

### 3. Die Unterweser - Ein Überblick über Hydrographie und Gewässergüte

I. GRABEMANN, H.-J. GRABEMANN, A. MÜLLER, Institut für Küstenforschung, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH

*"Die Weser hat überdies ein besonders süßes und liebliches Wasser, welches sowohl zum Trinken, als Kochen und Brauen sehr bequem ist ...Imgleichen ist das Weserwasser, wegen seiner bequemen Eigenschaft zur Färberey und Gerberey, sehr diensam, und auch daher sehr berühmt"*

(WESERCHRONIK 1768, J.H. DIELHELM; zitiert in ALBRECHT und KIRCHHOFF, 1987)

Die Weser wird seit jeher u.a. als Schifffahrtsweg, zur Trink- und Brauchwasserentnahme und als Vorfluter genutzt. Aufgrund dieser verschiedenartigen Nutzungen wurden Flusslauf und Wasserqualität im Laufe der Zeit zunehmend **anthropogen** beeinflusst, wodurch sich letztlich die Lebensbedingungen für **Fauna** und Flora änderten.

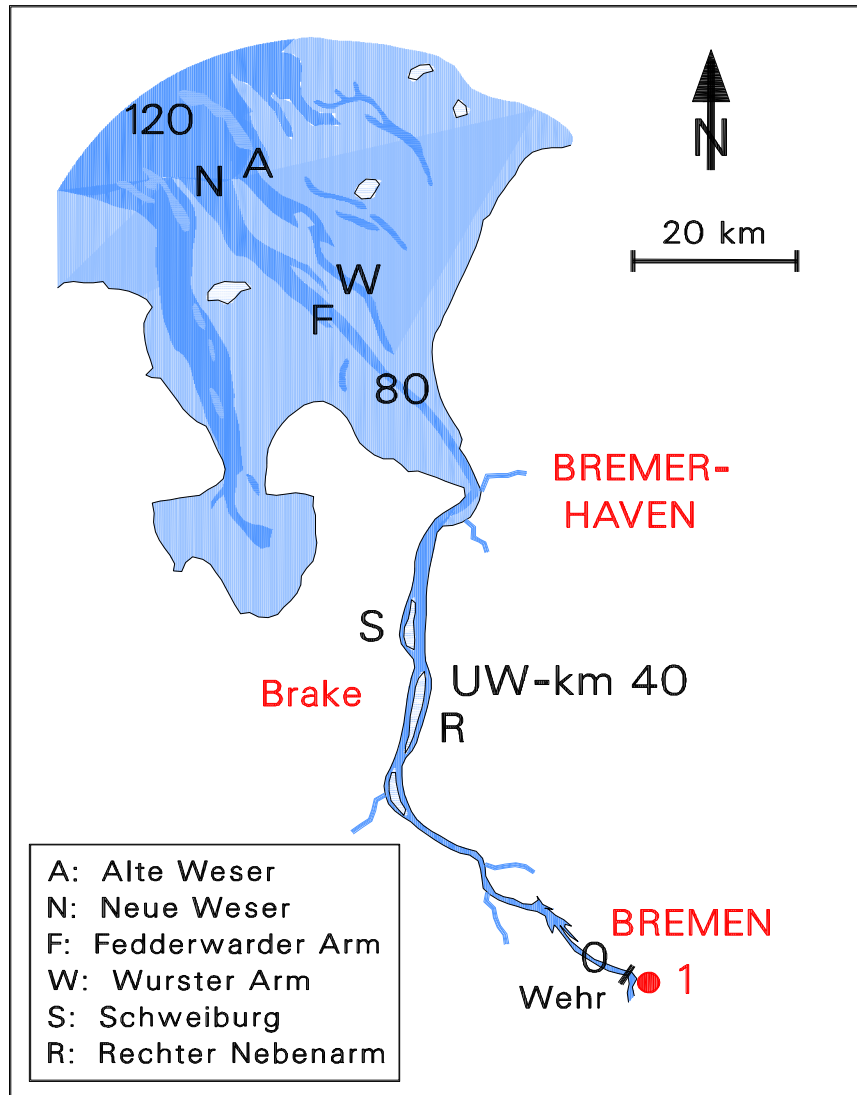
Während Wasserstände und Salzgehalte aus Gründen der Beweissicherung in Folge von Baumaßnahmen seit den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts aufgezeichnet werden, existieren für Gewässergüteparameter wie Sauerstoff- und Nährstoffgehalte keine derartigen langen Zeitreihen. Neben Einzelmessungen liegen für diese Parameter in der Regel erst seit 1979 kontinuierliche Zeitreihen vor. Aus diesem Grund lassen sich langfristige Entwicklungen (Trends) unterschiedlich genau für die verschiedenen Parameter aufzeigen.

#### 3.1 Die Unterweser heute - Basisdaten

Die tidefreie Weser ist vom Zusammenfluss ihrer beiden Quellflüsse Fulda und Werra bis zum Wehr in Bremen-Hemelingen 362 km lang. Das von den Gezeiten beeinflusste Mündungsgebiet der Weser (Abb. 3.1) wird unterteilt in die etwa 70 km lange kanalartige Unterweser von Bremen bis Bremerhaven und die daran anschließende etwa 55 km lange trichterförmige Außenweser. Die Außenweser ist ein Doppelrinnensystem mit Querverbindungen und dazwischenliegenden Platen inmitten großräumiger Wattflächen. Die beiden Haupttrinnen sind Fedderwarder-Arm - Hohe-Weg-Rinne - Neue Weser (westliche Rinne) und Wurster-Arm - Tegeler Rinne - Alte Weser (östliche Rinne).

Im Mündungsgebiet überlagern sich die Einflüsse der aus dem Binnenland abfließenden Oberwassermengen mit denen der Gezeiten.

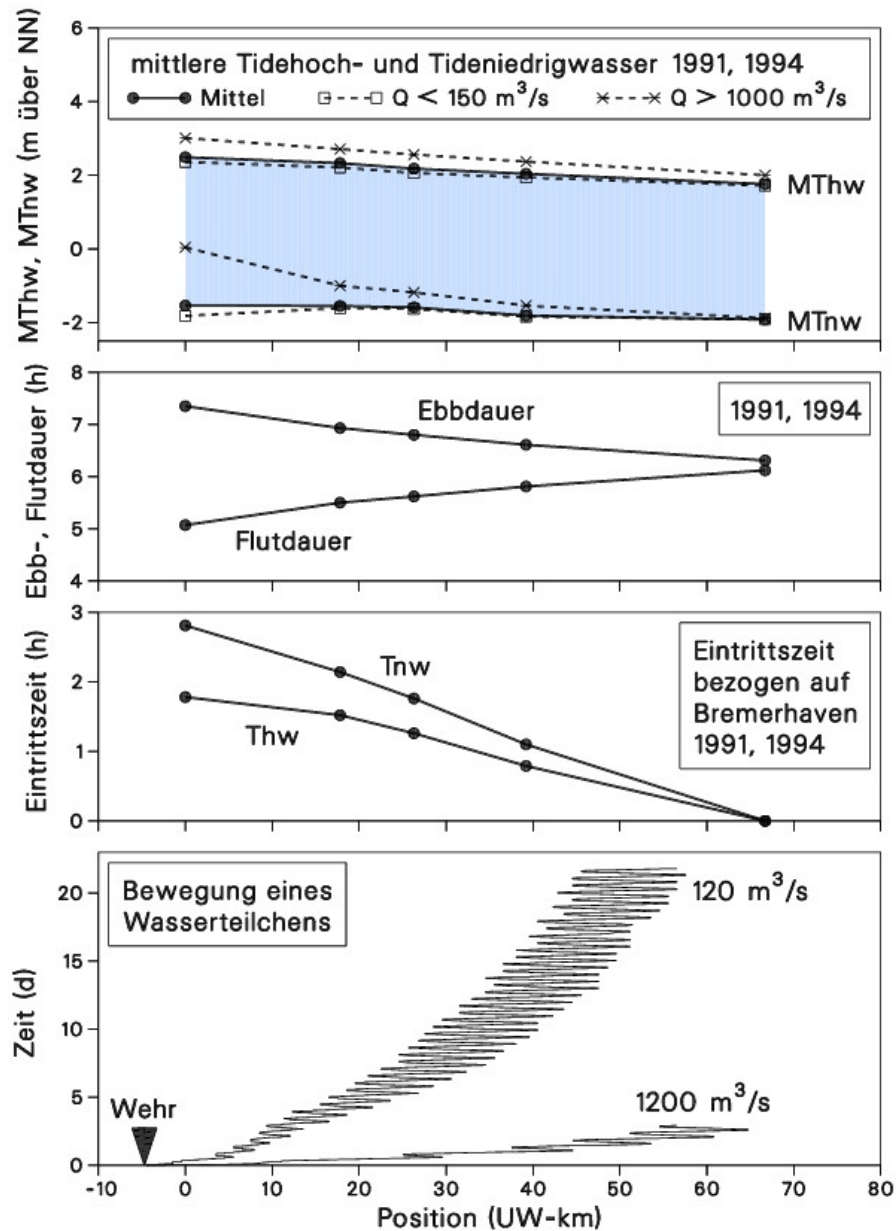
Der Oberwasserabfluss beträgt bei Intschede (etwa 30 km flussauf des Bremer Wehres) im langjährigen Mittel (MQ)  $324 \text{ m}^3/\text{s}$ , das langfristige Mittel der jährlichen Maxima (MHQ) liegt bei  $1210 \text{ m}^3/\text{s}$ , der höchste gemessene Abfluss (HHQ) betrug  $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das langfristige Mittel der jährlichen Minima (MNQ) liegt bei  $117 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw. der kleinste gemessene Abfluss (NNQ) bei  $59,7 \text{ m}^3/\text{s}$  (Jahre 1941 bis 1998, DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, WESER-/EMSGEBIET, 1998).



**Abb. 3.1:** Skizze der Wesermündung. Die Zahlen im Fahrwasser geben die Unterweser-Kilometer an (UW-km 0 an der Wilhelm Kaisen Brücke in Bremen, 1: ARGE-Weser-Messstation Bremen-Hemelingen)

Die Gezeitenwelle dringt von Nordwesten in die Weser ein. Das Oberwasser wirkt dämpfend auf die flussaufgerichtete Flutwelle, so dass die Flutdauer flussaufwärts immer kürzer wird. Entsprechend verlängert sich die Ebbdauer. In Bremerhaven betragen mittlere Flut- und Ebbdauer 6h 5min und 6h 20min, bei Bremen dagegen 5h 5min und 7h 20min. Das Hochwasser tritt in Bremen am Pegel Große Weserbrücke im Mittel 1h 50min später ein als in Bremerhaven (Alter Leuchtturm), das Niedrigwasser im Mittel 2h 50min später (Mittelwerte der Jahre 1991 und 1994, Abb. 3.2; nach Daten aus den DEUTSCHEN GEWÄSSERKUNDLICHEN JAHRBÜCHERN, WESER-/EMS GEBIET, 1991, 1994). Der mittlere Tidenhub ist bei Bremerhaven etwa 3,6 m und bei Bremen etwa 4 m; zwischen Spring- und Nipptide schwankt er um etwa 1 m. Flussauf von Brake zeigt der Tidenhub auch eine Abhängigkeit vom Oberwasserabfluss. Bei großem Oberwasser ( $>1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1994) nimmt der Tidenhub bei Bremen deutlich ab, da das Niedrigwasser ansteigt. Bei kleinem Oberwasser ( $<150 \text{ m}^3/\text{s}$ , 1991) nimmt der Tidenhub dagegen etwas zu (Abb. 3.2). Die

mittleren Flut- und Ebbwege liegen im Bereich von Bremerhaven bei etwa 14 km. In Bremen beträgt der mittlere Ebbweg etwa 6 km, der mittlere Flutweg nur etwa 1-4 km (GKSS, 1980, dort Tab. 1.1).

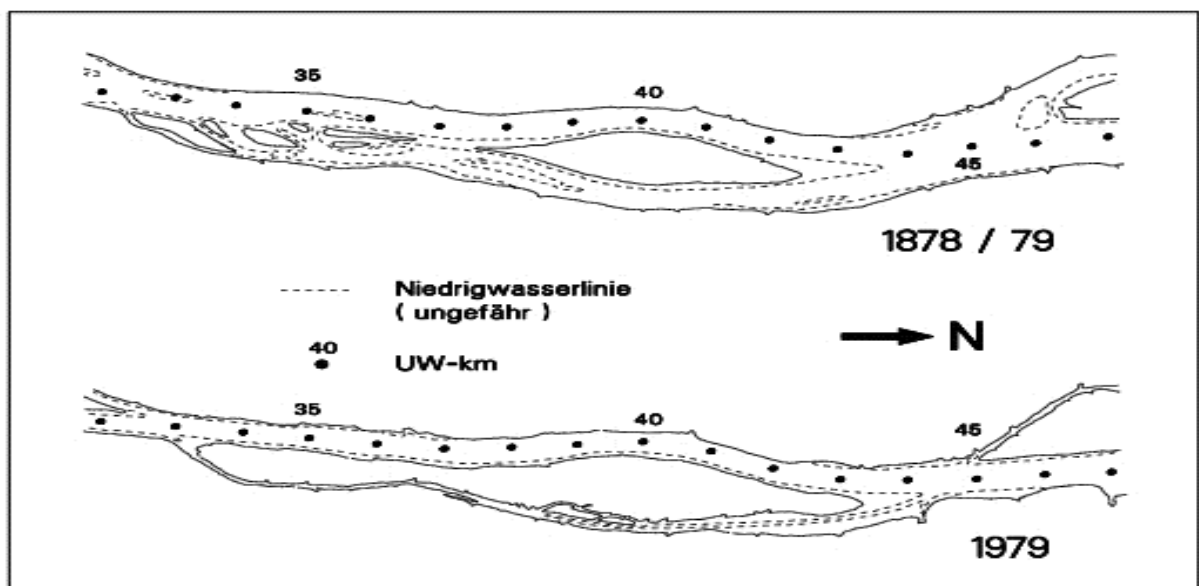


**Abb. 3.2:** Mittlere Tidehoch- (MThw) und Tideniedrigwasser (MTnw), mittlere Ebb- und Flutdauer und mittlere Eintrittszeiten des Tidehoch-(Thw) und Tideniedrigwassers (Tnw) bezogen auf Bremerhaven jeweils als Mittelwerte für 1991 und 1994 (nach den Daten aus den DEUTSCHEN GEWÄSSERKUNDLICHEN JAHRBÜCHERN, WESER-/EMSGEBIET, 1991 und 1994) und Bewegung eines Wasserteilchens für kleines und großes Oberwasser im Längsprofil der Unterweser (ermittelt mit dem numerischen Gewässergütemodell FLUSS (MÜLLER et al., 1992))

Die maximale Flutstromgeschwindigkeit im Fahrwasser nimmt von 50 cm/s bei UW-km 5 auf über 120 cm/s bei UW-km 80 zu, wobei sie zwischen UW-km 15 und 60 zwischen 80 und 100 cm/s liegt. Die maximale Ebbstromgeschwindigkeit im Fahrwasser nimmt von etwa 40 cm/s bei UW-km 5 auf etwa 130 cm/s bei UW-km 70-80 zu (Wetzel, 1987, dort Abb. 13). Die Flutstromgrenze wandert von etwa 2 km flussab vom Wehr bei kleinem Oberwasser bis etwa UW-km 10 bei sehr großem Oberwasser (etwa zweifaches MHQ; ermittelt mit dem numerischen Gewässergütemodell FLUSS, MÜLLER et al., 1992).

In der Unterweser nimmt der mittlere Durchfluss von 325 m<sup>3</sup>/s am Wehr in Bremen auf etwa 6600 m<sup>3</sup>/s bei Bremerhaven (UW-km 65,45) zu (Weserlastplan, 1982). Die periodischen Strömungsumkehr aufgrund der Gezeiten führt dazu, dass ein Wasserkörper innerhalb eines Gebietes mehrmals hin- und herwandern (Abb. 3.2) und somit mehrmals durch Abwassereinleitungen belastet werden kann. Bei kleinem Oberwasser (120 m<sup>3</sup>/s) braucht ein Wasserkörper etwa 24 Tage für die Strecke Bremen-Nordenham (Wehr bis UW-km 55), bei großem Oberwasser (1200 m<sup>3</sup>/s) reduziert sich diese Zeit auf ca. 2 Tage (GRABEMANN et al., 1990).

In der Vermischungs- oder Brackwasserzone mischen sich ausströmendes salzarmes Oberwasser und einströmendes salzreiches Meerwasser. Der Salzgehalt steigt ausgehend vom Salzgehalt des Oberwassers stromabwärts auf den Salzgehalt des Meerwassers an. Die Tideweser ist relativ gut durchmischt (BARG, 1979), d.h., die Salzgehaltsschwankungen zwischen Oberfläche und Sohle sind in der Regel klein. Die Brackwasserzone pendelt in Abhängigkeit von der Tidephase und der Oberwasserführung. Bei kleinem Oberwasser (MNQ) stößt diese Zone stromauf bis etwa Brake vor; bei großem Oberwasser (MHQ) liegt ihre landseitige Grenze etwa 25 km weiter stromab. Im Tidezyklus beträgt die Verlagerung dieser Zone zwischen Niedrigwasser und Hochwasser 10-20 km. An einem festen Ort innerhalb dieser Zone können daher größere Salzgehaltsschwankungen vorkommen.



**Abb. 3.3:** Skizzen des Unterweserabschnittes zwischen UW-km 32 und 47 (Hauptarm und Rechter Nebenarm) für 1878/1879 (nach FRANZIUS, 1888) und 1979 (nach BSH Seekarte Nr. 5)

Im salzärmeren Bereich der Vermischungszone wird eine Zone verstärkter Wassertrübung, d.h. verstärkter Ansammlung von Schwebstoffen im Wasser beobachtet (LÜNEBURG, 1953; WELLERSHAUS, 1981; GRABEMANN und KRAUSE, 1989, 1994; u.a.). Insbesondere im Gebiet der Trübungszone können individuelle Schwebstoffe viele Zyklen von Ablagerung und Wiederaufwirbelung durchlaufen, ehe sie ins Meer verfrachtet werden oder langfristig sedimentieren. Sedimentierte Schwebstoffe können jedoch unter erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten als Folge von Stürmen oder hohen Oberwasserabflüssen wieder remobilisiert werden. In der Trübungszone können Schwebstoffgehalte größer als  $1,5 \text{ kg/m}^3$  beobachtet werden, während flussauf bzw. -ab der Trübungszone die Schwebstoffgehalte in der Größenordnung von  $0,05 \text{ kg/m}^3$  liegen (GRABEMANN und KRAUSE, 1989). Von See und von oberstrom werden Schwebstoffe in das Tidegebiet transportiert. Während die Größe der Schwebstoffeinträge von See weitgehend unbekannt ist, liegen die Schwebstoffmengen, die vom Binnenland in die Unterweser eindringen, im Mittel (1970-1998) bei  $537 \cdot 10^3 \text{ t/a}$  bzw.  $17 \text{ kg/s}$  (Intschede; DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, WESER-/EMSGEBIET, 1998).

In der Unterweser liegen die Jahresmittelwerte der Wassertemperatur an den ARGE Weser Messstationen Hemelingen, Brake und Bremerhaven 1995 bis 1999 bei  $10\text{-}13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Entsprechende Jahresmittelwerte betragen für den Sauerstoffgehalt  $8\text{-}11 \text{ mg/l}$ , den Ammonium-Stickstoffgehalt  $0,1\text{-}0,4 \text{ mg/l}$ , den Nitrat-Stickstoffgehalt  $4\text{-}5 \text{ mg/l}$  und den Gesamtphosphorgehalt  $0,2 \text{ bis } 1 \text{ mg/l}$ . Tabelle 3.1 zeigt die Schwankungsbreite der 14 tägigen Mittelwerte für die genannten Parameter beispielhaft für Bremen Hemelingen (nach ARGE WESER, 1995-1999). Im Längsschnitt der Unterweser zeigen Temperatur, Sauerstoffgehalt und verschiedene Nährstoffgehalte je nach Jahreszeit mehr oder weniger ausgeprägte Minima oder Maxima (vgl. Kap. 3.3 und 5), die durch Abwärme- und Abwassereinleitungen hervorgerufen werden.

	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	T ( $^\circ\text{C}$ )	O <sub>2</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	P <sub>ges</sub> (mg/l)	o-PO <sub>4</sub> -P (mg/l)
MP	328	12,2	10,2	0,2	4,4	0,2	0,07
NP	120	0,5	5,4	0,05	2,5	0,1	0,03
HP	1500	23,7	15,5	1,4	7,8	0,6	0,18

**Tab. 3.1: Mittelwerte des Oberwassers (Q), der Temperatur (T), des Sauerstoffgehaltes (O<sub>2</sub>), des Ammonium- (NH<sub>4</sub>-N) und Nitrat-Stickstoffgehaltes (NO<sub>3</sub>-N), des Gesamt- (P<sub>ges</sub>) und des Orthophosphat-Phosphorgehaltes (o-PO<sub>4</sub>-P) für Bremen Hemelingen. MP: Mittelwert über die Jahre 1995-1999, NP bzw. HP: kleinster bzw. grösster Mittelwert einer 14 tägigen Periode (nach ARGE WESER, 1995-1999)**

## 3.2 Hydrographie der Unterweser - Entwicklung in den letzten 100 Jahren

### 3.2.1 Baumaßnahmen und morphologische Änderungen

Die Stadt Bremen, gegründet an der letzten Furt der Weser vor der Mündung in die Nordsee, entwickelte sich zum bedeutenden Seehafen. Im Laufe der Jahrhunderte wurden die Seeschiffe größer und die Fahrwasserverhältnisse schlechter (ROHDE, 1970). Mit Beginn des 16. Jahrhunderts führte die durch Abholzungen im Wesergebirge ausgelöste Erosion zu einer Erhöhung der Sand- und Kiesfracht (BUSCH et al., 1984; DIRKSEN, 1986). Die Fahrwasserverhältnisse verschlechterten sich so weit, dass Bremen erst in Vegesack (1619-1622) und ab 1827 in Bremerhaven Hafenanlagen ausbaute (WALTHER, 1956; ROHDE, 1970; FLÜGEL, 1986, 1987). Beispielsweise hatte das Fahrwasser zwischen Bremen und Vegesack im 18. Jahrhundert streckenweise eine Tiefe von 80 cm (ROHDE, 1970; BUSCH et al., 1984). Zahlreiche kleinere und größere Inseln behinderten in früheren Jahrhunderten das Abfließen hoher Oberwassermengen aus der Mittelweser. Daher traten in Bremen bei hohen Abflüssen Überschwemmungen auf (FLÜGEL, 1986, 1987).

Da Bremen seine Position als Seehandelsplatz behalten wollte, sollte die Unterweser nach Plänen von FRANZIUS (1888) für Seeschiffe wieder schiffbar gemacht werden (ROHDE, 1970; DIRKSEN, 1986; FLÜGEL, 1986, 1987; u.a.). Flusskrümmungen, Stromspaltungen, Engstellen und Barrenbildungen behinderten das Fortschreiten der Tidewelle und verringerten die natürliche Räumkraft des Stromes. Um der Tidewelle ein möglichst glattes Ein- und Auslaufen zu ermöglichen, entstand ein sich nach stromauf verjüngender Mündungstrichter. Zur Begradigung des Flusslaufes wurden Krümmungen abgeflacht, Stromspaltungen durch Abdämmung oder Einschränkung der Nebenarme beseitigt, und das Fahrwasser durch Ausbaggerungen vertieft und verbreitert (FRANZIUS, 1888; PLATE, 1924; WALTHER, 1956; ROHDE, 1970; DIRKSEN, 1986; FLÜGEL, 1987). Die beiden größeren heute noch vorhandenen Nebenarme dienen als Flutspeicherraum: in ihrem oberen Teil nur durch einen schmalen Kanal mit dem Hauptstrom verbunden und flußab trichterförmig offen, nehmen sie bei Flut einen großen Wasserkörper auf (BUSCH et al., 1984). Die Baumaßnahmen erleichterten wie geplant das Eindringen der Tidewelle. Die obere Tidegrenze verschob sich weiter flußaufwärts. In Bremen-Hemelingen wurde daher zwischen 1906 und 1913 eine Wehranlage errichtet (WALTHER, 1954).

Aufgrund der steigenden Schiffsgößen wurden weitere Baumaßnahmen (Tab. 3.2) durchgeführt, die zu Verbreiterungen und Vertiefungen, insbesondere flussauf von Brake, führten (WALTHER, 1954, 1956; ROHDE, 1970; RAMACHER, 1974; DIRKSEN, 1986; FLÜGEL, 1986; WETZEL, 1987; u.a.). Im Zuge der Baumaßnahmen wurden zahlreiche Strombauwerke und Ufersicherungen errichtet (WALTHER, 1956; FLÜGEL, 1986; WETZEL, 1987). Die Abbildungen 3.4 und 3.5 zeigen die Veränderungen der Uferlinie und den Verlust von Flachwasserbereichen sowie Veränderungen der Sohle und der Abflussquerschnitte zwischen 1888 und 1985. Neben den Ausbauten in der Unterweser zur Vertiefung und Verbreiterung des Fahrwassers wurden die bremischen und niedersächsischen Häfen erweitert (FLÜGEL, 1986, 1987; OHLING, 1987).

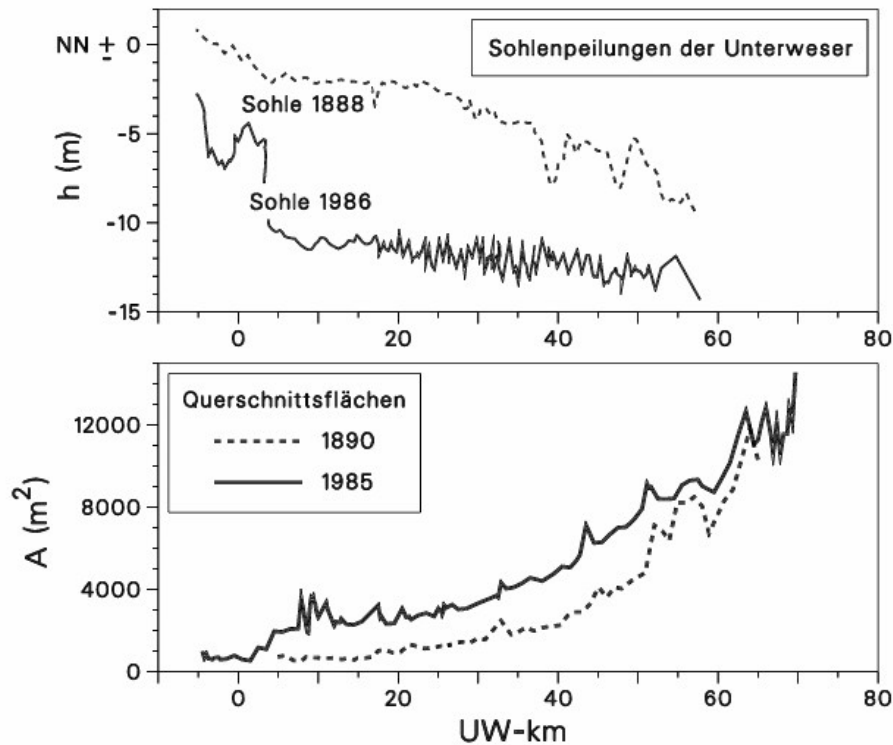
<b>Ausbau</b>	<b>Zeitraum</b>	<b>Art des Ausbaus und erreichter Tiefgang für Schiffe</b>
5-m-Ausbau	1887 - 1895	Begradigung des Flusslaufes, Fahrwasservertiefung (Tiefgang 5 m)
Wehr in Bremen	1906 - 1913	Herstellung des Staus 1911
7-m-Ausbau	1913 - 1916	Fahrwasservertiefung (Tiefgang 7 m)
Erweiterter 7-m-Ausbau	1921 - 1924	Ausbau des Fahrwassers hauptsächlich in der oberen Unterweser
8-m-Ausbau	1925 - 1929	Fahrwasservertiefung (Tiefgang 8 m), Verbreiterung der Fahrrinne oberhalb von Vegesack
8,7-m-Ausbau	1953 - 1959	Fahrwasservertiefung (Tiefgang 9,6 m)
9-m-Ausbau	1972 - 1979	Fahrwasservertiefung (Tiefgang 10,7 m, bis Nordenham 13 m Tiefgang)

**Tab. 3.2: Baumaßnahmen in der Unterweser. Den Meterangaben bei den Bezeichnungen für die verschiedenen Ausbauten liegen verschiedene Bezugsniveaus zugrunde**

### 3.2.2 Veränderungen der Ufer

Der Ausbau der Weser hatte im Zusammenwirken mit der Verschlechterung der Gewässergüte tiefgreifende Folgen für Fauna und Flora. Bei der folgenden Beschreibung der Änderungen zur Uferlänge und -beschaffenheit werden Folgen für die **Biozönose** nur gestreift.

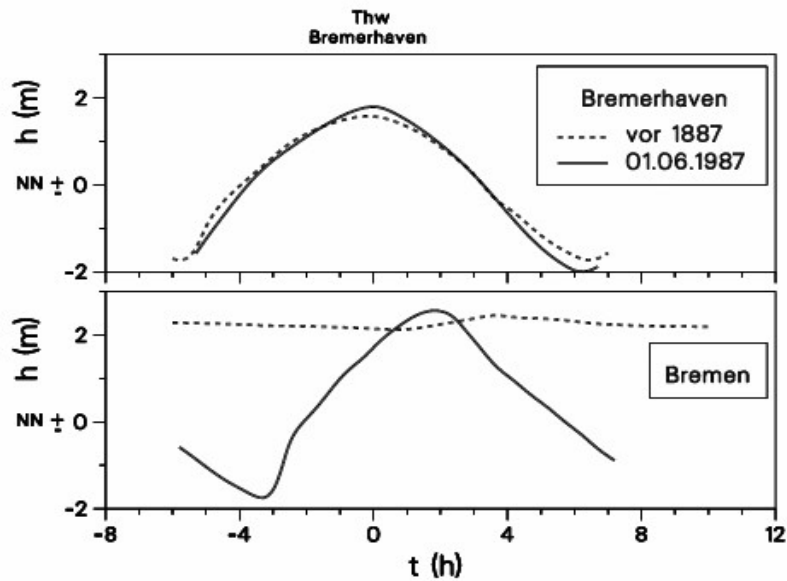
In der Unterweser wurden im Zuge der Ausbauten Alt- und Nebenarme, Untiefen und Sände beseitigt. Dadurch gingen Uferlänge, Wasserfläche und Stillwasserbereiche verloren. Die Uferlinie ist heute um ca. 100 km kürzer. Ein Verlust dieser Gebiete bedeutet z.B. für die Fischfauna den Verlust ihrer Nahrungs-, Ruhe- und Versteckplätze. Insbesondere Jungfische und Laich brauchen diese ruhigen, vegetationsreichen Zonen zum Überleben (BUSCH et al., 1984; HAESLOOP et al., 1989).



**Abb. 3.4:** Sohlenpeilungen der Unterweser 1888 und 1986 (Daten aus DIRKSEN, 1986) und Entwicklung der Querschnittsflächen in der Unterweser (Daten für 1890 aus STRÖHMER, 1963; Daten für 1985: Wasser- und Schifffahrtsamt Bremen)

Aufgrund des Sogs und Schwall der passierenden Schiffe, des steigenden Tidenhubes (vgl. 3.2.3.1) und der angestiegenen Strömungsgeschwindigkeit mussten viele Uferbereiche durch Verbau geschützt werden. Hierdurch gingen weitere Nahrungs- und Versteckplätze verloren. Heute befinden sich nur noch etwa 40 % der Uferlinie in naturnahem Zustand (linkes Ufer zwischen Farge und Elsfleth und rechtes Ufer zwischen Brake und Nordenham). 60 % wurden auf verschiedene Arten befestigt (hauptsächlich die Strecke zwischen dem Wehr und Farge und die Umgebung der Hafenstädte Elsfleth, Brake, Nordenham und Bremerhaven; BUSCH et al., 1984; SCHUCHARDT et al., 1984; HAESLOOP et al., 1989). Die Uferbereiche, die heute noch Vegetation aufweisen, werden mechanisch durch den Sog und Schwall der passierenden Schiffe geschädigt (BUSCH et al., 1984).





**Abb. 3.5:** Tidekurven an den Pegeln Bremerhaven und Bremen (Daten für 1887 aus WALTHER, 1954; Daten für 1987: Wasser- und Schifffahrtsamt Bremen)

Die zur Stromlenkung errichteten Buhnen schaffen zusätzlichen Uferbereich und zwischen ihnen existieren Bereiche kleiner Strömungsgeschwindigkeit, die in geringem Umfang die verlorengegangenen Ruheplätze ersetzen können. Die Buhnen zerstückeln jedoch die Schilfgürtel. Zudem sind sie oftmals durch Steinpflasterungen oder -schüttungen geschützt, so dass ihr ökologischer Wert gering ist (BUSCH et al., 1984). Aufgrund des angestiegenen Tidenhubes (vgl. 3.2.3.1) sind ehemalige Flachwassergebiete heute dem Mesolitoral zuzuordnen. Diese tidebeeinflussten Uferregionen, die im Wechsel trocken fallen und überflutet werden, bilden einen extremen Lebensraum und können nur von daran angepassten Lebewesen besiedelt werden (BUSCH et al., 1984).

Ein großer Teil der biologischen Produktion und der Selbstreinigungsprozesse findet in ufernahen Flachwasserbereichen statt (SCHUCHARDT et al., 1984). Die Alt- und Nebenarme besaßen aufgrund ihrer Form und Verlandungszonen lange Uferlinien hoher Produktivität. Außerdem werden dort Nährstoffe durch die Vegetation aufgenommen und sind daher dem Wasser entzogen. Durch das Abtrennen und Auffüllen dieser Arme sinkt auch die Produktivität des Hauptstromes und ein Teil der Selbstreinigungskraft des Flusssystemes geht verloren (BUSCH et al., 1984). Des Weiteren ist im Sauerstoffkreislauf die Sauerstoff-Regenerierung stark von der Belüftung durch die Wasseroberfläche abhängig. Diese ist wiederum von den durch die Ausbauten veränderten Gewässeroberfläche, Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit abhängig (KÜHLE et al., 1989; MÜLLER et al., 1992). Aufgrund der im Laufe des 20. Jahrhunderts gestiegenen Nutzung der Weser als Vorfluter und der daraus resultierenden Veränderungen der Gewässergüte ist der Beitrag der Baumaßnahmen auf die Gewässergütebeeinträchtigungen nicht abzuschätzen.

### 3.2.3 Auswirkungen der Baumaßnahmen auf die Hydrographie

#### 3.2.3.1 Wasserstände und Tideablauf

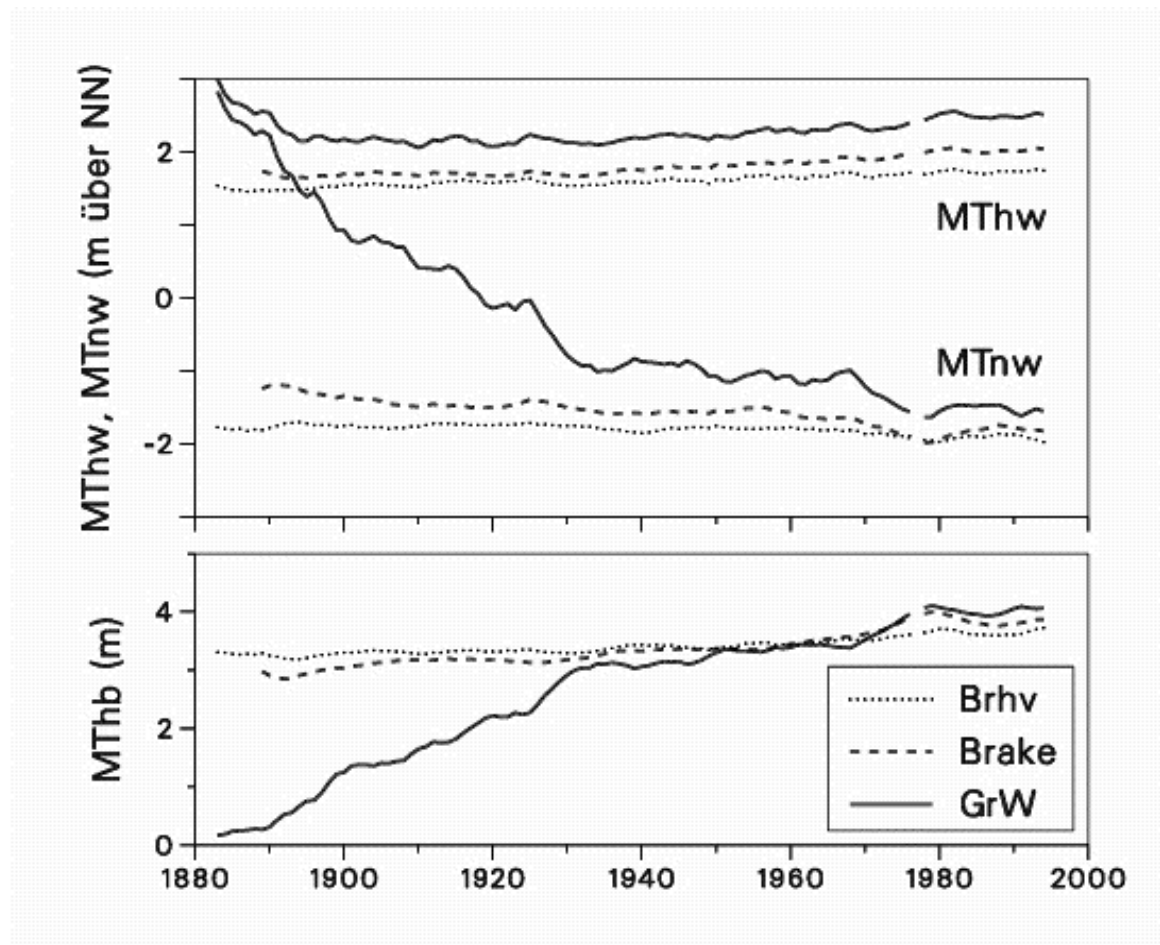
Als Folge der Baumaßnahmen änderten sich die Tideabläufe beträchtlich (WALTHER, 1954; WITTMER, 1958; ROHDE, 1970; FLÜGEL, 1986; WETZEL, 1987; u.a.). Die Fortschrittdauer der Tidewelle von Bremerhaven nach Bremen hat sich um etwa 2h bei Hochwasser und um etwa 4h bei Niedrigwasser verkürzt. Die Flutdauer in Bremen hat sich um etwa 2h 20 min verlängert und die Ebbdauer entsprechend verkürzt (Tab. 3.3):

	1887		1994	
<b>Fortschrittdauer der Tide von Bremerhaven bis Bremen (h:min)</b>	<b>Thw</b>	3:52	1:46	
	<b>Tnw</b>	6:59	2:55	
<b>Flutdauer (h:min)</b>	<b>Brhv</b>	<b>Bremen</b>	<b>Brhv</b>	<b>Bremen</b>
	5:57	2:50	6:07	5:11
<b>Ebbdauer (h:min)</b>	6:28	9:35	6:18	7:14

**Tab. 3.3: Fortschrittdauer der Tidewelle von Bremerhaven nach Bremen sowie Flut- und Ebbdauer in Bremerhaven (Brhv) und Bremen (Daten für 1887 aus WALTHER, 1954; Daten für 1994 (Jahresmittelwerte) nach den Hoch- und Niedrigwasserzeiten aus dem DEUTSCHEN GEWÄSSERKUNDLICHEN JAHRBUCH, WESER-/EMS GEBIET)**

Die mittleren Tidehochwasser änderten sich in der gesamten Unterweser geringfügiger, ebenso die mittleren Tideniedrigwasser stromab von Brake. Stromauf der Huntemündung sanken die mittleren Tideniedrigwasser dagegen stark ab, was zu einer deutlichen Zunahme des mittleren Tidenhubes führte (WALTHER, 1954; WETZEL, 1987; u.a.). In Bremen ist der Tidenhub von ehemals etwa 20 cm (Abb. 3.6) auf etwa 4 m angestiegen.

Zwar ist der größte Teil dieser Änderungen auf die eigentlichen Unterweserausbauten zurückzuführen, jedoch spielen auch andere Faktoren eine Rolle. Am Pegel Oslebshausen (UW-km 8,4) zum Beispiel betrug die Differenz des mittleren Tideniedrigwassers zwischen 1968/72 und 1976/80 0,35 m. Etwa 2/3 dieser Differenz sind wahrscheinlich auf den 9-m-Ausbau in der Unterweser zurückzuführen. Der Rest ist etwa zu gleichen Teilen den Auswirkungen des 12-m-Ausbaus in der Außenweser, flussbaulichen Maßnahmen und der Vergrößerung der Eingangstidewelle aus der Nordsee zuzuschreiben (WETZEL, 1987). Eine verstärkte Veränderung der Wasserstände in der Nordsee ist seit den 60/70er Jahren zu beobachten (ROHDE, 1982; SIEFERT, 1982; FÜHRBÖTER, 1986a, 1986b).



**Abb. 3.6:** Übergreifende Fünfjahresmittel des mittleren Tidehochwassers (MThw), des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) und des mittleren Tidenhubes (MThb) für Bremen Große Weserbrücke (GrW), Brake und Bremerhaven (Brhv Doppelschleuse bzw. Alter Leuchtturm) zwischen 1880 und 2000 (bis 1976 nach Daten des Wasser- und Schifffahrtsamtes Bremen, vgl. GRABEMANN et al., 1983; ab 1978 nach Daten aus den DEUTSCHEN GEWÄSSERKUNDLICHEN JAHRBÜCHERN, Weser-/Emsgebiet, Abflussjahre 1976-1996)

### 3.2.3.2 Sturmfluten und hohe Oberwasserabflüsse

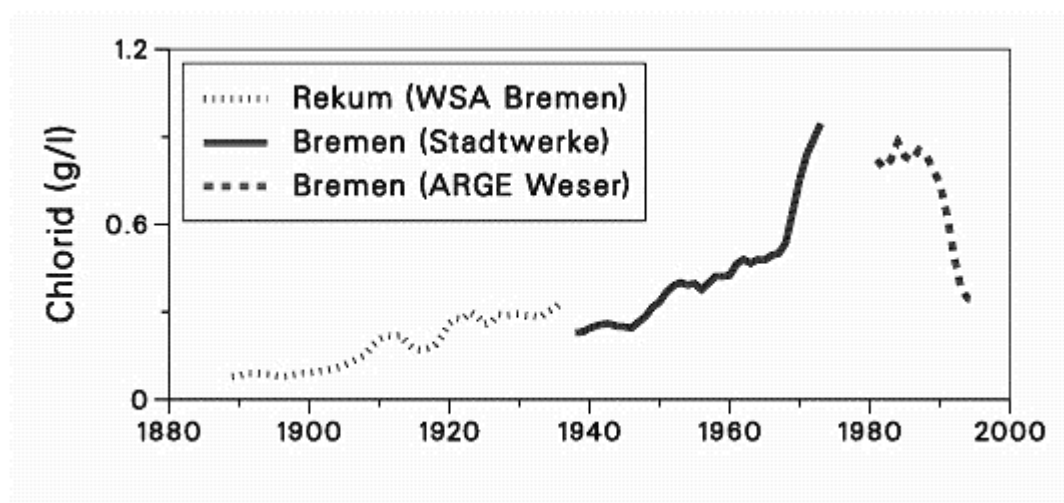
Als Folge der Baumaßnahmen wird die einlaufende Tidewelle heute geringer morphologisch gedämpft. Des weiteren sind in den 70er Jahren Sturmflutsperrwerke in den Nebenflüssen Ochtum, Lesum und Hunte (BLIESENER und LÜNINGHÖNER, 1978) in Betrieb gegangen. Daher laufen Sturmfluten heute höher auf (DIETZE, 1983). Dagegen fließen große, aus der Mittelweser kommende Oberwassermengen heute besser ab (DIETZE, 1983).

### 3.2.3.3 Brackwasserzone

Über das Bewässerungssystem und den Butjadinger Zuwässerungskanal werden in der Wesermarsch weite Landstriche mit Wasser versorgt. Daher ist das Vordringen des salzreichen Meerwassers und damit die Position der Brackwasserzone von Bedeutung.

Trotz des ungehinderteren Eindringens der Tidewelle wurde nach dem 5-m-Ausbau - entgegen den Befürchtungen - eine Verschiebung der Brackwasserzone flussabwärts beobachtet (PLATE, 1924; HENSEN, 1953; WALTHER, 1954). Diese Verschiebung wurde durch die Verminderung des Flutraumes verursacht. Am oberen Ende geschlossene Nebenarme und zwischen Tideniedrigwasser und Tidehochwasser liegende Flächen verlandeten oder wurden mit Baggergut aufgefüllt. Erst nach Auflandung der Altarme und Außendeichsflächen über das mittlere Tidehochwasser kam es zu einer Erhöhung der Tidewassermenge. In den 20er Jahren wanderte die Brackwasserzone wieder flussaufwärts (HENSEN, 1953; WALTHER, 1954).

In den 60er und besonders in den 70er Jahren ist eine Verschiebung der Brackwasserzone flussaufwärts durch einen starken Salzgehaltsanstieg an den Messstellen zu beobachten. Dieser Salzgehaltsanstieg ist nicht in erster Linie durch die Zunahme des Salzgehaltes im Weser oberwasser (Abb. 3.7) und nicht durch Salzgehaltsänderungen im eindringenden Nordseewasser begründet (GRABEMANN et al., 1983). Der Salzgehalt in der Deutschen Bucht zeigt keinen langfristigen Trend; allerdings schwankt er im Rhythmus von 4 bis 6 Jahren (BECKER und KOHNKE, 1978; Hill und DICKSON, 1978). Die obengenannte Verschiebung der Brackwasserzone wird durch verstärkt eingemischtes Nordseewasser verursacht. Dieses ist jedoch nicht nur auf die durch die Ausbauten veränderten Wasserstände zurückzuführen, sondern wurde auch - allerdings zu einem geringeren Teil - durch die Änderungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste beeinflusst.



**Abb. 3.7:** Entwicklung der Chloridkonzentration im Oberwasser (übergreifende Fünfjahresmittel, nach Daten des Wasser- und Schifffahrtsamtes Bremen (Rekum, UW-km 28,8), der Stadtwerke Bremen und der ARGE Weser (Bremen-Hemelingen))

### 3.3 Gewässergüte der Unterweser – Ein Überblick in Bezug auf Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt

Bis Anfang des 20. Jahrhunderts sorgten kommunale und industrielle Abwässer nur punktuell für Probleme, da die Bevölkerungsdichte im Wesertal relativ gering war und die Entsorgung der Abwässer in den Städten über Sickergruben erfolgte. Im Zuge des Bevölkerungswachstums, der Intensivierung der Landwirtschaft und der Industrialisierung nahm die Wasserverschmutzung rapide zu, da unter anderem der

Ausbau von Abwasserkanalnetzen nach dem zweiten Weltkrieg nicht immer mit dem Bau von Kläranlagen einherging. 1956/57 waren ca. 75 % der Haushalte im Bereich der Weser an eine öffentliche Kanalisation angeschlossen, aber nur knapp 25 % der Abwassermenge wurden vor Einleitung in die Flüsse mechanisch-biologisch geklärt. Zu einem Stillstand in der negativen Entwicklung der Gewässergüte der Weser kam es erst in den 70er Jahren. Massive Investitionen führten in den 80er Jahren zu einer Verbesserung (ALBRECHT und KIRCHHOFF, 1987).

Die kommunalen und industriellen Abwässer, die nach ihrer Behandlung mit unterschiedlicher Restbelastung in die Weser und ihre Nebenflüsse eingeleitet werden, beeinträchtigen den Sauerstoffhaushalt im Fluss und führen zu einer Erhöhung der Nähr- und Schadstoffgehalte. Insbesondere letztere können sich im Sediment sowie in Flora und Fauna anreichern. Kühlwassereinleitungen stören unter anderem den von der Temperatur beeinflussten Sauerstoffhaushalt des Flusses; die zur Entnahme des Kühlwassers vorgeschalteten Rechen- und Siebanlagen können die Fauna, insbesondere Laich und Jungfische zerstören. Durch Abwassereinleitungen der an der Weser stehenden Kernkraftwerke wird die Radioaktivität des Weserwassers beeinflusst. Wasserentnahmen, u.a. durch die Kraftwerke und zur Speisung des Mittelkanals, können bei niedrigem Oberwasserabfluss die Gewässergüte der Weser verschlechtern. Das Niederschlagswasser führt der Weser aus der Luft gelöste, von der Erdoberfläche abgespülte Stoffe und Stoffe aus dem Kanalnetz zu (WESERLASTPLAN, 1982).

Im Folgenden werden die Entwicklung des Salzgehaltes, des Sauerstoffgehaltes und der Nährstoffe beispielhaft gezeigt bzw. der heutige Zustand beschrieben.

In den deutschen Binnengewässern liegt der natürliche Salzgehalt normalerweise unter 100 mg/l. Das Oberwasser der Weser weist jedoch wesentlich höhere Salzgehalte auf. Diese zunehmende Versalzung des Oberwassers der Weser (Abb. 3.7) wurde durch die im Laufe dieses Jahrhunderts angestiegene Einleitung von salzreichen Abwässern aus der Kali-Industrie hervorgerufen (Tab. 3.4).

Die Versalzung führte zu einer Veränderung der Biozöosen in Werra, Ober- und Mittelweser (VEH, 1975; HULSCH und VEH, 1978; NEUMANN et al., 1990). In der Unterweser, besonders flussab von Brake, ist diese Versalzung von untergeordneter Bedeutung, da sich hier schon der Einfluss des eindringenden Meerwassers bemerkbar macht (HAESLOOP und SCHIRMER, 1990). Seit Anfang der 90er Jahre geht die Versalzung aufgrund von Betriebsstillegungen und Sanierungen verbleibender Produktionsstätten im ostdeutschen Kali-Revier langsam zurück (Wassergütestelle Weser, 1996, "Die Chloridproblematik an Werra und Weser"). Kurzfristige große Schwankungen der Salzkonzentration schaffen jedoch weiterhin erhebliche Probleme für die Fauna (L. REIDT, "Wo die Salzwelle rauscht", Die Zeit vom 20.08.1993).

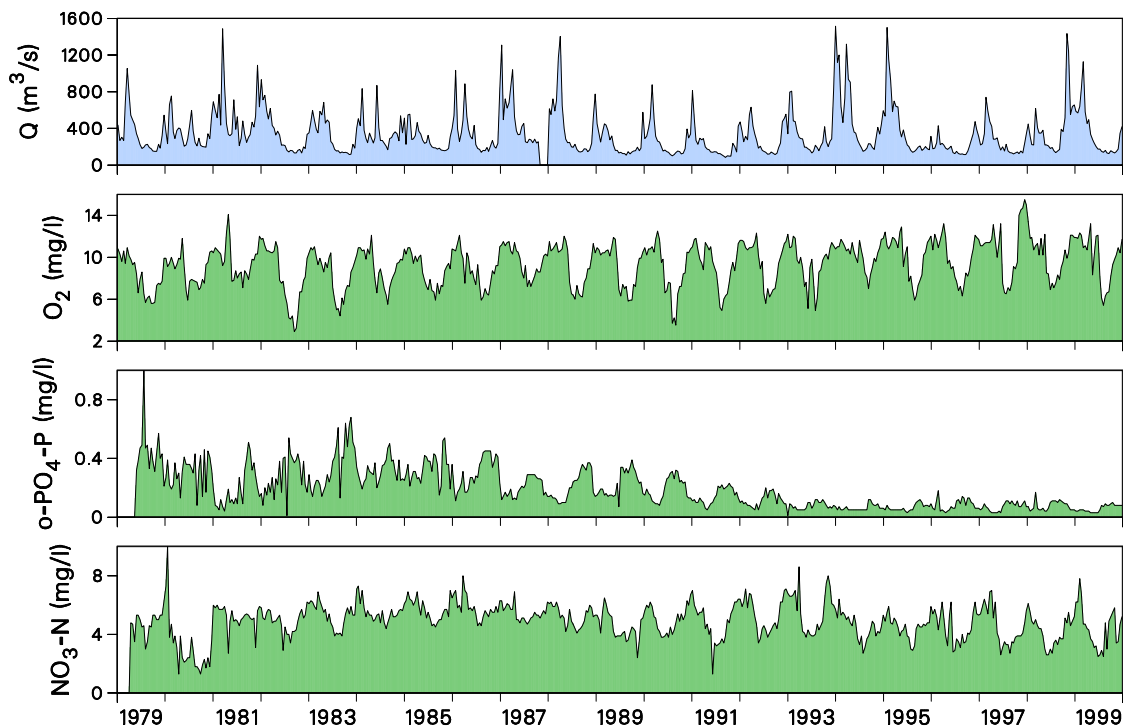
Die Versalzung des Weserwassers und die damit verbundene erhöhte Salzkorrosion hat zur Folge, dass das Flusswasser als Brauchwasser nur bedingt nutzbar ist. 1983 musste in Bremen die seit 1873 bestehende Nutzung des Weserwassers zur Trinkwasserversorgung eingestellt werden (EBERHARDT, 1975; EBERHARDT in HAUTAU et al., 1987).

<b>1856</b>	Entdeckung von Steinsalzvorkommen in Thüringen und Hessen
<b>1861</b>	Beginn des Salzbergbaus und Errichtung der ersten Fabrik
<b>1911</b>	Trinkwassernotstand in Bremen aufgrund der hohen Salzbelastung des Flusses
<b>1913</b>	Staatsvertrag Preußens mit den Thüringischen Staaten: Gründung einer Kaliabwässer-Kommission in Kassel mit der Aufgabe, Regelungen für die Salzwassereinleiter zu treffen. Die Einleitungsmengen seien so an die Wasserführungen der Flüsse anzupassen, dass 842,5 mg/l Cl <sup>-</sup> mit 48,4° dH in der Werra bei Gerstungen und 250 mg/l Cl <sup>-</sup> mit 20° dH in Bremen nicht überschritten werden
<b>1924</b>	Erhöhung der Grenzwerte bei Gerstungen auf 1.781 mg/l Cl <sup>-</sup> und 63,1° dH für die Werra und in Bremen für die Weser 350 mg/l Cl <sup>-</sup> mit 23° dH
<b>um 1925</b>	Zunahme der Düngesalzproduktion und Beginn der Abwasserversenkung in den Untergrund
<b>1942</b>	Im 2. Weltkrieg werden vorübergehend die Grenzwerte wie folgt festgelegt:- Gerstungen 2.500 mg/l Cl <sup>-</sup> mit 50° dH, - Bremen 350 mg/l Cl <sup>-</sup> mit 23° dH
<b>1947-1951</b>	Neue Abkommen über Salzkonzentrationen und -frachten im Fluss: 62% der Fracht aus den Thüringischen Werken (DDR), 38% aus den hessischen (BRD)
<b>1949-1950</b>	Auftreten von massenhaftem Fischsterben in der Werra
<b>Seit 1952</b>	stete Zunahme der Salzableitungen durch DDR-Fabriken
<b>1968</b>	Thüringische Kaliwerke stoppen die Versenkung von Salzabwässern über Schluckbrunnen in den Plattendolomit, da die Trinkwasserbrunnen der näheren Umgebung Salzschäden aufwiesen. Folge: ein weiteres Ansteigen der Salzfrachten in Werra und Weser
<b>1976</b>	in der Werra wurden Spitzenwerte von 40.000 mg/l Cl <sup>-</sup> erreicht, die jährliche Durchschnittskonzentration beträgt 17.000 mg/l Cl <sup>-</sup>
<b>Seit 1980</b>	erneute Verhandlungsrunden der BRD mit der DDR um eine Frachtreduzierung
<b>Seit 1982</b>	trotz der vorhandenen technischen Möglichkeiten zur Salzreduzierung kommen die bilateralen Verhandlungen zu keinem Ergebnis
<b>1987</b>	die Einführung neuer Technologien in den DDR-Werken scheitert am westdeutschen Patentinhaber des ESTA-Verfahrens
<b>1989</b>	Reduzierung der Salzfrachten durch Produktpausen- und Minderungen
<b>ab 1990</b>	die ostdeutsche Kali-Industrie kämpft um das Überleben der thüringischen Werke, erste Produktionsstättenstillegungen führen zu einer weiteren Salzfrachtabnahme, Stufenplan zur Sanierung der thüringischen Salzabwassereinleitungen
<b>1992</b>	Verwaltungsabkommen über die Gewährung von Zuwendungen des Bundes und der Länder für Maßnahmen zur Reduzierung der Werra-Weser-Versalzung, Ziel dieses Konzeptes ist eine Reduzierung der thüringischen Chlorideinleitungen auf 40 kg/s
<b>1993</b>	Veränderungen des Konzeptes durch die Schließung des Werkes Merkers, neu aufgestelltes Ziel ist eine Frachtenreduzierung für die thüringischen Werke auf 18 kg/s Cl, Forderung der ARGE Weser zu Konzentrationsbegrenzungen in Werra und Weser unabhängig von Einleitungsquoten

**Tab. 3.4: Chronologie der Versalzung von Werra und Weser aus Abwässern der Kaliindustrie (erweitert nach BUSCH et al., 1989)**

Für das bei Bremen-Hemelingen in die Unterweser einströmende Weserwasser zeigen die seit 1979 aufgezeichneten kontinuierlichen Zeitreihen (ARGE WESER, 1979-1999) für den Sauerstoffgehalt und die verschiedenen Nährstoffgehalte unterschiedlich ausgeprägte Entwicklungen (Abb. 3.8). Biologische Ab-

bau- und Umwandlungsprozesse hängen von der Jahreszeit und der Wassertemperatur ab. Unterschiedliche Oberwasserabflüsse sorgen für unterschiedliche Verdünnungen eingeleiteter Substanzen sowie für unterschiedliche Verweilzeiten (und damit Abbaustrecken in Flusslängsrichtung) in Ober- und Mittelweser. Ein Wasserkörper braucht beispielsweise 5,8 d bei MNQ, 4,9 d bei MQ bzw. 2,6 d bei MHQ, um Ober- und Mittelweser zu durchfließen (WESERLASTPLAN, 1982, Abb. A9). Die aus den obengenannten Ursachen resultierenden ausgeprägten jahreszeitlichen Schwankungen der Sauerstoff- und Nährstoffkonzentrationen bei Bremen-Hemelingen überlagern mögliche langfristige Trends, hervorgerufen durch Maßnahmen, die zur Verbesserung der Gewässergüte in der Binnenweser durchgeführt wurden.



**Abb. 3.8:** Zeitreihen des Oberwasserabflusses (Q), des Sauerstoffgehaltes ( $O_2$ ), des Phosphat-Phosphor- ( $o\text{-PO}_4\text{-P}$ ) und Nitrat-Stickstoffgehaltes ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) für Bremen-Hemelingen von 1979 bis 1999 (14 tägige Mittelwerte, ARGE WESER 1979 bis 1999)

Bei Hemelingen ist ein schwacher positiver Trend im mittleren Sauerstoffgehalt (14-tägige Mittelwerte) zwischen 1979 und 1999 (Sauerstoffzunahme von etwa 2 mg/l in 21 Jahren; ermittelt aus den Daten in den ARGE Weser Zahlentafeln) zu erkennen, der den Bau/Ausbau von Kläranlagen in Ober- und Mittelweser widerspiegelt. Seit Inkrafttreten des Waschmittelgesetzes von 1975 sind die Phosphatgehalte in der Weser rückläufig. Das Abwasserabgabengesetz verstärkte diese Entwicklung (ALBRECHT und KIRCHHOFF, 1987). Die Ortho-Phosphat-Phosphorgehalte bzw. -frachten nahmen beispielsweise von etwa 0,3 mg/l bzw. 90 kg/s in der ersten Hälfte der 1980er Jahre (Mittelwerte 1980-1984) auf kleiner 0,1 mg/l bzw. etwa 22 kg/s in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre (Mittelwerte 1995-1999) ab (ermittelt aus den Daten in den ARGE Weser Zahlentafeln). Beim Nitratgehalt fand eine derartige Trendwende bis heute nicht statt. Die Entwicklung folgte dem Anstieg des Stickstoffverbrauchs in der Landwirtschaft, 1959 waren es ca. 40 kg/ha, 1983 bereits ca. 120 kg/ha (ALBRECHT und KIRCHHOFF, 1987). Für die 1980er und

1990er Jahre sind auf der Basis der ARGE Weser Daten keine signifikanten Trends für die Nitratgehalte bzw. -frachten zu erkennen. Die 5-Jahresmittelwerte waren 1995-1999 mit 4,4 mg/l bzw. 1700 kg/s nur wenig kleiner als 1980-1984 mit 4,8 mg/l bzw. 1700 kg/s.

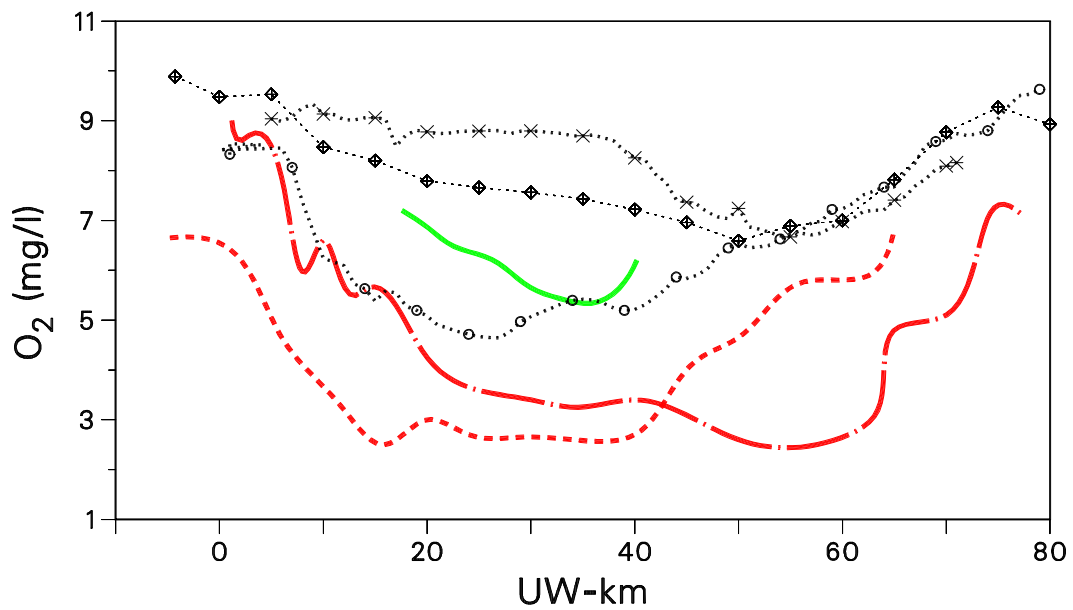
Im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) sind die Sauerstoffgehalte bei Hemelingen aufgrund der eingeschränkten biochemischen Abbau- und Umwandlungsprozesse und des höheren Oberwasserabflusses höher als im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Aufgrund der eingeschränkten Nitrifikation sind die Ammoniumgehalte im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr, wobei große Oberwasserabflüsse auch im Winter kleinere Ammoniumgehalte verursachen können. Die Ammoniumfrachten sind ebenfalls im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr. Da Nitrat im Gegensatz zum Phosphat im Erdreich nicht sehr fest gebunden ist (Weserlastplan, 1982), sind bei kleineren Oberwasserabflüssen die Auswaschungen und Abspülungen landwirtschaftlich genutzter (d.h. Nitratgedüngter) Flächen und damit die Nitratgehalte im Fluß kleiner. Aus diesem Grund sind sowohl die Nitratgehalte als auch die -frachten bei Hemelingen im Winterhalbjahr im Mittel höher als im Sommerhalbjahr. Die Phosphatgehalte sind im Winterhalbjahr im Mittel aufgrund der stärkeren Verdünnung der entsprechenden Einleitungen durch größere Oberwasserabflüsse kleiner als im Sommerhalbjahr.

Neben den Jahresgängen zeigen die Sauerstoff- und Nährstoffgehalte im Längsprofil der Unterweser je nach Jahreszeit unterschiedlich ausgeprägte Minima bzw. Maxima. Diese Extreme werden durch Abwassereinleitungen in die Unterweser und/oder durch Abbau und Umwandlung der eingeleiteten Stoffe sowie der Stoffe, die aus Ober- und Mittelweser in die Unterweser transportiert werden, verursacht.

Ein Sauerstoffminimum ist hauptsächlich in wärmeren Monaten im Längsprofil der Unterweser zu beobachten (Abb. 3.9). Stromabwärts nimmt der Sauerstoffgehalt durch Beimischung des vom Meer her eindringenden sauerstoffreicheren Meerwassers wieder zu (GRABEMANN et al., 1993). Im Gebiet der Trübungszone kann es aufgrund der Partikel- und damit Bakterienanreicherung zu einer verstärkten Sauerstoffzehrung kommen (SCHUCHARDT et al., 1989).

Bereits im Sommer 1929 konnte ein Sauerstoffminimum mit minimalen Sauerstoffgehalten um 5,5 mg/l beobachtet werden (SCHRÄDER, 1941). In den 1960er, 1970er und Anfang der 1980er Jahre wurden in warmen, abflussarmen Zeiten Sauerstoffminima mit Konzentrationen unter 4 mg/l beobachtet (ZEITZ, 1975; SCHRÖDER et al., 1983). Seit Mitte der 1980er Jahre ist das Sauerstoffminimum weniger ausgeprägt (Abb. 3.8). Diese Verbesserung des Sauerstoffgehaltes lässt sich auf die signifikant verringerten Gehalte an BSB- und organisch gebundenem Stickstoff im Abwasser der Kläranlage Seehausen nach Einbau der biologischen Stufe zurückführen (MÜLLER et al., 1990; WOHLBEN in HAUTAU et al., 1987; SCHUCHARDT et al., 1989; GRABEMANN et al., 1993).



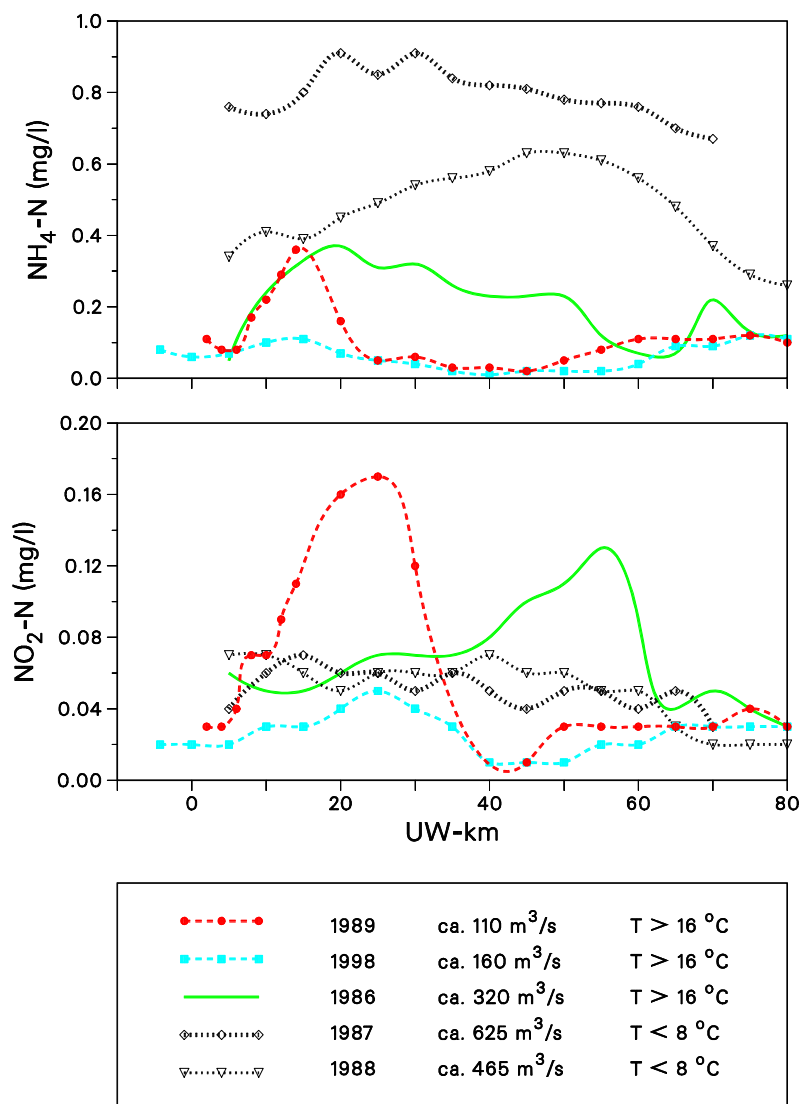


—	1929	ca. HW	ca. 120 m <sup>3</sup> /s	(Schröder, 1941)
- - -	1964	Ebbe	ca. 130 m <sup>3</sup> /s	(Zietz, 1975)
- · -	1978	ca. HW	ca. 260 m <sup>3</sup> /s	(Wöbken/Kunz, 1980)
× ··· × ··· ×	1987	Ebbe	ca. 280 m <sup>3</sup> /s	(SBU, BWE)
o ··· o ··· o	1991	Ebbe	ca. 120 m <sup>3</sup> /s	(SBU, BWE)
◊ ··· ◊ ··· ◊	1998	Ebbe	ca. 160 m <sup>3</sup> /s	(SBU, BWE)

**Abb. 3.9 Sauerstofflängsprofile in der Unterweser im Sommer bei Oberwasserabflüssen kleiner 280 m<sup>3</sup>/s zwischen 1929 und 1998 (SBU: Senator für Bau und Umwelt Bremen, BWE: Bezirksregierung Weser/Ems – Aussenstelle Brake)**

Im Winter ist die fluviale Ammoniumfracht vergleichsweise hoch. Diese Fracht wird durch Abwassereinleitungen in die Unterweser weiter erhöht und zur Nordsee transportiert. In der wärmeren Jahreszeit, wenn die fluviale Ammoniumfracht niedrig ist, verursachen Abwassereinleitungen, hauptsächlich durch die Bremer Kläranlage Seehausen, ein Ammoniummaximum in der Regel im Bereich UW-km 10 bis 40. Aufgrund der Nitrifikation wird im Bereich UW-km 20 bis 50 ein Nitritmaximum beobachtet (Abb. 3.10; GRABEMANN et al., 1993). Diese Nährstoffmaxima sind in der Regel desto ausgeprägter und desto weiter flussauf zu beobachten, je kleiner der Oberwasserabfluss, d.h. je länger die Verweilzeit eines Wasserkörpers in der Unterweser ist (vgl. Abb. 3.2). Etwa seit Mitte der 1990er Jahre ist das Ammoniummaximum wegen der signifikanten Reduzierung der Ammoniumeinleitungen weniger stark ausgeprägt (Abb. 3.10; vgl. Kap. 3.4 und 5).

Die Längsprofile des Nitrat- und des Phosphorgehaltes zeigen in der Regel keine Extrema. Aufgrund der hohen Nitrat-Vorbelastung beträgt die Nitrat-Zunahme durch Einleitungen und Nitrifikation in der Unterweser nur etwa 1-3 % des fluvialen Nitrateintrages (vgl. Tab. 3.4). In der Brackwasserzone nehmen die Konzentrationen der Nährstoffe in der Regel aufgrund der Verdünnung durch das eindringende nährstoffärmere Wasser aus der Nordsee bzw. dem Küstenbereich ab (GRABEMANN et al., 1993). In den 1990er Jahren nehmen die Phosphatkonzentrationen in der Brackwasserzone zeitweise nicht ab oder auch zu, d.h., die Phosphatkonzentrationen im Weserwasser sind ähnlich hoch wie oder kleiner als im eindringenden Wasser (vgl. Längsprofilmessungen, Senator für Bau und Umwelt Bremen und Bezirksregierung Weser/Ems – Aussenstelle Brake).



**Abb. 3.10:** Längsprofile für Ammonium-Stickstoff (NH<sub>4</sub>-N, oben) und Nitrit-Stickstoff (NO<sub>2</sub>-N, unten) in der Unterweser im Sommer und im Winter für verschiedene Oberwasserabflüsse (nach Daten des Senators für Bau und Umwelt Bremen und der Bezirksregierung Weser/Ems – Aussenstelle Brake)

### 3.4 BSB- und Stickstofffrachten an der oberen Grenze der Brackwasserzone

Fluviale BSB- und Stickstofffrachten werden in der Unterweser durch Abwassereinleitungen erhöht und durch biochemische Umwandlungs- und Abbauprozesse entweder erniedrigt oder weiter erhöht. Zur Abschätzung des Eintrages in das angrenzende Meeresgebiet sollen die Frachten nach der Pariser Kommission (PARCOM) an der oberen Grenze der Brackwasserzone angegeben werden. Die obere Grenze der Brackwasserzone pendelt bei kleinem Oberwasser im Gebiet von Brake. BSB- und Nährstofffrachten wurden daher durch den Querschnitt bei UW-km 40 mit Hilfe des querschnittsgemittelten, zeitabhängigen numerischen Gewässergüte- und Transportmodells FLUSS (Müller et al., 1992) beispielhaft für die Jahre 1989 bis 1994 und 1998 berechnet (zur Methodik der Frachtermittlung Kapitel 3.4.1).

Im Modell werden folgende Frachten unterschieden:

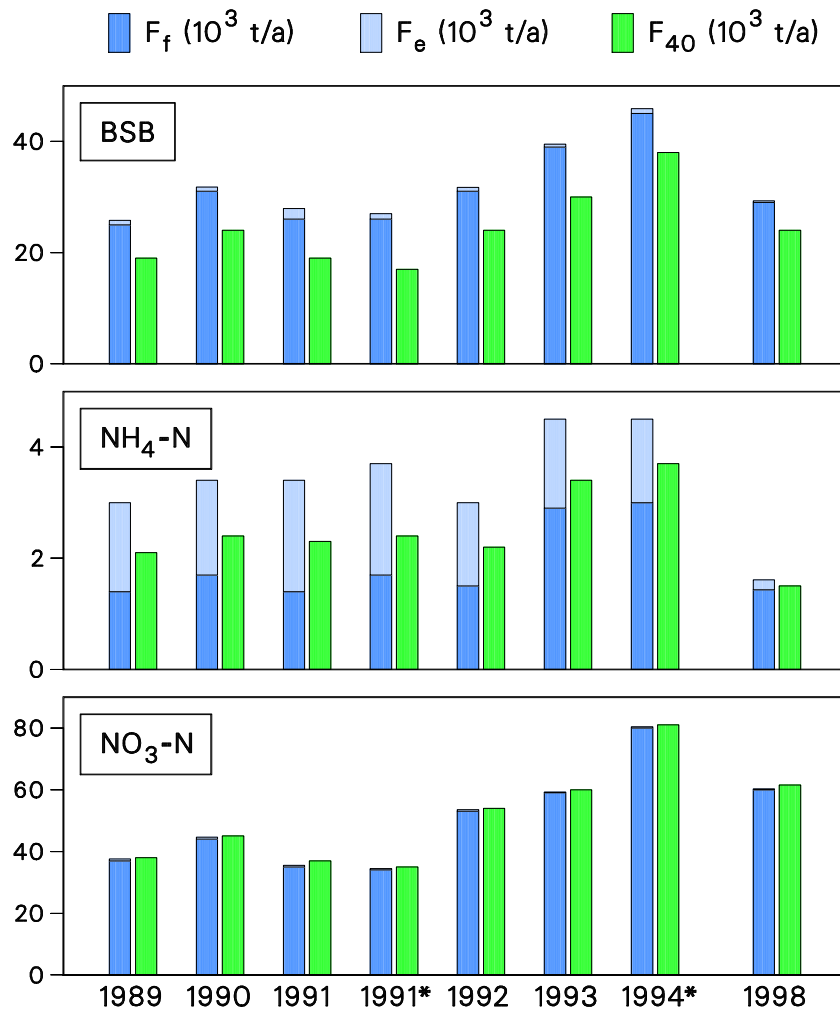
- $F_f$ : fluviale Frachten, die mit dem Oberwasser eingetragen werden
- $F_e$ : eingeleitete Frachten (Summe der Frachten, die von den Einleitern flussauf von km 40 eingetragen werden)
- $F_s$ : Summenfracht aus fluvialer und eingeleiteter Fracht
- $F_{40}$ : Frachten bei Unterweser-km 40 (berechnet aus der Modellierung)

In der 12-jährigen Reihe 1988 bis 1999 schwanken die BSB- und Stickstofffrachten  $F_f$  deutlich von Jahr zu Jahr (siehe Abb. 3.11). Über das Weserwehr strömten in diesem Zeitraum fluviale BSB-Frachten von jährlich 25 bis  $50 \cdot 10^3$  t/a ( $BSB_5$  bis 1989,  $BSB_7$  ab 1990). Für  $NH_4$ -N lag die Fracht bei 1,2 bis  $3,1 \cdot 10^3$  t/a, für  $NO_3$ -N bei 36 bis  $80 \cdot 10^3$  t/a.

Für BSB und  $NO_3$ -N sind die in die Unterweser eingeleiteten Frachten  $F_e$  der Kläranlagen und Industriebetriebe verglichen mit der jeweiligen Oberwasserfracht  $F_f$  klein. Sie betragen etwa 1-7 % beim BSB und etwa 2 % beim  $NO_3$ -N. Dagegen sind die durch Abwassereinleitungen in die Unterweser fließenden  $NH_4$ -N-Frachten  $F_e$  in den Jahren 1988 bis 1996 etwa in der Größenordnung der Oberwasserfracht  $F_f$ . Ab dem Jahr 1997 macht sich die zwischenzeitliche Sanierung von größeren Kläranlagen an der Unterweser durch eine deutliche Reduzierung der  $NH_4$ -N-Fracht durch die Einleiter  $F_e$  bemerkbar (vgl. Kapitel 5.4.3).

Aufgrund der Abbau-, Umwandlungs- und Transportprozesse nehmen die aus den Modellierungen abgeleiteten BSB- und Ammonium-Stickstofffrachten  $F_{40}$  gegenüber den Summenfrachten aus fluvialen und Einleiterfrachten ( $F_s = F_f + F_e$ ) ab, die Nitrat-Stickstofffrachten dagegen um etwa 2 % zu. Die Abnahme der BSB- und Ammonium-Stickstofffrachten findet hauptsächlich in den wärmeren Monaten statt (die Abbau- und Umwandlungsprozesse sind in der Regel temperaturabhängig) und hängt u.a. von der Verweilzeit des Wassers in der Unterweser flussauf von UW-km 40 und damit vom Oberwasserabfluß ab (vgl. Kapitel 3.3). Sie kann in warmen, abflußarmen 14-Tages-Perioden bis 70 % betragen.

Mittlere Frachten  $F_{40}$ , die durch den Querschnitt bei UW-km 40 in Richtung Nordsee transportiert werden, liegen für die Jahre 1989-1993 bzw. 1998 in der Größenordnung von 17 bis  $38 \cdot 10^3$  t/a für BSB und 35 bis  $81 \cdot 10^3$  t/a für Nitrat-Stickstoff (siehe Abb. 3.11). Aufgrund der Reduzierung der Ammonium-Stickstofffrachten durch die Unterweser-Einleiter ist 1998 die Ammonium-Stickstofffracht durch den Querschnitt bei UW-km 40 mit  $1,4 \cdot 10^3$  t/a deutlich kleiner als in den Jahren 1989-1993 (mit 2,1 bis  $3,7 \cdot 10^3$  t/a).



**Abb. 3.11: Jahresfrachten ( $10^3$  t/a) von 1988 bis 1999.  $F_f$ : fluviale Frachten (Hemelingen; 1988-1993, 1995-1999: basierend auf den 14 tägigen Mittel- ( $NH_4-N$ ) bzw. Einzelwerten (BSB) der ARGE-Weser),  $F_e$ : Summe der Frachten der Einleiter flußauf von UW-km 40 (Senator für Bau und Umwelt Bremen),  $F_{40}$ : Frachten bei UW-km 40 (berechnet aus Modellierungen)**

#### Zur Methodik der Frachtermittlung bei UW-km 40 mit dem Modell FLUSS

FLUSS ist ein Modell zur Simulation des über den Flussquerschnitt gemittelten Transportes von Wasserinhaltsstoffen und der Gewässergütesituation im Längsprofil von Tidelflächen. Das Modell simuliert die Zustandsänderungen und Transportprozesse mittels zeitabhängiger, querschnittsgemittelter Transportgleichungen in einem Flussabschnitt zwischen zwei Messstellen unter Benutzung von deren Messwerten und der lokalen Meteorologie als Randbedingungen. Die im Wasserkörper, an der Wasseroberfläche und am Gewässerboden ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse sind dem Stand des Wissens entsprechend möglichst naturnah parametrisiert und werden zeitabhängig simuliert. Bei der Simulation des Sauerstoff- und Nährstoffhaushaltes werden im Modell u.a. folgende Prozesse durch Parametrisierungen berücksichtigt: Belüftung durch die Wasseroberfläche, Assimilation des Phytoplanktons, Sauerstoffzehrung durch biochemische Prozesse am Gewässerboden, Sauerstoffzehrung durch Mineralisation organischer Inhaltsstoffe des Wasserkörper, Nitrifikation. Frachten industrieller und kommunaler Einleiter fließen in das der Position des betreffenden Einleiters entsprechenden Modellsegments (125 m) ein. FLUSS eignet sich auf Grund der akzeptablen Rechenzeiten zur Simulation längerer Zeiträume und kann sowohl für diagnostische als auch für prognostische Gewässerstudien eingesetzt werden und gezielt Aussagen über den Einfluss einzelner Einleiter oder veränderter äußerer Randbedingungen auf den Gewässergütezustand eines Gewässers machen.

Für die Simulationen, die zur Berechnung der in Abbildung 3.11 dargestellten Frachten durchgeführt wurden, umfasste das Modellgebiet die Wesermündung zwischen Bremen (Wehr, flussseitiger Modellrand) und Bremerhaven (UW-km 70, seeseitiger Modellrand). Die obengenannten Prozesse sind in der Regel temperaturabhängig. Die Temperaturlängsverteilung wurde unter Vorgabe der aktuellen (täglichen) meteorologischen Situation (Werte einer Messstation auf dem Gelände der Stahlwerke Bremen) und der Wärmeeinleitungen (Senator für Bau und Umwelt Bremen, Bezirksregierung Weser/Ems- Außenstelle Brake) durch die Kraftwerke Hafen, Mittelbüren und Farge, durch das Kernkraftwerk Unterweser und durch die Stahlwerke Bremen simuliert.

Desweiteren gingen die BSB- und Nährstoffeinleitungen der Kläranlagen Seehausen, Delmenhorst, Osterholz, Farge, Brake, Nordenham und Bremerhaven, der BWK und der Fettraffinerie Brake ein (Senator für Bau und Umwelt Bremen, Bezirksregierung Weser/Ems- Außenstelle Brake).

Jeweils 26 Perioden pro Jahr wurden entsprechend den 14-Tages-Perioden der ARGE-Weser-Messungen simuliert. Für diese Perioden wurden jeweils die BSB- und Nährstofffrachten durch den Querschnitt bei UW-km 40 berechnet und zur Jahresfracht aufsummiert. Dabei wurden die 14-Tages-Mittelwerte bzw. Einzelwerte (BSB) der Messstationen Hemelingen und Bremerhaven für die Temperatur, den Sauerstoffgehalt, den BSB-Gehalt und die Nährstoffgehalte (ARGE Weser, 1989-1993, 1998) als Randbedingungen am see- und flussseitigen Modellrand vorgegeben. Das Oberwasser wurde ebenfalls entsprechend der jeweiligen Periode berücksichtigt. Desweiteren gingen Wasserstandszeitreihen (Wasser- und Schiffsamt) über einen Spring-Nipp-Zyklus 1987 für verschiedene Pegel ein (werden andere Spring-Nipp-Zyklen von z.B. 1994 zugrundegelegt, ändern sich die BSB- und Nährstofffrachten um wenige Prozent).

Die zur Modellierung benutzten Datensätze wiesen teilweise verschiedenen große Lücken auf, die interpoliert oder durch plausible Annahmen ergänzt wurden.

## Literatur

- ALBRECHT, J., KIRCHHOFF, N., 1987. Ökologie der Weser - Der Fluß als Lebensraum im Wandel der Zeit. In Bachmann und Hartmann (Hrsg.), Schifffahrt, Handel und Häfen - Beiträge der Schifffahrt auf Weser und Mittellandkanal, Minden, 295-325.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT ZUR REINHALTUNG DER WESER (ARGE Weser), 1996, Die Chloridproblematik an Werra und Weser.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT ZUR REINHALTUNG DER WESER (ARGE Weser), 1994, Die Unterweser 1993.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT ZUR REINHALTUNG DER WESER (ARGE Weser), Weserlastplan 1982.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT ZUR REINHALTUNG DER WESER (ARGE Weser), Zahlentafeln der physikalisch-chemischen Untersuchungen 1979 – 1992, Wesergüteberichte 1993-1999.
- BECKER, G., KOHNKE, D., 1978. Longterm variations of temperature and salinity in the Inner German Bight. Rapp. P.-v. Cons. Explor. Mer. 172, 335-344.
- BLIESENER, F., LÜNINGHÖNER, W., 1978. Bauwerke an der Unterweser. Hansa 115(15/16), 1273-1275.
- BUSCH, D., SCHIRMER, M., SCHUCHARDT, B., SCHRÖDER, K., 1984. Der Ausbau der Unterweser zum Großschifffahrtsweg und seine Auswirkungen auf das Ökosystem und die Flußfischerei. N. Arch. f. Nds. 33(1), 60-80.
- DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, WESER-/EMS GEBIET, Abflußjahre 1991, 1994 und 1998.

- DIETZE, W., 1983. Die Veränderungen der Wasserstände in den großen Tideflüssen seit 100 Jahren. Dt. Gewässerkl. Mitt. 27, 7-12.
- DIRKSEN, J.E., 1986. Ausführung der Weserkorrektur und folgende Ausbaumaßnahmen für die seewärtige Zufahrt nach Bremen. Die Weser 60(6), 152-162.
- EBERHARDT, M., 1975. Trinkwassergewinnung aus Flußwasser, insbesondere Weserwasser. Dt. Gewässerkl. Mitt. 19 (Sonderheft), 56-62.
- FLÜGEL, H., 1986. 100 Jahre Korrektur der Unterweser und Hafenbau in Bremen-Stadt. Hansa 123(17), 1349-1353.
- FLÜGEL, H., 1987. 100 Jahre Korrektur der Unterweser und Hafenbau in Bremen. Jb. Hafenbautechn. Gesellschaft 42, 50-82.
- FRANZIUS, L., 1888. Die Korrektur der Unterweser. Bremen.
- FREIE HANSESTADT BREMEN, DER SENATOR FÜR UMWELTSCHUTZ UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.). Trinkwasserversorgungsbericht des Landes Bremen, Bremen.
- FÜHRBÖTER, A., 1986a. Anstieg des Meeresspiegels an der deutschen Nordseeküste. Spektrum der Wissenschaft (3), 16, 20.
- FÜHRBÖTER, A., 1986b. Veränderungen des Säkularanstiegs an der deutschen Nordseeküste. Wasser und Boden (9), 456, 459 - 460.
- GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 1980. Gewässeranalytische Untersuchungen auf der Unterweser im Herbst 1979. Teil 2: Hochauflösende hydrographische Messungen und Spurenanalytik. GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 80/E/27.
- GRABEMANN, I., KRAUSE, G., SIEDLER, G., 1983. Langzeitige Änderungen des Salzgehaltes in der Unterweser. Dt. Hydrogr. Z. 36, 61-77.
- GRABEMANN, I., KRAUSE, G., 1989. Transport processes of suspended matter derived from time series in a tidal estuary. J. Geophys. Res. 94(C), 14373-14380.
- GRABEMANN, I., KÜHLE, H., KUNZE, B., MÜLLER, A., NEUMANN, L.J.R., 1990. Studies on the distribution of oxygen and nutrients in the Weser estuary. In Michaelis, W. (ed.), Estuarine water quality management. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Coastal and Estuarine Studies 36, 341-344.
- GRABEMANN, I., KUNZE, B., MÜLLER, A., 1993.: Lower Weser water quality monitoring and water quality situation. In WHITE, K.N., BELLINGER, E.G., SAUL, A.J. HENDRY, K., BRISTOW, M.R. (eds.), Urban waterside regeneration. Ellis Horwood Series in Environmental Management, Science and Technology, Ellis Horwood Limited, N.Y., London, 302-311.

- GRABEMANN, I., KRAUSE, G., 1994. Suspended matter fluxes in the turbidity maximum of the Weser estuary. In Dyer, K.R., Orth, R.J. (eds.), Changes in fluxes in estuaries. Olsen & Olsen, Frederiksborg, 23-28.
- HAESLOOP, U., SCHIRMER, M., SCHUCHARDT, B., 1989. Zu den ökologischen Folgen des Ausbaues der Unterweser zum Großschiffahrtsweg. Tagungsband, Internationaler Umweltkongreß "Der Hafen: Eine ökologische Herausforderung", Hamburg, BRD, 179-181.
- HAESLOOP, U., SCHIRMER, M., 1990. Die ökologischen Folgen des Ausbaus der Unterweser zum Großschiffahrtsweg. In Meßprogramm Weser in Bremen (MEWEB), Freie Hansestadt Bremen - Der Senator für Umweltschutz und Stadtentwicklung und Wasserwirtschaftsamt Bremen (Hrsg.), Bremen, 70-74.
- HAUTAU, H., EBERHARDT, M., EBEL, K., FLÜGEL, H., KEUNE, H., REIS, G., WOHLLEBEN, H., NEUMANN, H., SCHIRMER, M., 1987. Probleme der Wasserqualität von Weser, Werra und Fulda (Podiums- und Plenumsdiskussion). Die Weser 61(4/5), 125-134.
- HENSEN, W., 1953. Das Eindringen von Salzwasser in die Gezeitenflüsse und ihre Nebenflüsse, in Seekanäle und Häfen. Mitt. Franz. Inst. 3, 20-50.
- HILL, H.W., DICKSON, R.R., 1978. Longterm changes in the North Sea hydrography. Rapp. P.-v. Cons. Explor. Mer. 172, 310-334.
- HULSCH, J., VEH, G., 1978. Zur Salzbelastung von Werra und Weser. N. Arch. f. Nds. 27, 367-377.
- LÜNEBURG, H., 1953. Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung, Teil II: Die Probleme der Sinkstoffverteilung in der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. 2, 15-51.
- KÜHLE, H., PRANGE, A., MÜLLER, A., 1989. Hydrographie, Wärmehaushalt, Sauerstoffhaushalt und Eutrophierung der Unterweser. Gutachten zur Beurteilung des Gewässergütezustandes der Unterweser, unveröffentlichter Teilbericht, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH und Wasserwirtschaftsamt Bremen.
- MÜLLER, A., GRODD, M., WEIGEL, H.-P., 1990. Lower Weser monitoring and modelling. In Michaelis, W. (ed.), Estuarine water quality management. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Coastal and Estuarine Studies 36, 285-294.
- MÜLLER, A., GRABEMANN, I., KUNZE, B., 1992. Water quality modelling: prediction of the transport of water constituents in the Weser estuary (Germany). In Spaulding, M.L., Bedford, K., Blumberg, A., Cheng, R., Swanson, C. (eds.), Estuarine and Coastal Modeling, American Society of Civil Engineers, New York, 405-417.
- NEUMANN, H., GAUMERT, D., HERBST, V., SCHILLING, J., 1990. Betrachtungen über die ökologischen und ökonomischen Schäden der Salzbelastung von Werra und Weser. Die Weser 90(2/3), 77-86.
- OHLING, J., 1987. Die niedersächsischen Häfen an der Unterweser. Jb. Hafenbautechn. Gesellschaft 42, 129-137.

- PLATE, L., 1924. Der Ausbau der Unterweser. Jb. Hafenbautechn. Gesellschaft 7, 150-164.
- RAMACHER, H., 1974. Der Ausbau der Unter- und Außenweser. Mitt. Franz. Inst. 41, 257-276.
- REIDT, L., 1993. Wo die Salzwelle rauscht. Die Zeit vom 20.08.1993.
- ROHDE, H., 1970. Entwicklung der Wasserstraßen im Bereich der deutschen Nordseeküste. Die Küste 20, 1-44.
- ROHDE, H., 1982. Die Geschichte des Pegels Helgoland. Dt. Gewässerkl. Mitt. 26, 117-124.
- SCHRÄDER, T., 1941. Fischereibiologische Untersuchungen im Wesergebiet. II. Hydrographie, Biologie und Fischerei der Unter- und Außenweser. Zeitschrift für Fischerei und deren Hilfswissenschaften 39, 527-693.
- SCHRÖDER, K., BUSCH, D., SCHIRMER, M., SCHUCHARDT, B., 1983. Reaktionen der Fischfauna auf anthropogene chemische und physikalische Veränderungen des Wassers der Unterweser. N. Arch. Nds. 32, 418-430.
- SCHUCHARDT, B., BECKMANN, M., KNUST, R., SCHIRMER, M., 1984. Eulitorale Uferstrukturen an der Unterweser. DROSER 84(2), 83-90.
- SCHUCHARDT, B., MÜLLER, M., SCHIRMER, M., 1989. Veränderungen im Sauerstoff-Haushalt der Unterweser nach der Reduzierung kommunaler und industrieller Einleitungen. Dt. Gewässerkl. Mitt. 33 (3/4), 98-103.
- SIEFERT, W., 1982. Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste 37, 1-36.
- VEH, G., 1975. Die Salzbelastung der Flüsse im Einzugsgebiet der Weser. Dt. Gewässerkl. Mitt., Sonderheft, 72-77.
- WALTHER, F., 1954. Veränderungen der Wasserstände und Gezeiten in der Unterweser als Folge des Ausbaus. Hansa 91(21/22).
- WELLERSHAUS, S., 1981. Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser estuary. Arch. Hydrobiol. 92, 161-198.
- WETZEL, V., 1987. Der Ausbau des Weserfahrwassers von 1921 bis heute. Jb. Hafenbautechn. Gesellschaft 42, 83-105.
- WITTMER, H., 1958. Tideänderungen durch Einbauten in Tideflüssen. Mitt. Franz. Inst. 13, 1-231.
- WÖBKEN, K., KUNZ, N., 1980. Beitrag zu Gewässergütefragen der Unterweser. Wasser und Boden 8, 372-377.
- ZIETZ, U., 1975. Probleme der Gewässergüte in der Unterweser. Dt. Gewässerkl. Mitt. 19 (Sonderheft), 87-94.