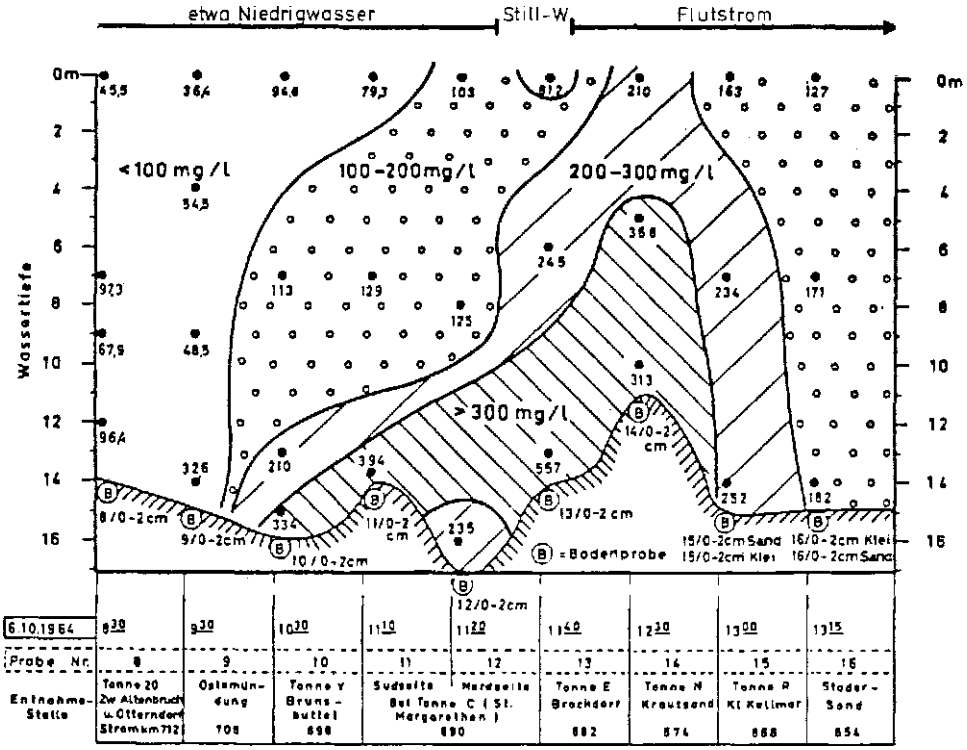


Abb. 8.8: Übersicht über die Verteilung der Gesamtschwebstoff Mengen in der Elbe zwischen Stadersand und Altenbruch (Strom-km 720) für den 6.10.1964 (KOSKE et al., 1966)

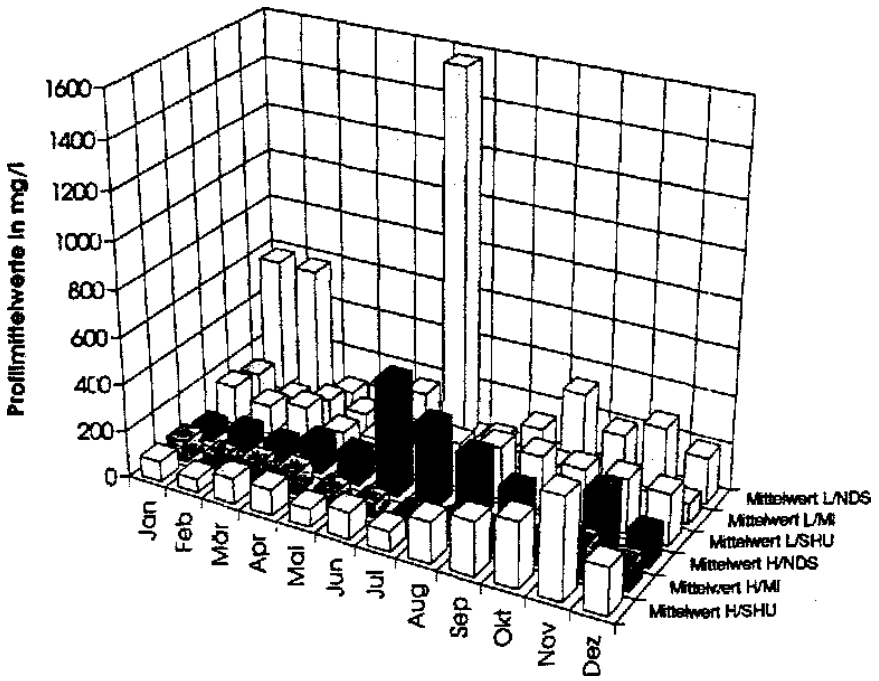


Abb. 8.9: Vergleich der Konzentrationen der abfiltrierbaren Stoffe bei auflaufenden Wasser (H) und ablaufendem Wasser (L) im Querprofil der Elbe bei Brokdorf (ÖKOLIMNA, 1989)

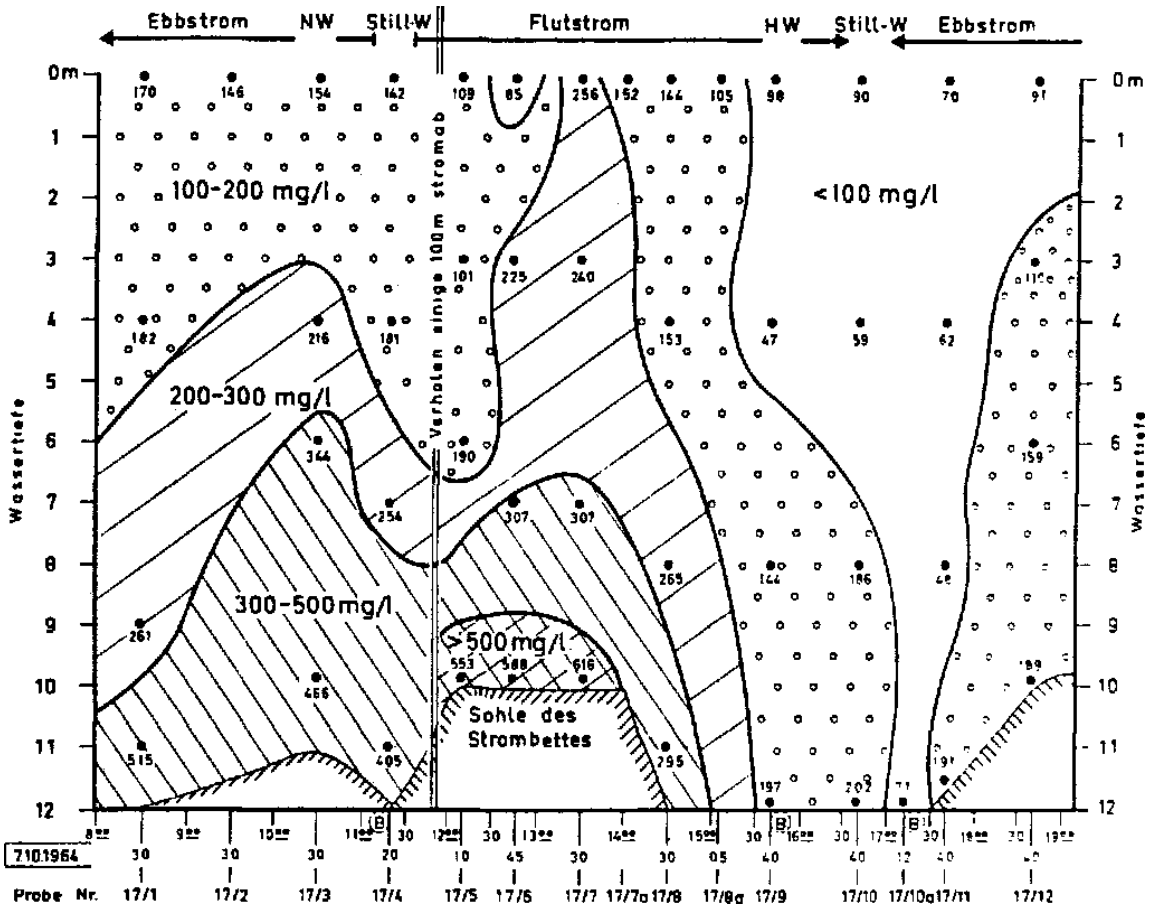


Abb. 8.10: Verteilung der Gesamtschwebstoff-Mengen für die Ankerstation Brokdorf am 7.10.1964 (KOSKE et al. 1966)

Die Trübungsverhältnisse im Elbe-Ästuar sind durch unterschiedliche Trübungskonzentrationen in der Vertikalen, wie sie im Tidenablauf zu beobachten sind, gekennzeichnet. Nach NÖTHLICH (1972a) treten an der Wasseroberfläche geringere Trübungswerte auf als in der Tiefe, wobei die Trübungsintensität mit zunehmender Wassertiefe ansteigt (vgl. Tab. 8.3).

Es sei angemerkt, daß das Trübungsgefälle nicht immer gleichsinnig von der Wasseroberfläche zur Tiefe verläuft, sondern manchmal im Süßwasserbereich der Elbe, häufiger jedoch im Brackwasser, in 2-5 m über der Sohle höhere Trübungswerte zu messen sind. Eine solche Aufwirbelung breitet sich wolkenartig aus und schafft Wasserkörper mit hoher Trübungskonzentration.

Neben tidebedingt auftretenden Trübungswolken gibt es auch engbegrenzte (vgl. Abb. 8.11). Die Schwebstoffwerte einzelner Stationen, z.B. - Rhinplate-Süd - liegen weit unter dem Durchschnitt. Es ist zu vermuten, daß gerade solche Gebiete durch die Dynamik von Querströmungen und durch erhöhte Flutbzw. Ebbstromgeschwindigkeiten einer erniedrigten Bodenerosion ausgesetzt sind mit der Folge eines deutlich herabgesetzten Sinkstoffgehaltes im Wasser.

In Nebengewässern, z.B. hinter Pagensand, sowie in der Nähe von Schlickbänken, im Bereich von Buhnenfeldern und Stacks, ist die Wassertrübung wesentlich höher, doch sollen diese speziellen örtlichen Gegebenheiten in dieser Studie nicht behandelt werden. Einen merklichen Einfluß auf die Trübungskonzentration hat dagegen das scharfe Abknicken des Fahrwassers in eine andere Strömungsrichtung. Hier kommt es auch im Hauptstrom zu einem erhöhten Sinkstoffgehalt, während bei unwesentlichen Richtungsänderungen weniger Trübung auftritt. Solche "dynamischen" Abschnitte erhöhter Trübung liegen z.B. bei Hanskalbsand, Lühesand-Süd, Stadersand, Pagensand-Nord, Rhinplate-Süd und Tonne H (Störmündung).

Die Trübungsverteilung ist abhängig von der Dynamik der Gezeitenströme (die Elbe gilt als mesotidal, vgl. Kap. 6 und 6.1). Die Ausbreitung von Teilchen zeigt eine inhomogene Verteilung (vgl. Abb. 8.12).

Tab. 8.3: Glührückstand und Glühverlust [%] sowie Sestongehalt [mg/l] von Tiefen- bzw. Oberflächenproben, Mittelwerte für das Jahr 1967 (verändert nach NÖTHLICH, 1972a)

Station	Glührückstand		Glühverlust		Sestongehalt					
					Oberfläche			Tiefenwasser		
	Oberfl.	Tiefe	Oberfl.	Tiefe	Max.	Min.	Ø	Max.	Min.	Ø
1 Schweinsand	64,8	71,4	35,2	28,6	58,3	12,8	24,9	85,2	17,2	42,9
2 Hanskalbsand	74,7	76,8	25,3	23,2	102,0	10,2	39,9	321,6	18,6	69,1
3 Lühesand-Süd	68,8	74,3	31,2	25,7	42,6	15,0	30,9	96,3	24,0	48,9
4 Lühesand-Nord	72,7	73,0	27,3	27,0	39,2	12,4	23,5	207,2	22,9	66,0
5 Stadersand	79,3	82,9	20,7	17,1	92,8	29,2	52,0	179,3	40,7	82,2
6 Grauerort	70,6	73,6	29,4	26,4	62,0	10,0	36,6	357,6	31,0	113,1
7 Pagensand-UF	68,6	72,5	31,4	27,5	52,4	13,6	24,6	278,1	26,8	82,5
8 Pagensand-Nord	66,1	76,6	33,9	23,4	76,6	14,2	42,8	251,1	18,4	146,0
9 Rhinp1ate-Süd	61,1	77,6	38,9	22,4	136,6	11,2	65,7	400,6	62,4	241,2
10 Rhinplate-Mitte	80,2	83,2	19,8	16,8	70,2	25,0	48,1	401,5	24,3	115,3
12 Brokdorf	72,8	73,3	27,2	26,7	110,0	15,0	52,3	337,2	26,1	107,5
15 Brunsbüttelkoog	76,6	83,3	23,4	16,2	201,0	16,4	90,6	1089,0	64,6	271,7

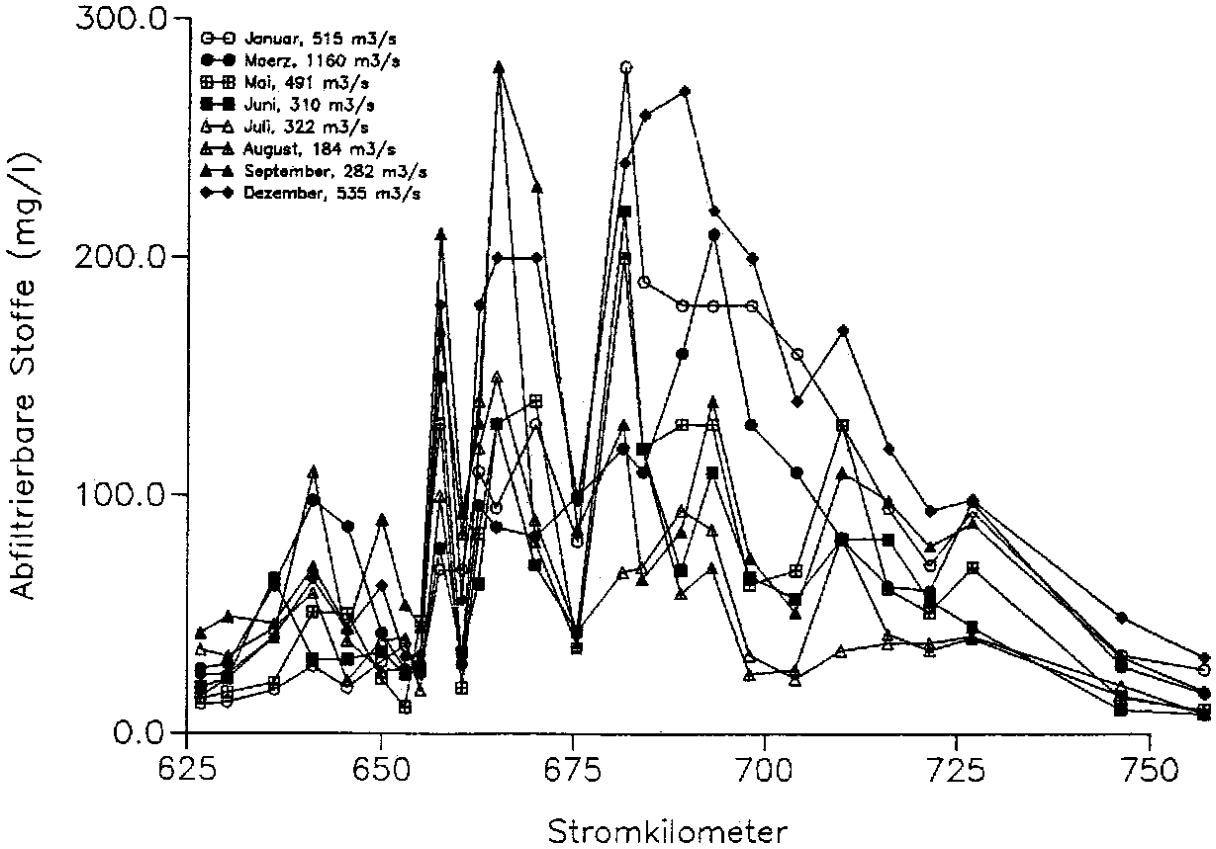
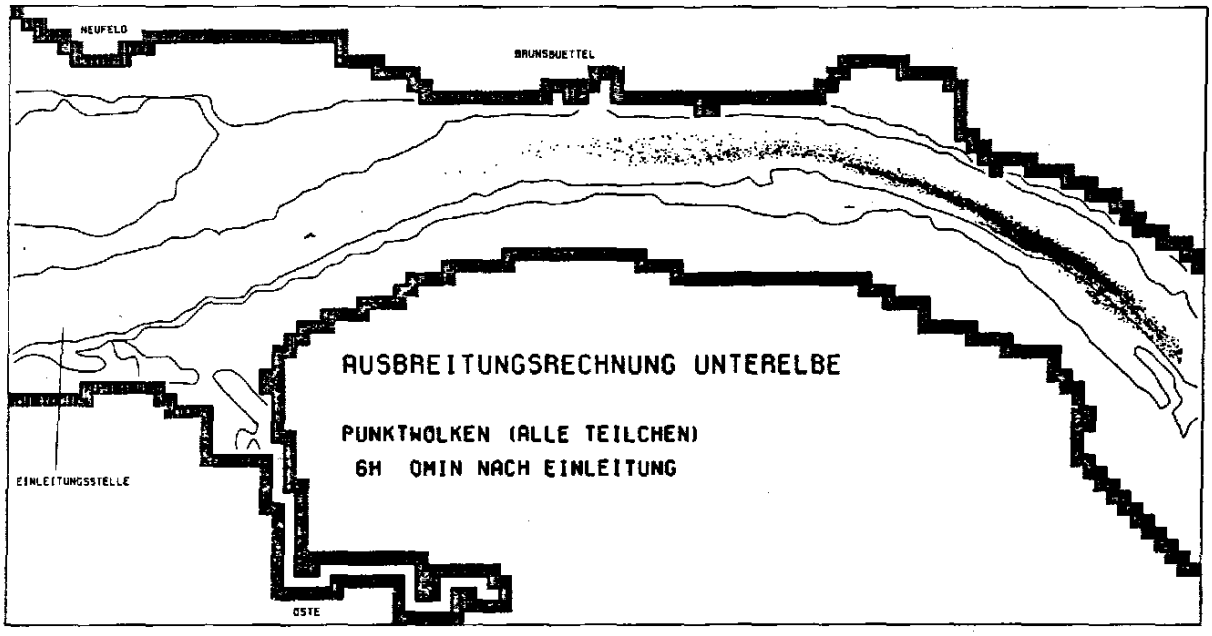


Abb. 8.11: Lokal begrenzte Trübstoffmaxima/-minima in der Unterelbe 1990 (Daten ARGE ELBE, 1990)

Der Schwebstofftransport unterliegt generell den Mechanismen wie der Transport salzhaltigen Wassers (vgl. Kap. 8). Dennoch erfolgt der Schwebstofftransport gegenüber dem Wassertransport aufgrund größerer Reibung verzögert (mdl. Mitt. GREISER, 1992) und wird durch sehr variable Mechanismen gesteuert (vgl. Abb. 8.13)



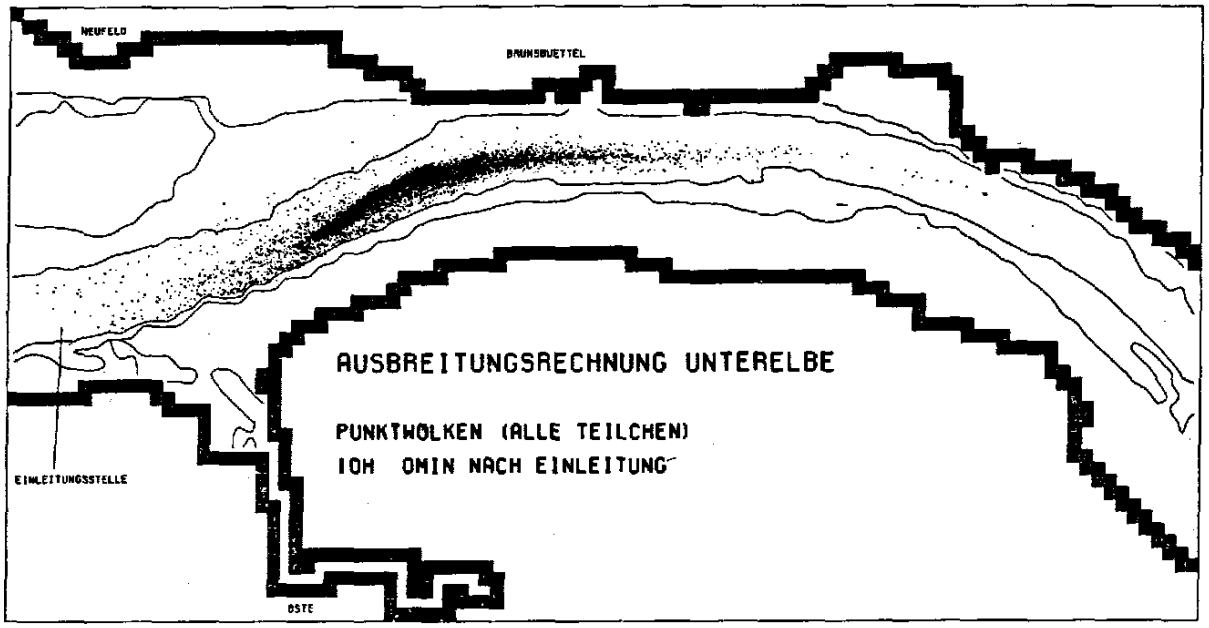
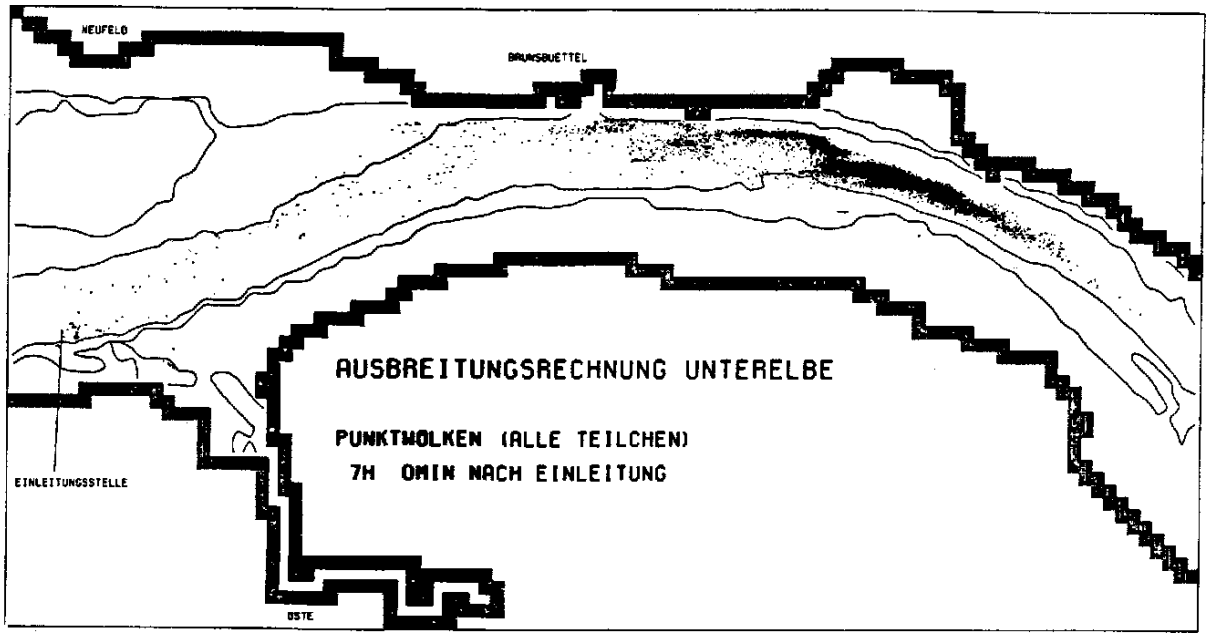


Abb. 8.12a: Teilchenverteilung (10.000 Teilchen) in der Unterelbe 6 und 10 Stunden nach oberflächennaher Einleitung (DUWE et al., 1987)



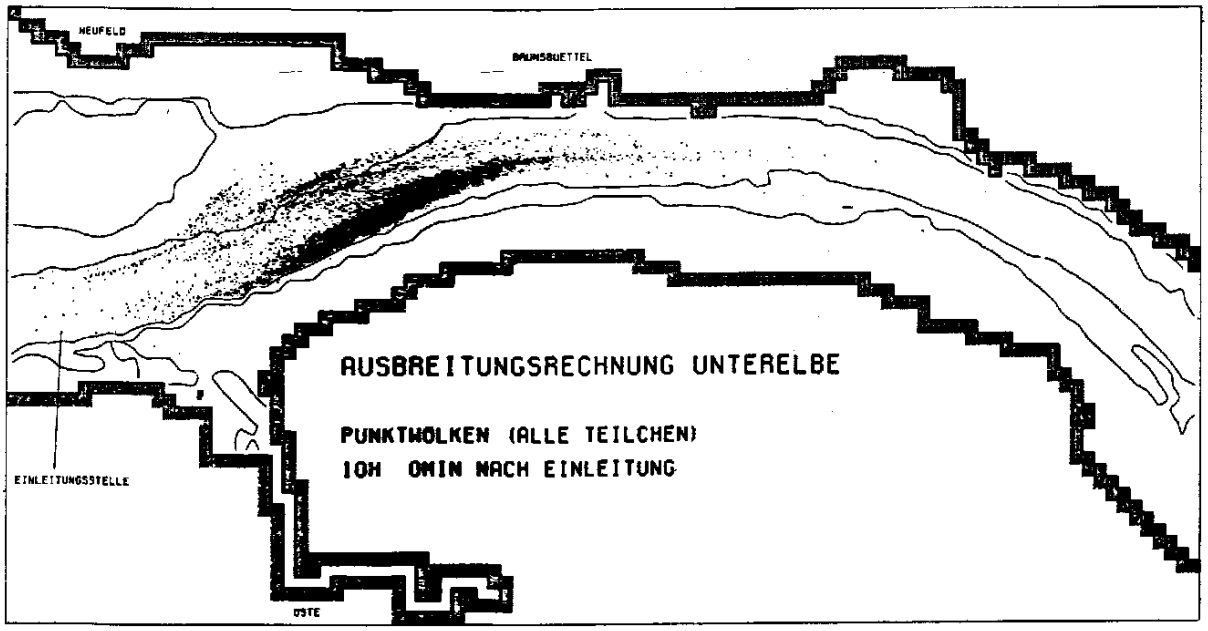


Abb. 8.12b: Teilchenverteilung (10.000 Teilchen) in der Unterelbe 6 und 10 Stunden nach bodennaher Einleitung (DUWE et al., 1987)

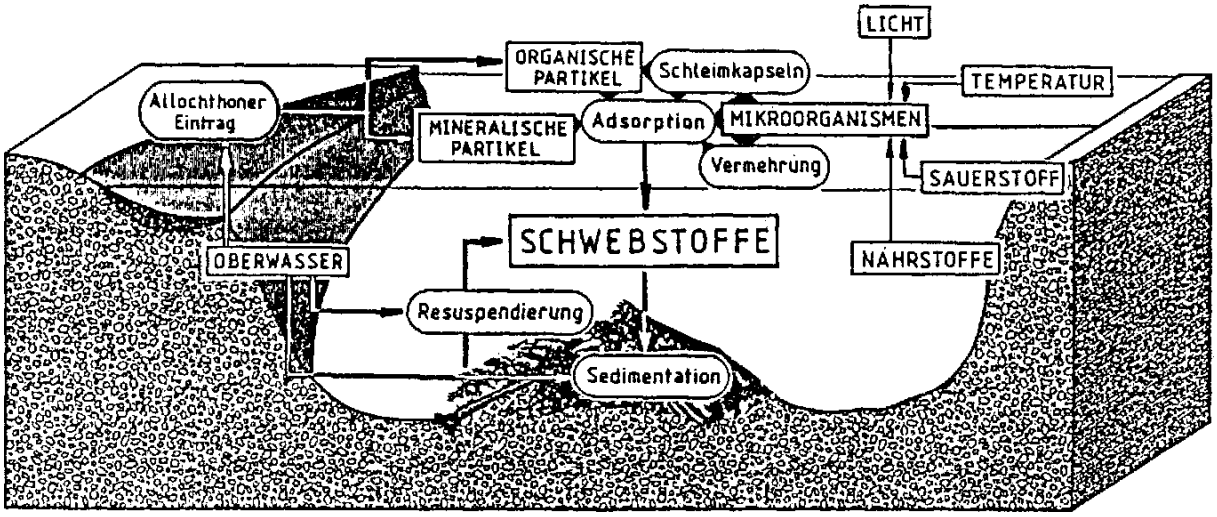


Abb. 8.13: Zusammenhang zwischen den für die Schwebstoffbildung und den -transport wesentlichen Einflußgrößen (GREISER, 1991)

Es besteht ein Zusammenhang zwischen Intensität der Trübung bzw. Aufwirbelung der Sinkstoffe und der aktuellen Stromgeschwindigkeit (vgl. Abb. 8.14).

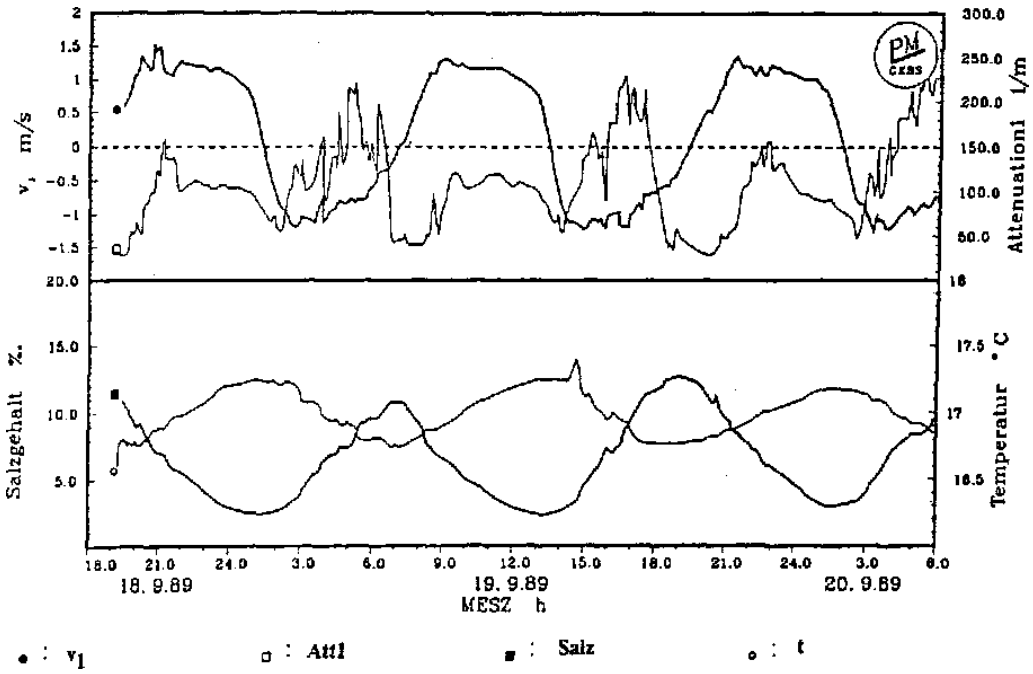


Abb. 8.14: Gang der Strömungsgeschwindigkeit, Trübung, Salzkonzentrationen und Temperatur über ca. 3 Tideperioden, gemessen an einem Ponton bei Büttel (WILKEN et al., 1991)

Die Aufwirbelung der Sinkstoffe vom Gewässergrund ist bei einsetzender Flut bzw. Ebbe besonders stark (vgl. Abb. 8.15). Nach ca. einer Stunde ist eine weitgehende Durchmischung in der Vertikalen erreicht. Im letzten Flut- bzw. Ebbdrittel beginnt bereits die sedimexitation der Sinkstoffe, die in der Regel kurz vor dem erneuten Kentern des Stromes abgeschlossen ist. Die im Wasserkörper verbleibende Resttrübung stammt von feinen Fraktionen. Die Turbulenz im Wasserkörper (FLÜGGE, 1982), resultierend aus der Strongeschwindigkeit in Kombination mit der jeweils herrschenden Tidenphase (vgl. Kap. 6) bewirkt, daß einerseits zur Zeit höchster Stromgeschwindigkeiten eine kräftige Durchmischung des Wasserkörpers mit Sink

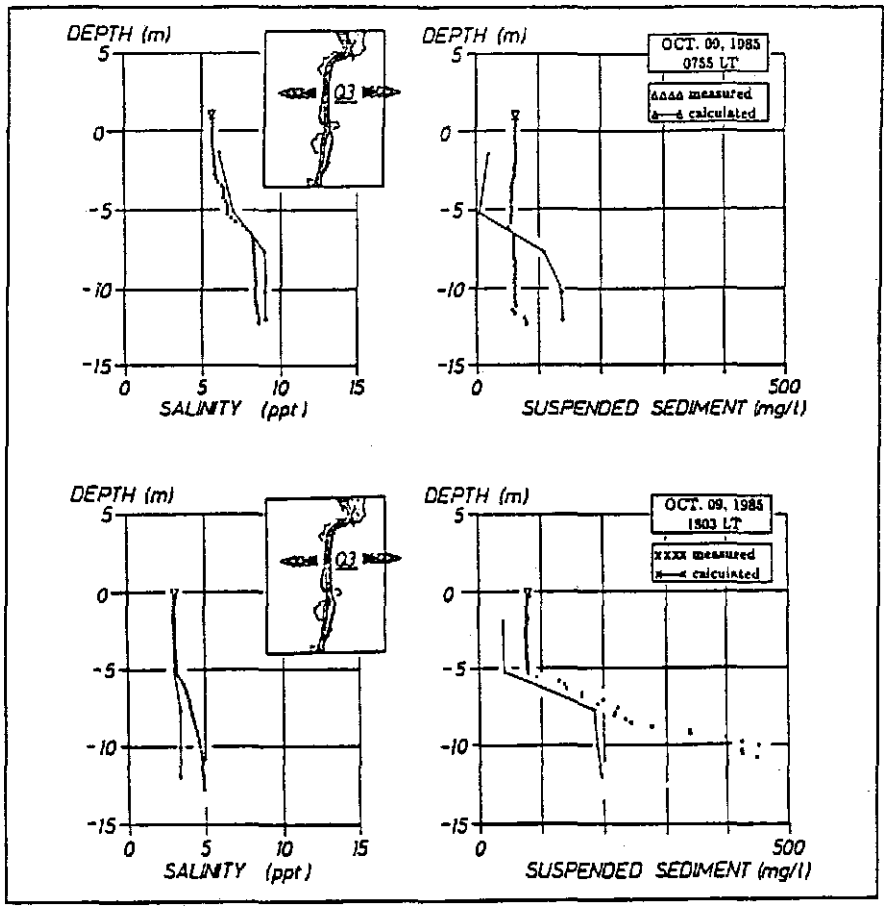


Abb. 8.15: Im Zentralbereich der Trübungszone (Weser) gemessene und berechnete Vertikalprofile des Salz- und Schwebstoffgehalts im vergleich. Unmittelbar vor Flutkenterung (oben) sowie bei voll entwickeltem Flutstrom (unten) (LANG, 1990)

stoffen zustande kommt, andererseits zur Kenterzeit die gröberen Bestandteile sedimentieren (vgl. Kap. 8.2). Eine Klärung der obersten Wasserschichten erfolgte zur turbulenzarmen Kenterzeit (vgl. Abb. 8.16).

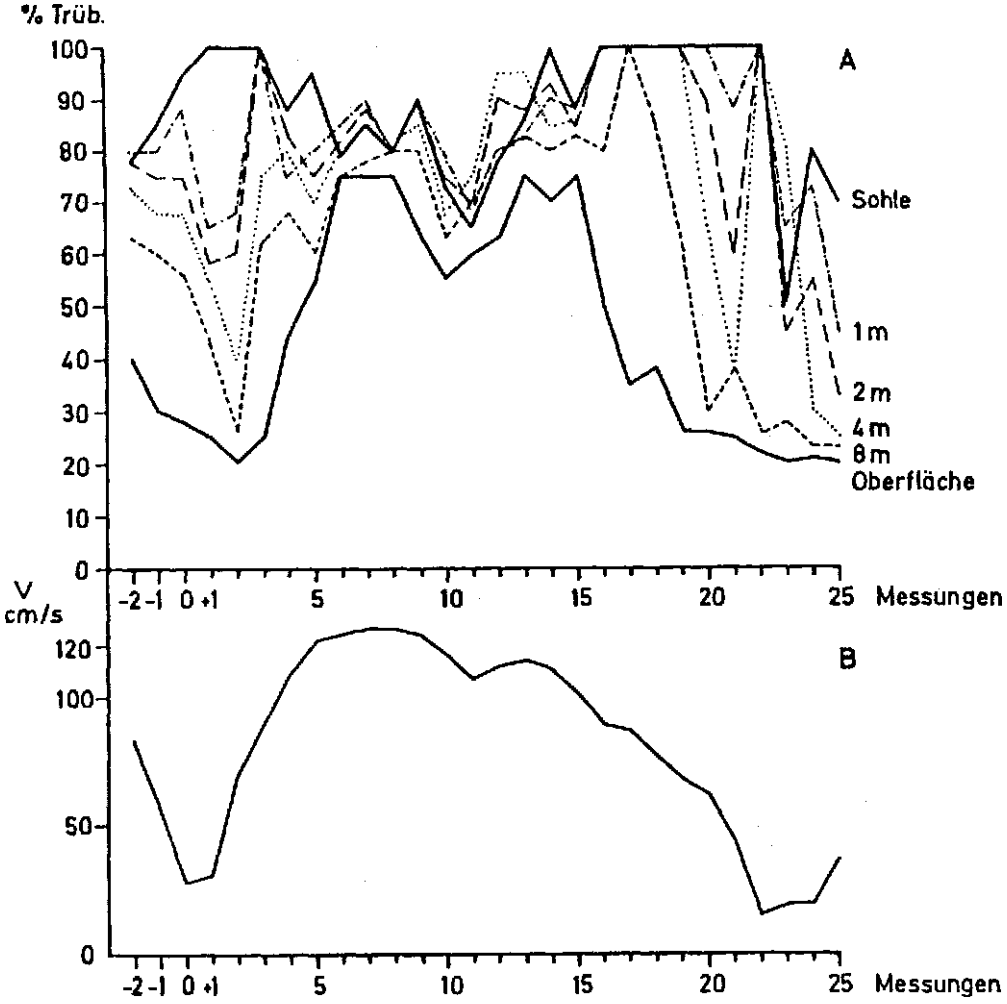


Abb. 8.16: Tidebedingte Veränderung der Trübungsintensität in verschiedenen Wassertiefen (oben) und Strömungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche (unten) (NÖTHLICH, 1972a)

Nach NÖTHLICH (1972a) ist für die Aufwirbelung eine Mindestgeschwindigkeit des Transportstromes notwendig, ein sog. Schwellwert, ehe die Turbulenzen im Wasserkörper dafür groß genug sind. Dieser Schwellwert ist für die einzelnen Korngrößen recht unterschiedlich. Für Feinsand beginnt die Aufwirbelung bei Stromgeschwindigkeiten ab 20 cm/s, während für gröberen Sand 30 - 50 cm/s angegeben werden (zur Problematik

der Aufwirbelung u.a. LUCHT, 1954, 1964 und FLÜGGE, 1982). Die Stromgeschwindigkeiten sind zur Zeit starker Flut bzw. Ebbe aber wesentlich höher (KLEIN, 1960; LUCHT, 1963, 1964), so daß ein großer Teil des Sedimenttransportes in der Suspensionsphase erfolgt (vgl. LUCHT, 1954). Bei der Betrachtung der Schwebstoffwerte ist zu beachten, daß die ARGE ELBE die Proben eine Stunde vor Tnw zieht, die höchste Schwebstoffkonzentration aber etwa 1 Stunde nach Stauphasen, Thw und Tnw, durch Resuspension erreicht wird (mdl. Mitt. GREISER, 1992).

Die aktuelle Trübungssituation stellt somit eine Funktion der Stromgeschwindigkeit dar, verbunden mit einem Zeitfaktor. Die Dynamik des vorganges beruht auf der Gezeitenrhytmik, wobei die Trübungsintensität von der Wirksamkeit der Turbulenzen im Wasserkörper und dem Vorrat an Sinkstoffen im Gewässer abhängt. Letztere sind sowohl jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen als auch in unterschiedlicher Menge in den Regionen der Elbe verteilt.

Neben den mit der Tidendynamik gekoppelten Faktoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Trübungsverteilung sind aperiodische und auch saisonbedingte Einflüsse wirksam (vgl. Tab. 8.4) (zur Temperaturabhängigkeit der Schwebstoffbildung vgl. SCHULZ, 1990, und GREISER, 1991).

Tab. 8.4: Regionale und jahreszeitliche Verteilung der Trübung [%] im limnischen Bereich des Elbe-Ästuars nach NÖTHLICH (1972a) (T=Tiefe; O=Oberfläche) Maximalwerte des Untersuchungsjahres 1967 = Stationen mit Brackwassereinfluß

Station	Frühjahr		Sommer		Herbst		Winter	
	T	O	T	O	T	O	T	O
Schweinsand	23	13	75	35	55	30	50	36
Hanskalbsand	15	10	78	25	100	36	63	43
Lühesand-S+N	38	18	80	28	55	30	-	-
Stadersand	23	15	60	25	75	40	60	55
Grauerort	-	-	69	28	85	25	100	48
Pagensand-UF+N	25	15	75	30	100	40	100	50
Rhinplate-S	25	20	76	28	100	78	100	60
Rhinplate-M	22	15	60	25	100	50	100	48
Brokdorf[1)]	80	30	100	38	100	75	100	62
Brunsbütteikoog[2)]	88	40	100	65	100	100	100	78

Nach KÜHL & MANN (1961, 1968) wird die Trübungsverteilung besonders stark durch die Oberwasserführung der Elbe beeinflußt. Den tidebedingten Intensitätsschwankungen der Wassertrübe sind also Veränderungen des Trübungsbildes im Wechsel der Jahreszeiten übergeordnet. Solche Jahreszeitlichen Unterschiede sind beträchtlich (vgl. Kap. 8.3). Mit dem Frühjahrshochwasser werden zwar feine Partikel eingeschwemmt, trotzdem findet eine radikale Ausräumung des Gewässers von groben Partikeln und Sinkstoffen statt, da mit der Hochwasserführung der Elbe eine erhöhte Abdrift, gekoppelt ist, hervorgerufen durch eine aufgrund der nachdrückenden Wassermassen stärker als normal ausgeprägte Ebbphase (LUCHT, 1964). Jahreszeitliche Unterschiede im Trübungsbild lassen deutlich den Einfluß des Frühjahrshochwassers erkennen. Die geringen Trübungsunterschiede zwischen der Oberfläche und der Tiefe einerseits und die gleichmäßig niedrige Trübung in Längsschnitt andererseits sind ein typisches Zeichen dafür. Die Stationen mit Brackwassereinfluß zeigen auch bei Hochwassereinfluß eine gegenüber den Stationen im limnischen Bereich der Elbe erhöhte Trübung.

Die Lage der Trübungszone in Ästuar ist sowohl abhängig von den periodischen Schwankungen der Gezeitenströme als auch von saisonbedingten Einflüssen, wie Oberwasserführung und Windstau.

8.3 Lage des Trübstoffmaximums

Neben dem erhöhten und sich ständig verändernden Salzgehalt ist der vermehrte Trübstoffanteil charakteristisch für die obere Brackwasserregion. Es bilden sich- dabei ein oder mehrere Schwebstoffmaxima aus (vgl. Abbildungen im Anhang).

Die durch ihre hohe Trübung gekennzeichnete Brackwasser-Region ist saisonalen Schwankungen der Oberwasserführung ausgesetzt. Je nach Stärke des Zustromes verschiebt sich bei hoher Abflußmenge die räumliche Lage des Trübungsgebietes elbeabwärts, bei Trockenheit dagegen elbeaufwärts (ARGE ELBE, 1988; vgl. Abb. 8.17).

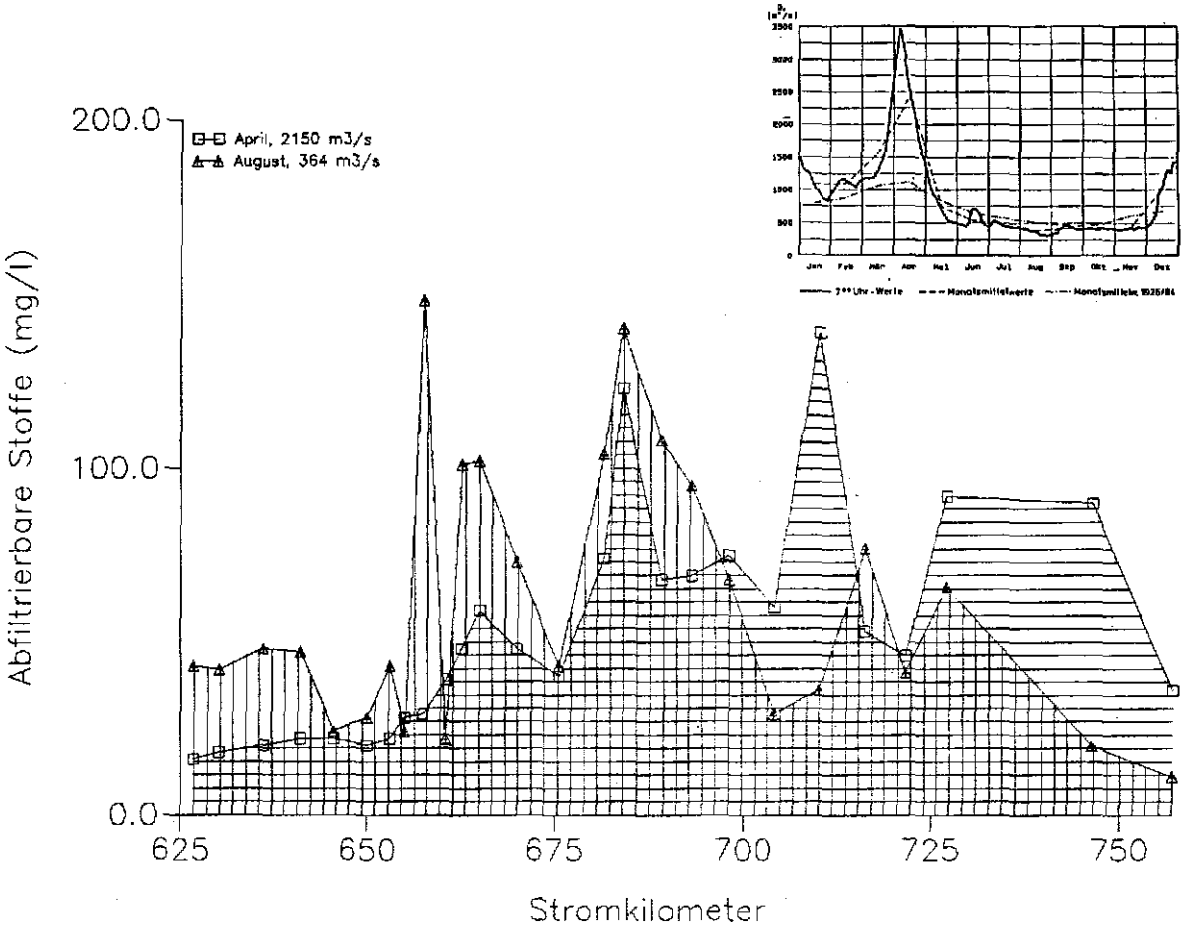


Abb. 8.17: Verschiebung der Trübstoffmaxima (auch Abb. 8.18-8.19) vom abflußreichen Frühjahr zum trockenen Sommer 1988 (Daten ARGE, 1988); Oberwasserabflüsse (ARGE ELBE, 1988)

Hierzu stellte NÖTHLICH (1972a) fest:

"Während die Trübungszonen im Februar und März ... 1965 ... noch im Gebiet zwischen der Ostemündung und Brunsbüttelkoog bzw. zwischen Brunsbüttelkoog und der Störmündung lag, wurde sie mit dem einsetzenden Frühjahrshochwasser flußabwärts gedrängt. Dabei nahm die Trübung stark ab, war aber noch deutlich höher als im Süßwasserbereich. Es kam also auch hier im Brackwasser der Elbe genauso wie im Süßwasser zu einer Reduzierung der Trübungsintensität."

Die Lage der Trübstoffmaxima nach länger andauerndem niedrigen und hohen Oberwasserabfluß ist in Abb. 8.18 und Abb. 8.19 dargestellt.

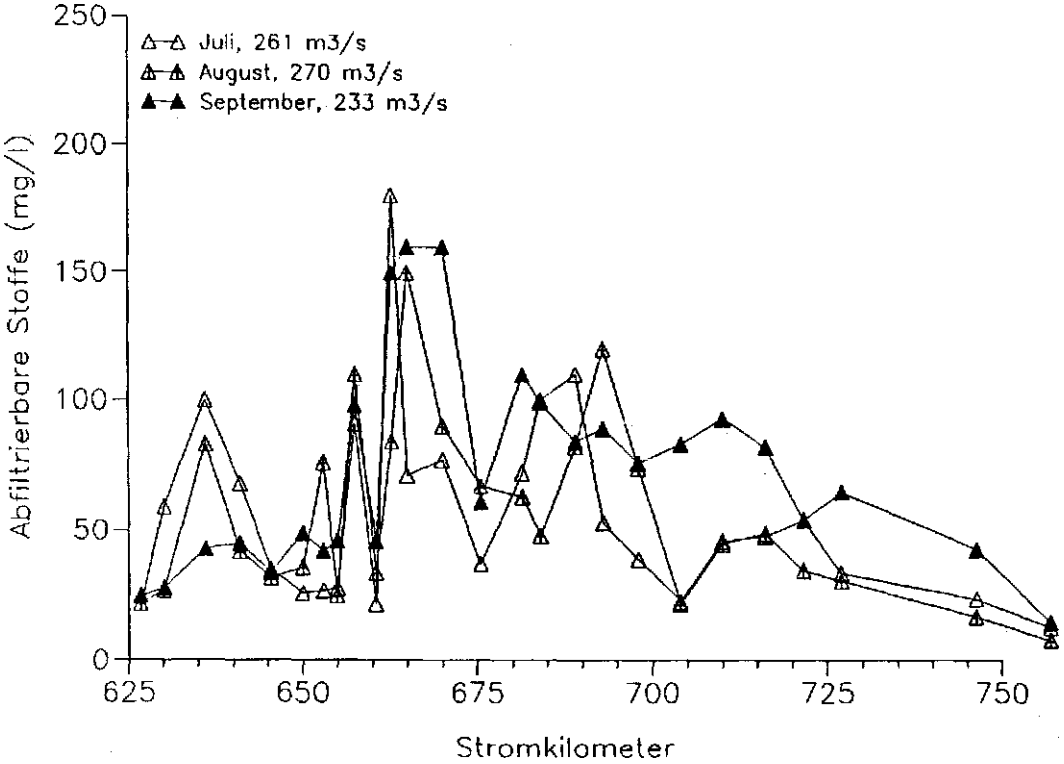


Abb. 8.18: Trübstoffmaxima bei niedrigem Oberwasserabfluß 1989 (Daten ARGE ELBE, 1989)

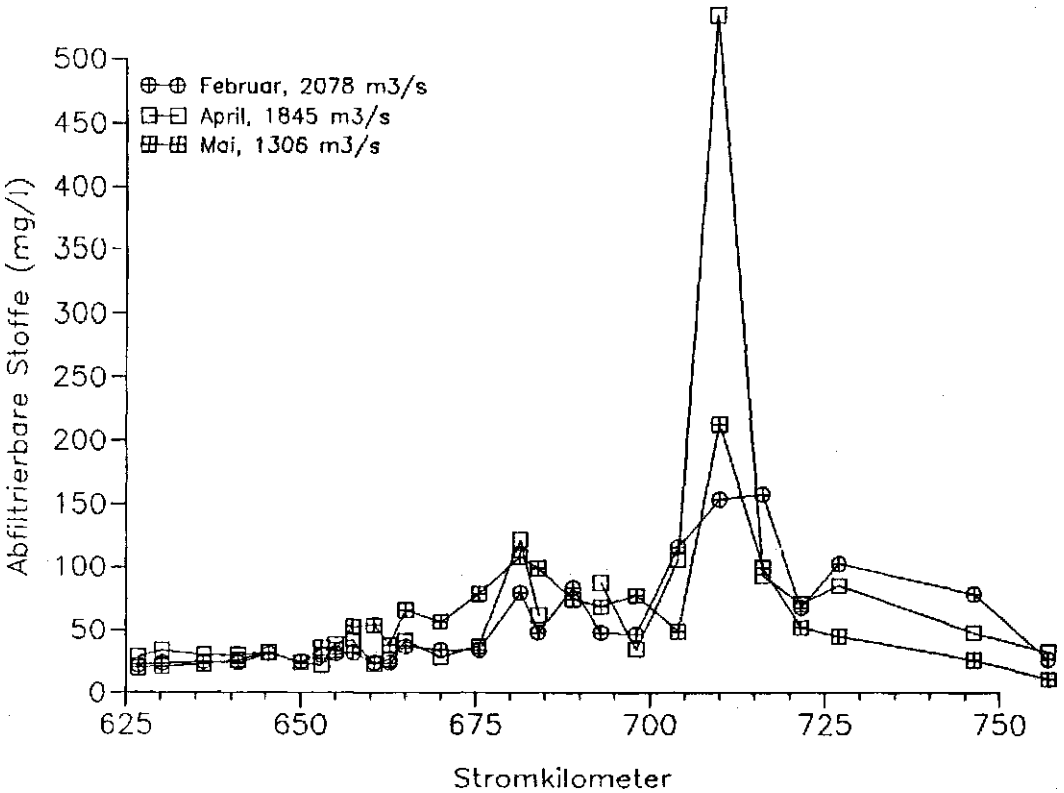


Abb. 8.19: Trübstoffmaxima bei hohem Oberwasserabfluß 1987 (Daten ARGE ELBE, 1987)

Untersuchungen im Elbe-Ästuar haben gezeigt, daß der Schwebstoffgehalt des Oberflächenwassers dort stark ansteigt, wo die mit der Tide pendelnde obere Brackwassergrenze durch einen geringfügigen Anstieg des Salzgehaltes erstmalig festzustellen ist (vgl. Abb. 8.20).

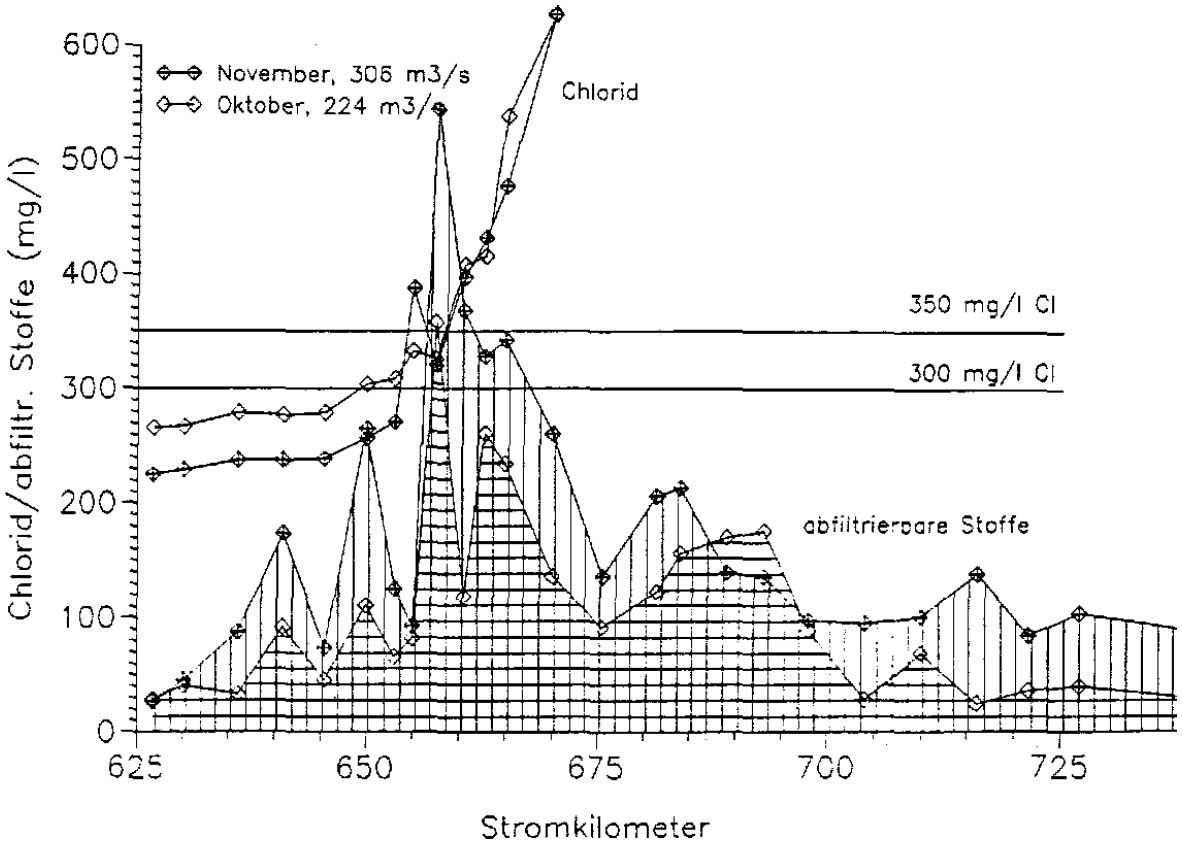


Abb. 8.20: Trübung in der oberen Brackwasserregion (dargestellt als abfiltrierbare Stoffe in mg/l) im Vergleich zum Chloridgehalt im Oktober und November 1991 (Daten ARGE ELBE, 1991)

Den Zusammenhang des Trübstoffmaximums mit bestimmten Salzkonzentrationen im Elbewasser, wurde auch von POSTMA & KALLE (1955) experimentell durch Zugabe von Salz zum Elbewasser (destilliertes und marines Wasser) nachgewiesen (Vgl. Abb. 8.21a). Das Trübungsmaximum befindet sich in der Nähe von Brokdorf an dem Punkt, an den sich die Cl^--Kurve erstmalig merkbar über ihren Grundwert erhebt (0,75 ‰ Cl^- ≈ 1,38 ~~0/00~~‰ Salz). Ein zweites kleineres Maximum liegt kurz vor Cuxhaven (vgl. Abb. 8.21b).

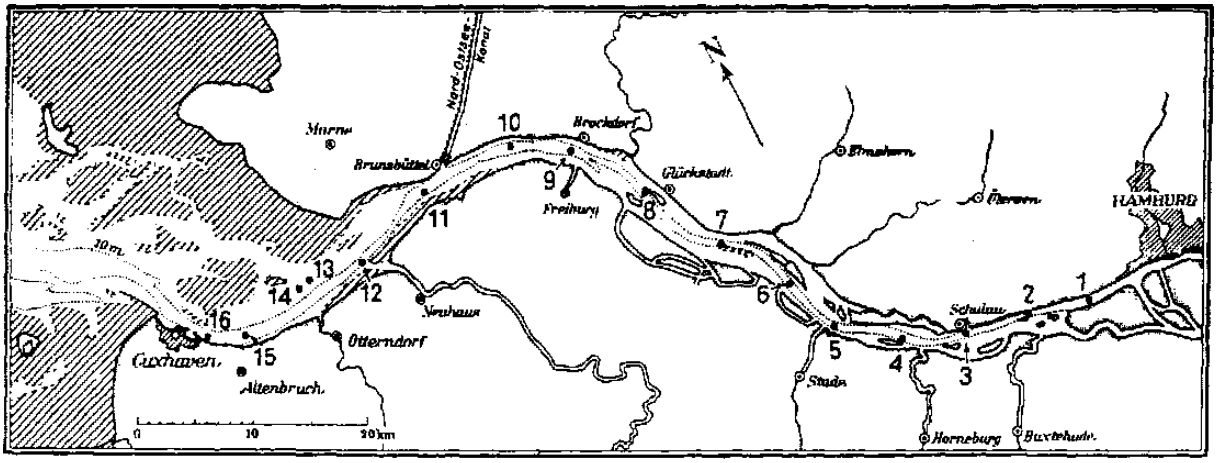


Abb. 8.21a: Lage der Stationen im Unterelbegebiet zu Tab. 8.5

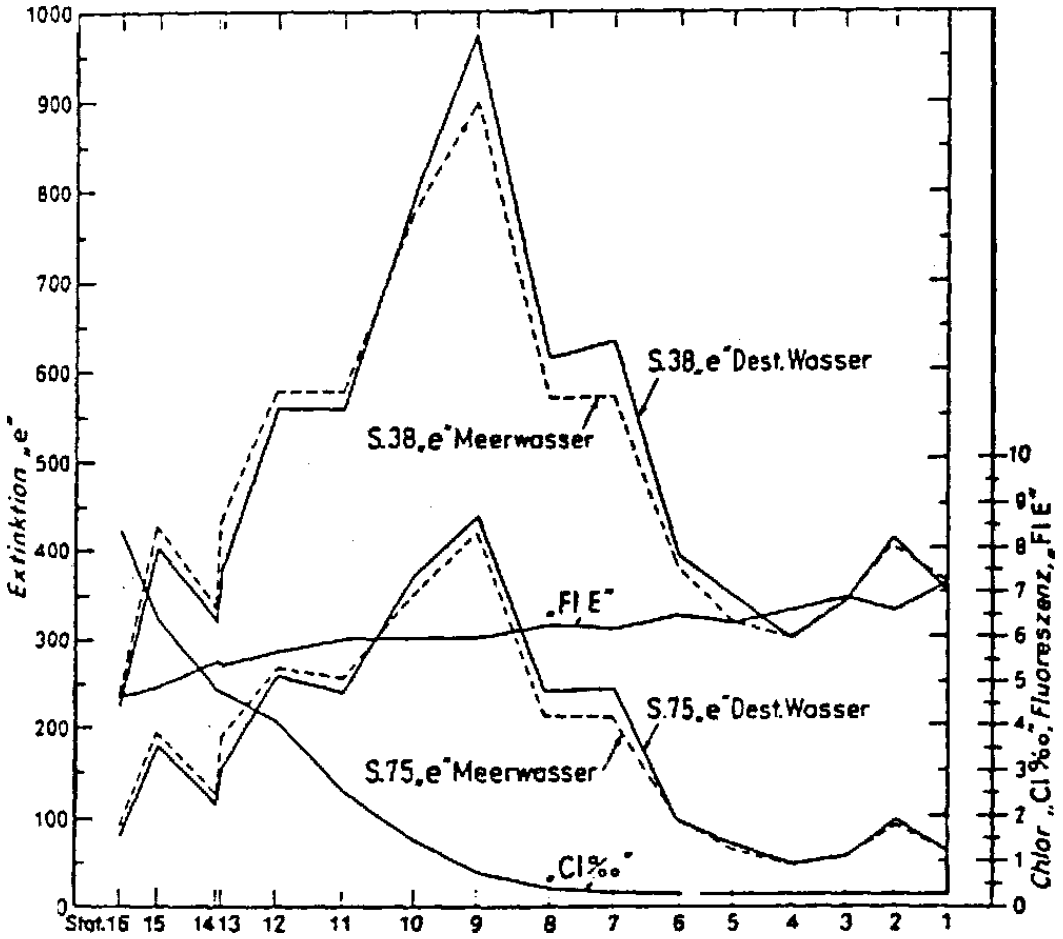


Abb. 8.21b: Extinktionsverlauf der Trübung in der Unterelbe mit und ohne Zusatz von Meerwasser sowie Verlauf des Chlor-Ionengehaltes und der Fluoreszenzstärke (POSTMA & KALLE, 1955)

Aus den Angaben von NÖTHLICH, (1972a) läßt sich allerdings ableiten, daß trotz der variablen räumlichen Lage die Trübungszone in der Elbe bisher stets an der oberen Brackwassergrenze (vgl. Kap. 8.3) bei 0,5 - 5 ‰ S beobachtet wurde (vgl. Kap. 10). Bemerkenswert ist, daß das Maximum der Trübung - entsprechend der Lage des Gleichgewichtspunktes - stets im oligohalinen, teils im mesohalinen Bereich liegt.

Über die Lage des Trübstoffmaximums faßt SCHULZE (1990) die Ergebnisse der wesentlichen Untersuchungen folgendermaßen zusammen: "Die bei niedrigen Salzgehalten zwischen 1,5 und 5 ‰ in der Brackwasserzone vorhandene hohe Trübung des Wasserkörpers (Trübungszone) wurde durch zahlreiche Untersuchungen belegt (vgl. u.a. BETH 1952, HENSEN 1953, KÜHL und MANN 1972, POSTMA und KALLE 1955, CASPERS 1968, NÖTHLICH 1972a, CHRISTIANSEN 1974, ALLEN et al. 1980, WELLERSHAUS 1982, NICHOLS 1977, FRANZIUS 1986, GRABEMANN und KRAUSE 1989 und RICKLEFS 1989). Trübungszonen in Tideflüssen können sich auf Strecken zwischen rd. 20 und 40 km ausdehnen (KÜHL und MANN 1968, SCHUBEL 1968 und GRABEMANN und KRAUSE 1986)"
Nach LANG (1990) ist: "'... die Trübe ist in erster Linie eine Funktion des Salzgehalts' (LÜNEBURG, 1953), wobei eine gut wahrnehmbare Trübungszone bei einem zwischen 2-8 ppt (ebenda) oder 2-10 ppt liegenden Salzgehalt gefunden werden kann (WELLERSHAUS, 1981). Damit fällt in der Weser der Beginn der Trübungszone mit dem landseitigen Ende der Brackwasserzone zusammen. Ferner wird ein enger Zusammenhang zwischen der Schwebstoffkonzentration und der Salzschichtung beobachtet, der 'von größter Wichtigkeit für die Betrachtung der Schwebstoffverteilung in den Flußmündungen' ist (LÜNEBURG, 1950); zwei Jahre später berichtet derselbe Autor von hohen Schwebstoffkonzentrationen unterhalb der Sprungschicht, die im Brackwasserbereich der Weser 5 ppt betragen kann (LÜNEBURG, 1952); auf diesen Zusammenhang weist er auch in seinen späteren Arbeiten immer wieder hin (LÜNEBURG, 1953, 1955). Erhöhte Schwebstoffkonzentrationen in Bodennähe, insbesondere bei Nipptiden, wurden auch von anderen Forschern beobachtet - 'But it [suspended sediment] rests above the bottom in a 2 to 7 m thick layer instead of being distributed in the whole water body.' (WELLERSHAUS, 1981). Als Erklärung für die Schwebstoffkonzentrationsanreicherung bei Anwesenheit einer stabilen vertikalen Salzschichtung wird ein auf die Turbulenz dämpfend wirkender Einfluß angegeben, der eine 'Aufwirbelung der Teilchen' verhindern soll (GRABEMANN und KRAUSE, 1986), wobei generell von einer 'Modulation des Trübungsverlaufes' durch eine vorhandene Dichteschichtung gesprochen wird (ebenda); darüberhinaus wird auch ein die Sedimentation verstärkender Einfluß vermutet (RIETHMÜLLER et al., 1988). Umgekehrt kann eine am flußseitigen Ende der Brackwasserzone beobachtete labile oder gar instabile Dichteschichtung bewirken, daß dort 'wahre Quellungswolken der Trübe mit bloßem Auge zu beobachten sind.' (LÜNEBURG, 1952)."

Messungen aus der Weser über die beobachtete Tidedynamik der Schwebstoffkonzentrationen und des Salzgehaltes (vgl. Abb. 8.22) bestätigen die maximale Schwebstoffdichte bei niedrigen Salzgehalten, wenn diese in der Weser auch höher liegen als in der Elbe zu beobachten ist.

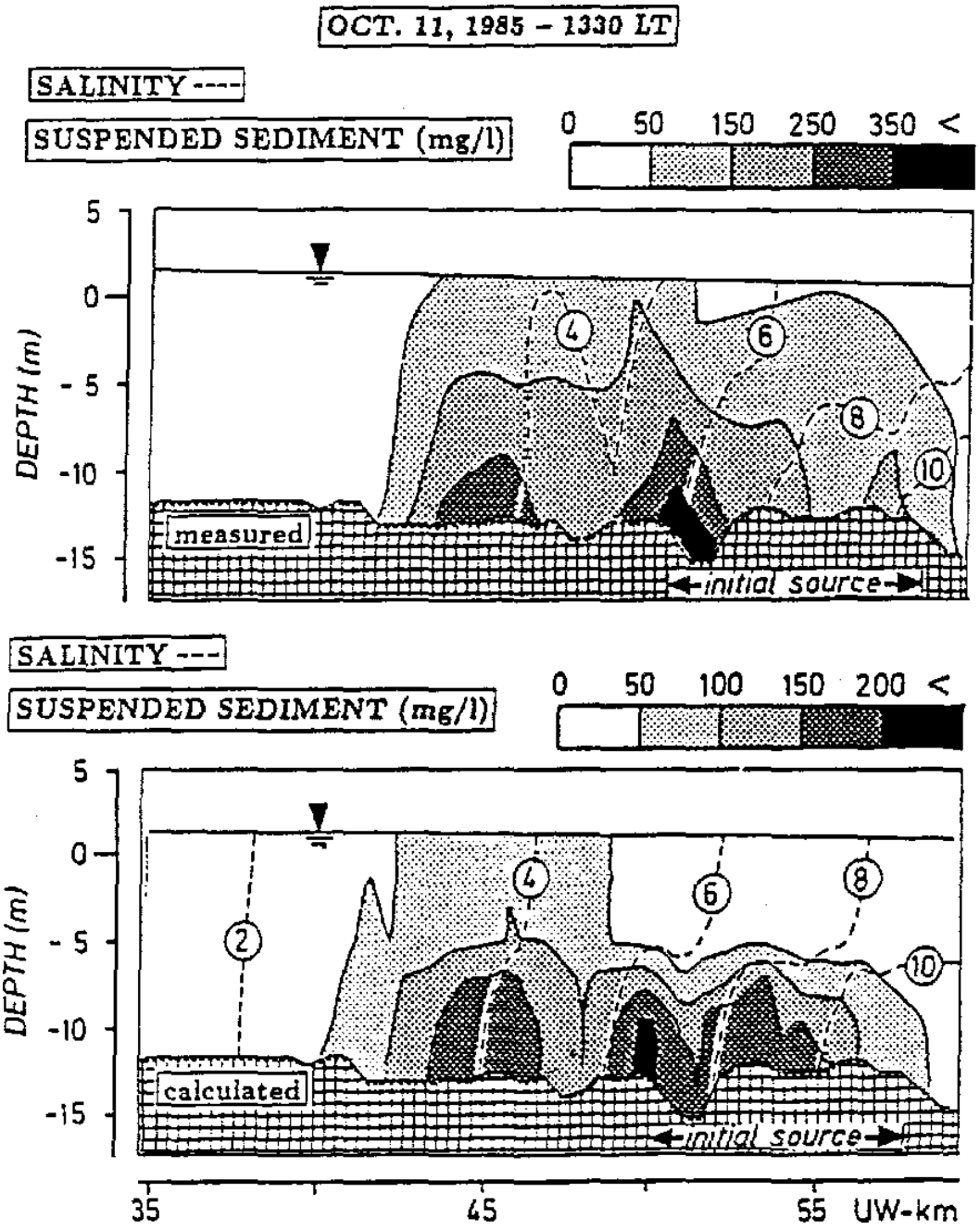


Abb. 8.22: Isolinien des Salzgehaltes sowie Isoflächen gleicher Schwebstoffkonzentration im Zentralbereich der Trübungszone der Unterweser für den 11.10.1985, 13.30 Uhr (LANG, 1990)

Die ARGE ELBE (1988) stellte ein Schema für die Zusammenhänge zwischen Trübstofftransport, Oberwasser und Salzgehalt auf, allerdings ohne Berücksichtigung weiterer Faktoren wie Reibung, Temperatur etc. (vgl. Abb. 8.23)

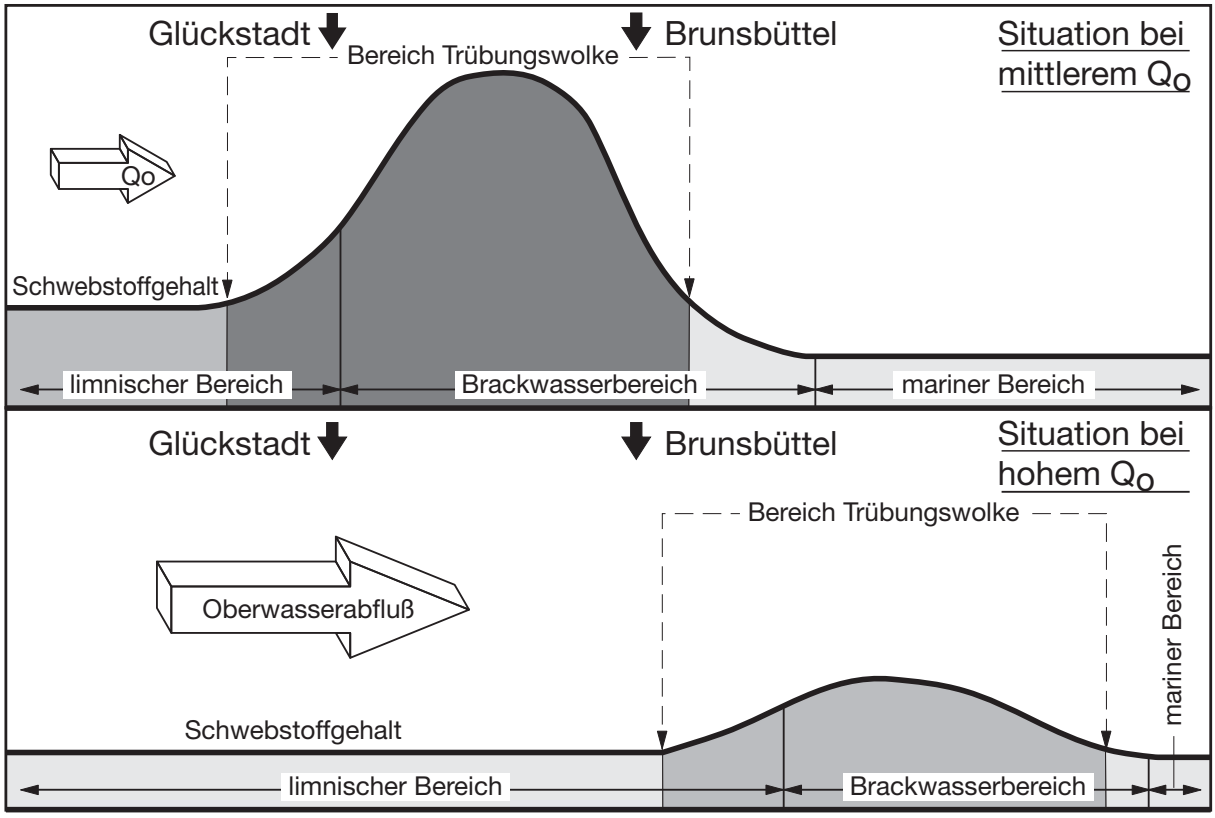


Abb. 8.23: Schematische Darstellung des Einflusses von Oberwasser und Salzgehalt auf die Trübungswolke in Elbe-Ästuar (verändert nach ARGE ELBE, 1988)

Die Lage des Trübstoffmaximums in der Elbe ist an die Oberwasserführung und, nach einer bestimmten Laufzeit, die Lage der oberen Brackwasserzone im Ästuar gekoppelt (vgl. Abb. 8.24 und Abb. 8.25; Kap. 6 und 8.4).

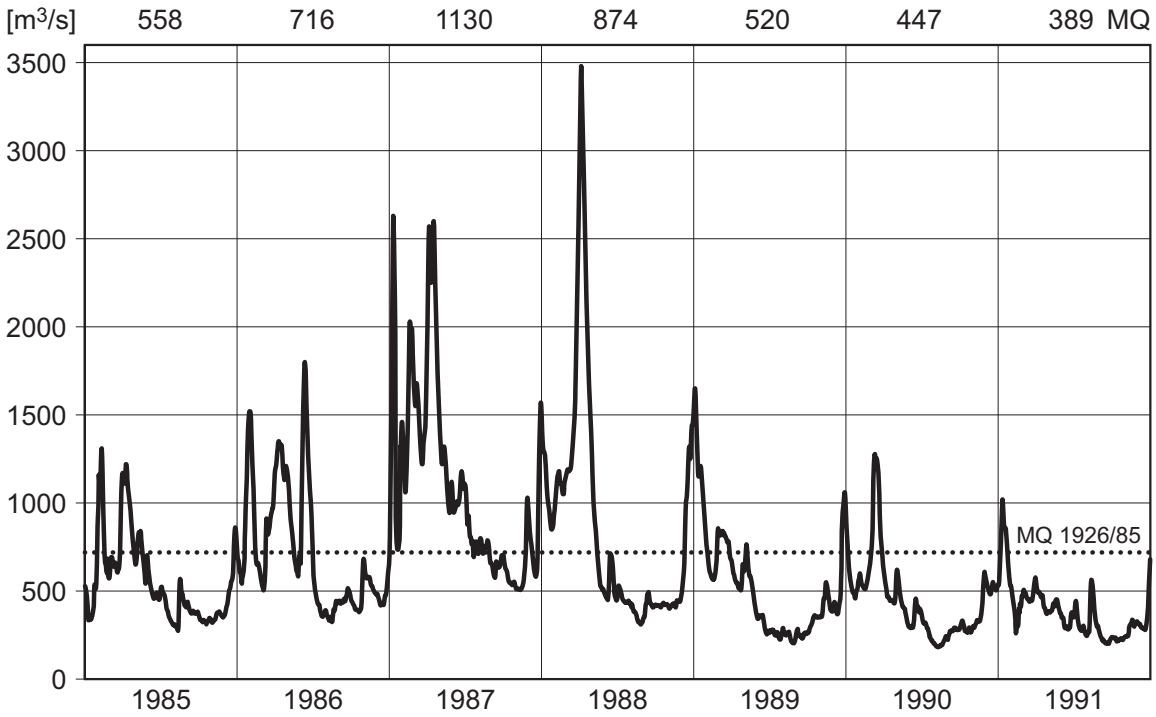


Abb. 8.24: Abfluß der Elbe am Pegel Neu Darchau (ARGE ELBE, 1991)

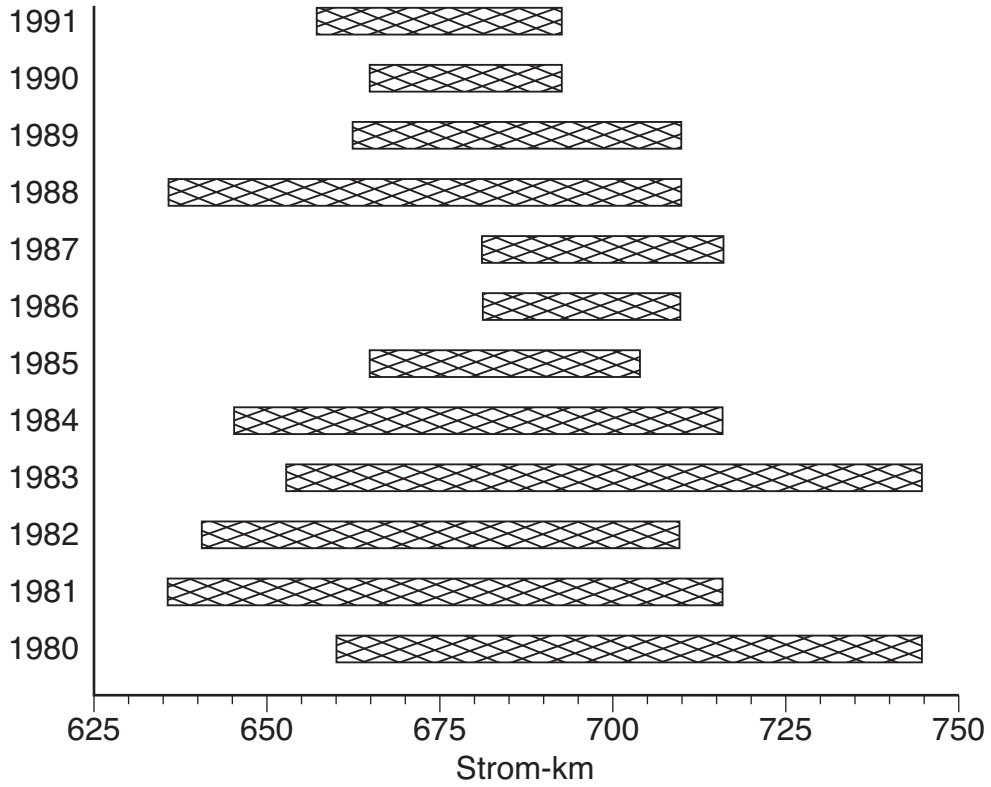


Abb. 8.25: Extreme Lagen der Trübstoffmaxima ca. 1 Stunde vor MTnw 1980 - 1991 (Daten ARGE ELBE, 1980 - 1991)

LANG (1990) stellt die komplexen Zusammenhänge zwischen der Herkunft der Schwebstoffe, den hydrochemischen Prozessen und den dynamischen hydrologischen Vorgängen von Trübstoffverteilung/-transport im Ästuar zusammenfassend in einer Grafik dar (vgl. Abb. 8.26).

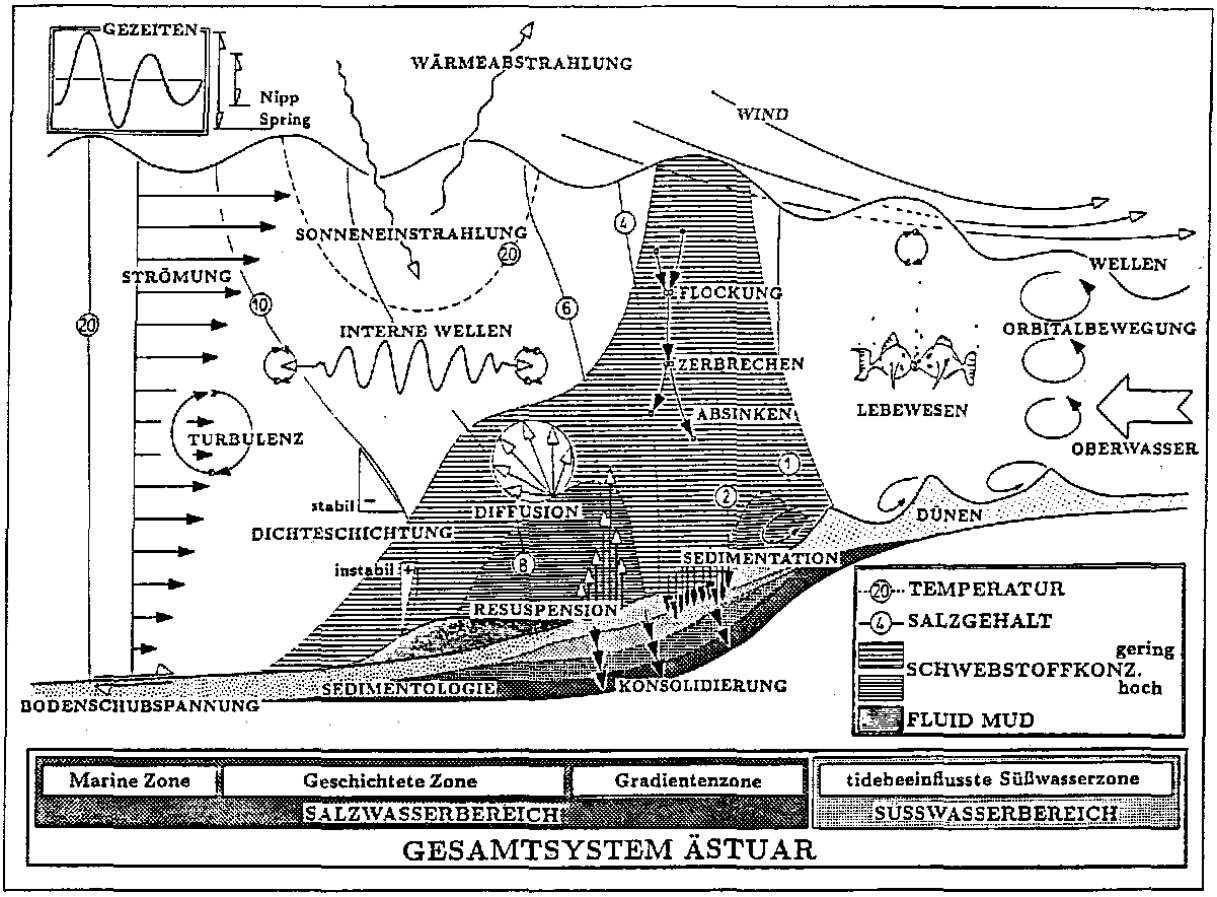


Abb. 8.26: Herkunft der Schwebstoffe und hydrochemische Prozesse im Ästuar (LANG, 1990)

9. Lage der oberen Brackwassergrenze im Ästuar

Die Lage der oberen Brackwassergrenze ist vielfach beschrieben und festgelegt worden (vgl. Kap. 3 und 4). Um in vergleichbarer Weise die Lage der oberen Brackwassergrenze in den letzten Jahren zu beschreiben, wird in diesem Kapitel wertneutral die 300 mg/1 Cl^--Grenze angewandt (in diesem Kapitel folgendermaßen gekennzeichnet: OBERE BRACKWASSERGRENZE). Eine Diskussion der Konsequenzen, die sich aus der Verwendung der verschieden definierten 'oberen Brackwassergrenzen' ergeben, erfolgt in Kap. 10.3. Die Lage der oberen Brackwassergrenze wird aus den regelmäßigen monatlichen Chlorid-Stichproben (Wasseroberfläche an den Fahrwassertonnen) von Manatslängsprofilen (ARGE ELBE, 1979 - 1991) bei vollem Ebbstrom ca. 1 Stunde vor Tnw ermittelt. Die Auswertung der Daten ergibt, daß die OBERE BRACKWASSERGRENZE im Extrem zwischen Pagensand-Süd und der Ostemündung (vgl Abb. 9.1 und Abbildungen im Anhang) schwankt. So lag sie z.B. in April 1988 nach einem kräftigen Oberwasserabfluß etwa in Höhe der Ostemündung, dagegen während extremer Trockenperioden im Sommer 1976, 1989, 1990 und 1991, bei Lühesand Nord (vgl. Abb. 9.2 und 9.3).

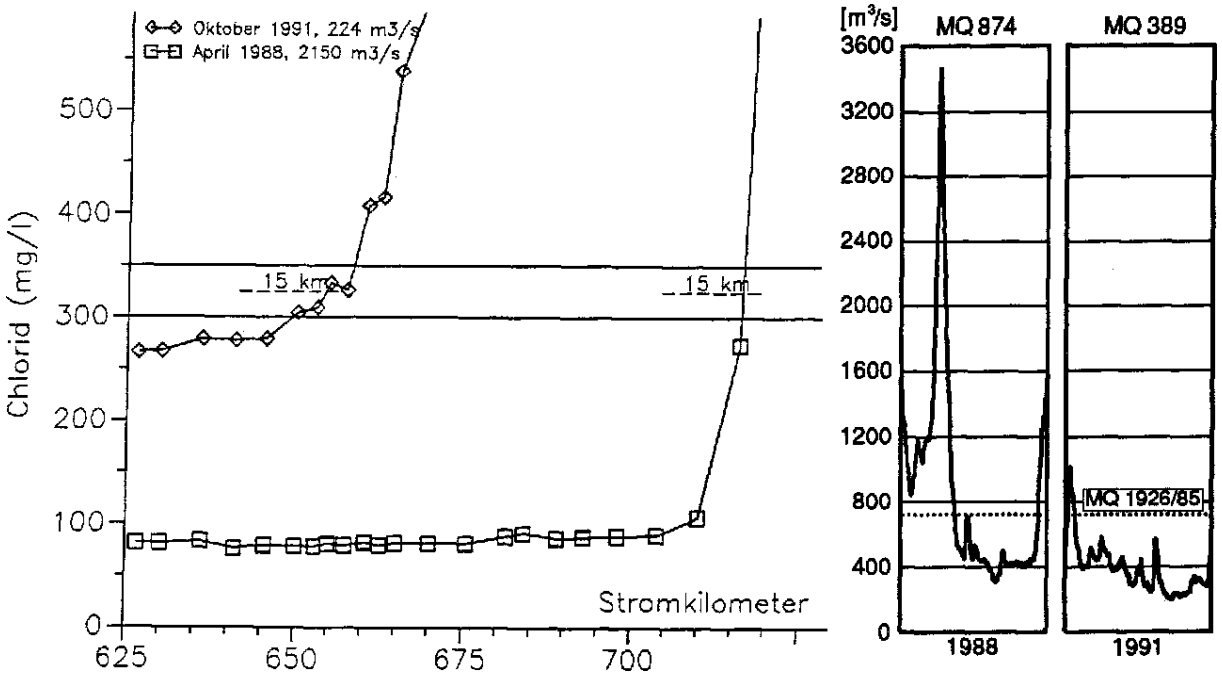
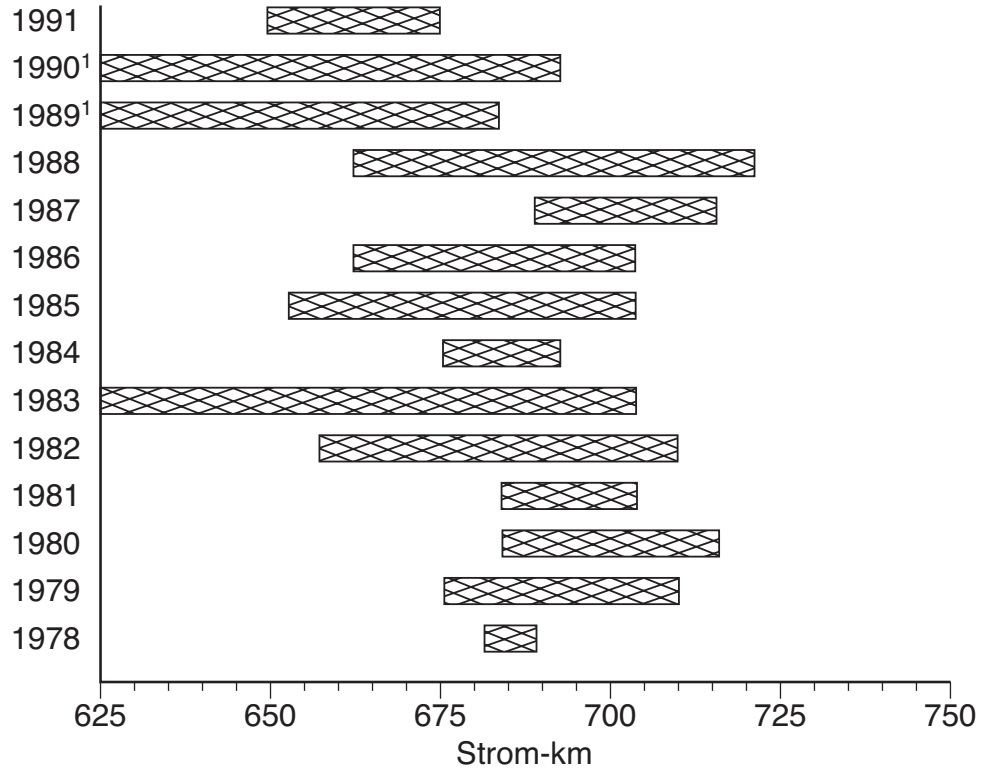


Abb. 9.1: Extreme der OBERE BRACKWASSERGRENZE (Daten ARGE ELBE, 1979 - 1991)



[1] 1989 und 1990 hat das Oberwasser schon mehr als 300 mg/l Chlorid

Abb. 9.2: Extremlagen der OBEREN BRACKWASSERGRENZE (Daten ARGE ELBE, 1988 -1991)

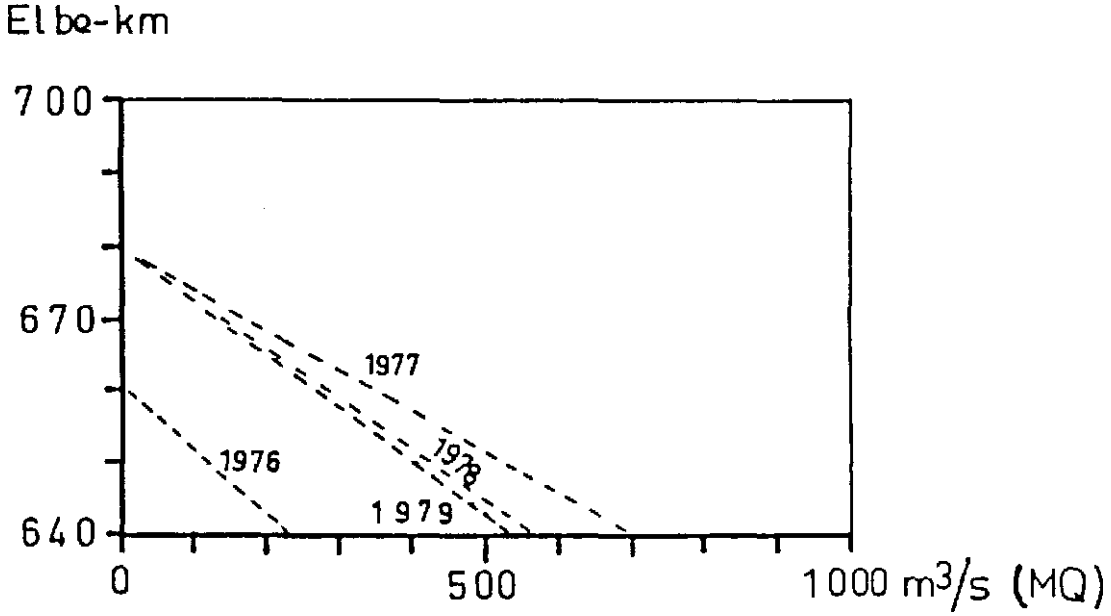


Abb. 9.3: Lage der biologisch wirksamen Brackwassergrenze in Abhängigkeit vom sommerlichen oberwasserabfluß 1981 - 1988 und 1991 (SCHÖLL, 1992)

"(x) Der Korrelationsgeradensteigungsgrad 1991 unterscheidet sich wegen der erheblich differierenden Dauer der Niedrigwasserperioden dieser Jahre" (SCHÖLL, 1992).

Während des Tideverlaufes verlagert sich die Brackwasserzone (vgl. Kap. 6.1) stromauf- und ab. Dabei erfolgt der Transport in der Vertikalen und im Längs- und Querprofil unterschiedlich schnell (vgl. Abb. 9.4 und Kap. 6.1 und 8.2).

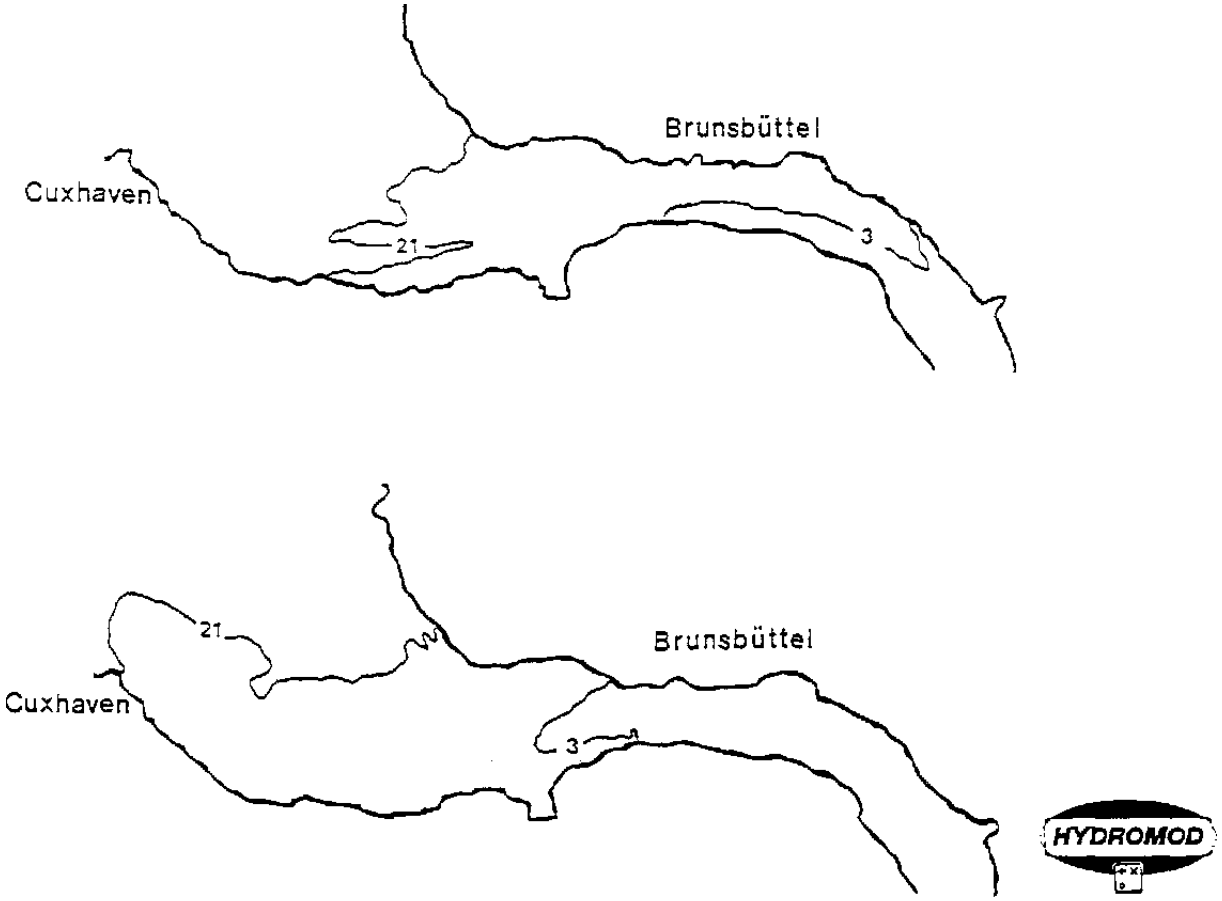


Abb. 9.4: Minimaler und maximaler Salzgehalt an der Oberfläche während einer Normaltide bei mittlerem Oberwasserabfluß und 0 ‰ S (Modellrechnungen: HYDROMOD, 1991/2)

Die Lage der OBEREN BRACKWASSERGRENZE wird in erster Linie durch die abfließende Oberwassermenge sowie anhaltende Ost-/Westwindlagen beeinflußt (ARGE ELBE, 1988).

Eine Veränderung der verschiedenen beeinflussenden Faktoren bewirkt, daß sich der Bereich, in dem die obere Brackwassergrenze liegen kann, über viele Kilometer erstreckt (LUCHT, 1953) (vgl. Abb. 9.5)

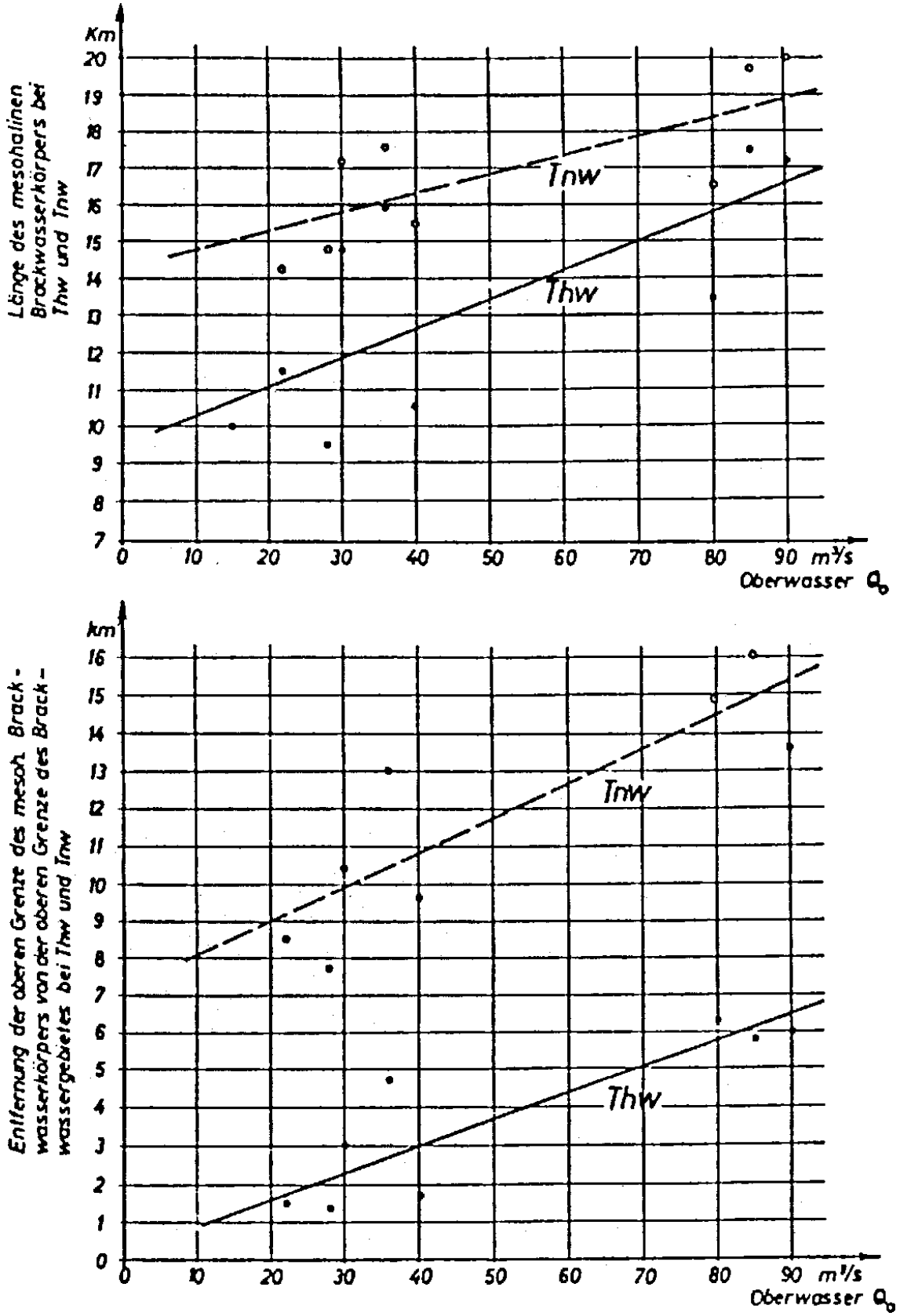


Abb. 9.5: Berechnete maximale und minimale Salzgehaltsverteilung für einen "mittleren" Tidezyklus 1984 mit mittlerem Oberwasserabfluß (HYDROMOD, 1991)

Die Verdriftung der OBEREN BRACKWASSERGRENZE läßt sich aus den vorliegenden Modellrechnungen ermitteln (vgl. Abb. 9.6 und 9.7). So betrug z.B. der ideelle Transportweg von Wasserteilchen bei geringer Oberwasserführung bei Lühesand Nord von Kenterpunkt Ebbe [Ke] bis zum Kenterpunkt Flut [Kf] 11,3 km am 15.10.1991. Das bedeutet, daß der Wasserkörper vom Beginn der Probennahme maximal 7 km (11,3 km - 4,3 km) elbeaufwärts verdriftet. Für den Bereich vor der Ostemündung wurde bei hohem Oberwasserabfluß ein maximaler Transportweg von 19,9 km berechnet.

Vereinfachend kann daher der Wert von 15 km (u.a. mdl. Mitt. ARGE ELBE, 1992) beibehalten werden.

Setzt man die von KAPPENBERG (1992) errechneten Transportwege an, so ergibt sich eine Verschiebung der oberen Brackwassergrenze weit oberhalb der aus den ARGE ELBE-Werten ermittelten OBEREN BRACKWASSERGRENZE (vgl. Abb. 9.8 und 9.9 und Kap. 10.3)

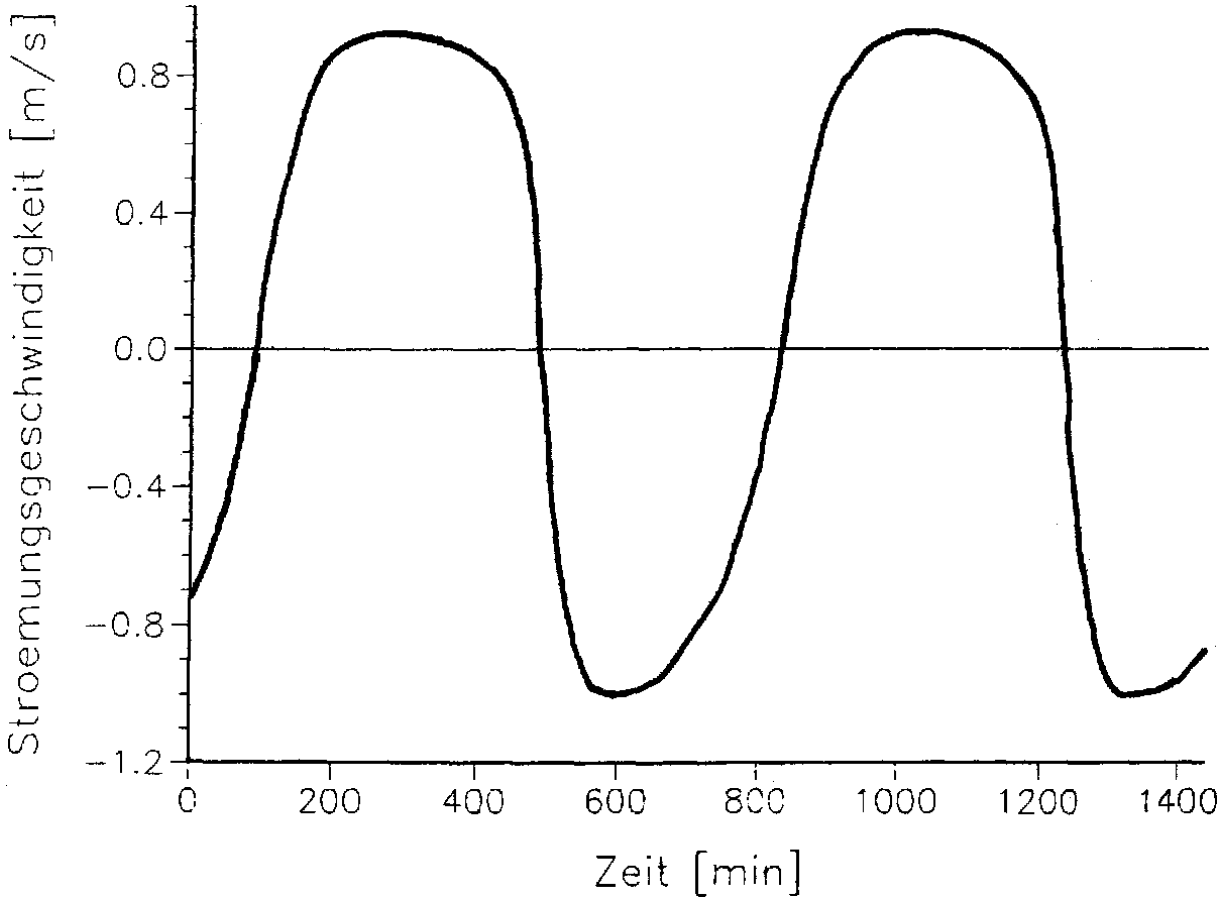


Abb. 9.6: Modellrechnungen: Strömungsgeschwindigkeiten während einer Tide bei Glückstadt (Daten ARGE ELBE, 1992)

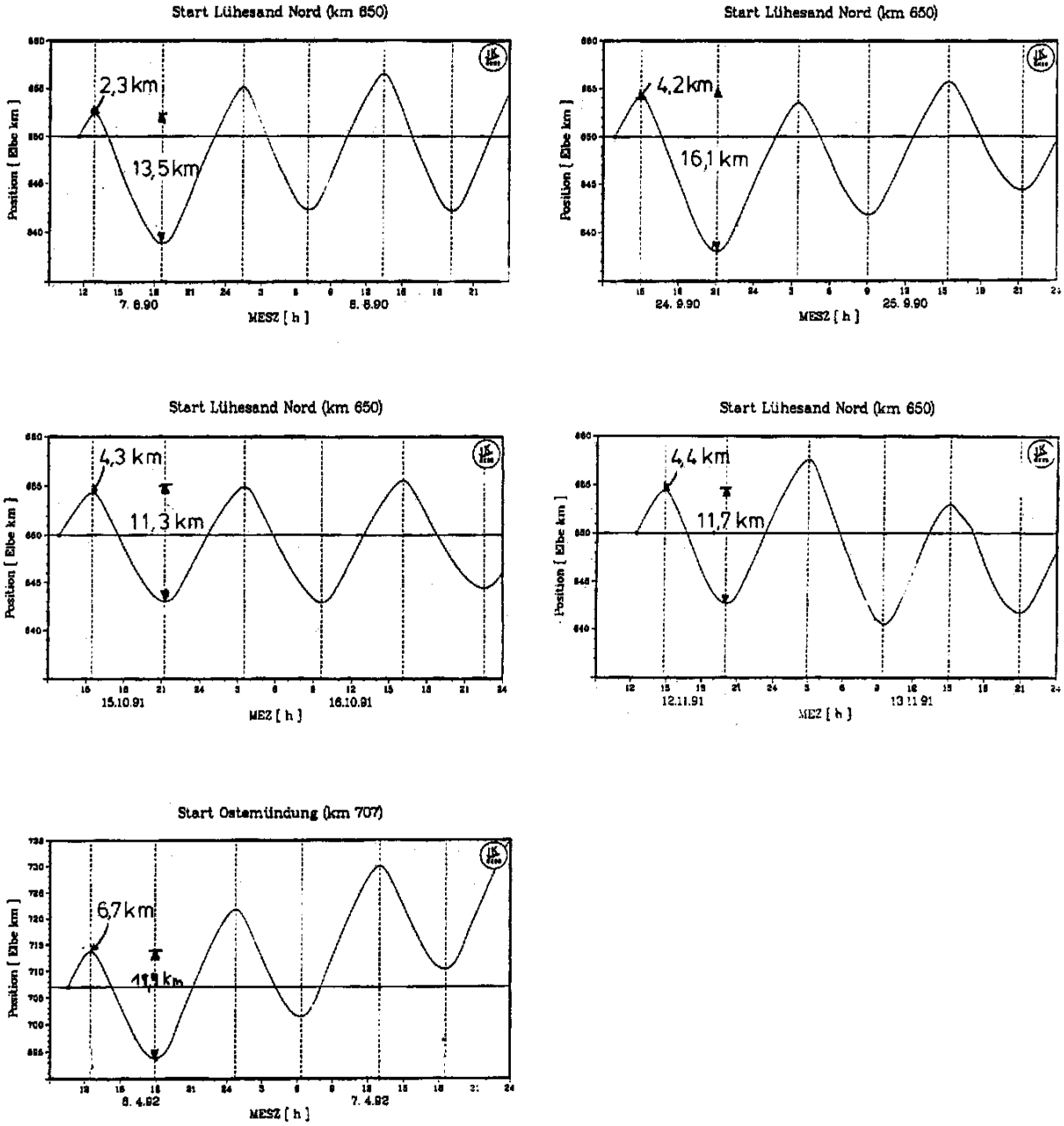


Abb. 9.7: Modellrechnungen: Bewegungen von Wasserteilchen bei geringen Oberwasserabflüssen vor Lühesand Nord und bei hohen Oberwasserabflüssen vor der Ostemündung während mehrerer Tiden (KAPPENBERG, 1992, unveröffentlicht)

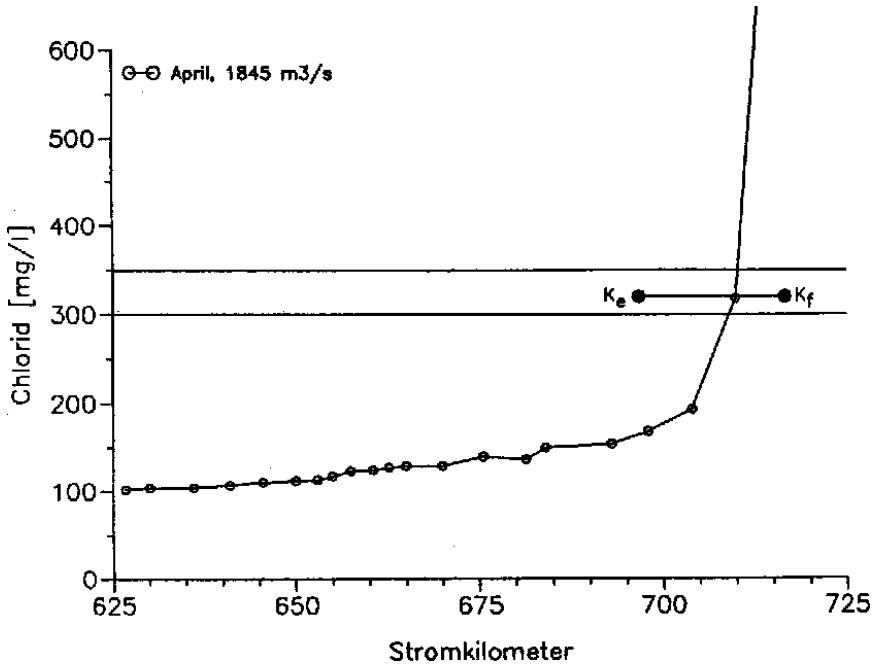


Abb. 9.8: Verschiebung der Brackwassergrenze zwischen den Kenterpunkten Ke und Kf (Probenahme des Längsprofils ca. 1 h vor Tnw) bei hohen Oberwasserabflüssen 1987 (Transportwege vgl. Abb. 9.7; Daten ARGE ELBE, 1987)

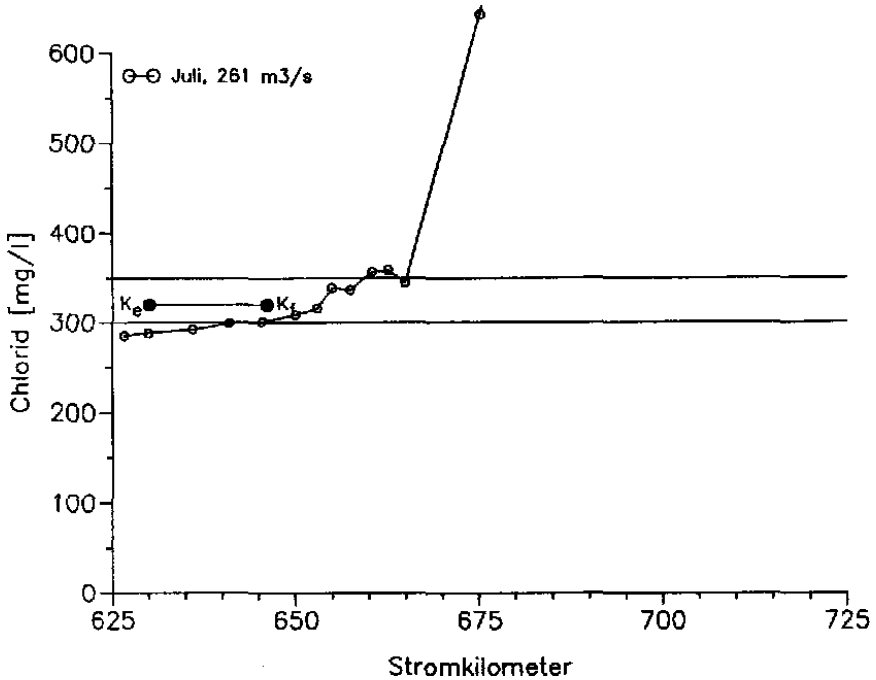


Abb. 9.9: Verschiebung der Brackwassergrenze zwischen den Kenterpunkten Ke und Kf (Zeitpunkt der Probenahne des Längsprofils ca. 1 Stunde vor Tnw) bei niedrigen Oberwasserabflüssen (Transportwege; Daten ARGE ELBE, 1989)

10. Diskussion

10.1 Rechtsvorschriften

Die Lage der oberen Brackwassergrenze ist für diverse Rechts- bzw. Verwaltungsvorschriften von wesentlicher Bedeutung.

In dieser Studie soll nur auf die 22. Verwaltungsvorschrift (**22. Abwasser VwV, WHG § 7**) hingewiesen werden. Sie beinhaltet, daß Fischteste mit Goldorfen bei Abwässern von ins Brackwasser einleitenden Verursachern anders zu behandeln sind als bei denjenigen, die ins Süßwasser ableiten.

Von wesentlicher Bedeutung für die Anlieger im oberen Brackwasserbereich von Flüssen ist die **31. Abwasser VwV, WHG § 7**. Diese regelt u.a. die Rückgabe von Schwebstoffen aus Kühl- und Prozesswasser.

Da in Ästuaren die obere Brackwasserzone mit den Trübstoffmaximum gekoppelt ist, bezieht sie sich indirekt auch auf diesen Bereich. Es wird am Beispiel der 31. Verwaltungsvorschrift erläutert. Hier heißt es: "... Da der Schwebstoffgehalt im Gewässer bei Abflüssen über Mittelwasser (MQ) stark ansteigt, gilt die Mindestanforderung nur bis zu diesen Abflüssen ...", d.h. bei höheren Abflüssen dürfen die entnommenen Schwebstoffe in das Gewässer rückgeführt werden.

Für die Elbe gilt ein mittlerer Abfluß von 719 m^3/s bezogen auf Neu Darchau (Strom-km 536,4; DGJ, 1985). Da ein Wasserkörper von Neu Darchau den Unterlauf mit einigen Tagen Verzögerung erreicht (ARGE ELBE, 1989; vgl. Tab. 6.3 in Kap. 6.2), gelten diese mittleren Abflußverhältnisse auch für den Unterlauf der Elbe.

In der Unterelbe kommt es sehr selten durch hohe Oberwasserabflüsse - und auch nur dann - zu einer vermehrten Schwebstofffracht aus dem Oberlauf, z.B. im Frühjahr 1988 nach einer großen Hochwasserwelle. Im Normalfall wird der hohe und stark schwankende Schwebstoffgehalt im Bereich des unteren Süß- und oberen Brackwassers durch andere Mechanismen beinflußt (vgl. Kap. 8.1 und 8.2). Als Konsequenz tritt in diesem Grenzbereich, im Rhythmus der Tide pendelnd, das Schwebstoffmaximum auf. Es wandert also bei extrem niedrigen Oberwasserabflüssen

mit zunehmender Verlagerung der Brackwassergrenze elbeaufwärts (vgl. Kap. 8.3 und Kap. 9)

Der "Hochwasserpassus" der 31. Verwaltungsvorschrift bezieht sich also nicht auf den Mündungsbereich von Tidegewässern. Denn in Ästuarien entsteht das Trübstoffmaximum im Bereich der Brackwassergrenze nicht durch Spülstöße aus dem Oberlauf, sondern vorrangig durch komplexe Mechanismen beim Einstrom von Meerwasser in das Süßwasser.

10.2 Konsequenzen der Definition der oberen Brackwassergrenze für ihre Lage im Ästuar

"Die Brackwassergrenzen geben die Endpunkte der Brackwasserzone an, d.h. an den Grenzpunkten bleibt der Salzgehalt während einer Tide konstant" (BARG, 1979). Diese oder andere Definitionen der oberen Brackwassergrenze (vgl. Kap. 5) haben wesentliche Konsequenzen für ihre Lokalisierung.

In der Elbe liegt die obere Brackwassergrenze bei **sehr hohen Oberwasserabflüssen** nach Auswertung aller zitierten Definitionen jeweils in derselben Region - vor der Ostemündung (vgl. Abb. 10.1). Dies hat seine Ursache in dem sehr plötzlichen und steilen Anstieg des Chloridgehaltes von weit unterhalb von 300 mg/1 auf sehr hohe Konzentrationen.

Bei **extrem niedrigen Oberwasserabflüssen** weichen die verschiedenen Grenzwerte deutlich voneinander ab (vgl. Abb. 10.2).

Als besonders problematisch erweist sich ohne differenzierte Ionenanalyse das ca. 300 mg/l Chlorid-Limit (CASPERS, 1959) bei einer Versalzung des Oberwassers (vgl. Abb. 6.28 in Kap. 6.3). Hier sollte der endgültige seewärtige Anstieg des Salzgehaltes (BARG, 1979; PARCOM, 1987) mit herangezogen werden.

Auch sind Abweichungen zwischen der PARCOM-Definition und der Grenze nach NÖTHLICH relativ groß, aber begründet. Während PARCOM bei geringen Oberwasserabflüssen Tnw berücksichtigt (ähnliche Verhältnisse wie bei den ARGE ELBE-Längsprofilmessungen), beschreibt NÖTHLICH, allerdings unabhängig vom

Oberwasser, mit dem Vordringen der Seepocken (vgl. Kap. 7.2) die Situation bei Flut. Diese Varianten führen z.B. 1991 zu regionalen Abweichungen einiger Kilometer, etwa zwischen Stadersand und Lühesand-Nord. Die Anwendung der beiden letztgenannten Definitionen hat wesentliche Konsequenzen für Aussagen über die Verbreitung von Organismen im unteren Süß- und oberen Brackwassergebiet der Elbe.

Die Verschiebung der Brackwassergrenze in den letzten Jahren wird in Kap. 10.3 dargestellt.

10.3 Schlußbetrachtungen

Zur Lage der oberen Brackwassergrenze der Elbe sind noch einige generelle Gedanken anzuführen. So werden z.B. die Auswirkungen von Sturmfluten, Klimaveränderungen oder Ausbaumaßnahmen diskutiert (vgl. Kap. 6). - HENSEN (1953a) und CASPERS (1963) berichteten, daß sich nach Sturmfluten die Brackwassergrenze nicht zwangsläufig elbeaufwärts verschob, es wurden sowohl Aussüßungen als auch Versalzungen beobachtet.

Zur Frage, ob die Säkularvariation des Tidehubs (vgl. Kap. 6.1) zu einer Verschiebung der Brackwassergrenze führt, liegen allerdings z.Zt. keine Literaturangaben vor. Nach HENSEN (1953a) rückt die obere Brackwassergrenze stromaufwärts, wenn bei sonst unveränderten Werten, die Flutwassermenge größer, die Oberwassermenge kleiner oder der Durchflußquerschnitt kleiner wird. Die Folgen der ersten Elbevertiefungen (bis 1936) belegt HENSEN anhand von Salzgehaltsunterschieden aus der Zeit zu Beginn und nach den vorläufigen Abschluß der Ausbautätigkeit. Er folgert, daß durch Regelungsarbeiten (Abnahme des Flutraumes) eine Verlagerung der Brackwasserzone um etwa 10 km elbeabwärts erfolgte. Angaben über die Verschiebung der oberen Brackwassergrenze sind den Ausführungen aufgrund fehlender Salzgehaltsmessungen aus der oberen Brackwasserregion für die vorangegangenen Perioden nicht zu entnehmen.

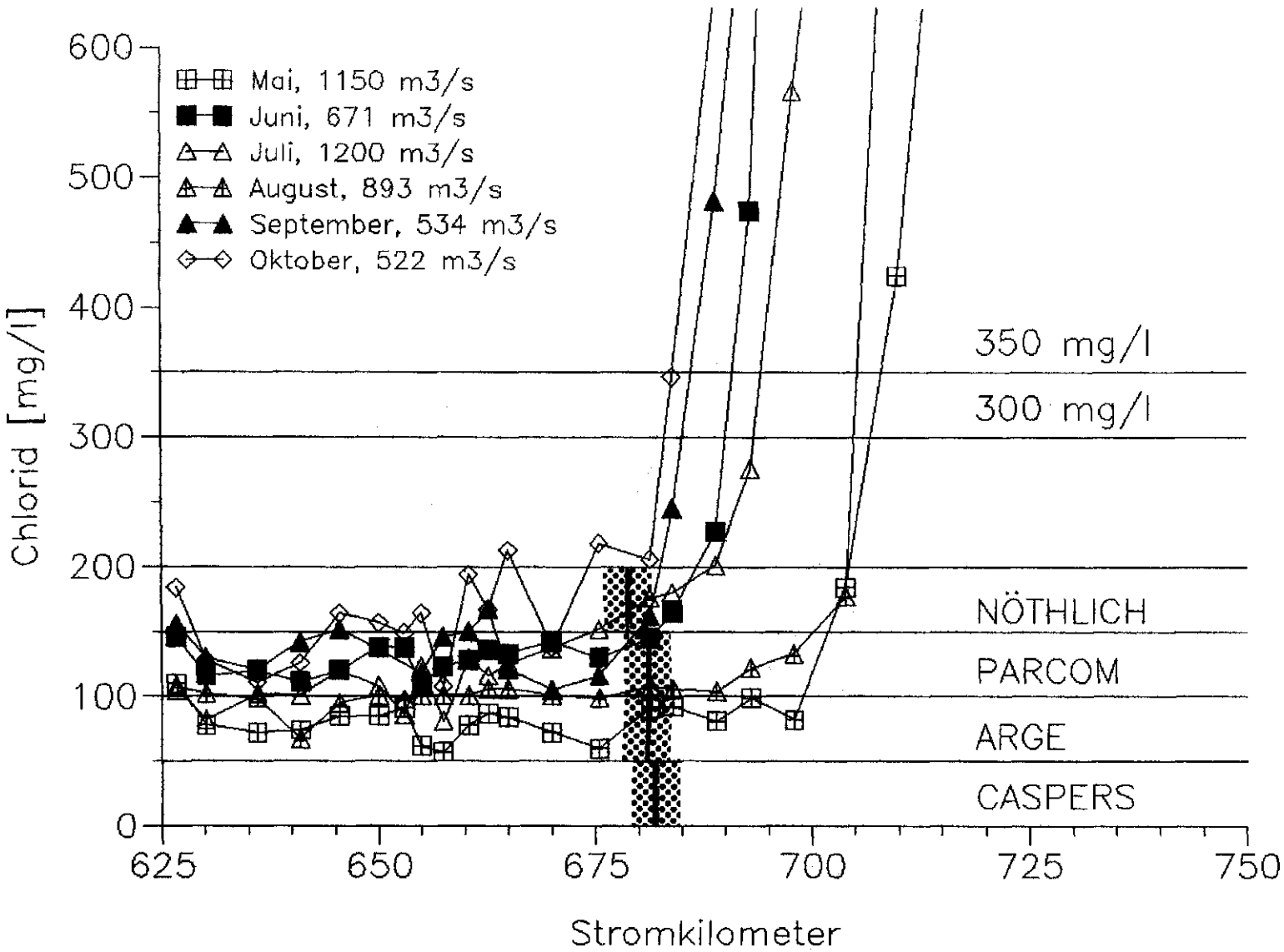


Abb. 10.1: Lage der oberen Brackwassergrenze nach NÖTHLICH (1980) sowie nach den Definitionen von CASPERS, ARGE ELBE und PARCOM unter Verwendung der Meßdaten (1 h vor Tnw) der ARGE ELBE (1980) bei hohen Oberwasserabflüssen im Sommerhalbjahr 1980

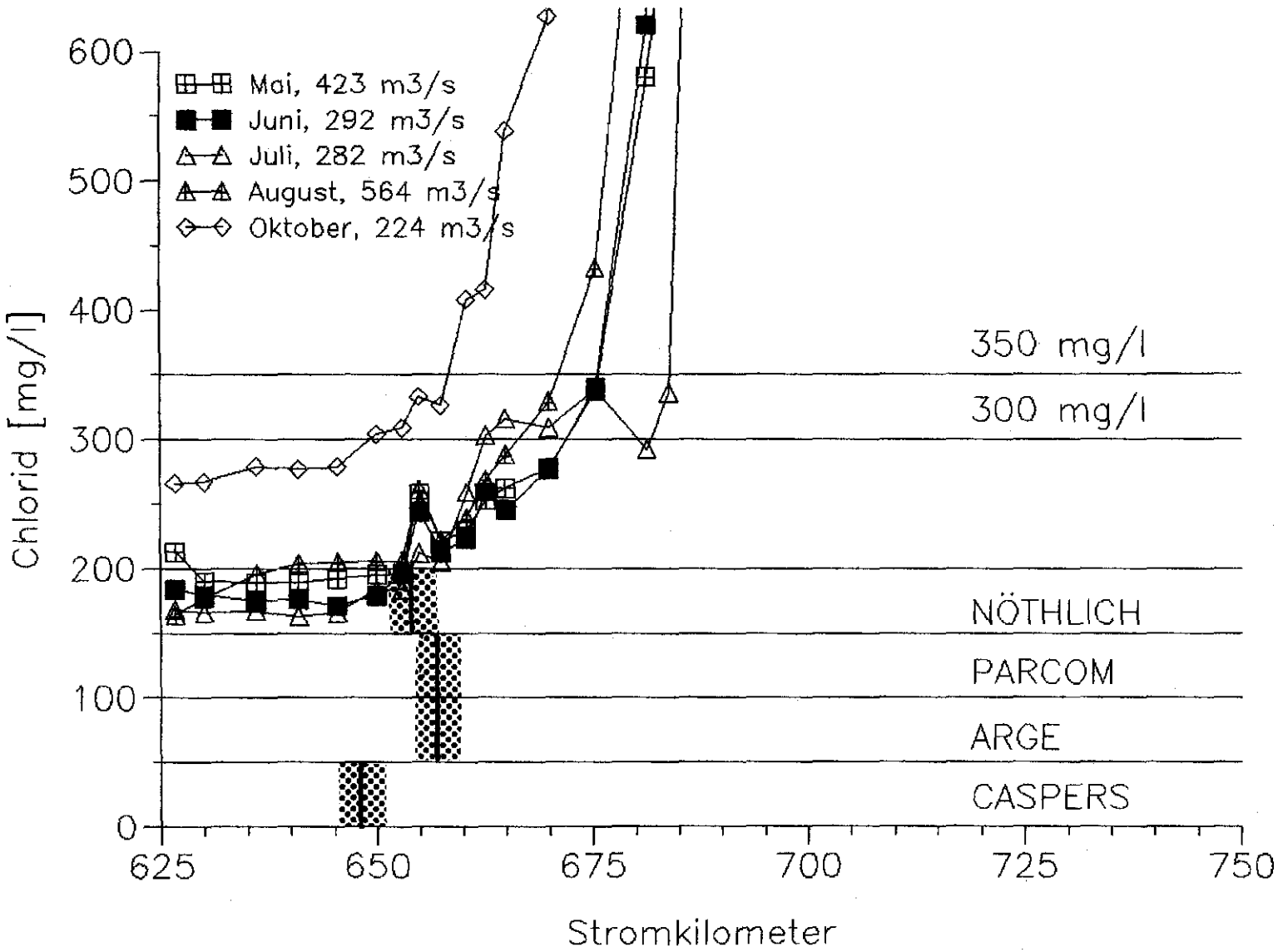


Abb. 10.2: Lage der oberen Brackwassergrenze nach NÖTHLICH (SCHÖLL, 1992) sowie nach den Definitionen von CASPERS, ARGE ELBE und PARCOM unter Verwendung der Meßdaten (1 h vor Tnw) der ARGE ELBE (1991) bei niedrigen Oberwasserabflüssen im Sommerhalbjahr 1991

Zu einer Vertiefung der Elbefahrrinne meint LUCHT (1977):

"Durch den Ausbau der Elbe als Schiffahrtsstraße wird es der Tidewelle erleichtert, von See her in den Fluß einzulaufen. Damit erhöht sich zugleich die Zufuhr salzreichen Wassers durch die Flutströmung. In der Brackwasserregion steigt der Salzgehalt bei niedrigen Abflüssen stärker an und ihre Obergrenze, die vorher bei Glückstadt angegeben wurde, rückt stromaufwärts. Sie lag im Sommer 1976 bei Stadersand."

Neuere Untersuchungen und Modellierungen (ZIELKE, 1991) zeigen die Wahrscheinlichkeit einer stromaufwärtigen Verschiebung des Brackwassers. Denn für einen diskutierten Elbeausbau wird eine Erhöhung des Salzgehaltes im zentralen Bereich der Brackwasserzone von 0,1 - 0,2 ‰ prognostiziert (DUWE & PFEIFFER zitiert in ZIELKE, 1991) und damit möglicherweise eine Verlagerung der Brackwassergrenze stromaufwärts.

In der Literatur wird ein Zusammenhang zwischen Chloridgehalt und Trübungsmaximum dargestellt (u.a. POSTMA & KALLE, 1955; KÜHL, 1972; LANG, 1990; WILKEN et al., 1991). POSTMA & KALLE geben das Trübstoffmaximum "an der Oberfläche ... an dem Punkt an, an welchem der Salzgehalt zu steigen beginnt ... " etwa bei einen Chloridgehalt von 750 mg/1 ≈ 1,38 ‰ Salz.

Die Auswertung der Elbe-Längsprofile der letzen Jahre belegen die Lage des Trübstoffmaximums an der oberen Brackwassergrenze (vgl. Abb. 10.3). Allerdings ist der Zusammenhang aufgrund der dynamischen Verhältnisse in der Elbe derart komplex, daß sich ein eindeutiger Wert nicht festschreiben läßt. Während der Trockenperiode 1989 - 1991 lag das Trübstoffmaximum sogar an der oberen Brackwassergrenze bei ca. 300 mg/1 Cl^- (vgl. Abb. 10.4) und erreichte bei stärker versalztem Oberwasser sogar den Hamburger Hafen (mdl. Mitt. FLÜGGE, 1992).

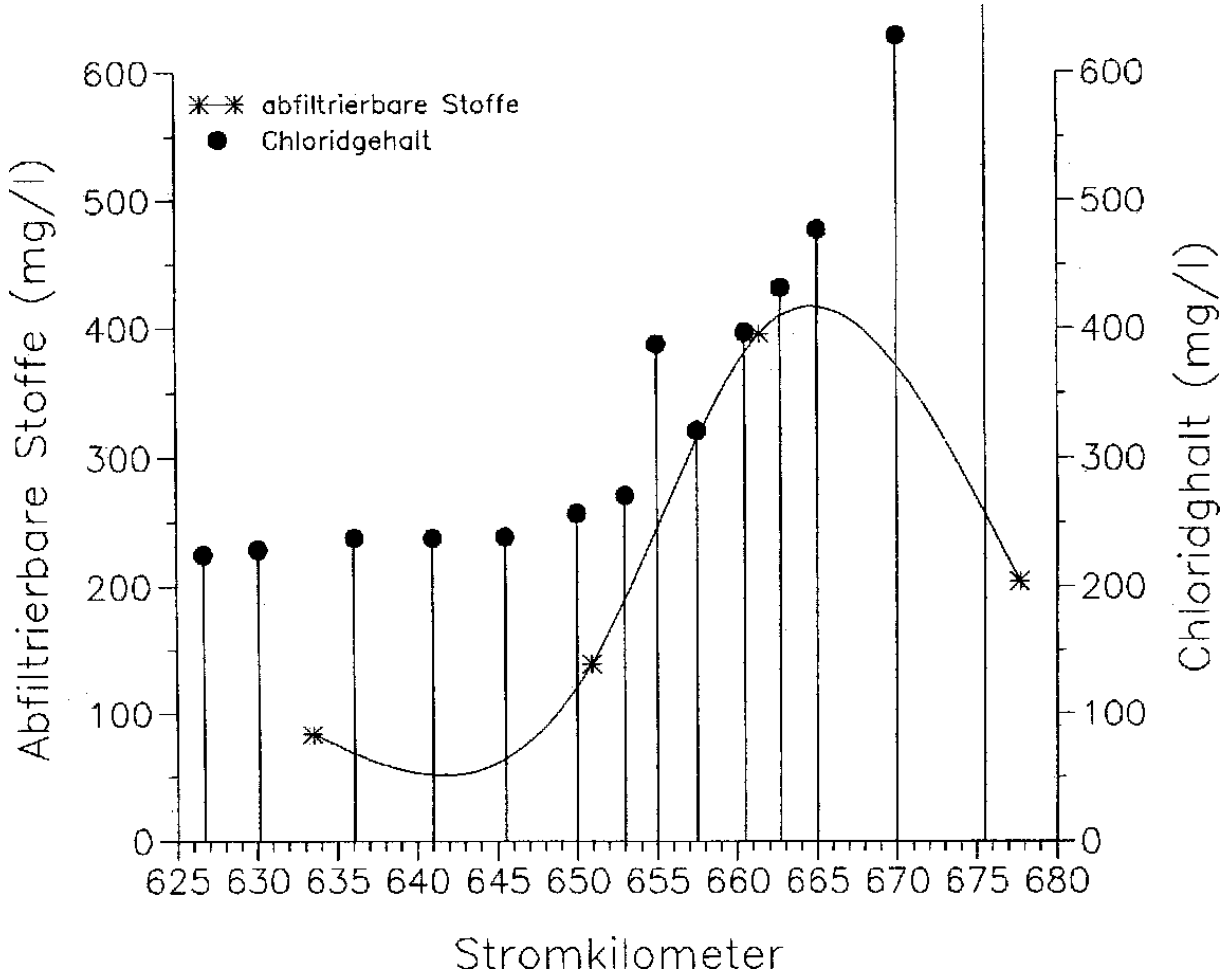


Abb. 10.3: Abfiltrierbare Stoffe und Chloridgehalt in der Elbe im November 1991; die Kurve der abfiltrierbaren Stoffe ist eine geglättete Kurve aus dem Mittel von je 4 Meßwerten (Daten ARGE ELBE, 1991)

Sowohl hydrologische als auch biologische Untersuchungen von mehr als 100 Jahren (vgl. Tab 10.1) haben gezeigt, daß eine Verlagerung der Brackwasserzonen, damit auch der oberen Brackwassergrenze, elbeaufwärts erfolgt ist (u.a. KÜHL, 1972; SIEFERT, 1976; KAUSCH, 1991 und Kap. 3 und Kap. 9). Eine derartige Verschiebung trifft damit auch auf die Schwebstoffe zu.

Die Lage der oberen Brackwassergrenze vor der Ostemündung nach hohen Oberwasserabflüssen hat sich langfristig kaum verändert, (vgl. Kap. 3 und Kap.9). Die am weitesten elbeaufwärts gelegene Brackwassergrenze (Ausnahmen 1904: VOLK, 1906 und 1911: FICK, 1943) wurde von CASPERS (1959) bei Glückstadt festgesetzt und später von anderen Autoren bestätigt.

Tab. 10.1: Angaben über die Lage der oberen Brackwassergrenze (erweiterte Tabelle nach NÖTHLICH, 1980)

Autor und Jahr der Veröffentlichung	Bezugszeitraum	obere Brackwassergrenze
KIRCHENPAUER, 1862	1858 - 1862	Glückstadt
LORENZ, 1863	1863	Glückstadt
LENTZ, 1888	1884	(Cuxhaven)
DAHL, 1891	1891	Brunsbüttel/Glückstadt
VOLK, 1906	1904	Wedel
BONNE, 1912	1911	weit elbeaufwärts
FICK, 1943	1911	Köhlbrand
THIEMANN, 1934	1931 - 1932	etwa Cuxhaven
FICK, 1943	1941	Freiburg
CASPERS, 1948	1946 - 1948	Freiburg/Krautsand
HENSEN, 1953	1935 - 1951	Glückstadt
KÜHL & MANN, 1953	1948 - 1952	Glückstadt
LUCHT, 1953	1953	Glückstadt
KÖTTER, 1961	1950/1951	Störmündung
CASPERS, 1958, 1959	1953 - 1958	Glückstadt (Krautsand)
1963	1963	extrem: Pagensand-Nord
SCHULZ, 1961	1955 - 1957	Glückstadt/Brokdorf
LUCHT, 1964	1935/1960	Glückstadt
GARMS, 1961	1954 - 1957	Glückstadt/Krautsand
MOVAGHAR, 1964	1955 - 1958	Glückstadt
RIEMANN, 1966	1964	Glückstadt
NÖTHLICH, 1967, 1972	1965 - 1967	Glückstadt
GIERE, 1968	1963/1965	Glückstadt
CASPERS, 1968	1959/1968	Glückstadt
LUCHT, 1977	1976	Stadersand
NÖTHLICH, 1976	1976	Schwarztonnensand
RIEDEL-LORJÉ, 1981	1976	mindestens Stadersand
NÖTHLICH, 1977	1977	Rhinplate N, Brammer Bank
1979	1978	Störmdg., Brammer Bank
1980	1979	Hollerwettern, Br. Bank
1980	1980	Rhinplate N,Bramer Bank
SCHMIDT, 1989	1987 - 1988	zwischen Krautsand und Asseler Sand
WEIGELT, 1991	1990 - 1991	Lühesand-Nord
THIEL, 1992	1990	Lühesand-Nord
SCHÖLL, 1992	1991	Schwingemündung

Es ist nochmals darauf hinzuweisen, daß den Angaben über die obere Brackwassergrenze unterschiedliche Definitionen (vgl. Kap 5 und 10.2) zugrunde liegen und daß keine Korrekturen auf eine einheitliche Bezugsgröße vorgenommen wurden.

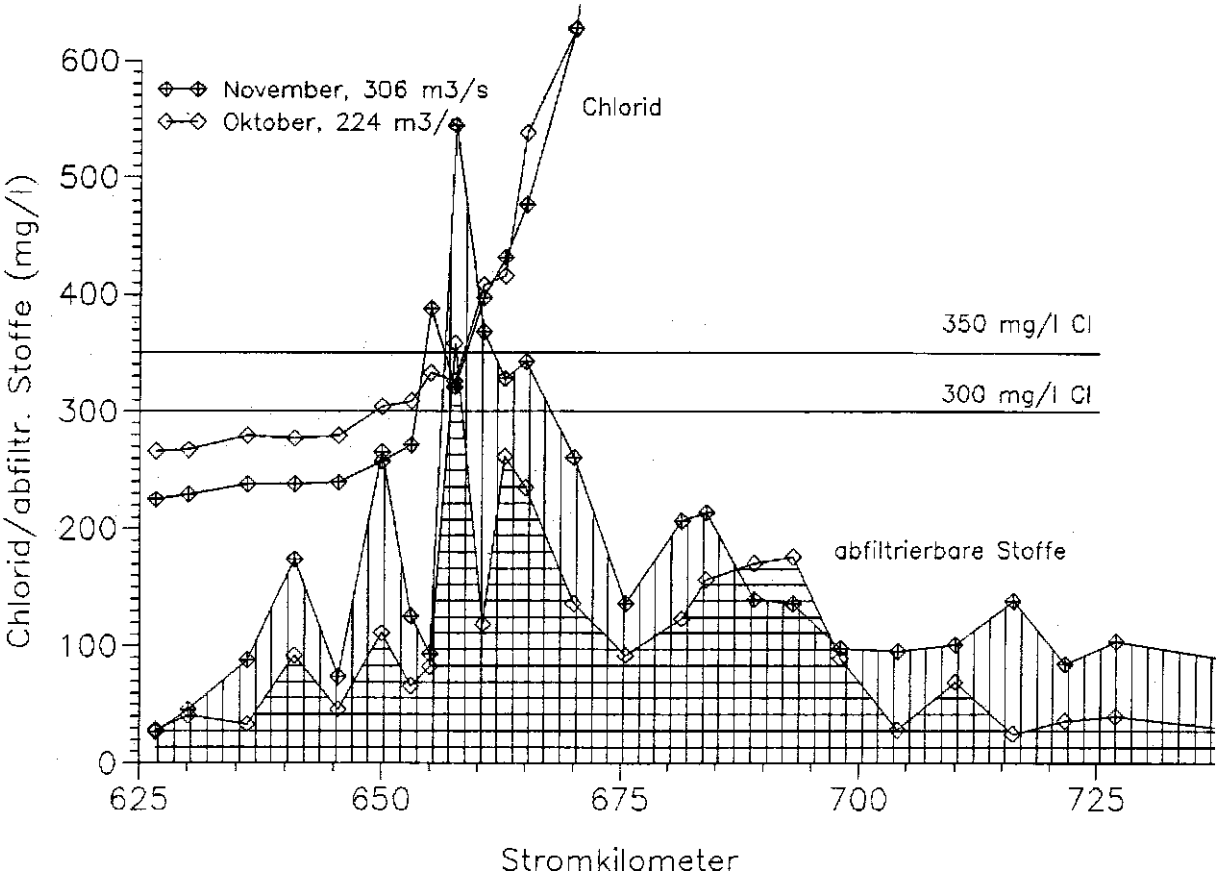


Abb. 10.4: Lage des Trübstoffmaximums (abfiltrierbare Stoffe an der Oberfläche ca. 1 h vor TnW) an der oberen Brackwassergrenze im Vergleich zum Chloridgehalt in Oktober und November 1991 (Daten ARGE ELBE, 1991)

KÜHL (1977), NÖTHLICH (1980) und RIEDEL-LORJÉ (1981) beschrieben für den Trockensommer 1976 das Vordringen der oberen Brackwassergrenze bis zu km 660 bzw. mindestens bis Stadersand.

Vergleichbare Verhältnisse lagen 1989 bis 1991 vor. Die niedrigen Oberwasserabflüsse führten zu einer Verschiebung der Brackwassergrenze stromaufwärts und im Herbst 1991 zu einem Einstrom von Schwebstoffen in den Hamburger Hafen. Diese Extremsituation änderte sich 1992: Im April wirkte eine größere Oberwasserwelle als Spülstoß (mdl. Mitt. GREISER, 1992). Schwebstoffmaxima und obere Brackwassergrenze verlagerten sich anschließend wieder elbeabwärts (vgl. Abb. 10.5).

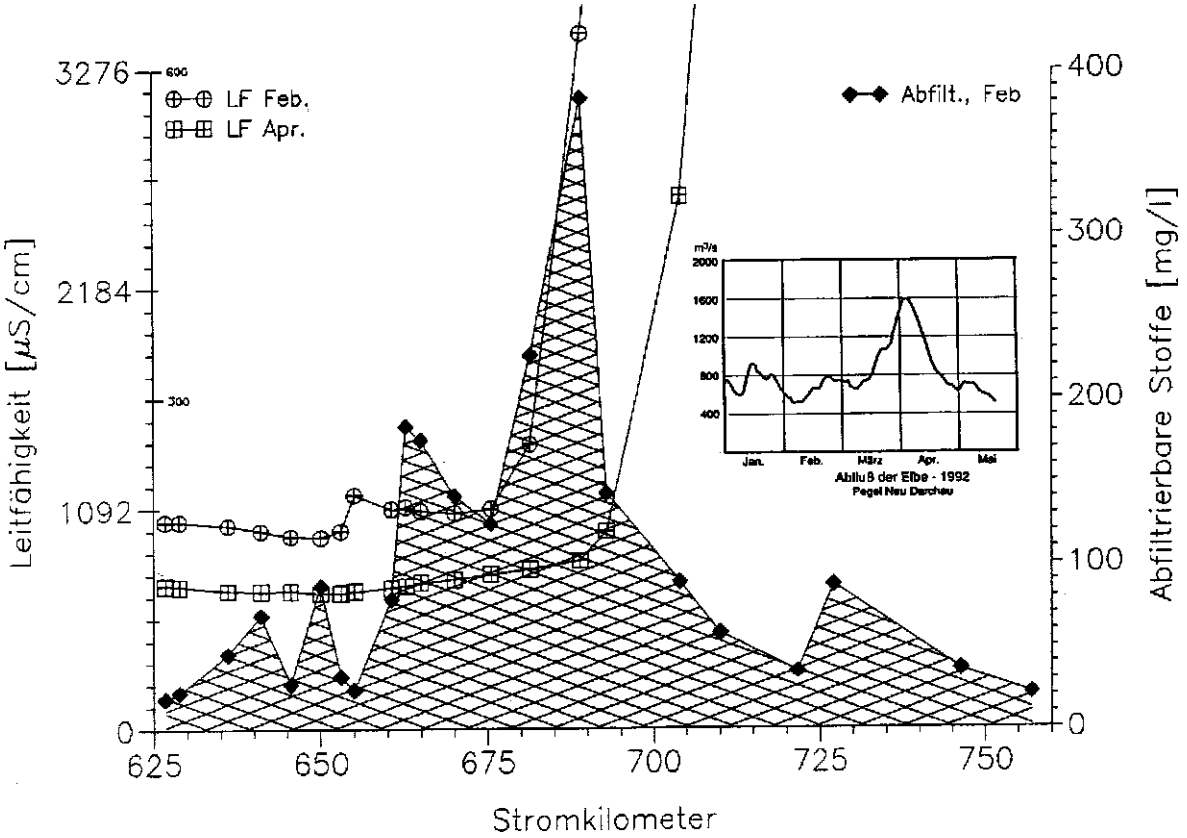


Abb. 10.5: Verlagerung der oberen Brackwassergrenze und des Trübstoffmaximums nach Regenfällen im April 1992 (Daten und Oberwasser bei Neu Darchau: ARGE ELBE, 1992)

Aus den Untersuchungen lassen sich für die Zukunft keine Trends ableiten. Inwieweit sich mögliche Klimaverschiebungen mit Trockenperioden und/oder einer Erhöhung des Nordseespiegels auf die Lage der Brackwasserzone in der Elbe auswirken können, ist ohne Modellrechnungen schwer abzuschätzen.

Das Elbe-Ästuar stellt ein sehr vielfältiges und dynamisches System dar (vgl. Abb. 10.6), in dem die Lage der oberen Brackwassergrenze und des Trübstoffmaximums sehr differenziert zu betrachten ist.

Der in den Jahren 1979 bis 1991 beobachtete Ausbreitungsbereich des Trübstoffmaximums und die Extremlagen der oberen Brackwassergrenze, auch im Vergleich zu CASPERS (1959; vgl. Abb. 5.1 in Kap. 5), sind zusammenfassend in Abb. 10.7, 10.8 und 10.9 dargestellt).

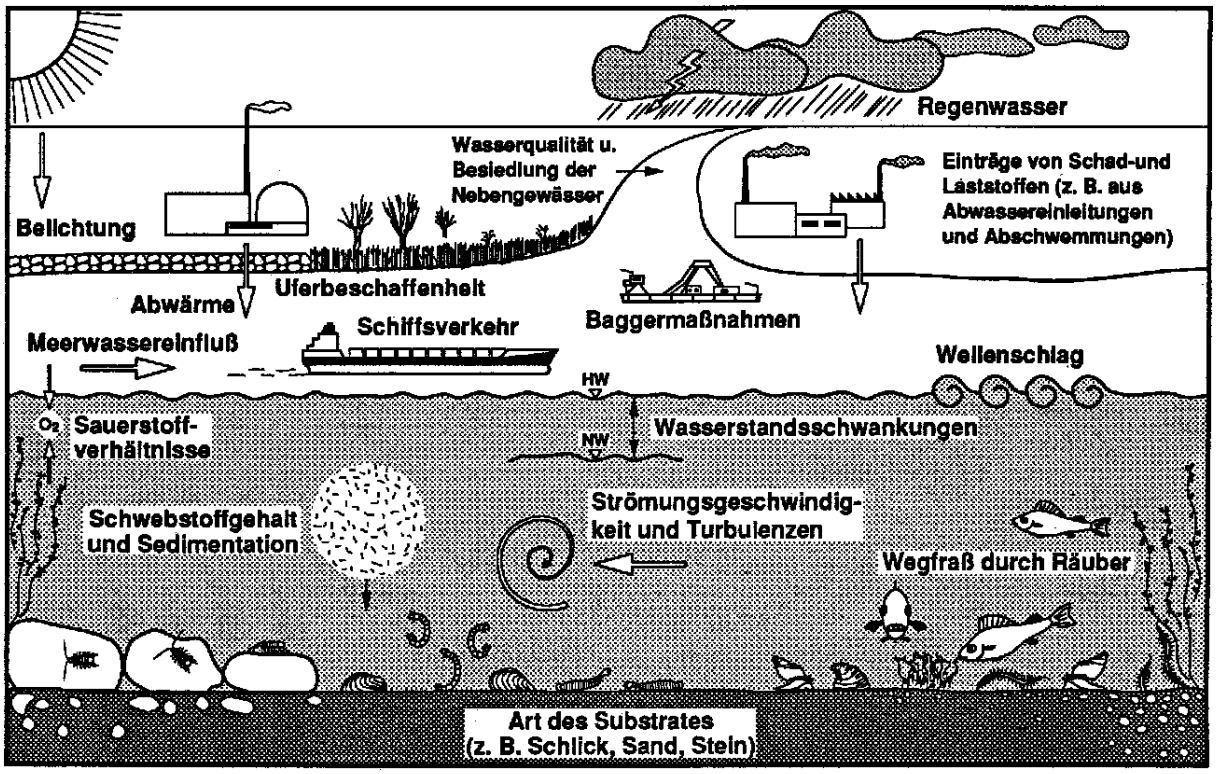


Abb. 10.6: Das Elbe-Ästuar als dynamisches System (ARGE ELBE, 1991)

Insgesamt ist anzugeben, daß die untere Süßwasserzone in oberwasserreichen Jahren in Bereich von Lühesand-Nord liegt. In Zeiten mit niedrigem Oberwasserabfluß verlagern sich Brackwassergrenze (dies ist die Bezugsgröße der oberen Brackwassergrenze nach PARCOM, 1987) und Trübungswolke elbeaufwärts, so daß Lühesand-Nord im Bereich der oberen Brackwasserzone und damit der maximalen Trübungswolke liegt. Daher ist zukünftig Lühesand-Nord anstelle von Glückstadt allgemein als Bezugsort für die obere Brackwassergrenze anzugeben.

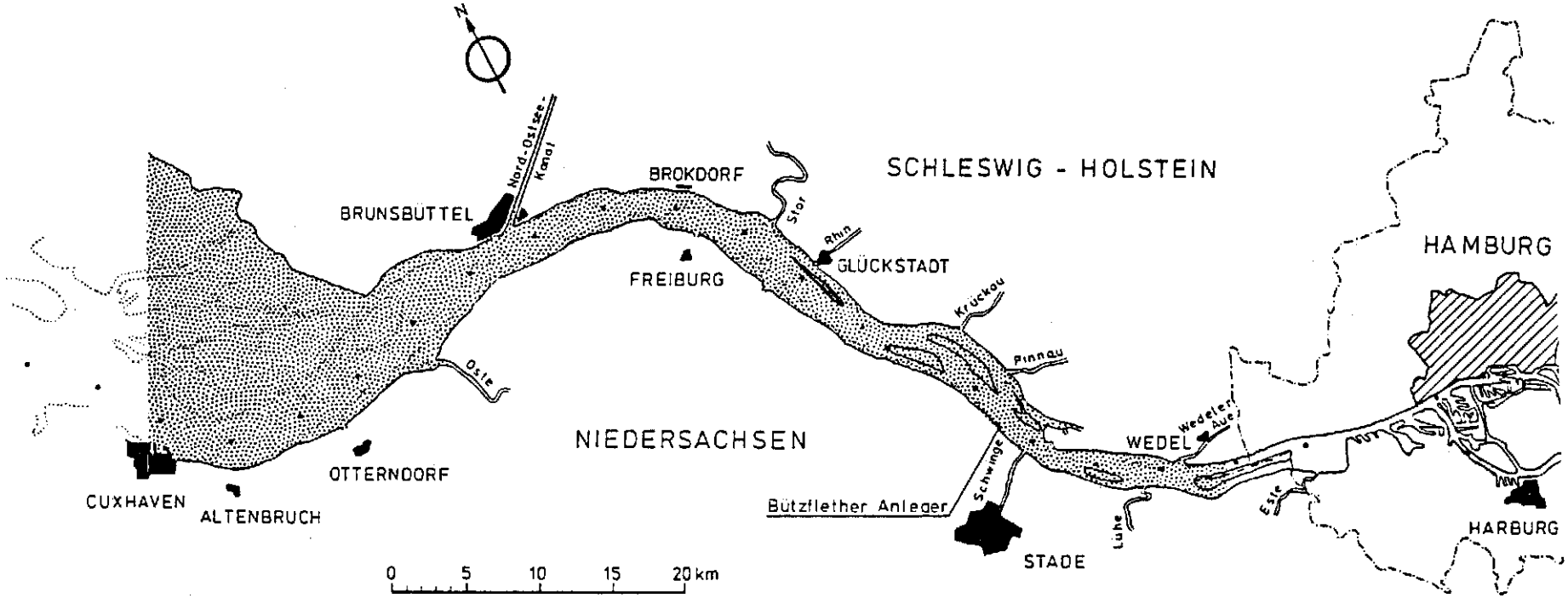


Abb. 10.7: Extreme Ausdehnung des Trübstoffmaximums (gepunkteter Bereich) im Elbe-Ästuar 1979 - 1991 (Daten ARGE ELBE, 1979 bis 1991)

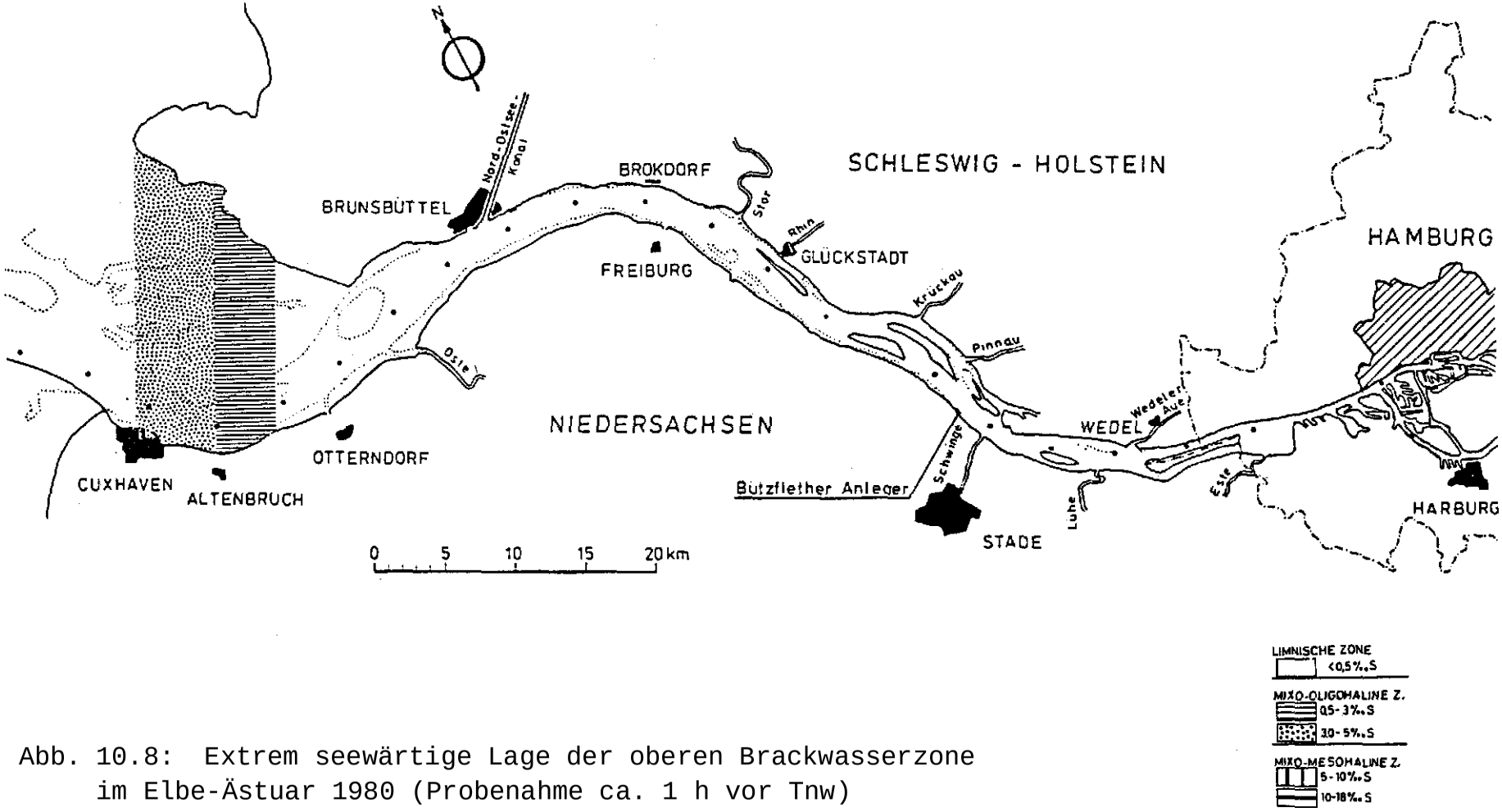


Abb. 10.8: Extrem seewärtige Lage der oberen Brackwasserzone im Elbe-Ästuar 1980 (Probenahme ca. 1 h vor Tnw) (Karte und Daten ARGE ELBE, 1980)

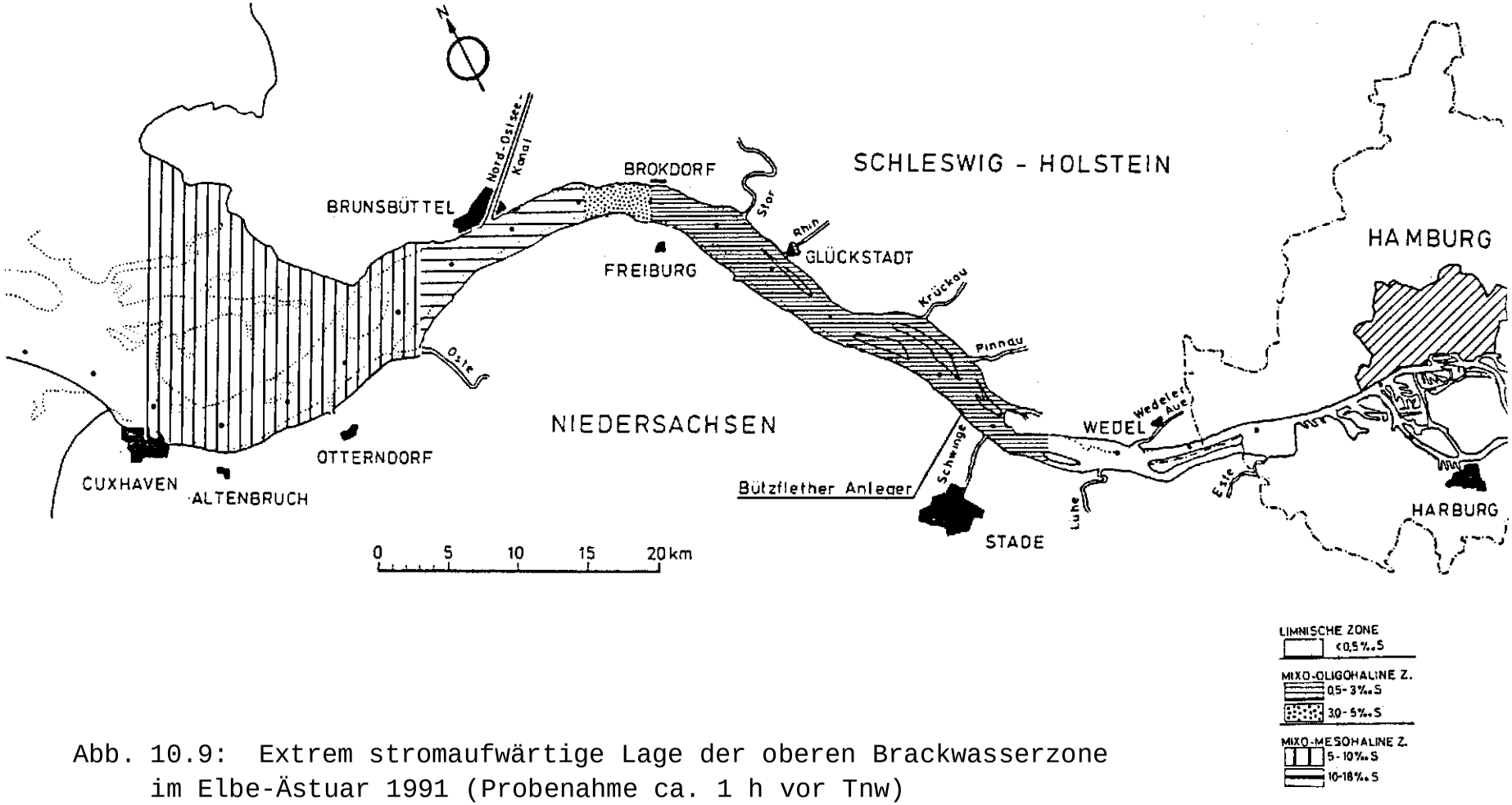


Abb. 10.9: Extrem stromaufwärtige Lage der oberen Brackwasserzone im Elbe-Ästuar 1991 (Probenahme ca. 1 h vor Tnw) (Karte und Daten ARGE ELBE, 1991)

11. Zusammenfassung

Im Elbe-Ästuar trifft abfließendes Süßwasser auf einströmendes Seewasser. Dieser Mischbereich, Brackwasser genannt, gilt für Süßwasser- und Meeresorganismen als lebensfeindlich. Allgemein wird der Übergang vom Süß- zum Brackwasser, an dem der Salzgehalt zu steigen beginnt, als obere Brackwassergrenze bezeichnet. Starke Oberwasserabflüsse verschieben die Brackwassergrenze seewärts, geringe Oberwasserabflüsse stromaufwärts. Gleichzeitig bewirkt die Tide (Ebbe und Flut) ein periodisches Pendeln der Wasserkörper. CASPERS (1959a) legte für die Elbe die obere Brackwassergrenze bei Glückstadt mit 0,5 ‰, später 300 mg/1 Chlorid, fest; NÖTHLICH (1980) ermittelte die obere Brackwassergrenze mithilfe von Seepocken als Indikatoren. Die Paris Kommission (PARCOM, 1987) definierte für Ästuare die obere Brackwassergrenze vom Meer ausgesehen "als Süßwassergrenze das Querprofil im Tideästuar, an den bei anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen noch ein signifikanter Anstieg des Salzgehalts bei Ebbe durch das Meerwasser eintritt". Nach Angaben der ARGE ELBE (1988) befindet sich die obere Brackwassergrenze dort, wo der Anstieg des Chloridgehalts 30 mg/1 überschreitet.

Eine Auswertung der Meßdaten der Monatslängsprofile der ARGE ELBE (1970 - 1991) hat ergeben, daß sich die obere Brackwassergrenze zeitweise deutlich elbeaufwärts verschoben hat. In den oberwasserreichen Jahren 1986 bis 1988 lag die obere Brackwassergrenze weiterhin etwa vor der Störmündung. Dagegen verlagerte sie sich in den oberwasserarmen Jahre 1989 bis 1991 im Extrem bis nach Lühesand. (Da sich die Meßdaten der ARGE ELBE auf die Lage des Wasserkörpers bei ca. 1 Stunde vor Tideniedrigwasser beziehen, muß eine Verdriftung bis zum Tidehochwasser um ca. 15 km stromaufwärts berücksichtigt werden.) Hier liegt auch die biologisch wirksame Brackwassergrenze. So wurden z.B. 1991 die marinen Heringe, Seepocken und Krabben bei Lühesand-Nord beobachtet.

In Ästuaren gibt es Zonen besonders hohen Trübstoffgehalts. Neben dem seewärts ansteigenden Salzgehalt ist das Trübstoff

maximum ein wesentliches Merkmal des oberen Mischbereichs. Das Schwebstoffmaximum tritt bei niedrigen Salzgehalten etwa zwischen 0,5 und 5 ‰ auf. Auswertungen der Daten der ARGE ELBE von 1979 bis 1991 bestätigen das Trübungsmaximum im Bereich der oberen Brackwassergrenze bei 300 mg/1 Cl^- ≈ 0,5 ‰ Salz. CASPERS & SCHULZ (1964) beschrieben diesen Bereich als "Sinkstoffalle" und "Sterbezone" für limnische Organismen. Die Schwebstoffverteilung unterliegt dynamischen Vorgängen. Entsprechend der Brackwassergrenze wandert die Trübstoffwolke mit Oberwasserführung und Tide. Diese spielen eine wesentliche Rolle sowohl für die Resuspendierung als auch den Transport. Neben hydrodynamischen laufen auch wichtige elektrochemische und (mikro)biologische Prozesse ab. Die Zusammenhänge sind bis heute nicht eindeutig geklärt.

Aus der Anwendung der unterschiedlichen Definitionen zur Lage der oberen Brackwassergrenze ergeben wesentliche Konsequenzen: Während bei hohen Oberwasserabflüssen die obere Brackwassergrenze an dem selben Ort anzusetzen ist, liegt sie bei niedrigen Oberwasserabflüssen dagegen an unterschiedlichen Punkten. Diese Tatsache ist nicht nur für die Beschreibung biologischer Vorgänge in der Elbe von Bedeutung, sondern auch für Genehmigungs- und Beweissicherungsverfahren.

Eine Auswertung der Elbe-Literatur seit 1863 hat eine weiträumige Verschiebung der Brackwassergrenze elbeaufwärts ergeben, die sich nicht nur auf den geringen Oberwasserabfluß der letzten Jahre zurückführen läßt, sondern auf vielfältige anthropogene Veränderungen der Strommorphologie in den vergangenen Jahrzehnten.

In oberwasserreichen Jahren liegt der Elbeabschnitt von Lühesand in der unteren Süßwasserzone. In Zeiten mit niedrigem Oberwasserabfluß verlagern sich Brackwassergrenze und Trübungswolke elbeaufwärts, so daß sich Lühesand-Nord dann im Bereich der oberen Brackwasserzone und damit der maximalen Trübungswolke befindet. Daher ist zukünftig Lühesand-Nord anstelle von Glückstadt allgemein als Bezugsort für die obere Brackwassergrenze anzugeben.

12. Literatur

Neben den im Text zitierten und im Folgenden **fett** gedruckten Literaturangaben werden weitere, die Materie vertiefende Quellen angeführt.

ADICKES (1901): Denkschrift betreffend den Schutz der Fluß-fischerei in der Elbe. - Zeitschrift fehlt.

AHLF, W., U. BROCKMANN, W. CALMANO, U. DÖHLER, U. FÖRSTNER, L. KARBE, L. MART, J. SCHLOER, J.-C. BENING, F. EDELKRAUT & A. PFEIFFER (1988 und 1991): Wechselwirkung zwischen gelösten und partikulären Phasen in der Wassersäule. (Teilprojekt A4).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 161-210 und 1989-1991: 221-262.

ALBRECHT, M.L. (1954): Die Wirkung der Kaliabwässer auf die Fauna der Werra und Wipper.- Z. Fischerei u. Hilfswiss., 1.N.F. 3: 401-426.

ALBRECHT, M.-L. (1960): Die Elbe als Fischgewässer.- WW 10: 461-465.

ALLEN, G.P., J.C. SALOMON P. BASSOULET, Y. DU PENHOAT & C. DE GRANDPRE (1980): Effects on tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries.- Sedimentary Geol. 26: 69-90, zitiert in SCHULZE, 1990.

ANONYMUS (1892): Verunreinigungen des Elbwassers durch die Grubenabwasser der Mansfelder Gewerkschaften.- Unterlagen Staatsarchiv Hamburg.

ANONYNUS (1894a): Weitere Verunreinigungen des Elbwassers durch die Grubenabwasser der Mansfelder Gewerkschaften.- Unterlagen Staatsarchiv Hamburg.

AMONYMUS (1894b): Graphik über Chlorgehalt in Hamburger Wasserleitungen und Oberwasserabfluß.- Unterlagen Staatsarchiv Hamburg.

ANONYMUS (1900): Reinigung der Unterelbe.- Neue Hamb. Zeitung 27.7.

ARBEITSGMEINSCAFT FÜR DIE REINHALTUNG DER ELBE DER LÄNDER HAMURG-NIEDERSACHSEN-SCHLEMIG-HOLSTEIN [ARGE ELBE] (1977 bis 1992): Wassergütedaten der Elbe von Schnackenburg bis zur See. - Zahlentafeln/Berichte der Abflußjahre 1977 bis 1990, 1991 und 1992 unveröffentlicht.- Hamburg.

ARGE ELBE (1984): Gewässerökologische Studie der Elbe von Schnackenburg bis zur See. - Hamburg.

ARGE ELBE (1988): Schwermetalldaten der Elbe von Schnackenburg bis zur See 1984 -1988.- Hamburg.

ARGE ELBE (1990): Nährstoffstudie der Elbe von Schnackenburg bis zur See.- Hamburg.

ARGE ELBE (1991): Das oberflächennahe Zoobenthos der Elbe als Indikator für die Gewässerqualität. - Hamburg.

AX, P. (1957): Die Einwanderung mariner Elemente der Mikrofauna in das limnische Psammal der Elbe.- Verh. Dt. Zool. Ges. Hamburg 1956: 428-435.

AX, P. & R. AX (1960): Experimentelle Untersuchungen über die Salzgehaltstoleranz von Ciliaten aus dem Brackwasser und Süßwasser.- Biol. Zbl. 79: 7-31.

BAKKER, C. & F. VEGTER (1978): General Tendencies of Phyto- and Zooplankton Development in Two Closed Estuaries (Lake Veere and Lake Grevelingen) in Relation to an Open Estuary (Eastern Scheldt); S.W.Netherlands.- Hydrobiol. Bull. 12: 226-245.

BAKKER, C. & N. DE PAUW, (1975): Comparison of Brackish Water Plankton Assemblages of Identical Salinity Ranges in an Estuarine Tidal (Westerschelde) and Stagnant (Lake Veere) Environment (S.W.-Netherlands).- Zooplankton Neth. J. Sea Res. 9: 145-165.

BARG, G. (1979): Untersuchungen über Salzgehaltsxierteilungen in Brackwassergebieten von Tideflüssen am Beispiel der Unterweser.- Mitt. Franzius-Inst. 49: 1-107.

BARG, G. (1980): Salzgehaltsverteilungen in Brackwassergebieten als Grundlage ökologischer Betrachtungen.- Ibidem 50: 348-369.

BARNES, H. (1954): Some tables for the ionic composition of sea water.- J. Exp. Biol. 31: 582-588.

BARNES, H. (1970): A review of some factors affecting settlement and adhesion in the cyprids of some common barnacles.- In: Adhesio in Biological Systems, Acad. Press, New York and London: 89-111.

BERNAT, N. (1988): Untersuchung zur Verteilung des Zooplanktons auf einem Querprofil der Elbe bei Scheelenkuhlen unter besonderer Berücksichtigung der dominierenden Art *Eurytemora affinis* (Copepoda).- Dipl. Univ. Hamburg. -

BETH, H. (1952): Die Brackwasserzone der Ems, I. Teil, Die jahreszeitliche Verschiebung der Brackwasserzone.- unveröff. vorläufiger Bericht , Wasser- und Schiffahrtsamt Emden, zitiert in SCHULZE, 1990.

BICK, H. (1964): Die Populationsdynamik von Süßwasserciliaten in Versuchen mit marinen Brackwässern und binnenländischen Natronwässern.- Verh. Internat. Verein Limnol. 15: 847-852.

BICK, H. (1967): Vergleichende Untersuchung der Ciliatensukzession beim Abbau von Zellstoff in marinem Brackwasser und athalassogenen Brackwasser vom Typ der Kaliwerksabwässer. Hydrobiol. 30: 185-204.

BICK, H. (1968): Untersuchungen zur Verträglichkeit von Meer- und Brackwasser für Ciliaten des Saprobiensystens der Wassergütebeurteilung.- Helgol. wiss. Meeresunters. 17: 257-268.

BICK, H. & W. SCHMERENBECK (1971): Vergleichende Untersuchung des Peptonabbaus und der damit verknüpften Ciliatenbesiedlung in strömenden und stagnierenden Modellgewässern. - Hydrobiol. 37: 409-446.

BICK, H., K.-H. CHRISTMANN & W. SCHMERENBECK (1975): Untersuchungen über den Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Aufwuchsentwicklung in Modellgewässern. - Forschungsber. Land Nordrhein-Westf. 2498.

BOCK, E., B. BÖTTCHER, P. DITTBERNER, A. FREIGANG, H. HARMS, L. KARBE, H.-P. KOOPS, M. RUDERT, S. SOWITZKI, G. STEHR (1988 und 1991): Bakterielle Stoffumsetzungen in der Tide-Elbe. (Teilprojekt B1).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 211-256 und 1989-1991: 263-308.

BOEHLICH, M. (1992): Mathemathisches Tidemodell des Elbeaestuars der BAW-AK.- BAW-Kolloquium in d. Außenstelle Küste am 26.03.92: Tidedynamik des Elbeästuars.

BÖHLIG, S. (1986): Untersuchungen zur intraspezifischen Variabilität der Anpassung an aestuartypische Lebensbedingungen, insbesondere an den Salzgehalt, bei Algen aus der Tide-Elbe.- Dipl. Univ. Hamburg.

BONIN, D.J., M.R., S.Y. MAESTRINI & M.-C. BOMIN (1986): Physiological features of six micro-algae to be used as indicators of seawater quality.- Cryptogam. Algol. 7: 23-83.

BONNE, G. (1912a): Die Zustände in der Unterelbe und ihren Nebenflüssen im Jahre 1911.- Kommissionsverlag von Gebrüder Lüdekind, Hamburg.- Verhandlungen d. Internat. Vereins zur Reinhaltung der Flüsse, des Bodens und der Luft 29: 1-111.

BONNE, G. (1912b): Die Klagen der Deutschen Binnenfischer über die zunehmende Verunreinigung unserer Gewässer nebst den Mitteln und Wegen zur Abhilfe derselben.- Ibidem 30: 1-192.

BOPP, A. (1979): Untersuchungen zum Gesundheitszustand einiger Fischarten aus dem Elbebereich zwischen Gorleben und Glückstadt im Jahre 1978.- Dipl. Univ. Hamburg.

BRAARUD, T. (1951): Salinity as an Ecological Factor in Marine Phytoplankton.- Physiol. Plantarum 4: 28-34.

BRAND, L.E. (1984): The Salinity Tolerance of Fortysix Marine Phytoplankton Isolates.Estuarine Coastal Shelf Sci. 18: 543-556.

BROD, H.G. & H.U. PREUSSE (1975): Einfluß von Auftausalzen auf Boden, Wasser und Vegetation. Teil 1-3.- Rasen-Turf-Gazon 6: 21-27, 46-54.

BROCKMANN, C. (1908): Das Plankton im Brackwasser der Wesermündung.- Beitr. Naturkde. Nordwestdeutschlands N.F. 1, zitiert in REMANE und SCHLIEPER, 1971.

BRUNCKHORST, H. & U. CLAUSSEN (1985): Zur Ökologie des neu entstandenen Salzwasserbiotopes "Kronenloch" im Speicherkoog Dithmarschen.- Seevögel 6: 102-113.

BUBENDEY, J. (1892): Berechnung des Weges, den ein bei Niedrigwasser vor der Mündung des Geeststammsieles ausgesetzter Schwimmer während der Fluth zurücklegt.- Manuskript.

BUCHHOLZ, H. VON (1951): Die Larvenformen von *Balanus improvisus*. Beiträge zur Kenntnis des Larvenplanktons I.- Kieler Meeresforsch. 8: 49-57.

BUHSE, G. (1975): Fischereibiologische Störungsfaktoren, hervorgerufen durch industrielle Versalzung am Beispiel der Werra und Oberweser.- Verh. Int. Ver. Limnol. 19: 2563-2567.

BUHSE, G. (1975): Die schädigende Wirkung der Kaliendlaugen auf die Fischereibiologie der Werra und Oberweser.- Umwelthygiene 11.

BUIKEMA, A.L. S.R. SHERBERGER, G.W. KNAUER, L.A. NEWBERN, J.T. READINGS J. CAIRNS (1978): Effects of simulated entrainment on the biology of a freshwater Cladoceran; Energy and Environmental Stress in Aquatic Systems.- DOE Symposium Series 48: 809-825.

BUND/LÄNDER-MEßPROGRAMM FÜR DIE NORDSEE [BLMP] (1981, 1983, 1985, 1987, 1989, 1991): Gewässergütemessungen im Küstenbereich der Bundesrepublik Deutschland, Wassergütedaten 1980/1981, 1982/83, 1984/85, 1986/87, 1988/89, 1990/91* (*im Druck).Gemeinsames Bund/Länder-Meßprogramm für die Nordsee, Hamburg.

BURSCHE, E.M., H. KÜHL & H. MANN (1958): Hydrochemie und Phytoplankton in der Unterelbe.- Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 5: 165-192.

CARPELAN, L.H. (1978): Evolutionary euryhalinity of diatoms changing environments.- Nova Hedwigia 29: 489-526.

CASPERS, H. (1948): Ökologische Untersuchungen über die Wattentierwelt im Elbe-Aestuar.- Verh. dtsch. Zoologen Kiel.

CASPERS, H. (1954): Biologische Untersuchungen über die Lebensräume der Unterelbe und des Vormündungsgebietes der Nordsee.- Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 23: 76-85.

CASPERS, H. (1958): Biologie der Brackwasserzonen im Elbe-Aestuar.- Verh. Intern. Verein. Limnol. 13: 687-698.

CASPERS, H. (1959a): Vorschläge einer Brackwassernomenklatur ("The Venice System").- Int. Rev. ges. Hydrobiol. 44: 313-316.

CASPERS, H. (1959b): Die Einteilung der Brackwasserregionen in einem Aestuar.- Arch. Oceanogr. Limnol. (Venezia) 11: 153-169.

CASPERS, H. (1962/63): Biologische Analyse der großen Sturmflut 1962 im Elbe-Aestuar.-Abh. Verh. Naturwiss. ver. Hamburg 7: 69-78.

CASPERS, H. (1968): Der Einfluß der Elbe auf die Verunreinigung der Nordsee.- Helgol. wiss. Meeresunters. 17: 422-434.

CASPERS, H. & H. SCHULZ (1964): Die biologischen Verhältnisse der Elbe bei Hamburg.- Arch. Hydrobiol. 60: 53-88.

CHRISTIANSEN, B. VON (1974): Über den Transport suspendierter Feststoffe in Ästuarien an Beispiel der Elbmündung bei Neuwerk.- Hamb. Küstenforsch.

CHRISTIANSEN, H. VON (1985a): Das Forschungsvorhaben Schlick/-Schwebstoffe in Ästuaren.- Ibidem 42: 115-121.

CHRISTIANSEN, H. VON (1985b): Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-SAMPLER in der Elbe.- Ibidem 42: 123-134.

CLAUSSEN, U. (1985): Ökologische Untersuchungen am Plankton und zur Hydrochemie des "Kronenloches"; Speicherkoog Dithmarschen.Dipl. Univ. Hamburg.

CONRAD, W. & H. KUFFERATH (1954): Recherches sur les eaux saumâtres des environs de Lilloo.- Inst. Royal des Sciences Naturelles de Belgique; Mémoire 127.

DAHL, F. (1893): Untersuchungen über die Thierwelt der Unterelbe.- Ber. Komm. wiss. Unters. dtsch. Meere 3: 151-185.

DAVENPORT, J. (1976): Acomparative study of the behavior of some barnacles exposed fluctuating sea water concentration.- J. mar. biol. Ass. U.K. 57: 7-19.

DEUTSCHE EINHEITSVERFAHREN ZUR WASSER-, ABWASSER- UND SCHLAMMUNTERSUCHUNG [DEV] (1992).- VCH, Weinheim.

DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH [DGJ] (1985). Unteres Elbegebiet. Mit Bayerischem Elbegebiet und Elbegebiet Berlin (West). Abflußjahr 1985 (1.11.1984-31.10.1985); Hrsg. Freie und Hansestadt Hamburg.- Hamburg.

DIERCKING, R. & L. WEHRRWANN (1991): Artenschutzprogramm. Fische und Rundmäuler in Hamburg.- Umweltbehörde Hamburg. Naturschutz und Landschaftspflege in Hamburg 38: 1-126.

DIETRICH, G. & X. KALLE (1957): Allgemeine Meereskunde. Eine Einführung in die Ozeanographie.- Gebrüder Borntraeger, Berlin.

DIMITRI, L. & H.G. BROD (1982): Einfluß der Auftausalze auf Bäume und andere Pflanzen.- Landschaft und Stadt 14: 73-84.

DÖRJES, J., S. GADOW, H.-E. REINECK & I.B. SINGH (1970): Sedimentologie und Makrobenthos der Nordergründe und der Außenjade (Nordsee).- Senckenbergiana Maritima. 2: 31-59.

DÖRJES, J. & H.-E. REINECK (1977): Fauna und Fazies einer Sandplate (Mellum Bank, Nordsee).- Ibidem 9: 19-45.

DUNBAR, W.P. (1900): Bericht des Hygienischen Instituts betreffend die im Winter 1899/1900 vorkommenden Geruchs- und Geschmacksveränderungen des Elbwassers.- Lüdtcke & Wulff, Hamburg.

DUNBAR, W.P. (1918): Die Versalzung und Verhärtung des Elbwassers. (Manuskript).Gutachten Hyg. Inst. Hamburg.

DUNBAR, W.P. (1921): Die Versalzung und Verhärtung des Elbwassers.- Gesundheits-Ing. 44: 81-87, 155-163.

DUNKEL, D. (1974): Populationsdynamik des Copepoden *Acartia tonsa* DANA im Elbe-Aestuar.- Dipl.Univ. Hamburg.

DUWE, K. (1988): Modellierung der Brackwasserdynamik eines Tideästuars am Beispiel der Unterelbe.- Diss. Univ. Hamburg.

DUWE, K., J. KROHN, K. PFEIFFER, J.C. RIEDEL-LORJÉ & K. SOETJE (1987): Ausbreitung von wassergefährdenden Stoffen in der südlichen Deutschen Bucht und im Elbe-Ästuar nach Freisetzung durch Schiffe.- GKSS 87/E/18.

DUWE, K., K. PFEIFFER & J. POST (1991): Teilbericht 2: Auswertung bestehender Daten und Modellergebnisse. Strömungen, Salzgehalte und Morphologie; Teilbericht 3: Modelluntersuchungen zum Einfluß der Vertiefungsvariante 4 (schmal).- Hydromod, Wedel.

EBELING, G. (1933): Ergebnisse der fischereibiologischen und fischereichemischen Untersuchungen von Kaliabwässern.- Vom Wasser, zitiert in ALBRECHT, 1954.

EHRENBAUM, E. (1890): Zur Naturgeschichte von *Crangon vulgaris* Fabr.- Mitt. dt. SeefischVer, Sonderbeilage: 6-124.

EISMA, D. (1986): Flocculation and deflocculation of suspended matter in estuaries.- Netherlands J.-Sea Res. 20: 183-199.

ERDMANN (1902): Gutachten in Sachen der Stadt Magdeburg gegen die Mansfeldsche Kupferschiefer bauende Gewerkschaft.- Gutachten.

FANGER, H.-U., J. KAPPENBERG, H. KUHN, U. MAIXNER, D. MILFERSTÄDT (1990a): The Hydrographic Measuring System HYDRA. In: Michaelis, W. (Ed.): Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Modelling and Research. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.- Coastal estuarine management 36 Chapter V: 211-216.

FANGER, H.-U., J. KAPPENBERG, H. KUHN, U. MAIXNER, D. MILFERSTÄDT (1990b): Das hydrographische Meßsysten HYDRA. In: Beyer, N., S. Petzold, A. Prange et al.: 3. Magdeburger Gewässerschutzseminar- Zur Belastung der Elbe-28.- 30.11.1990 im Congress Center Magdeburg.- GKSS 90/E/43: 272.

FAST, T. & L. KIES (1990): Biomass and production of phytoplankton in the Elbe Estuary.In: Michaelis, W. (ed), Estuarine water quality management. (Coastal and estuarine studies) 36: 395-398.

FEIST, G. (1974): Wasserwirtschaftliche Probleme durch Industrieansiedlungen im Unterelbebereich.- Wasser Boden 5: 128-132.

FICK, H., 1943: Veränderungen in der Fischerei der Niederelbe. Z. ges. Fischereiwirtschaft 11: 1-2.

FIEDLER, M. (1991): Die Bedeutung von Makrozoobenthos und Zooplankton der Unterelbe als Fischnahrung.- Ber. Inst. Meereskd. Christian-Albrechts-Univ. Kiel 204.

FLÜGGE, G. (1982): Transport- und Ausbreitungsmechanismen in Flüssen und Tideästuarien unter besonderer Berücksichtigung der Strömungsturbulenz.- Mitt. Franzius-Inst. 55: 1-118.

FLÜGGE, G. (1992): Das Elbeästuar - Einführende Erläuterung des hydrographischen Systems.- BAW-Kolloquium in d. Außenstelle Küste am 26.03.92: Tidedynamik des Elbeästuars.

FLÜGGE, G. & M. BERGEMANN (1992): Hypothesen zum Schwebstoffhaushalt der Brackwasserzone der Elbe.- BAW-Kolloquium in d. Außenstelle Küste am 26.03.92: Tidedynamik des Elbeästuars.

FLÜGGE, G., TH. GAUMERT & M. BERGEMANN (1989): Gewässergütekriterien und Bewirtschaftungsmodelle für die Tideelbe. (Umweltforschungsplan des Bundesministers f. Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit).- UBA FB 102 04 337.

FLÜGGE, G. & P. HUTH (1992): Grundsatzuntersuchungen zum Tidesystem der Elbe.- BAW-Kolloquium in d. Außenstelle Küste am 26.03.92: Tidedynamik des Elbeästuars.

FLÜGGE G.& W. JEPPELT (1987): Einträge über die Nordsee in die Flüsse. Umweltvorsorge Nordsee - Belastung, Gütesituation und Maßnahmen.- Nieders. Umweltministerium Hannover.

FRANZIUS O. (1986): Suspended Sediment Problems in the brackish transition of the tidal Ems river.- P.I.A.N.C.-A.I.P.C.N. Bull. 53: 37-62, zitiert in SCHULZE, 1990.

FÜHRBÖTER, A. & J. JENSEN (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht.- Die Küste 42: 78-100.

GÄTJE, C. (1991): Artenzusammensetzung, Biomasse und Primärproduktion des Mikrophytobenthos des Elbe-Ästuars.- Diss. Univ. Hamburg.

GÄTJE, C. & L. KIES (1990): Microphytobenthos in the Elbe Estuary: Biomass, species composition and primary production measurements with oxygen microelectrodes. In: Michaelis, W. (ed.), Coastal and Estuarine Studies, Estuarine Water Quality Management 36: 399-402.

GARNS, R. (1961): Biozönotische Untersuchungen an Entwässerungsgräben in Flußmarschen des Elbe-Aestuars.- Arch. Hydrobiol./Suppl 26 (Untersuch. Elbe-Aestuar 1): 344-462.

GAUMERT, TH. & J.C. RIEDEL-LORJÉ (1982): 100 Jahre Elbe-Wasser. Eine Studie über die biologischen Verhältnisse in der Elbe von 1842-1943.- Eigendruck, Hamburg.

GESSNER, F. (1957): Meer und Strand.- VEB Deutscher Verlag d. Wissenschaften, Berlin.

GIERE, O. (1964): Das Eindringen mariner Zooplankter in das Elbe-Aestuar.- Dipl. Univ. Hamburg.

GIERE, O. (1968): Die Fluktuation des marinen Zooplanktons im Elbe-Aestuar. Beziehungen zwischen Populationsschwankungen und hydrographischen Faktoren im Brackwasser.- Arch. Hydrobiol./-Suppl. 31 (Untersuch. Elbe-Aestuar 3): 379-546.

GILMOUR, D.J., M.F. HIPKINS & D. ARTHUR (1984): The Effect of Decreasing the External Salinity on the Primary Processes of Photosynthesis in *Dunaliella tertiolecta*.- J. exp. Botany 35: 28-35.

GRABEMANN, I. & G. KRAUSE (1986): Dynamik des Suspensionstransportes in einem Tideästuar am Beispiel der Weser. Abschlußber.- BMFT Forschungsvorhaben MFU 05242 Bundesminister für Forschung und Technologie Bonn, zitiert in SCHULZE, 1990.

GRABEMANN, I. & G. KRAUSE (1989): Transport processes of suspended matter derived from time series in a tidal estuary. J. of Geophys. Res. 94: 14/373-14/379 zitiert in SCHULZE, 1990.

GRASSHOF, K. (1976): On the possible replacement of Knudsen-Ekman's equation of state of seawater.- Deep-Sea Res. 23: 1079-1081.

GRASSHOF, K.; M. EHRHARDT & K. KREMMLING (1983): Methods of seawater analysis.Verlag Chemie Weinheim.

GREEN, J. (1968): The Biology of Estuarine Animals.- Sidgwick & Jackson, London.

GREISER, N. (1985): Die Bedeutung biologischer Faktoren für die Schwebstoffbildung in der Elbe - Untersuchungsmethoden und erste Ergebnisse.- Die Küste 42: 135-149.

GREISER, N. (1988): Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihrer biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg.- Hamb. Küstenforsch. 45: 1-169.

HALLIK, R. (1959): Diatomeen als Anzeiger des Sedimenttransportes in der Unterelbe.- Z. dtsch. geol. Ges. 111: 29-32.

HANAMANN, J. (1898): Hydrochemie der Elbe in Böhmen.- Arch. naturwiss. Landesdurchforsch. Böhmen.

HARTOG, C. DEN (1964a): Typologie des Brackwassers.- Helgol. wiss. Meeresunters. 10: 377-390.

HARTOG, C. DEN (1964b): The amphipods of the deltaic region of the rivers Rhine, Meuse and Scheldt in relation to the hydrography of the area. Pt 3.- Neth. J. Sea Res. 2: 407-457.

HASLE, G.R. (1978): Some freshwater and brackish water species of the diatom genus *Thalassiosira* Cleve.- Phycol.17: 263-292.

HECKMANN, C.W. (1984): Effects of dike construction on the wetland ecosystem along the freshwater section of the Elbe Estuary.- Arch. Hydrobiol./Suppl. 61 (Untersuch. Elbe-Aestuar 5): 397-508.

HECKMANN, C.W. (1985): The development of vertical migration patters in the sediments of estuaries as a strategy for algae to resist drift with tidal currents.- Int. Revue ges. Hydrobiol. 70: 151-164.

HECKMANN, C.W. (1986): The anadronic migration of a calanoid copepod, *Eurytemora affinis* (Poppo 1880), in the Elbe Estuary. Crustaceana 50: 176-181.

HECKMANN, C.W. (1992): Die Tierwelt des Bodens und der Watten in der Tide-Elbe.- Ber. Zentr. für Meeres- u. Klimaforsch. Univ. Hamburg 19: 191-203.

HEERTEN, G. & H.-W. PARTENSCKY (1979): Ein Vergleich der Sturmflut vom 3. Januar 1976 auf der Elbe mit anderen Sturmfluten nach 1962.- Mitt. Franzius-Inst. 45.

HENSEN, W. (1953): Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in Seekanäle und Häfen.- Mitt. Hann. Versuchsanst. Grundbau u. Wasserbau 3: 20-50.

HENSEN, W. (1972): Die qualitative Beschaffenheit des Elbwassers im Streckenabschnitt vor Stadersand/Bützfleth.- Gutachten.

HENTSCHEL, E. (1917a): Biologische Untersuchungen über den tierischen und pflanzlichen Bewuchs in Hamburger Hafen.- Mitt. Zool. Mus. Hamburg 33: 1-171.

HENTSCHEL, E. (1917b): Abwasserwirkung und Lebensgestaltung in der Niederelbe.- Fischerbote 9: 272-277.

HENTSCHEL, E. (1923): Biologische Wirkung der Gezeiten im Süßwasser der Niederelbe.- Verh. intern. Ver. Limnol. 1: 33-36.

HENTSCHEL, E. (1925): Das Werden und Vergehen des Bewuchses an Schiffen.- Mitt. Zool. Mus. Hamburg: 41: 1-51.

HENTSCHEL, E. (1949): Analyse einer benthischen Lebensgemeinschaft.- Mitt. Hamb. Zool. Mus. 61: 93-115.

HERBST, V. (1979): Limnologische Untersuchungen zur Erforschung der chemischen, physikalischen und biologischen Reaktionen beim Zusammentreffen und Mischen von Werra- und Fulda-Wasser. Bericht NWA, Hildeshein.

HERBST, D.B. & T.J. BRADLEY (1989): Salinity and nutrient limitations on growth of benthic algae from two alkaline salt lakes of the western great basin (USA).- J. Phycol. 25: 673-678.

HILTERMANN, H. (1949): Klassifikation der natürlichen Brackwässer.- Erdöl und Kohle 2: 4-8

HILTERMANN, H. (1966): Klassifikation rezenter Brack- und Salinar-Wässer in ihrer Anwendung für fossile Bindungen.- Z. Dtsch. Geol. Ges. 115: 463-496

HIRSCH, E. (1920): Vorläufige Mitteilung über die Ergebnisse einer biologischen Untersuchung des versalzten Flußgebietes der Wipper.- zitiert in ALBRECHT (1954).

HÜLSEMANN, J. (1988 und 1991): Dynamik der Feststoffe: Schwebstoff, Schlick, Sediment. (Teilprojekt Z A (A 2)).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 77-104, 1989-1991: 117-150.

HUSTEDT, F. (1927): Die Kieselalgen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz unter Berücksichtigung der übrigen Länder Europas sowie der angrenzenden Meeresgebiete.- Rabenhorst's Kryptogamenflora 7, 1.-3.Teil.

HUSTEDT, F. (1939): Die Diatomeenflora des Küstengebietes der Nordsee vom Dollart bis zur Elbmündung.- Abh. Naturwiss. Ver. Bremen 31: 572-677.

HUSTEDT, F. (1957): Die Diatomeenflora des Flußsystems der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen.- Ibidem 34: 181-440.

HUSTEDT, F. (1959): Die Diatomeenflora der Unterweser von der Lesummündung bis Bremerhaven mit Berücksichtigung des Unterlaufs der Hunte und Geeste.- Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 6: 13-175.

HYDROMOD (1992): siehe K. DUWE und K. PFEIFFER.

INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DER ELBE [IKSE] (1991): Gewässergütebericht Elbe 1989 von der Quelle bis zur Mündung. Prag, Magdeburg, Hamburg.

JENSEN, J. (1992): Entwicklung der mittleren Tidewasserstände. BAW-Kolloquium in d. Außenstelle Küste am 26.03.92: Tidedynamik des Elbeästuars.

JENSEN, J. & W. SCHÖNFELD (1991): Erkenntnisse aus der statistischen Analyse von Pegelzeitreihen der deutschen Nordseeküste.- Jb. Hafenbautechn. Ges.

JOHNSON-PRIEN, B. (1985): Untersuchungen zur physiologischen Adaptation ausgewählter Algen des Elbe-Ästuars.- Dipl. Univ. Hamburg.

KALLE, K. (1955): Ein kreisförmiger Rechenschieber zur Bestimmung des Salzgehaltes bei der Cl^--Titration des Meerwassers.- Dtsch. Hydrogr. Z. 8: 29-30.

KAPPENBERG, J., FANGER, H.-U., V. MÄNNING, A. PRANGE (1990): Suspended Matter and Heavy Metal Transport in the Lower Elbe River under Different Flow Conditions. In: Michaelis, W. (eds.): Estuarine Water Quality Management-Monitoring, Springer-Verlag Berlin.- Coastal Estuarine Management 36: 147-152.

KAUSCH, H. (1991): Aquatischer Lebensraum.- Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt Ökologische Voruntersuchung, Materialienband zur Expertenanhörung am 12./13. 08. 1991 in Hamburg.

KAUSCH, H., A. PEITSCH, N. BERNAT, A. FAUBEL, D. BLOME, W. NELLEN & M. WEIGELT (1988 und 1991): Folgeproduktionen in der Tide-Elbe. (Teilprojekt B3).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 339-374, 1989-1991: 373-468.

KAUSCH, H., P. BRECKLING, G. FLÜGGE et al. (1990): Tidegewässer, Bericht der Arbeitsgruppe 6.- In: P. Hamm: Studie über die Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Umweltforschungsplan BMU.

KAUSCH, H., J. ORTEGA, V. STEEGE & A. HAGGE (1991): Teilbericht 1: Ökologisches Vorgutachten zur "Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt".- Bericht Univ. Hamburg.

KAUSCH, H. & A. PEITSCH (1992): Das Zooplankton und seine Verteilung im Elbe-Aestuar.- In: Kausch, H. (Ed.), Die Unterelbe; natürlicher Zustand und Veränderungen durch den Menschen.- Ber. Zentr. Meeres- u. Klimaforsch. Univ. Hamburg 19: 169-189.

KIENER, A. (1978): Écologie, Physiologie et Économie des Eaux Saumâtres.- Colletion de Biol. des Milieux marins 1, Masson, Paris, New York, Barcelone, Milan.

KIES, L. & L. NEUGEBOHRN (1988 und 1991): Primärproduktion von Algen und Makrophyten in der Tide-Elbe. (Teilprojekt B2).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen übiotischen und blotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 257-338, 1989-1991: 309-372.

KIES, L., L. NEUGEBOHRN, H. BRAKER, T. FAST, C. GÄTJE & A. SEELIG (1992): Primärproduzenten und Primärproduktion im Elbe-Ästuar.- In: Kausch, H. (Ed.), Die Unterelbe; natürlicher Zustand und Veränderungen durch den Menschen.- Ber. Zentr. Meeres- U. Klimaforsch. Univ. Hamburg 19: 137-168.

KINNE, O. (1956a): Über den Einfluß des Salzgehaltes und der Temperatur auf Wachstum, Form und Vermehrung bei dem Hydroid-polypen *Cordylophora caspia* (PALLAS), Thecata, Clavidae.- Zool. ib. (Physiologie) 66: 565-638.

KINNE, O. (1956b): Über Temperatur und Salzgehalt und ihre physiologisch-biologische Bedeutung.- Biol. ZBl. 75: 314-327.

KINNE, O. (1964): Physiologische und ökologische Aspekte des Lebens in Ästuarien.- Helgol. wiss. Meeresunters. 11: 131-156.

KIRCHENPAUER, J.U. (1862): Die Seetonnen der Elbmündung. Ein Beitrag zur Thier- und Pflanzen-Topagraphie.- Abh. Geb. Naturwiss., Naturwiss. Ver. Hamburg 4: 1-59.

KIRST, G.O. (1985): Osmotische Adaption bei Algen.- Naturwiss. 72: 125-132.

KLEES (1896): (Elbe-Verseuchung bei Magdeburg).- Hamb. Correspond. (Staatsarchiv Hamburg.).

KLEIN, H.-A. (1960): Strömungsverhältnisse und Wassermengen in der Tide-Elbe.- Mitt. WSD Hamburg 11.

KNAUTH, M., F. SCHROEDER, G. MIEHLICH & A. FAUBEL (1988 und 1991): Austauschvorgänge im Sediment des Gewässers und im Boden des Vordeichlandes. (Teilprojekt A3).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 105-160, 1989-1991: 151220.

KNISTER (1907): 3. Bericht des Hygienischen Instituts Hamburg. Manuskript (Staatsarchiv Hamburg.).

KNOWLES, C.M. (1974): Vorkommen, Verbreitung und Biologie der häufigsten Fischarten der Unterelbe unter besonderer Berück-sichtigung der Plötze (*Rutilus rutilus* L.) und des Kaul-barsches (*Acerina cernua* L.).- Dipl. Univ. Hamburg.

KNUDSEN, M. (1901): Hydrographical Tables.- G. E. C. Gad, Copenhagen.

KNUDSEN, M. (1902): zitiert in DIETRICH & KALLE (1957).

KNUDSEN, M. & W. SCHNAKENBECK (1943): Veränderungen der biologischen Verhältnisse der Niederelbe.- Monatshefte Fisch. 11: 2-5.

KNÜPLING, J. (1976): Einfluß der bioccenotischen Prozesse auf die Populationsdynamik von Aufwuchsciliaten im mesohalinen Bereich des Elbe-Aestuars.- Dipl. Univ. Hamburg.

KÖHLER,.A. (1981): Fluktuationen der Fischfauna im Elbe-Ästuar als Indikator für ein gestörtes Ökosystem.- Helgol. wiss. Meeresunters. 34: 263-285.

KÖHLER, A. & F. HÖLZEL (1980): Investigation on health conditions of flounder and smelt in the Elbe Aestuary.- ibidem 33: 401-414.

KOLBE, R. W. (1927): Zur Ökologie, Morphologie und Systematik der Brackwasser-Diatomeen. Die Kieselalgen des Sperenberger Salzgebietes.- Pflanzenforsch. 7: 1-146.

KOLBE, R. W. (1932): Grundlinien der Ökologie der allgemeinen Diatomeen.- Ergebn. Biol. 8: 222-238.

KÖTTER, F. (1961): Die Pflanzengesellschaften im Tidegebiet der Unterelbe.- Arch. Hydrobiol./Suppl 26 (Untersuch. Elbe-Aestuar 1): 106-184.

KOLKWITZ, R. & F. EHRLICH (1907): Chemisch-biologische Untersuchung der Elbe und Saale.- Mitt. Königl. Prüfungsanstalt Wasserversorgung u. Abwasserbeseitigung Berlin 9: 1-110.

KOLUNBE, E. (1931): Ein Beitrag zum Salzgehaltsverhältnis des Elbmündungsgebietes von Brunsbüttel bis Cuxhaven.- Arch. Hydrobiol. 223: 381-390.

KOSKE, P.H., H. KRUMM, G. RHEINHEINER & K.-H. SZEKIELDA (1966): Untersuchungen über die Einwirkung der Tide auf Salzgehalt, Schwebstoffgehalt, Sedimentation und Bakteriengehalt in der Unterelbe.- Kiel. Meeresforsch. 22: 47-63.

KOTHÉ, P. & J. SINDERN (1973): Die Verbreitung des Makro-Zoobenthos im Nord-Ostsee-Kanal und ihre Abhängigkeit vom Salzgehalt. II. Organismenverbreitung und biologische Indikation des Seewassereinflusses.- DGM 1: 21-25.

KRIEG, H.-J. & J.C. RIEDEL-LORJÉ (1991): Randbedingungen beim Einsatz von Aufwuchs-Untersuchungen zur Gewässergütebewertung.GWF-Wasser/Abwasser 1: 20-24.

KRAUT, K. (1884): Welche Bedeutung hat der Zufluß der Effluvien der Chlorkalium-Fabriken bei Staßfurt etc.- Hannover, Zeitschrift fehlt.

KRAUT, K. (1896): Gutachten in Sachen der Stadt Magdeburg gegen die Mansfeldsche Gewerkschaft etc.- Hannover, Zeitschrift fehlt.

KRAUT, K. (1888): Der Staßfurt-Magdeburger Laugekanal.- Hannover, Zeitschrift fehlt.

KRAUT, K. (1890): Neuere Untersuchungen über die Zuflüsse der Saale im Hinblick auf den Staßfurt-Magdeburger Laugekanal.- Hannover, Zeitschrift fehlt.

KRAUT, K. (1899): 2. Gutachten in Sachen der Stadt Magdeburg gegen die Mansfeldsche Gewerkschaft etc.- Hannover, Zeitschrift fehlt.

KRAUT, K. & W. LAUENHARDT (1888): Der Staßfurt-Magdeburger Laugekanal.- Darmstadt, Zeitschrift fehlt.

KÜHL, H. (1963): zitiert in Kühl (1972).

KÜHL, H. (1964): Über Schwankungen der abiotischen Faktoren in der Elbmündung bei Cuxhaven.- Helgol. Wiss. Meeresunters. 10: 202-216.

KÜHL, H. (1965/6): Der Abfluß der Elbe in Jahre 1965 und seine Wirkung auf Salzgehalt, Plankton- und Bewuchsbildung bei Cuxhaven.- Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 10: 61-70.

KÜHL, H. (1968): Schiffsbewuchs und Hafenbewuchs. Deutsche Häfen 2 (Wilhelmshaven, Bremerhaven).- Schiff Hafen 20: 3-6.

KÜHL, H. (1972): Hydrography and Biology of the Elbe Estuary.- Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 10: 225-309.

KÜHL, H. & H. MANN (1949): zitiert in Kühl (1972).

KÜHL, H. & H. MANN (1953): Beiträge zur Hydrochemie der Unterelbe.- Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 2: 236-268.

KÜHL, H. & H. MANN (1961): Vergleichende hydrochemische Untersuchungen an den Mündungen deutscher Flüsse.- Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol. 14: 451-458.

KÜHL, H. & H. MANN (1962): Über das Zooplankton der Unterelbe.- Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 8: 53-70.

KÜHL, H. & H. MANN (1963): Das Vorkommen von Garnelenlarven (*Crangon crangon* L) in der Elbmündung.- Arch. FischWiss. 19: 1-7.

KÜHL, H. & H. MANN (1965): zitiert in Kühl (1972).

KÜHL, H. & H. MANN (1967): Untersuchungen über das Plankton der Außenelbe.- Gewässer und Abwässer 44/45: 7-36.

KÜHL, H. & H. MANN (1968a): Vergleichende Untersuchungen über Hydrochemie und Plankton deutscher Flußmündungen.- Helgol. wiss. Meeresunters. 17: 435-444.

KÜHL, H. & H. MANN (1968b): Biologische Bedeutung der Wasserführung eines Tideflusses.- Gewässer und Abwässer 44: 7-36.

KÜHL, H. & H. MANN (1968): Biologische Bedeutung der Wasserführung eines Tideflusses.- Gewässer und Abwässer 47: 41-60.

LANDWÜST, C. VON (1991): Der Einfluss von im Tidenverlauf schwankenden Salzgehalten auf die Kondition der Flunder.- Dipl. Univ. Kiel.

LANG, G. (1990): Zur Schwebstoffdynamik von Trübungszonen in Ästuarien.- Ber. Inst. Strömungsmech. u. Elektron. Rechnen, Univ. Hannover 26.

LÄNGE, R. (1983): Zur Produktionsbiologie und Bestandsdynamik benthischer Mikroalgen im Watt des Elbe-Ästuars.- Diss. Univ. Kiel.

LARSEN, J. (1987): Algal studies of the Danish Wadden Sea; 4. A taxonomic study of the interstitial euglenoid flagellates.- Nord. J. Bot. 7: 589-607.

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [LAWA] 1985: Die Gewässergütekarte der Bundesrepublik Deutschland.- Stuttgart.

LELING, A. (1986): Untersuchung zur Häufigkeit und Verteilung des Makrobenthos in der Unterelbe.- Dipl. Univ. Hamburg.

LENTZ, H. (1888): Strömung und Salzgehalt der Elbe bei Cuxhaven.- Z. Bauwesen 38: 81-106.

LENZ, J. (1970): Zooplankton (Chemische, mikrobiologische und planktologische Untersuchungen in der Schlei im Hinblick auf deren Abwasserbelastung).- Kieler Meeresforsch. 26: 203-213.

LESCHKE, M. (1908): Hamburgische Elb-Untersuchung. Zoologische Ergebnisse der seit den Jahre 1899 vom Naturhistorischen Museum unternommenen biologischen Erforschung der Niederelbe.- Mitt. Naturhist. Mus. Hamburg 26: 249-279.

LILLELUND, K. (1960): Untersuchungen über die Biologie und Populationsdynamik des Stintes *Osmerus eperlanus* (LINNAEUS 1758) der Elbe. - Habil. Univ. Hamburg.

LOHBERG, W. & H. ROHDE (1973): Der Einfluß des Oberwassers in Tideflüssen auf das Tidemittelwasser in ihrem Mündungsgebiet. DGM 1: 1-13.

LORENZ, J.R. (1863): Brackwasser-Studien an der Elbemündung.- "Physikal. Verhältnisse und Verteilung der Organismen im Quarnerischen Golfe."- Kaiserl. Akademie der Wissenschaften, Wien.

LUCHT, F. (1953a): Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone der Elbe.- Dt. hydrogr. Z. 6: 18-32.

LUCHT, F. (1953b): Die Sandwanderung im unteren Tidegebiet der Elbe.- Ibidem: 186-207.

LUCHT, F. (1954): Geschiebe- und Sinkstofftransport in der Elbe.- Mitt. Geol. Staatsinst. Hbg. 23: 68-75.

LUCHT, F. (1963): Strömungsmessungen 1958/1961 im unteren Tidegebiet der Elbe.- Mitt. WSD Hamburg 15: 1-12.

LUCHT, F. (1964): Hydrographie des Elbe-Aestuars.- Arch. Hydrobiol./Suppl. 29 (Untersuch. Elbe-Aestuar 2): 1-96.

LUCHT, F. (1974): Untersuchungen über die Wassergüte in der Aussenelbe.- Hamb. Küstenforsch 32.

LUCHT, F. (1977): Die Wassergüte der Elbe.- Wasser Boden 12: 337-341.

LÜNEBURG, H. (1937): zitiert in KÜHL, 1972.

LÜNEBURG, H. (1939): Hydrochemische Untersuchungen der Elbmündung mittels Elektro-Kolorimeter.- Arch. dt. Seewarte 59: 1-27.

LÜNEBURG, H. (1950): zitiert in Lang (1990).

LÜNEBURG, H. (1952): Beiträger zur Hydrographie der Wesermündung, 1. Teil.- Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 1: 91-114.

LÜNEBURG, H. (1953): Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung, 2. Teil: Die Probleme der Sinkstoffverteilung in der Wesermündung.- Ibidem 2: 15-51.

LÜNEBURG, H. (1955): Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung, 4. Teil: Zur Verteilung der Sinkstoffe in den Seitenräumen der Wesernündüng.- Ibidem 3: 228-265.

LÜNEBURG, H. (1956): Über Messung und Bedeutung der Sinkstoffe in der Elbe- und Wesermündung.- Von Wasser 18: 197-207.

LÜNEBURG, H. (1964): Beiträge zur Sedimentologie der Weser- und Elbe-Aestuare.- Helgol. wiss. Meeresunters. 10: 217-230.

LUTH, U. (1989): Untersuchungen zum Phytoplankton und zur Hydrochemie auf einem Schnitt vom Süßwasser über das Speicherbecken im Beltringharder Koog in das Watt der Nordstrander Bucht.- Dipl. Univ. Hamburg.

LUTHER, G. (1987): Seepocken der deutschen Küstengewässer.- Helgol. Wiss. Meeresunters. 41: 1-43.

MAGENS, C. (1958): Untersuchungen der Ursachen und des Vorgangs der Verschlickung der Schleusenvorhäfen zu Brunsbüttelkoog. Mitt. Bundesanst. Wasserbau 10: 1-49.

MARGALEF, R. (1978): Life-forms of-phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment.- Oceanol. Acta 1: 493-509.

MCLACHLAN, J. (1961): The Effect of Salinity on Growth and Chlorophyll Content in Representative Classes of Unicellular Marine Algae.- Can. J. Microbiol. 7: 399-406.

MEIJMING, M.P.D. (1977): Einbürgerung von Brackwassertieren aus Nord- und Ostsee in der Werra.- Mitt. aus den Ergänzungsstudium ökologische Umweltsicherung Ges. Hochschule Kassel 1: 12-18.

MEYERF P. & A. CROTOGINO (1990): Protokoll einer mittleren Tide der Elbe für das Jahr 1988.- WSD Nord 4.

MICHAELIS, W.(1988 und 1891): Transport von Schweb- und Spurenstoffen. (Teilprojekt A1b).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 45-76, 1989-1991: 57-116.

MIEHLICH, G. (1991): Terrestrischer Lebensraum. Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Ökologische Voruntersuchung, Materialienband zur Experten-anhörung am 12./13.8.1991 in Hamburg.

MÖLLER, B. & H. PANKOW (1981): Algensoziologische und sapro-biologische Untersuchungen an Vorflutern der Elbe.- Limnologica 13: 291-350.

MÖLLER, H. (1988): Fischbestände und Fischkrankheiten in der Unterelbe 1984-1986.- Möller, Kiel.

MÖLLER, H. (1989): Changes in Fish Stocks and Fisheries: the Lower Elbe River.- In: Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe, G.E. Petts (ed.), John Wiley & Sons Ltd chap. 12: 203-220.

MÖLLER, H. & B. DIECKWISCH (1991): Larval fish production in the tidal River Elbe 1985-1986.- J. Fish. Biol. 38: 829-838.

MORRIS, A.W., R.F.C. MANTOURA, A.J. BALE, & R.J.M. HOWLAND (1978): Very low salinity regions of estuaries; important sites for chemical and biological reactions.- Nature 274: 678-680.

MOVAGRAR, C.A. (1964): Verbreitung und Ökologie der Amphipoden im Elbe-Aestuar.- Arch. Hydrobiol./Suppl. 29 (Elbe-Aestuar 2): 97-179.

MÜHLENHARDT, U. (1979): Die Biomasse mariner Mikrofauna Gesellschaften. Eine Untersuchung im Bereich der Klärschlamm-verklappung vor der Elbemündung.- Dipl. Univ. Hamburg.

NAKANISHI, M. & M. MONSI (1965): Effect of Variation in Salinity on Photosynthesis of Phytoplankton Growing in Estuaries.- J. Fac. Sci. Tokyo Ser. 3: 19-42.

NASNER, H. & H.-W. PARTENSKY (1979): Modellversuche für die Tide-Elbe. Strombaumaßnahmen nach 1962 und ihre Auswirkungen auf die Sturmflutwasserstände.- Mitt. Franzius-Inst. Wasserbau Küsteningenieurwesen Univ. Hannover 45: 37-178.

NELLEN, W. (1992): Fische und Fischerei in der Elbe. In: Kausch, H. (Ed.), Die Unterelbe; natürlicher Zustand und Veränderungen durch den Menschen.- Ber. Zentr. Meeres- u. Klimaforsch. Univ. Hamburg 19: 169-189.

NEUMANN, L.J.R. (1985): MOSTRA - ein neues Verfahren zur Strömungs- und morphologieadäquaten Bilanzierung von suspendierten Feststoffen und Begleitparametern in geschichteten Ästuaren.- Die Küste 42: 163-170.

NICHOLS, M.N. (1977): Response and recovery an estuary following the river flood.- J. Sediment. Petrol. 47: 1171-1186

NIEDERSTADT (1896): Elbwasser-Untersuchungen von 1896, verglichen mit denen früherer Jahre.- Staatsarchiv Hamburg.

NÖTHLICH, I. (1967): Untersuchungen über den Schlickhaushalt in der Unterelbe mit besonderer Berücksichtigung der biologischen Komponenten.- Mitt. Wasser- u. Schiffahrtsdirektion Hamburg 17: 1-72 und 73-155.

NÖTHLICH, I. (1972a): Beziehungen zwischen Trübungsverteilung und hydrographischen Faktoren im Süß- und Brackwasser des Elbe-Aestuars.- Arch. Hydrobiol./Suppl. 43 (Untersuch. Elbe-Aestuar 4): 1-32.

NÖTHLICH, I. (1972b): Trophische Struktur und Bioaktivität der Planktongesellschaft im unteren limnischen Bereich des Elbe-Aestuars. Kriterien zur saprobiellen Einstufung eines Tidengewässers.- Ibidem 43: 33-117.

NÖTHLICH, I. (1976 bis 1980): Hydrobiologische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Salzgehaltsverhältnisse im Elbe-Aestuar. Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1.-5. Bericht N2/350.53.

NÖTHLICH, I. (1990): Hydrobiologische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Salzgehaltsverhältnisse in Elbe-Ästuar.- BfG Bericht 0535, Koblenz, zitiert in SCHÖLL (1992).

ÖKOLIMNA (1985 bis 1990): Beweissicherung Kernkraftwerk Brokdorf. Jahresbericht 1985 bis 1990.- Berichte ÖKOLINNA, Burgwedel.

OHLMÜLLER (1896): Gutachten, betreffend die Verunreinigung der Saale zwischen Halle und Barby.- Gutachten Bd. 12.

PANKOW, H. (1976 und 1990): Ostsee-Algenfauna.- Gustav Fischer Verlag, Jena.

PARIS COMMISSION [PARCOM] (1987): Beitrag der Bundesrepublik Deutschland zur gemeinsamen überwachung der Kommissionen von Oslo und Paris; Arbeitprogramm Nordsee 1986 - 1995.- Bonn zitiert in Bund/Länder-Meßprogramm für die Nordsee, 1986/1987.

PARK, D.W. (1974): Flußmorphologie im Süßwasserbereich der Unterelbe (Elbe km 650 -670).- Hamb. geogr. Studien.

PARKE, M. & P.S. DIXON (1976): Check-List of British Marine Algae, third Revision.- J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 56: 527-594.

PARSONS, T.R. (1982): The new physical definition of salinity. Biologists beware.- Limnol. Oceanogr. 27: 384-385.

PEITSCH, A. (1992): Untersuchungen zur Populationsdynamik und Produktion von *Eurytemora affinis* (Calanoida, Copepoda) im Elbe-Ästuar.- Diss. Univ. Hamburg.

PIA, J. (1933): Kohlensäure und Kalk. Einführung in das Verständnis ihres Verhaltens in den Binnengewässern.- In: A. Thienemann. Die Binnengewässer.- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

PINGREE, R.D. & D.K. GRIFFITHS (1978): Tidal fronts on the shelf seas around the British Isles.- J. Geophys. Res. 83: 4615-4622.

POSTMA, H. & K. KALLE (1955): Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf von Flüssen, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe.- Dtsch. hydrogr. Z. 8: 137-144.

RAMMING, H.-G. (1971): Hydrodynamisch-numerische Untersuchungen über strömungsabhängige Horizontalausbreitungen von Stoffen in Modellflüssen mit Anwendungen auf die Elbe.- Mitt. Inst. Meereskde., Univ. Hamburg 18.

RAVAIL, B. & J.-M. ROBERT (1985): Influence de la Salinité sur la Multiplication du Skeletonema Costatum dans les eaux Estuariennes de la Loire.- Cryptogam. Algol. 1: 51-60.

REDECKE, H. C. (1922): Zur Biologie der niederländischen Brackwassertypen.- Bijdr. Dierk. Amsterdam 22: 239-335, zitiert in REMANE & SCHLIEPER, 1971.

REMANE, A (1934): Die Brackwasserfauna.- Verh. Dt. Zool. Ges.: 34-74.

REMANE, A & C. SCHLIEPER (1958): Die Biologie des Brack-wassers.- In: A. Thienemann, Die Binnengewässer 22, Schweizerbart, Stuttgart

REMANE, A & C. SCHLIEPER (1971): Biology of brackish water.- In: A. THIENEMANN, Biology of Brackish Water.- Ibidem 25.

RHEINHEIMER, G. (1977): Mikrobiologische Untersuchungen in Flüssen. II. Die Bakterienbiomasse in einigen norddeutschen Flüssen.- Arch. Hydrobiol. 81: 259-267.

RICKLEFS, K. (1989): Zur Sedimentologie und Hydrographie des Eider-Ästuars.- Ber. Geol.-Paläontol. Inst. und Mus. Uni Kiel 35, zitiert in SCHULZE, 1990.

RIEDEL-LORJÉ, J.C. (1981): Untersuchungen über den Indikationswert von Aufwuchs in Süß- und Brackwasserzonen des Elbe-Aestuars unter Berücksichtigung industrieller Einleitungen.- Arch. Hydrobiol./ Suppl.61 (Untersuch. Elbe-Aestuar 5): 153-226.

RIEDEL-LORJÉ, J.C. & TH. GAUMERT (1982): 100 Jahre Elbe-Forschung. Hydrobiologische Situation und Fischbestand 1842-1943 unter dem Einfluß von Stromverbau und Sieleinleitungen. Ibidem 61: 317-376.

RIEMANN, F. (1966): Die interstitielle Fauna im Elbe-Aestuar - Verbreitung und Systematik.- Ibidem 31 (Untersuch. Elbe-Aestuar 3): 1-279.

RIETHMÖLLER, R., H.-U. FANGER, I. GRABEKANN, H.J. KRASEKANN K. OHM, J. BÖNING, L.J.R. NEUMANN, G. LANG, M. MARKOWSKY, R. SCHUBERT (1988).- Hydrographic measurements in the turbidity zone of the Weser estuary.- In: Dronkers J. und van Leussen, W. (eds.), Physical Processes in Estuaries, Springer Verlag.: 332344, zitiert in LANG, 1990.

RIJSTENBIL, J.W. (1987): Phytoplankton composition of stagnant and tidal ecosystems in relation to salinity; nutrients; light and turbulence.- Neth. J. Sea Res. 21: 113-123.

ROHDE, H. (1971): Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schiffahrtsstraße.- Mitt. Franzius-Inst. Wasserbau Küsteningenieurwesen Univ. Hannover 36: 17-241.

ROHDE, H. (1974): Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstofftransport in einem Tidefluß; dargestellt an Beispiel der Elbe. Die Küste 25: 27-35.

ROTTGARDT, D. (1952): Mikropaläontologische wichtige Bestandteile rezenter brackischer Sedimente an den Küsten Schleswig-Holsteins.- Meyniania 1: 169-228.

RUBNER (1895): Über Flußverunreinigung mit besonderer Berücksichtigung anorganischer Versalzungen. Offizieller Bericht: 7.- Preussischer Medizinalbeamtenverein.

RUBNER & SCHMIDTMANN (1901): Gutachten der Königlichen wissenschaftlichen Deputation für Medizinisches Wesen über die Einwirkungen der Kaliindustrie Abwässer auf die Flüsse. Vierteljahrschr. gerichtl. Med. u. öff. Sanitätswesen 3: 21.

RUTTNER-KOLISKO, A. (1971): Rotatorien als Indikatoren für den Chemismus von Binnensalzgewässern. ("Abhandlung des Natrongewässer-Symposiums Tihany-Szecjed-Szarvas", 29.9.-4.10.1969).- Biol. Station Lunz der Österr. Akad. d. Wiss. 12: 283-298.

RUTTNER-KOLISKO, A. (1972): Der Einfluß von Temperatur und Salzgehalt des Mediums auf Stoffwechsel- und Vermehrungsintensität von *Brachionus plicatilis* (Rotatoria). Verhandlungsber. Dt. Zool. Ges., 65. Jahresversamml., Gustav Fischer Verlag: 89-95.

SCHLIENZ, W. (1923): Verbreitung und Verbreitungsbedingungen der höheren Krebse im Mündungsgebiet der Elbe.- Arch. Hydrobiol. 14: 429-452.

SCHLIEPER, C. (1972): Physiology of Brackish Water.- In A. Thienemann: Die Binnengewässer 22, E. Schweizerbart, Stuttgart

SCHMIDT, C. (1989): Zur Ökologie des sulfidtoleranten Nematoden-Genus Tobrilus Andrássy 1959 aus dem Elbwatt.- Dipl. Univ. Hamburg.

SCHNAKENBECK. W. (1943): Veränderungen der biologischen Verhältnisse der Niederelbe.- Monatshefte Fisch. 11: 2-5.

SCHÖLL, F. (1992): Hydrobiologische Untersuchungen zur Kennzeichnung der Salzgehaltsverhältnisse an der Unterelbe im Jahre 1991.- BfG-0652 (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz).

SCHÖNE, H.K. (1974): Experimentelle Untersuchungen zur Ökologie der marinen Kieselalge *Thalassiosira rotula*; 2. Der Einfluß des Salzgehaltes.- Mar. Biol. 27: 287-298.

SCHÖNFELD, N. & J. JENSEN (1990): Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln.- Die Küste 52: 191-204.

SCHORER (1875): (Versalzung der Elbe).- Zitiert in VOLK (1908).

SCHRÖDER, M. (1987): Messung des turbulenten Impuls- und Salztransports in der Mischungszone der Elbe.- GKSS 87/E/16.

SCHUBEL, J.R. (1968): Turbidity maximum of northern Chesapeake Bay.- Sc. 161: 1013-1015.

SCHUCHARDT, B. (1990): Zur Bedeutung physikalischer Prozesse für die Dynamik organischer Seston-Komponenten im inneren Weser-Ästuar.- Diss. Univ. Bremen.

SCHÜTZ, L. (1969): Ökologische und biologische Untersuchungen an den Balaniden der Kieler Bucht (Crustacea, Cirripedia). Faun. ökol. Mitt. 3: 269-277.

SCHULZ, H. (1954): Sedimentation und Erosion im Elbe-Ästuar der Gegenwart.- Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 23: 61-67.

SCHULZ, H. (1961): Qualitative und quantitative Plankton-untersuchungen im Elbe-Aestuar.- Arch. Hydrobiol./Suppl. 26 (Untersuch. Elbe-Aestuar 1): 5-105.

SCHULZE, K. (1990): Zur Dynamik des Schwebstoffhaushaltes in Brackwassergebieten am Beispiel des Ems-Ästuars.- Mitt. Leichtweiss Inst. für Wasserbau Braunschweig 108: 1-153.

SCHWARZE, H. (1985): Untersuchung von Baumassnahmen im Tidegebiet.- Mitt. Franzius-Inst. 60: 363-375.

SEGERSTRALE, S. (1959): Brackishwater classification. A historical survey.- Arch Oceanograph. Limnol. Suppl. 11: 7-33

SELLNER, K.G., R.V. LACOUTURE & C.R. PARRISH (1988). Effects of increasing salinity on a cyanobacteria bloom in the Potomac River estuary.- J. Plankton Res. 10: 49-61.

SEXTON, E. W. (1912): Some brackish-water Amphipoda from the mouth of the Weser and the Elbe, and from the Baltic.- Proc. Zool. Soc. London 1912: 656-665.

SEXTON, E. W. (1942): The relation to *Gammarus zaddachi* Sexton to some other species of *Gammarus* occuring in fresh, estuarine and marine waters.- J. Marine Biol. Ass. U. K. 25: 575-599.

SIEFERT, W. (1970): Die Tideverhältnisse der Elbe seit 1786. Dtsch. Gewässerk. Mitt. 14: 125-130.

SIEFERT, W. (1970): Die Salzgehaltsverhältnisse im Elbmündungsgebiet.- Hamb. Küstenforsch. 15.

SIEFERT, W. (1976): Hydrologische Daten aus dem Tidegebiet der Elbe und ihrer Nebenflüsse.- Ibidem 35: 1-24.

SIEFERT, W. (1991): zitiert in ZIELKE, 1991.

SIEFERT, W. & K. HAVNO (1989): Sturmflutuntersuchungen für die Elbe mit den Mathematisch-Hydraulischen Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts.- Hamb. Küstenforsch. 46.

SIMON, W.G. (1952): Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Außenelbe und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung 1949/50.- Mitt. Geol. Landesamt 1.

SIMON, W.G. (1953): Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Elbe zwischen Scheelenkuhlen und Cuxhaven und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung 1951.- Mitt. WSD Hamburg 8.

SIMON, W.G. (1954): Ergebnisse petrographischer Untersuchungen an Sedimenten der Unterelbe. - Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 23: 50-56.

SIMON, W.G. (1961): Bericht über Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Bereich der Außenelbe vom Sommer 1959.- Ibidem. 12: 1-69.

SIMONSEN, R. (1962a): Untersuchungen zur Systematik und Ökologie der Bodendiatomeen der westlichen Ostsee.- Intern. Revue ges. Hydrobiol. Syst. Beiheft. 1.

SIMONSEN, R. (1962b): Untersuchungen zur Systematik und Ökologie der Bodendiatomeen der westlichen Ostsee 2: Kieler Meeresforsch. 16: 16-130.

Subklew, H.J. (1969): Zur Ökologie von *Balanus improvisus*.- Limnol. 7: 1-147.

SÜNDERMANN J. (1988 und 1991): Modellierung des Strömungsfeldes und zugehöriger Transportprozesse in der Tide-Elbe.(Teilprojekt A1a).- SFB 327 (Wechselwirkungen zwischen abiotischen und biotischen Prozessen in der Tide-Elbe) Tätigkeitsber. 1986-1988: 23-44, 1989-1991: 35-56.

TERLIZZI, D.E.JR. & E.P. KARLANDER (1980): Growth of a coccoid nanoplankter (Eustigmatophyceae) from the Chesapeake Bay as influenced by light, temperature, salinity and nitrogen source in factorial combination.- J. Phycol. 16: 364-368.

THIEL, H., U. CLAUSSEN & B. DEVENTER (1989): Hydrobiologische Untersuchungen am "Kronenloch" (Salzwasserbiotop / Helmsander Koog) im Speicherkoog Dithmarschen.- Abschlussbericht, Uni. Hamburg.

THIEL, R. (1992): Daten zur Hamenfischerei von März 1989 bis April 1992.- SFB 327, unveröffentlicht.

THIEMANN, K. (1934): Das Plankton der Flußmündungen.- Wiss. Erg. dt. Atl. Exp. Meteor. 12: 199-273.

THIENEMANN, A. (1939): Grundzüge einer allgemeinen Ökologie. Schweeizerbart, Stuttgart.

THUMM, K. (1921): Die Kaliwerke und ihre Abwässer.- Verlag von Julius Springer, Berlin.

THUMM, K., H. THIESING, C. REICHLE et al. (1923): Die Beseitigung der Kaliabwässer im Bereich der Aller. Veröff. aus d. Gebiete d. Medizinalverwaltung XVII. Bd. 9.- Verlagsbuchhandlung Schoetz, Berlin.

ULEX (1871/3): (Versalzung der Elbe.)- Zitiert VOLK (1908).

[UNESCO] 1981: Background papers and supporting data on the Practical Salinity Scale 1978.- Unesco Technical Papers in Marine Science 37.

VOLK, R. (1903): Hamburgische Elbe-Untersuchungen.- Mitt. Naturhist. Mus. Hamburg 19: 65-154.

VOLK, R. (1906): Hamburgische Elbe-Untersuchungen. VIII. Studien über die Einwirkung der Trockenwetterperiode im Sommer 1904 auf die biologischen Verhältnisse der Elbe bei Hamburg. Ibidem 23: 1-101.

VOLK, R. (1908): III. Mitteilungen über die biologische Elbe-Untersuchung des Naturhistorischen Museums in Hamburg.- Z. Fischerei 14: 30-65.

WAGNER, R. (1971): Über die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Wässern.- Vom Wasser 38: 27-48.

WAGNER, R. (1980): Temperaturkorrekturfaktoren für die elektrische Leitfähigkeit von Wässern.- Z. Wasser- Abwasser Forsch. 13: 62-65.

WARNCKE, W. (1977): Veröffentlichungen über Sturmfluten. Chronologische Titelaufzählung von 1770 bis 1977.- Hamb. Küstenforsch. 37: 1-76.

WASSER- UND SCHIFFAHRTSDIREKTION NORD [WSD] (1991): Ergebnisse der Salzgehaltsmessungen für die Beweissicherung des Ausbaus der Unter- und Außenelbe auf 13,5 m unter Kartennull; Messungen von November 1989 bis Oktober 1990.- Ber. WSD, Kiel.

WASSER- UND SCHIFFAHRTSDIREKTION NORD [WSD] (1991): Daten unveröffentlicht.

WASSERWIRTSMMFTSAMT STADE [WWA] (1992): Daten unveröffentlicht.

WEIGELT, M (1990 - 1991): zitiert in ARGE ELBE.

WELLERSHAUS, S. (1981): Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser estuary.- Arch. Hydrobiol. 92: 161-198.

WELLERSHAUS, S. (1982): Die Trübungswolke im Weser-Ästuar.- DGM 26: 2-6.

WENDEL, O. (1911): Untersuchungen des Magdeburger Elb- und Leitungswassers von 1904-1911.- C.E. Klotz.

WIBEL, F. (1887): Die Schwankungen im Chlorgehalt und Härtegrad des Elbwassers bei Hamburg. Ein Beitrag zum Studium der Flußwässer und ihrer Verunreinigungen.- Abh. Naturw. Ver. Hamburg 10: 1-16.

WILKEN, R.-D., H. CHRISTIANSEN, H.-U. FANGER, N. GREISER, S. HAAR, W. PULS, H. REINCKE, D. SPOTT & M. VOLLMER (1991): Fakten und Hypothesen zum Schwebstoff- und Schadstofftransport in der Elbe.- GKSS 91/E/35: 167-189.

WILKENS, H. & A. KÖHLER (1977): Die Fischfauna der unteren und mittleren Elbe: die genutzten Arten (1950-1975.- Abh. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg 20: 185-222.

WITTE, H.-H. (1992): Wasserbauliche Systemanalyse für KÜstengewässer.- BAW-Kolloquium in d. Außenstelle Küste am 26.03.92: Tidedynamik des Elbeästuars.

WOHLWILL, A. (1889): (Chlorgehaltsbestimmungen im Elbwasser).- Zitiert in Volk (1908).

ZIELKE , W. (1991): Hydromechanik.- Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Ökologische Voruntersuchung, Materialienband zur Expertenanhörung am 12./13.08.1991 in Hamburg.

ZIEMANN, H. (1970): Zur Gültigkeit des Saprobiensystems in versalzten Binnengewässern.- Limnol. 7: 279-293.

ZIEMANN, H. (1971): Die Wirkung des Salzgehaltes auf die Diatomeenflora als Grundlage für eine biologische Analyse und Klassifikation der Binnengewässer.- Ibidem 8:505-525.