

Greifswalder Bodden und Oderästuar - Austauschprozesse(GOAP)

Abschlußbericht

Nährstoffe im Oderästuar - Transporte und Inventare

H. Meyer, R. Lampe Universität Greifswald, Geographisches Institut, F.-L.-Jahn-Straße 16,
17489 Greifswald,

P. Jonas Universität Greifswald, Physikalisches Institut, F.-L.-Jahn-Straße 16, 17489
Greifswald,

K. Buckmann Institut für Geodatenverarbeitung, Haus 37, 17498 Hinrichshagen

Inhaltsverzeichnis

Nährstoffe im Oderästuar - Transporte und Inventare [*](#)

1. Problemstellung [*](#)

2. Methoden [*](#)

2.1 Wasseruntersuchungen [*](#)

2.2 Sedimentuntersuchungen [*](#)

2.3 Kopplung der Nährstoffinventare des Pelagials an das 2D-Strömungsmodell [*](#)

3. Ergebnisse [*](#)

3.1 Meteorologische Situation und Abflüsse von Oder und Peene [*](#)

3.2 Hydrographische Situation [*](#)

3.3 Nährstoffe im Pelagial [*](#)

3.3.1 Jahresgänge [*](#)

3.3.2 Nährstoffeinleitungen [*](#)

3.4 Modellkopplung [*](#)

3.5 Nährstoffe im Sediment [*](#)

4. Diskussion [*](#)

4.1 Nährstoffe im Pelagial [*](#)

4.2 Nährstoffe in den Sedimenten [*](#)

4.3 Kopplung mit 2D-Modell [*](#)

4.4 Vergleich mit der Jahresreihe 1972-1981 [*](#)

5. Zusammenfassung [*](#)

1. Problemstellung

Einen Schwerpunkt des Projektes GOAP bildeten die Nährstoffe in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung sowie die qualitative und quantitative Darstellung ihrer Quellen und Senken im Ästuar. Eine Reihe von Teilaspekten war vor Projektbeginn bereits untersucht und dargestellt worden, vor allem der Wasserhaushalt durch CORRENS (1973, 1977, 1978) und MERTINKAT (1986, 1991), ökologisch-hydrographische Aspekte im Greifswalder Bodden SCHNESE (1973a, b), SCHOKNECHT (1973), SCHMIDT (1990, 1991) und im Kleinen Haff SCHOKNECHT, CORRENS (1973) sowie eine Charakterisierung der Sedimente durch LEIPE et al. (1989).

Zu Fragen der Nährstoffbelastungen im eigentlichen Oderästuar ist aber sehr wenig veröffentlicht worden. Die erste Arbeit über das Oderhaff - verfaßt von BRANDT (1894/96) im Zusammenhang mit dem Bau der Kaiserfahrt - enthält immerhin detaillierte Untersuchungen zur Sedimentverteilung, zum Makrozoobenthos und Phytoplankton. Neuere Arbeiten sind erst von MLODZINSKA (1980), NEHRING et al. (1990), LAMPE (1990, 1993) zu Nährstoff-Inventaren und -transporten mitgeteilt worden.

Die Ergebnisse des von der Wasserwirtschaftsdirektion der DDR (WWD) seit den 60-er Jahren betriebenen Monitoringprogramms, das auch das westliche Oderästuar umfaßte, wurden erst sehr spät und nur teilweise veröffentlicht (BACHOR 1990). Erst im Rahmen des GOAP-Projektes fand durch SCHMIDT (1996) eine teilweise Aufarbeitung dieses umfangreichen Datenmaterials (Zehnjahresreihe 1972 bis 1981) statt, in der insbesondere die Zusammenhänge zwischen Hydrographie, Phytoplankton und Nährstoffen dargestellt wurden.

2. Methoden

2.1 Wasseruntersuchungen

Die Wasserprobenahmen und Messungen der hydrographischen Parameter wurden 1993 bis 1995 im wesentlichen monatlich an den 16 Stationen des GOAP-Projektes (Abb.1 und Tab.1) von Bord der "BORNHÖFT" durchgeführt. 1996 wurden nur je zwei Stationen im Greifswalder Bodden (T.G2, T.Ariadne), Achterwasser (Awa-Nord, Awa-Süd; Awa-N entspricht der Standardstation Achterwasser 93-95) und Kleines Haff (T.H3, T.H6) beprobt, jedoch - soweit möglich - zweimal pro Monat. Zusätzlich wurden 1996 die drei Stationen K, L, M im Großen Haff ebenfalls zweiwöchentlich von den polnischen Kollegen beprobt. Daten zu den Wasserinhaltsstoffen aus den 1996 nicht beprobten Teilen des Ästuars wurden vom LAUN Stralsund zur Verfügung gestellt.

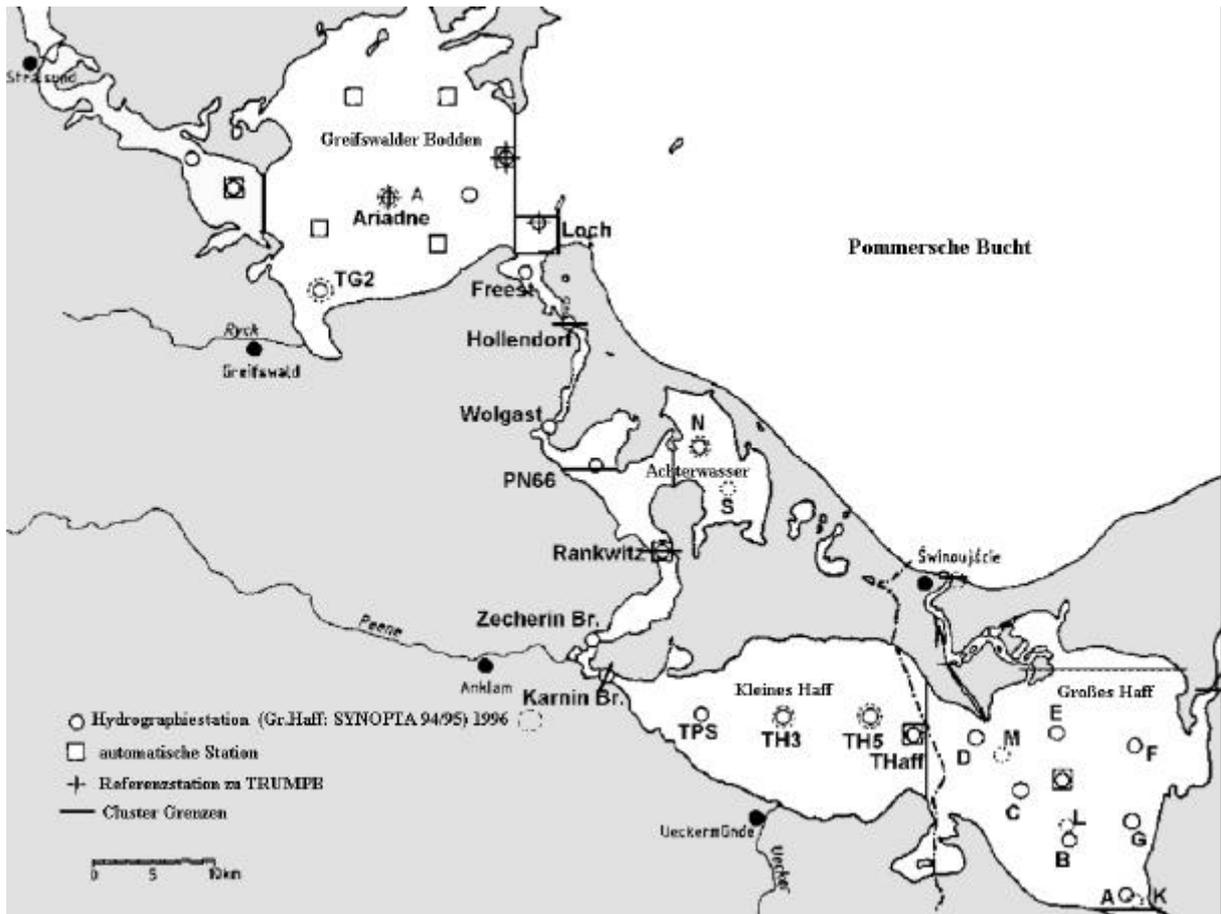


Abb. 1: Das [GOAP - Untersuchungsgebiet](#) mit Stationen und Kompartimentgrenzen

Tab. 1: Probenahmestationen und Koordinaten

Gebiet	POSKEY	Synonym	Breite	Länge
Greifswalder Bodden	TG2	T.G2	54° 08,60′	13° 29,10′
Greifswalder Bodden	ARIADNE	Ari	54° 12,40′	13° 34,00′
Greifswalder Bodden	ELSÂGRD	Elsa	54° 12,30′	13° 39,27′
Greifswalder Bodden	LOCH	Loc	54° 11,00′	13° 44,10′
Nördl. Peenestrom	FREEST	Fre	54° 08,50′	13° 45,00′
Nördl. Peenestrom	Hollendf	Holldf	54° 06,80′	13° 47,20′
Nördl. Peenestrom	WOLGAST	Wlg	54° 02,60′	13° 46,80′
Mittl. Peenestrom	KRUMMIN	PN66	54° 00,30′	13° 50,10′
Achterwasser	ACHTERWN	Awa, AwaN	54° 01,75′	13° 58,00′
Südl. Peenestrom	RANKWITZ	Raw	53° 57,20′	13° 53,20′

Südl. Peenestrom	ZECHERIN	ZBr	53° 51,95´	13° 49,80´
Südl. Peenestrom	KARNIN	KBr	53° 50,65´	13° 51,50´
Kleines Haff	PEENE_SD	TPS, TH1	53° 49,50´	13° 57,60´
Kleines Haff	H3	TH3	53° 49,50´	14° 03,30´
Kleines Haff	H5	TH5	53° 49,50´	14° 09,00´
Kleines Haff	HAFF	THaff	53° 47,30´	14° 16,30´
Sonderstationen				
Peenestrom	PN80	PN80	53° 53,81´	13° 53,52´
Achterwasser	ACHTERWS	AwaS	53° 59,76´	13° 59,25´
Kleines Haff	H6	TH6	53° 49,50´	14° 11,80´
Swinemünde	Swinemde	SW	53° 55,27´	14° 17,06´
Großes Haff	M	M	53° 46,77´	14° 22,38´
Großes Haff	L	L	53° 43,73´	14° 26,55´
Großes Haff	K	K	53° 40,63´	14° 30,70´

Tab. 2: Morphologische Daten des Untersuchungsgebietes

Teilgebiet, geogr.	Fläche [km ²]	mittl. Tiefe [m]		Volumen [km ³]
Oderästuar gesamt	1360,8	4,4		5,972
Oderhaff gesamt	686,9	3,8		2,583
Kleines Haff	277,3	3,7		1,026
Großes Haff	409,7	3,8		1,557
Greifswalder Bodden	510,2	5,8		2,960
Peenestrom	86,9	2,6		0,203
Achterwasser	77,0	2,9		0,226
Schlickflächen-Anteile				
(> 50% U, T)	geogr. Fläche [km ²]	%	Schlickfläche [km ²]	Schlickfläche [%]

Oderhaff	686,9	100,0	385	56
Kleines Haff	277,3	40,3	168	61
Großes Haff	409,7	59,7	214	52
Achterwasser	77,0		54	70
Modell-Kompartiment				
Modell-Kompartiment	Fläche [km²]	% von Fläche des geogr. Teilgebietes	Volumen [km³]	% vom Volumen d. geogr. Teilgebietes
GwB	487,3	95,5	2749,41	92,9
Loch	17,4		76,50	
Freest	9,1		22,79	
NPS	13,55		30,85	
MPS	39,7		105,21	
SPS	49,2		88,86	
Peenestrom gesamt	111,6	128,4	247,7	121,8
Achterwasser	75,1	97,6	199,72	88,4
Kl. Haff	238,6	86,0	851,95	83,0
Gr. Haff	572,2	139,7	2085,72	134,0

Um die Jahrgänge der Nährstoffkonzentrationen im Pelagial zu beschreiben, sind die durch das Teilprojekt erarbeiteten Daten zu Hydrographie und Wasserinhaltsstoffen mit Daten des LAUN Stralsund, der EWN (WESTPHAL, LENK, dieser Band) und des IfÖ Kloster/Hiddensee (DAHLKE et al., dieser Band) nach Ausreißerkorrektur und dreimalig durchgeführten Ringversuchen zu Monatsmitteln gepoolt worden. Für die Berechnung der mit dem Wasseraustausch stattfindenden Nährstofftransporte sind dagegen die jeweiligen Tageswerte verwendet worden. Der Datenbestand umfaßt bei den [Wasserinhaltsstoffen](#) maximal 13 gemessene Parameter für 1910 Stationswerte, die [Hydrographie](#) 7 Parameter für 1744 Stationswerte. Bezüglich der Meßwerte muß auf die GOAP-Datenbank verwiesen werden. Das gleiche gilt für die Ergebnisse der Sedimentanalysen.

2.2 Sedimentuntersuchungen

Im Juli 1992 wurde im Greifswalder Bodden eine [Kartierung der Oberflächensedimente](#) (0-5cm Tiefe) an 32 Stationen im 2sm-Raster, im Juni 1993 eine gleichartige Kartierung im [Kleinen Haff an 67 Stationen im 1sm-Raster und im Großen Haff an 31 Stationen](#) (s.a. [Bericht OSADCUK](#) auf dieser CD) durchgeführt. Methoden und Parameter sind in OSADCZUK et al. (1996) beschrieben sowie in der GOAP-Datenbank in den Dateien [METHODEN](#) und [PARAMLIS](#) unter Projekt GOAPAQUA detailliert aufgeführt.

1996 wurden an den oben genannten Stationen und Terminen im deutschen Teil des Ästuars mit dem NIEMISTÖ-Stechrohr jeweils drei Sedimentproben entnommen und die Schichten (0-2, 2-5, 5-10) cm von allen drei Kernen, sowie von einem Kern die Schichten (10-15, 15-20) cm, maximal noch (20-25, 25-30) cm als Einzelproben entnommen. Im Großen Haff erfolgte die Probenahme durch die im GOAP assoziierte Arbeitsgruppe der Universität Szczecin mit einem kurzen Stechrohr, wobei nur die Schichten 0-5 cm und 5-10 cm entnommen wurden.

Die Proben wurden wie die bei den Sedimentkartierungen analysiert.

2.3 Kopplung der Nährstoffinventare des Pelagials an das 2D-Strömungsmodell

In Anlehnung an NIXON, LEE (1981) und ANDERSSON, RYDBERG (1993) sollte durch Ankopplung der aus den gemessenen Nährstoffkonzentrationen errechneten Inventare der einzelnen Kompartimente des Ästuars (Abb. 1 und Tab. 2) an die Wasseraustauschdaten des 2D-Modells eine zeitaufgelöste Nährstoffbilanzierung der Kompartimente und des Nährstofftransportes im Ästuar erreicht werden.

In die Berechnung gingen ungewichtet alle Meßwerte (keine Mittelwerte!) von den innerhalb des jeweiligen Kompartiments gelegenen Stationen ein. Die zeitliche Änderung der Nährstoff-inventare der Kompartimente i wird durch eine aus diesen Meßwerten berechnete Spline-Funktion beschrieben und so für jeden Tag des Jahres j ein errechneter Wert NI_i^j für das jeweilige Inventar gewonnen. Die Kompartimente mit dem Volumen V_i werden dabei als ideale [Rührkessel](#) betrachtet, die an den Profilen des 2D-Modells (BUCKMANN 1997) miteinander verbunden sind. Eine Dispersion der Nährstoffkonzentrationen im Raum wird nicht berücksichtigt. Das Kopplungsmodell berechnet für jeden Tag j für die über die Profile (Kompartimentgrenzen) strömenden Wassermassen $W_{i,i\pm 1}^j$ die mitgeführten Nährstoffmengen als Zufluß $Z_i^j = W_{i,i\pm 1}^j * NI_{i\pm 1}^j / V_{i\pm 1}$ bzw. als Abfluß $Z_i^j = W_{i,i\pm 1}^j * NI_i^j / V_i$. Das Vorzeichen des Wassertransportes ergibt im Index die zu verwendenden Kompartimente und damit, unter Berücksichtigung der geographischen Lage, auch die Ein-(+) oder Ausstromsituation (-) für das betrachtete Kompartiment.

Durch täglichen Vergleich der vorzeichenbehafteten Zustrommengen Z_i^j mit den mittels der Spline-Funktion errechneten täglichen Inventarveränderungen $NI_i^j - NI_i^{j-1}$ wird für jeden Tag ein Differenzwert $D_i^j = (NI_i^j - NI_i^{j-1}) - Z_i^j$ bestimmt, der die kompartimentinternen Veränderungen charakterisiert. Ist $D_i^j > 0$, so ereignet sich intern eine Freisetzung, bei $D_i^j < 0$ ein Verbrauch im Kompartiment. Die Summierung $\sum_i D_i^j$ liefert die Bilanzierung über die Zeit.

Die Ankopplung der Nährstoffdaten an das 2D-Modell verwendet errechnete Tageswerte. Aus Gründen der Datenkonsistenz wurden deshalb in Abänderung eines älteren Algorithmus (GOAP-Zwischenbericht '97) die vom STAUN mitgeteilten mittleren monatlichen Abflüsse Q_m der Peene über die Differenzen Δ_d der täglichen Mittelwerte der Pegel Anklam und Karnin in Tagesabflüsse Q_t umgesetzt und mit dem Absolutwert der Pegeldifferenz derart gewichtet, daß die Monatsabflüsse reproduziert werden.

$$Q_t = Q_m / d_m * (1 - (\Delta_m - \Delta_d) / \Delta_m)$$

mit: Q_t : Tagesabfluß, Q_m : Monatsabfluß, d_m : Anzahl der Monatstage,

Δ_m : mittlere Pegeldifferenz des Monats, Δ_d : Tagesdifferenz Pegel

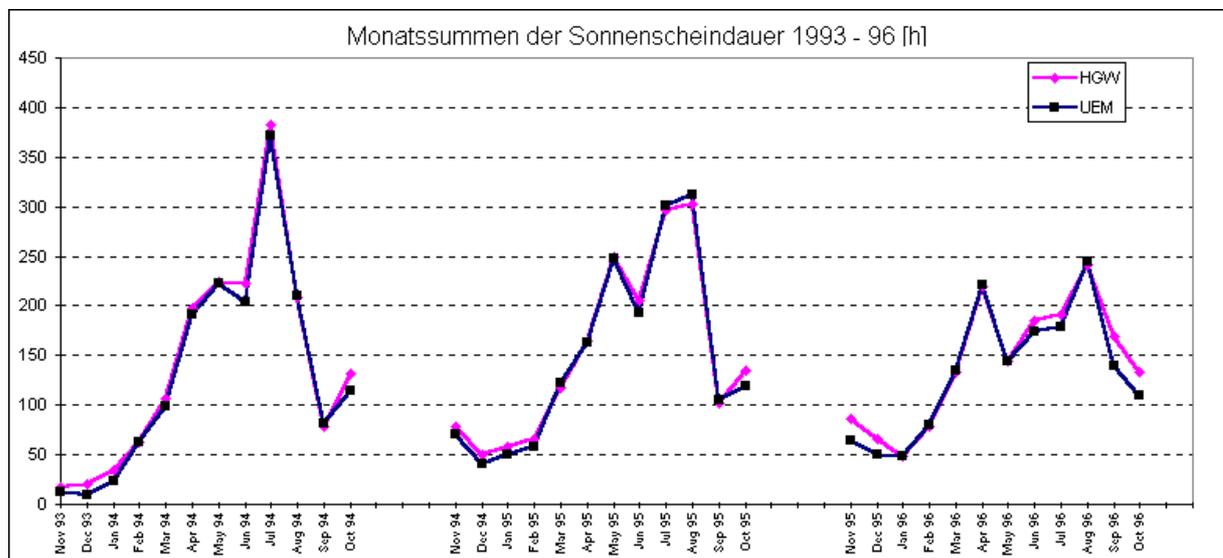
Eine Folge dieses Verfahrens ist, daß die so ermittelten Nährstofffrachten der Peene deutlich über den nach dem Standardverfahren vom STAUN ermittelten liegen (1995: 8600 t statt 6000t NO₃-N). Die so berechneten Werte berücksichtigen aber die insbesondere in der Peene bis zur Meßstelle Anklam Hafen (Meßstelle 0302020028 STAUN Stralsund, zwei bis dreimal monatlich beprobt) auftretenden Rückstauerscheinungen, so daß eine bessere Richtigkeit angenommen wird. Mit der seit April 1996 vom STAUN Ueckermünde betriebenen Abflußmeßstelle Anklam müßte diese Annahme noch überprüft werden, die entsprechenden Meßwerte waren aber noch nicht verfügbar.

Der im 2D-Modell fehlende Peene-Ausstrom von 770 (1995) bzw. 1.000 (1994) Mio m³ Wasser wurde als Korrekturterm zu den im Peenestrom abwärts liegenden Profilen hp_lassan, hp_krum, hp_karl, hp_free addiert. Auf die Profile vp_sues und vp_rud wurden, entsprechend den aus dem 2D-Modell folgenden Ausstrombilanzen aus dem Kompartiment Loch, je 10% bzw. 90% des Peeneausstroms verteilt.

3. Ergebnisse

3.1 Meteorologische Situation und Abflüsse von Oder und Peene

Die Jahre 1993 bis 96 wiesen meteorologisch jeweils einige Besonderheiten auf, die für den Gewässerzustand von Bedeutung waren (Abb. 2). Das Projekt startete im mit Abstand kältesten November der letzten Jahre, die darauffolgenden Monate waren dann allerdings zu warm und mit hohen Niederschlägen verbunden, so daß von Januar bis April alle Zuflüsse des Untersuchungsgebietes mehrfach übernormale Hochwasser führten. Die Niederschlagsbilanz des Jahres 1994 wurde mit dem trockenen und im Juli übermäßig warmen Sommer dann allerdings normalisiert.



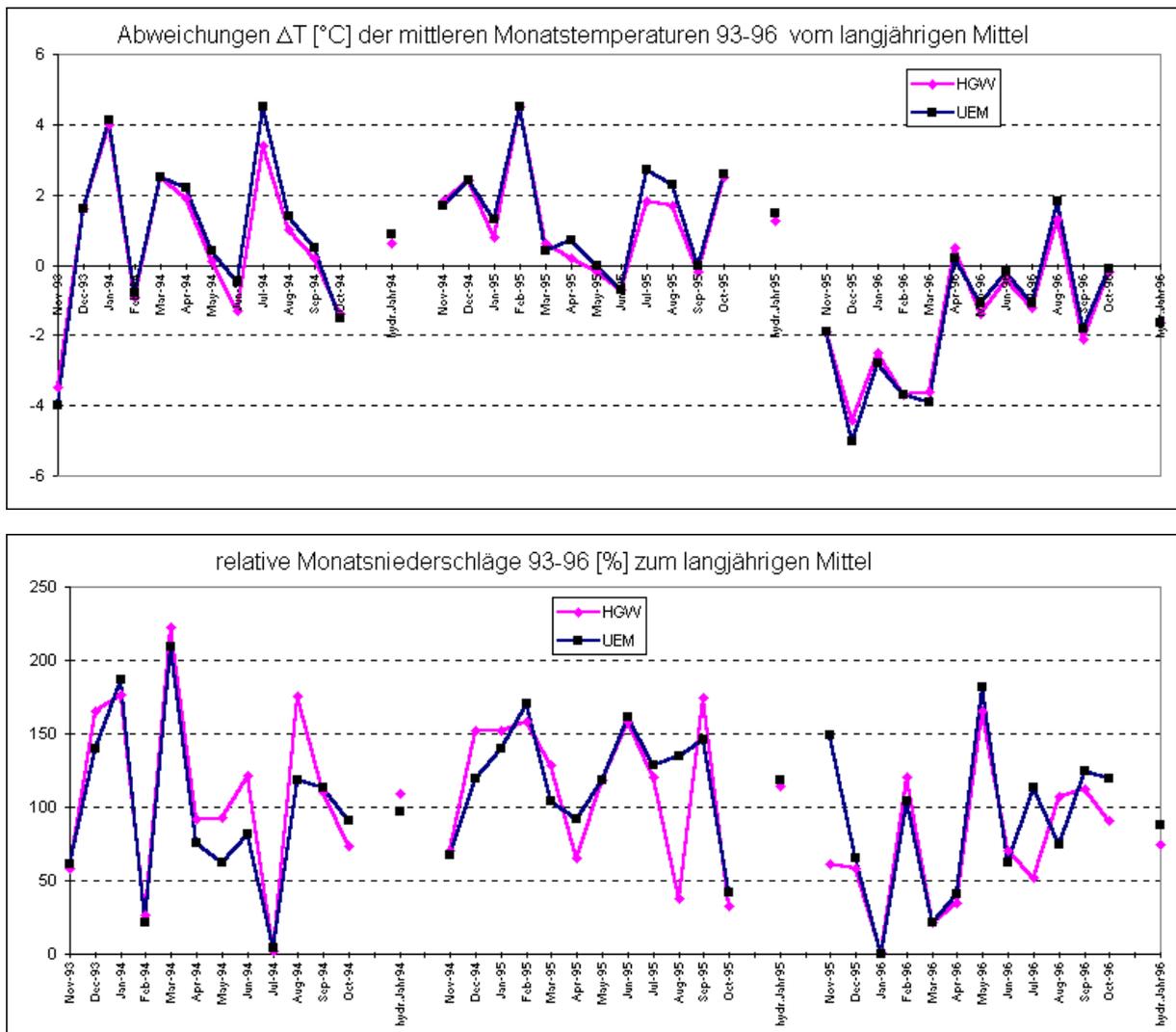


Abb. 2 Abweichungen der Monatssummen der Niederschläge und Monatsmittelwerte der Temperaturen der DWD-Stationen Greifswald (HGW) und Ueckermünde (UEM), sowie die Monatssummen der Sonnenscheindauer

Das Jahr 1995 entsprach in Bezug auf die Niederschläge eher einem Durchschnittsjahr, die übernormalen Niederschläge von Mai bis September wurden weitgehend in jeweils nur wenige Tage dauernden heftigen Regenperioden erreicht, so daß reichlicher Sonnenschein im Juli/ August wieder zu erhöhten Durchschnittstemperaturen führte, insgesamt war das Jahr 1995 im Untersuchungsgebiet 1.5 K zu warm.

Das hydrologische Jahr 1996 begann im Untersuchungsgebiet mit einem der höchsten Sturmhochwasser vom [3. bis 4. November](#) 1995 (Greifswald +179 cm, Wolgast + 107 cm, Karnin + 115 cm, Ueckermünde +118 cm über NN) und einer der längsten Eisperioden dieses Jahrhunderts. Von Anfang Dezember 1995 bis zum 10./11. April (135 Tage) war das Oderästuar von Eis bedeckt.

Die Zeit des Eisaufruchs (zweite Aprildekade 1996) war gekennzeichnet durch z.T. hochsommerliche Temperaturmaxima (Greifswald, Ueckermünde 28 °C), die zu einem sehr schnellen Anstieg der Wassertemperaturen führten, so daß bereits 10 Tage nach dem Eisaufruch jahreszeitlich normale Wassertemperaturen gemessen wurden: 6 °C im Greifswalder Bodden und Kleinem Haff, 10 °C im Achterwasser. Bis Juli '96 wurden dann allerdings nur unterdurchschnittliche Temperaturen erreicht. Insgesamt war das

hydrologische Jahr 1996 1.6 K zu kalt.

Peene berechnet			Oder Hohensaaten		
Monat	MQ(m) [m3/s]	Monatssumme [Mio m3]	MQ(m) [m3/s]	Monatssumme [Mio m3]	vom Mittel 1921-85 [%]
Nov 93	14.50	37.6	340	8.82E+02	72
Dec 93	32.30	83.7	502	1.34E+03	93
Jan 94	62.80	168.2	865	2.32E+03	142
Feb 94	59.20	143.2	812	1.96E+03	115
Mar 94	64.10	171.7	791	2.12E+03	103
Apr 94	65.20	169.0	1094	2.83E+03	144
May 94	27.20	72.9	693	1.86E+03	118
Jun 94	23.00	59.6	458	1.19E+03	95
Jul 94	12.00	32.1	275	7.36E+02	65
Aug 94	6.02	16.1	230	6.17E+02	56
Sep 94	6.75	17.5	280	7.25E+02	72
Oct 94	10.50	28.1	276	7.39E+02	71
hydrolJahr 94	31.96	999.76	551	1.73E+04	95
Nov 94	17.30	44.8	325	8.42E+02	69
Dec 94	24.70	66.2	405	1.08E+03	75
Jan 95	31.60	84.6	500	1.34E+03	82
Feb 95	55.40	134.0	780	1.89E+03	110
Mar 95	39.00	104.5	620	1.66E+03	81
Apr 95	34.70	89.9	620	1.61E+03	82
May 95	20.10	53.8	580	1.55E+03	98
Jun 95	25.30	65.6	580	1.50E+03	121
Jul 95	17.20	46.1	410	1.10E+03	98
Aug 95	9.63	25.8	250	6.70E+02	61
Sep 95	9.79	25.4			
Oct 95	10.50	28.1			
hydrolJahr 95	24.60	768.83			

Tab. 3: Abflüsse von Peene und Oder 1994/95 (Quelle: BSH und LAUN Ueckermünde)

Die Abflüsse von Oder und Peene folgten den Niederschlägen im wesentlichen mit dem Retentionsverhalten der Einzugsgebiete, deutlich erkennbar am Winterhochwasser Januar bis April 1994 trotz absolut trockenem Februar (Tab. 3). Sommerhochwasser traten im Untersuchungszeitraum 1993 - 96 nicht auf, erst Ende Juli 1997 erreichte die Hochwasserwelle des durch Starkregenfälle Anfang Juli im Quellgebiet der Oder hervorgerufenen Extremhochwassers das Untersuchungsgebiet mit einer Wasserführung von max. 3000m³/s.

3.2 Hydrographische Situation

Das Oderästuar stellt eine [Vermischungszone](#) des Brackwassers der Ostsee mit maximalen Salinitäten von 12 psu am westlichen Ausgang des Strelasundes sowie 9 psu in der Pommerschen Bucht und des Süßwassers der Flüsse Oder, Peene, Uecker, Zarow und Ryck dar.

Nach der Salinität läßt sich das Untersuchungsgebiet in fünf Einheiten einteilen:

1. Der Greifswalder Bodden weist Brackwasser mit einer Salinität von 6 und 8psu im

langjährigen Jahresmittel auf (LAMPE 1990). Ökologisch ist er nach dem Venedig-System der β -mixo-mesohalinen Zone zuzurechnen (SCHMIDT 1996). Ein intensiver Wasseraustausch findet vorwiegend über die Boddenrandschwelle mit der Pommerschen Bucht statt, die Austauschraten liegen bei ca. 11 pro Jahr (CORRENS 1977). Vertikale haline Schichtungen im Wasserkörper sind selten und wurden im Untersuchungszeitraum nur im Bereich der Peenestrommündung gefunden, wo sich das weniger salzhaltige Wasser des Peenestrom über das Wasser des Greifswalder Boddens schiebt. Im Projektzeitraum lagen die gemessenen Salinitäten zwischen 6.7 und 8.6 psu, der Mittelwert bei 7.5 psu (Abb. 3).

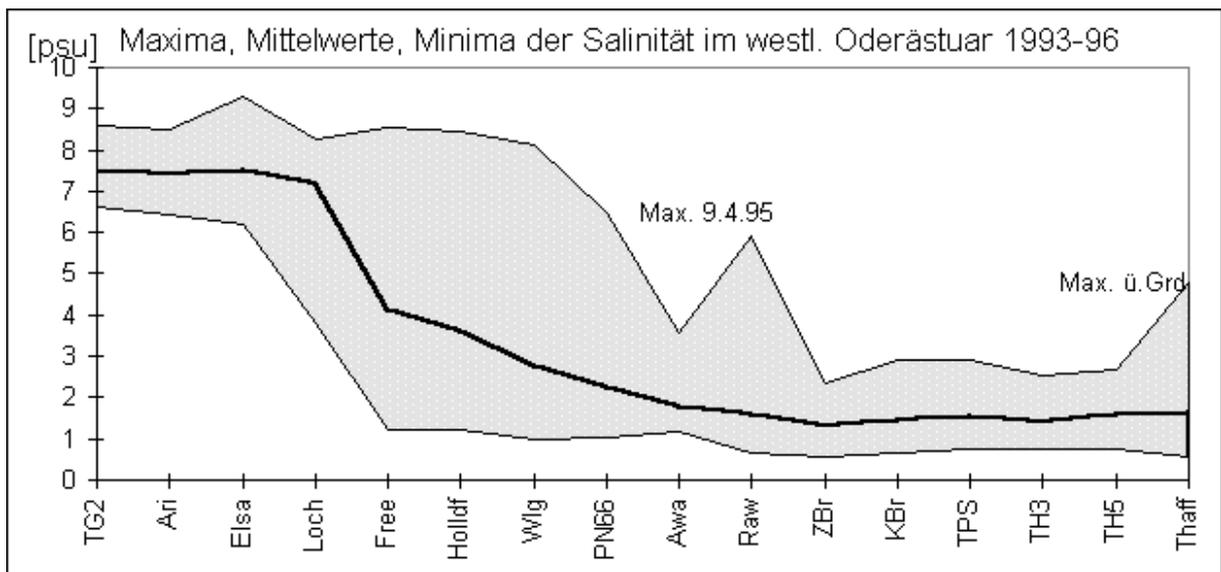


Abb. 3: Salinität im Längsprofil des westlichen Oderästuars 1993 bis 1996

2. Der Peenestrom stellt in seinem nördlichen Teil (Freest bis Wolgast) ein Gebiet häufig wechselnder Ein- und Ausstromlagen dar, mit Salinitäten zwischen 1 und 8.5 psu. Auslöser sind durch Windschub verursachte Pegeldifferenzen zwischen Greifswalder Bodden/Pommerscher Bucht und dem inneren Bereich des Peenestroms (CORRENS 1977). Länger anhaltende, aber seltenere Einstromsituationen können stärker salzhaltiges Wasser bis zum südlichen Peenestrom transportieren. Eine derartige Einstromlage wurde während der Frühjahrssynopta 1995 vom [4. bis 10. April 1995](#) beobachtet: Die Salinitätsmaxima an den Stationen Hollendorf (Holldf), Wolgast (Wlg), PN66 und Rankwitz (Raw) in Abb. 3 spiegeln dieses Ereignis wider. Derartige Salzwassereinbrüche hinterlassen im Peenestrom kaum hydrographische Spuren. Der nachfolgende Ausstrom des Peenewassers sorgt für einen schnellen Austrag des Salzwassers, 30 Tage nach dem Einstromereignis vom April 95 wurden Salinitäten um [2 psu im gesamten Peenestrom](#) gemessen.

3. Das Achterwasser speichert wegen seines geringen Wasseraustauschs mit dem Peenestrom die Erinnerung an derartige Salzwassereinbrüche über längere Zeit (LAMPE 1995). Das zeigen die Meßwerte der Landstation Loddin, die jahrelang täglich beprobt wurde (Abb. 4 und 5). Zum Vergleich sind die Meßwerte der CTD-Sonde - ermittelt während der Terminfahrten an den nahegelegenen Stationen Achterwasser-Nord (Awa bzw. AwaN) und der Station PN66 im vorgelagerten mittleren Peenestrom - in den Diagrammen enthalten.

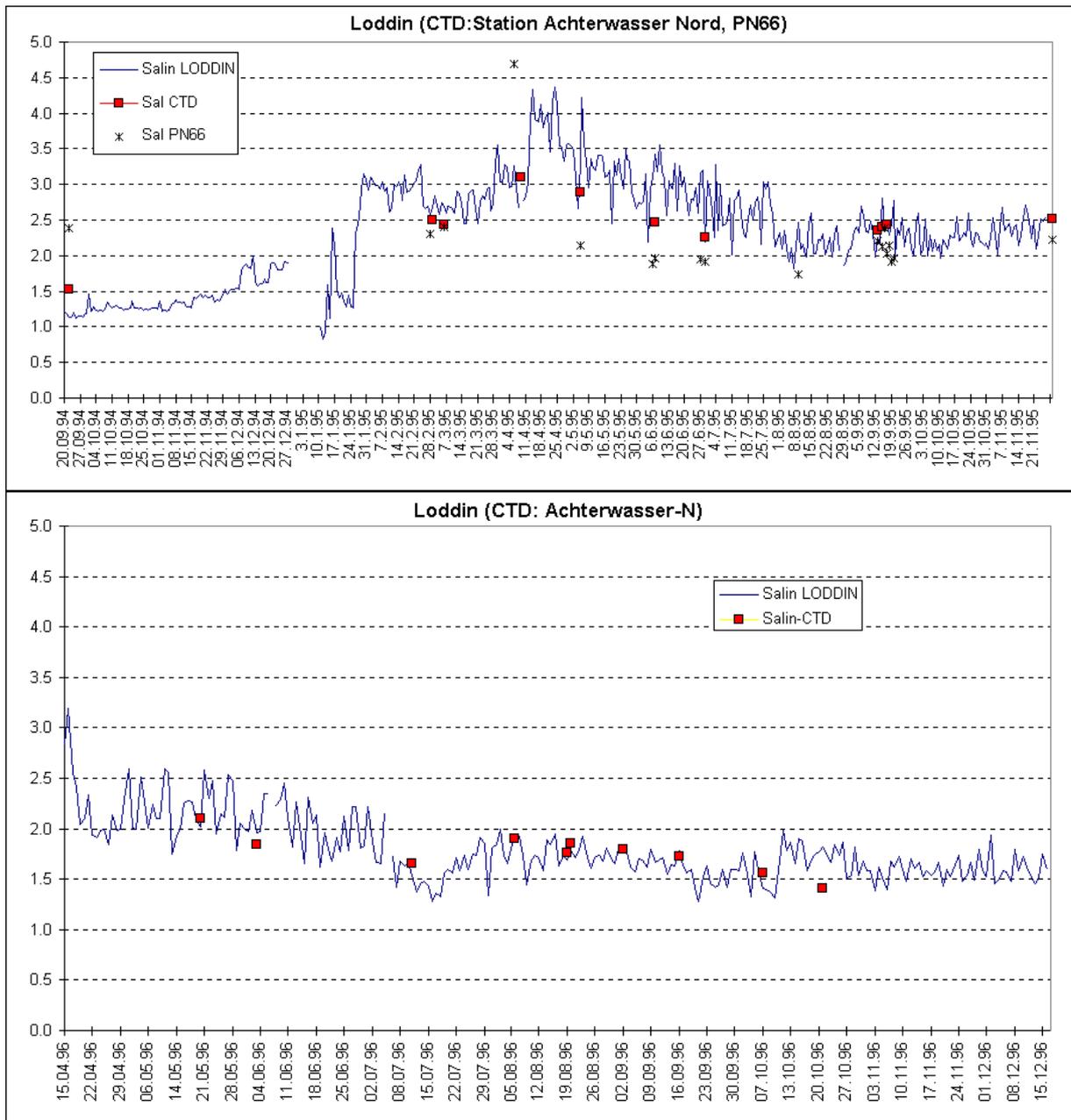


Abb. 4 und 5: Salinität im Achterwasser 1994/95 und 1996, tägliche Meßwerte an Wasserproben der Station Loddin und CTD-Sonden-Meßwerte von Terminfahrten

Demzufolge gab es 1995 zwei größere Salzwassereinträge bis in das Achterwasser: Ende Januar und den genannten Anfang April, 1996 seit Beginn der Messungen im April keinen. Bemerkenswert ist der Verlauf der Salinität im Monat nach der "Jahrhundertflut" vom 3./4. Nov. 1995. [Der schnelle Ablauf dieser Sturmflut](#) (Pegel Greifswald 18 h über 600cm, 26 h über 590 cm, Pegel Wolgast 28 h über 590 cm, Pegel Karnin 25 h über 590 cm, WSA STRALSUND 1995) ließ offenbar das Salzwasser nicht bis in das Achterwasser vordringen.

4. Der südliche Peenestrom ist durch die Peene das am stärksten süßwasserbeeinflusste Gebiet im westlichen Oderästuar, die Salinitäten sind aber nur wenig niedriger als im Kleinen Haff.

5. Das Kleine Haff weist mit 0.8 bis 3 psu die geringsten Salinitäten im Untersuchungsgebiet auf. Dieser Abschnitt verkörpert die β -oligohaline Zone (SCHMIDT 1996). Dominiert wird das Kleine Haff durch den Zustrom aus dem Großen Haff. Nach CORRENS (1977) wird diese Strömungsrichtung im längerfristigen Durchschnitt in 70 % , nach BUCKMANN (1997) im Jahr 1995 in 80% aller Fälle beobachtet. Dieser Zustrom aus dem Großen Haff spiegelt sich in den gegenüber dem Kleinen Haff etwas höheren mittleren Salinitäten der Station T.Haff an der polnisch-deutschen Grenze wider. In das nördliche Große Haff strömt durch den Piastowskikanal häufig Salzwasser ein (PASTUSZAK et al. 1996), das u. U. bis in das Kleine Haff gelangen kann. Diese Salzwassereinströme im Zusammenhang mit winterlichen Sturmhochwassern der südwestlichen Ostsee lassen den Salzgehalt des Haffwassers im Winter regelmäßig auf über 2 psu ansteigen. Ein derartiges Ereignis war das Sturmhochwasser vom 3./4.November 1995 mit ca. 110cm Wasserspiegelanstieg im Kleinen Haff und windbedingter sofortiger Durchmischung, als Ergebnis wurde am 23.11.1995 eine Erhöhung der Salinität von 1,33psu (20.9.95) auf 2,20psu gefunden. Das entspricht gut einer Mischung des Wassers vom 20.9. bei mittlerer Wassertiefe von 3,8m mit 1,1m Salzwasser von 7psu (mittlere Salinität in der Pommernbucht).

Gelegentlich treten dadurch in der Rinne zwischen Kleinem und Großem Haff (mit 8 m tiefste Stelle des gesamten Haffs außerhalb des Schifffahrtskanals nach Stettin) Salzwasserlinsen im Tiefenwasser auf, die sich - wie von [Juni bis September 1994](#) mit [Salinitäten > 4 psu](#) unterhalb von 5 m - monatelang halten können. Die andere Extremsituation wurde beim Frühjahrshochwasser der Oder Februar / April 1994 beobachtet. Das Flußwasser mit Salinitäten < 0.9 psu schichtete sich über das salzreichere Haffwasser, die gleiche Situation wurde im Bereich der Peenemündung (Zecherin/Karnin) von der Peene ausgehend beobachtet (Tab. 4).

MEßPUNKT	Salin	DIN	Nges	DIP	Pges	SiO4
08/02/94	psu	$\mu\text{mol/l}$	$\mu\text{mol/l}$	$\mu\text{mol/l}$	$\mu\text{mol/l}$	$\mu\text{mol/l}$
ZecherinBr o	1.40	672.97	796.60	2.84	2.81	186.57
ZecherinBr u	1.74	411.71	527.02	1.87	4.90	166.99
KarninBr o	1.38	397.42	514.01	1.87	4.27	166.99
KarninBr u	1.87	274.90	351.54	2.05	5.35	157.73
T.Haff o	0.89	340.14	414.71	2.64	4.44	186.57
T.Haff u	2.38	206.89	267.27	2.54	4.69	153.10

Tab. 4: Einschichtung der Flußhochwasser von Oder und Peene im Februar 1994, o = Oberfläche, u = 1m über Grund

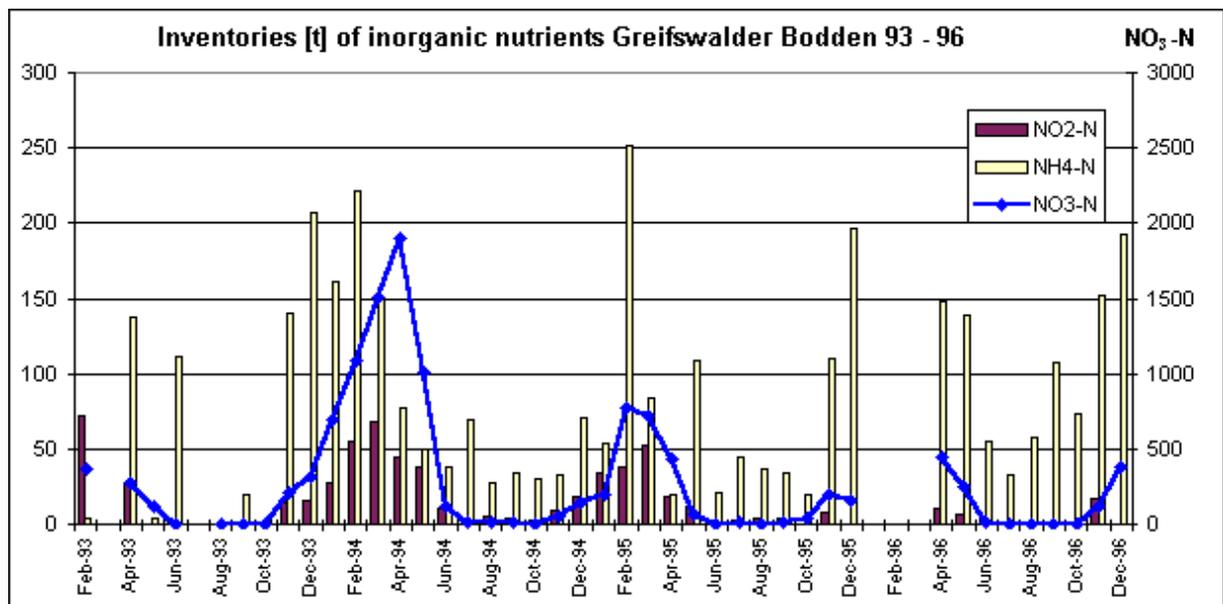
Auf das [Extrem-Hochwasser der Oder im Juli/August 1997](#) wird an anderer Stelle einzugehen sein, erste Ergebnisse zeigen aber schon, daß von derartigen Ausnahmeereignissen keine generelle Zusatzbelastung des Oderästuars ausgeht. Auch die Situation nach der Sturmflut vom 3./4.November 1995 stellte sich am 29.11.95 im Kleinen Haff als von den üblichen jahreszeitlichen Bedingungen nicht wesentlich abweichend dar.

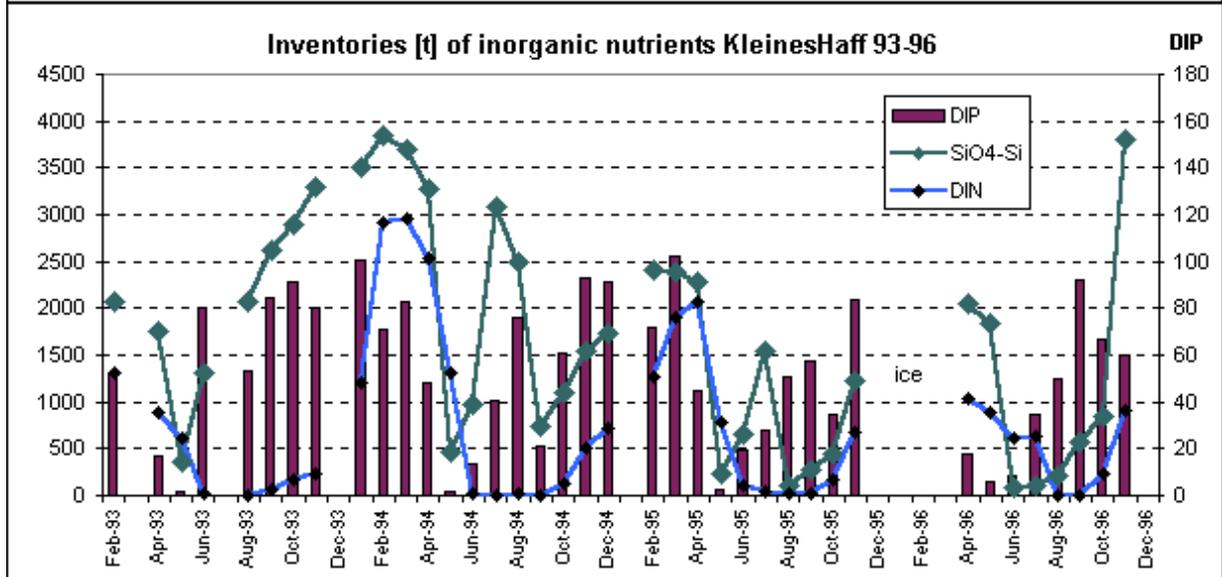
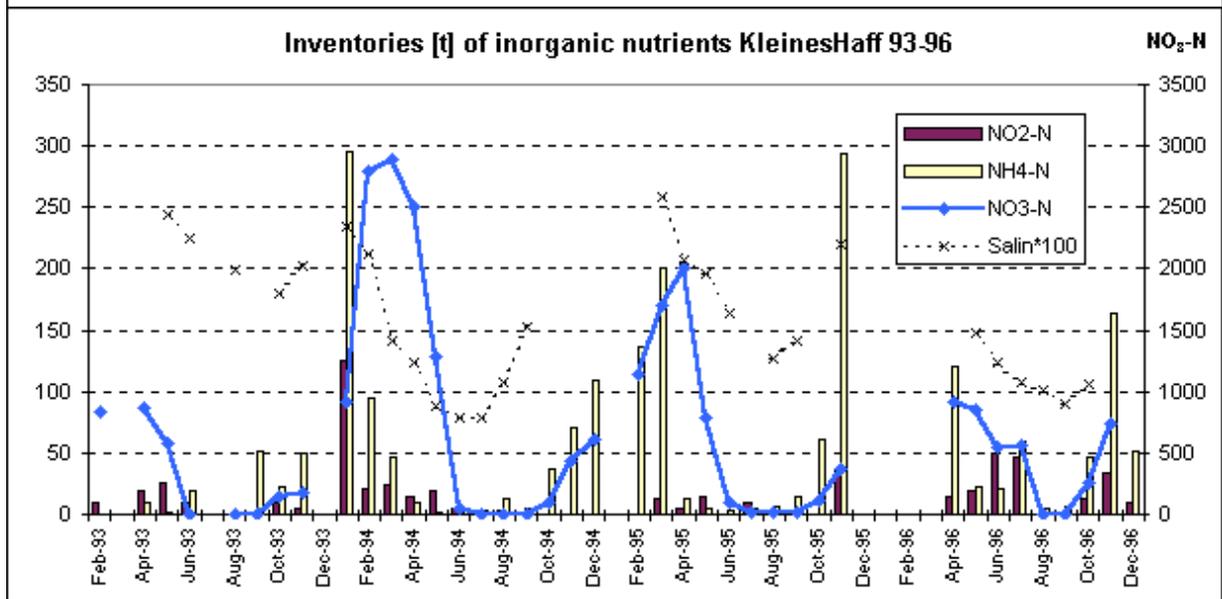
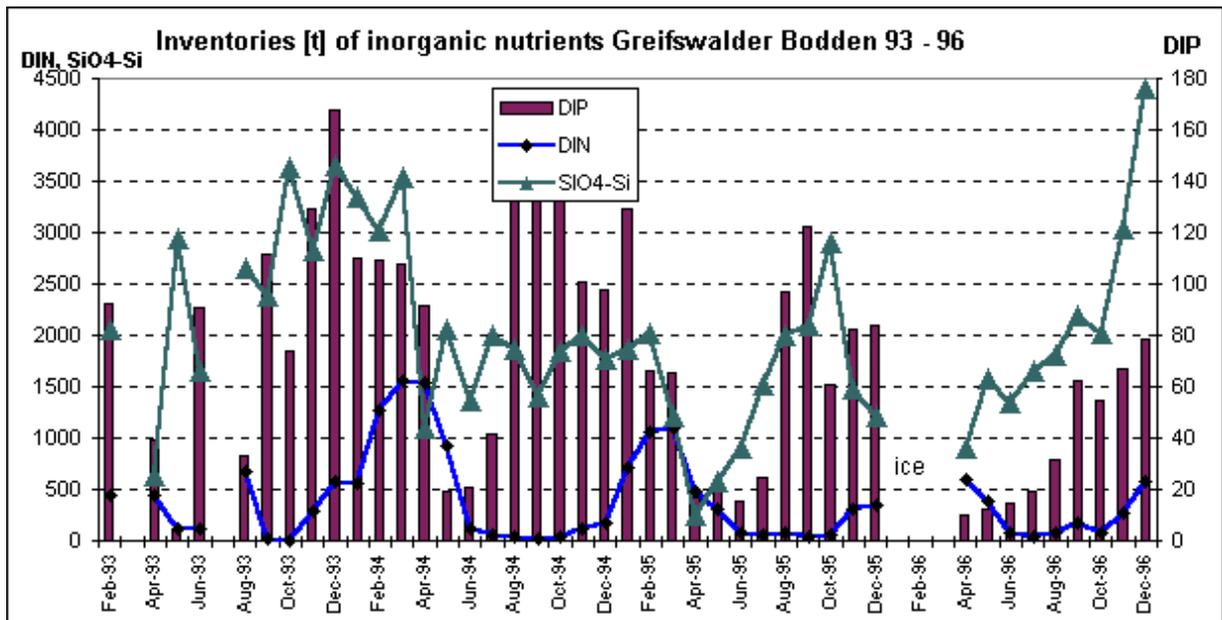
3.3 Nährstoffe im Pelagial

3.3.1 Jahresgänge

Der Konzentrationsverlauf bei den anorganischen Nährstoffen folgt im Projektzeitraum im wesentlichen den bekannten spezifischen Trends: Nitrat weist im Winter bis Frühjahr die höchsten Konzentrationen auf, offenbar wesentlich dominiert vom Flußwassereintrag. Die absolut höchsten Konzentrationen von $>670 \mu\text{molNO}_3/\text{l}$ wurden während des Frühjahrshochwassers 1994 im südlichen Peenestrom gemessen. Ein erheblicher Teil dieses winterlich/frühjährlichen Nitratinventars entsteht möglicherweise auch durch Nitrifikation. Obwohl wegen der positiven Korrelation der Nitrifikation mit der Temperatur (u.a. DAHLKE et al. 1997) die Umsätze geringer sind als im Sommer, deuten doch die regelmäßig kurz vor den Zeiten hoher Nitratkonzentrationen liegenden stark erhöhten Ammoniumkonzentrationen (Abb. 6) in diese Richtung, weil neben der Temperaturabhängigkeit die Nitrifikation positiv mit dem Ammoniumgehalt korreliert (DAHLKE et al. 1997). Im Sommer wird das Nitrat im westlichen Oderästuar von Juni/Juli bis September im Pelagial aufgezehrt. 1996 war der Totalverbrauch (= Konzentration unter der Nachweisgrenze) erst im August bis September zu beobachten, offenbar als Folge der eisbedingt erst spät einsetzenden Phytoplanktonentwicklung, die wahrscheinlich dann durch die unternormalen Temperaturen und Lichtverhältnisse (Sonnenscheindauer) im Mai/Juni 96 noch gebremst wurde. Im Großen Haff dagegen wurde weder im Sommer 1994 und [1996](#) noch im September 1995 ein Totalverbrauch des NO_3 beobachtet, die Einträge durch die Oder überwogen den Verbrauch der Phytoplankter deutlich.

Phosphat folgte dagegen 1993 - 1995 einem zweigipfligen Jahresgang mit hohen winterlichen und sommerlichen Konzentrationen. Im April (Grw.Bodden 95) bis Mai (Grw.Bodden 93,94, Kleines Haff, Peenestrom, Achterwasser) wird das Phosphat durch Kieselalgen aufgezehrt (in Verbindung mit SiO_4) bzw. im Herbst beim Auftreten anderer Kieselalgen stark verringert (SCHMIDT 1990). Die sommerliche Wiederherstellung des Phosphatinventars ist auf Remobilisierungsvorgänge aus dem Sediment zurückzuführen ([siehe weiter unten](#)).





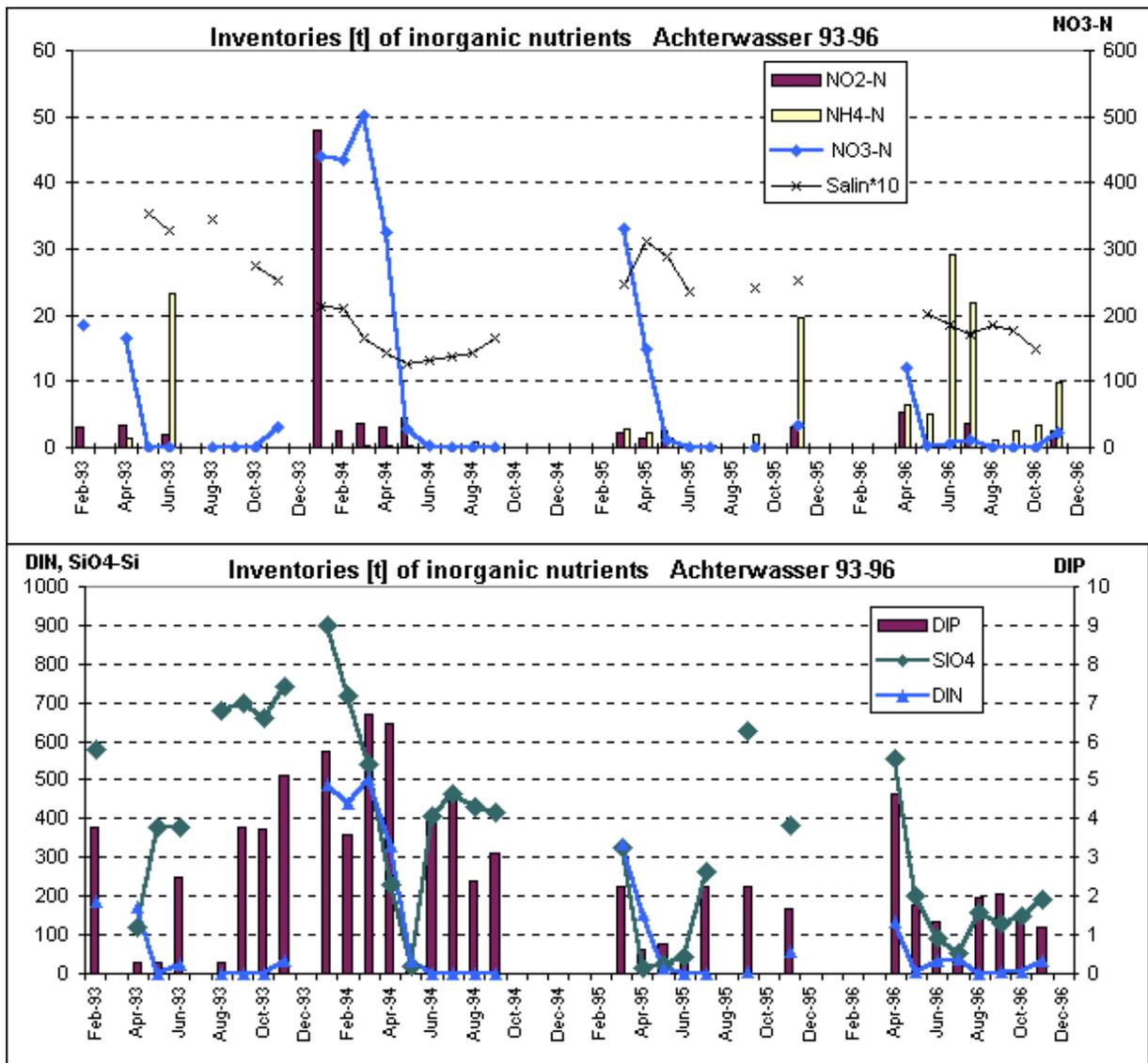


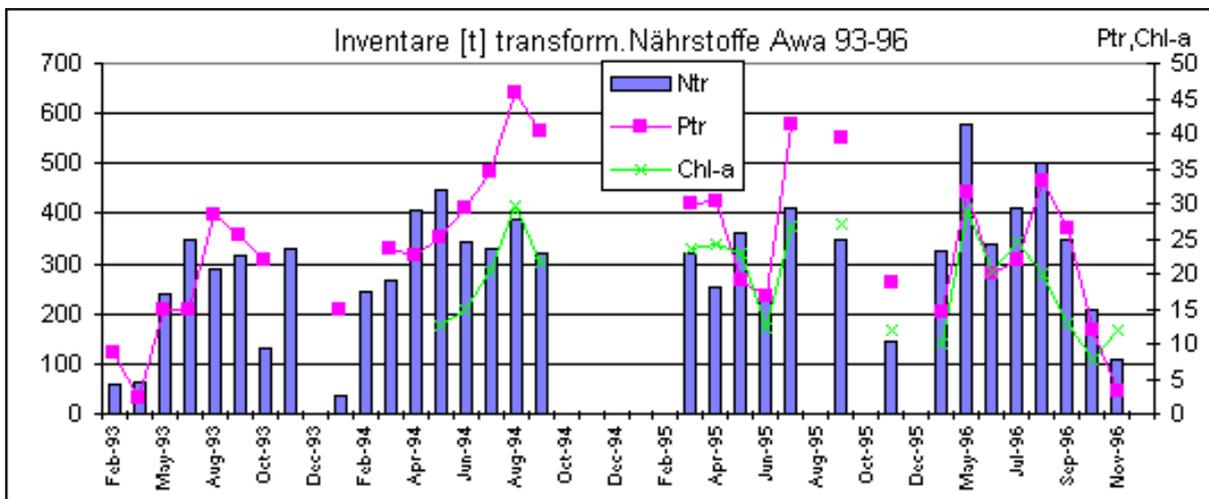
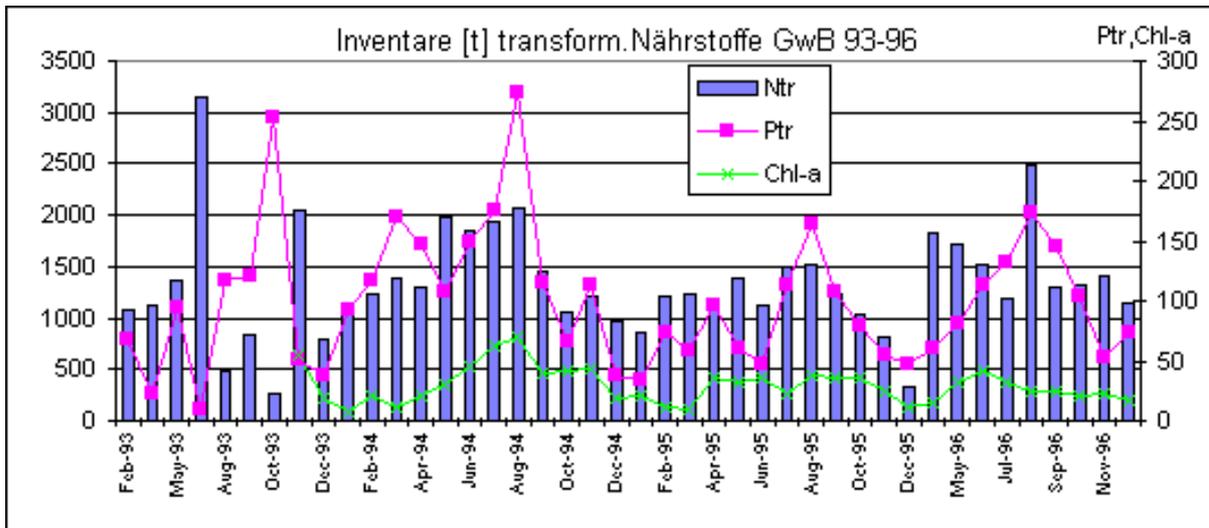
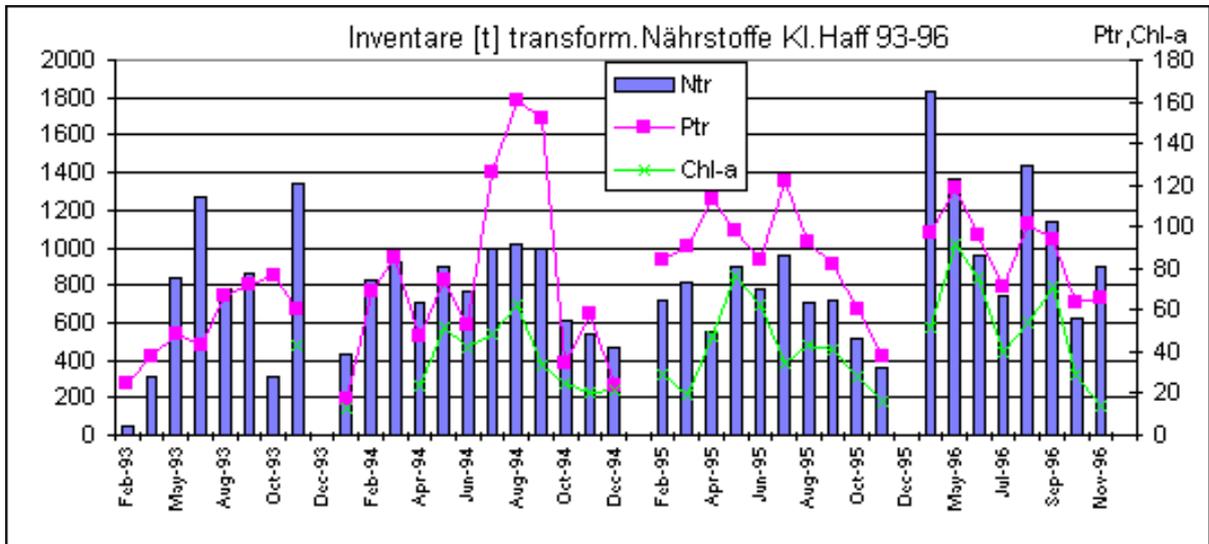
Abb. 6 Monatsmittelwerte der Inventare anorganischer Nährstoffe 1993-96

Zu Beginn 1996 fehlen die hohen Winterwerte, bei Eisaufbruch fand sich schon fast kein Phosphat mehr im Wasser, vielleicht die Folge einer bereits noch während der Eisbedeckung einsetzenden Planktonproduktion.

Silikat weist ein dem Phosphat ähnliches Verhalten auf. Niedrige SiO_4 -Gehalte im Pelagial korrelierten im Untersuchungszeitraum immer mit verstärktem Auftreten von Kieselalgen, in der Regel also im Frühjahr und Herbst, wobei in der zweiten Jahreshälfte die Kieselalgen im Kleinen Haff auch schon im Sommer wieder auftauchen können (August bis Oktober 95, LAUN Stralsund). Der Konzentrationsgipfel im Sommer ist eine Folge geringeren Verbrauchs einerseits wie auch relativ schneller Remobilisierung aus den Skeletten der sedimentierten Frühjahrsdiatomeen andererseits (vgl. LAMPERT, SOMMER 1993).

Die transformierten Nährstoffe $\text{N-tr} = \text{DON} + \text{PN} = \text{TN} - \text{DIN}$ und $\text{P-tr} = \text{DOP} + \text{PP} = \text{TP} - \text{DIP}$ zeigen als Produkte der biologischen Stoffwechselfvorgänge ein ganz anderes jahreszeitliches Verhalten. Sie erreichen ihre Jahresmaxima im Sommer und zeigen, manchmal etwas zeitversetzt, eine gute Korrelation mit der Sonnenscheindauer als Motor der Phytoplanktonproduktion (Abb. 7). Die transformierten Nährstoffe umfassen als Summengröße die Produkte biologischer Vorgänge einschließlich der Abprodukte wie Exsudate und Exkretionen in partikulärer und gelöster Phase, während Parameter wie

Phytoplanktonvolumen und Chl-a nur die partikulären Produkte der Bioproduktion erfassen.



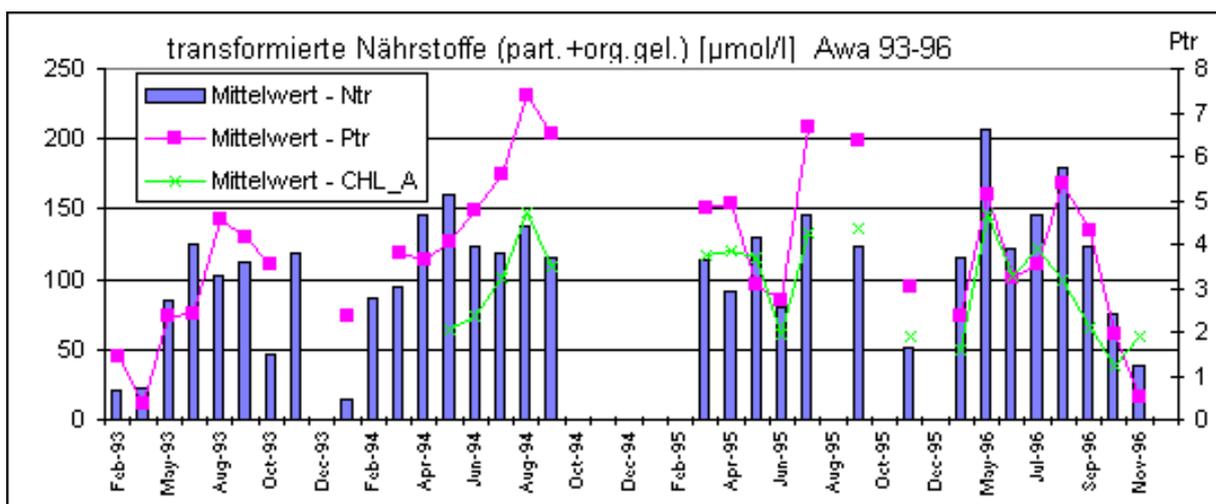
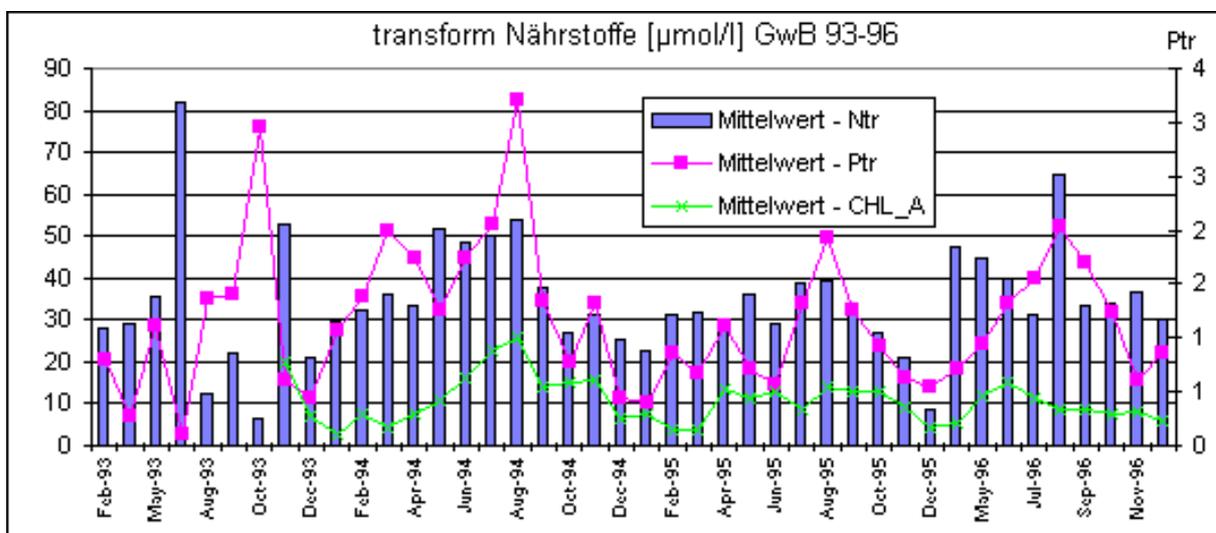
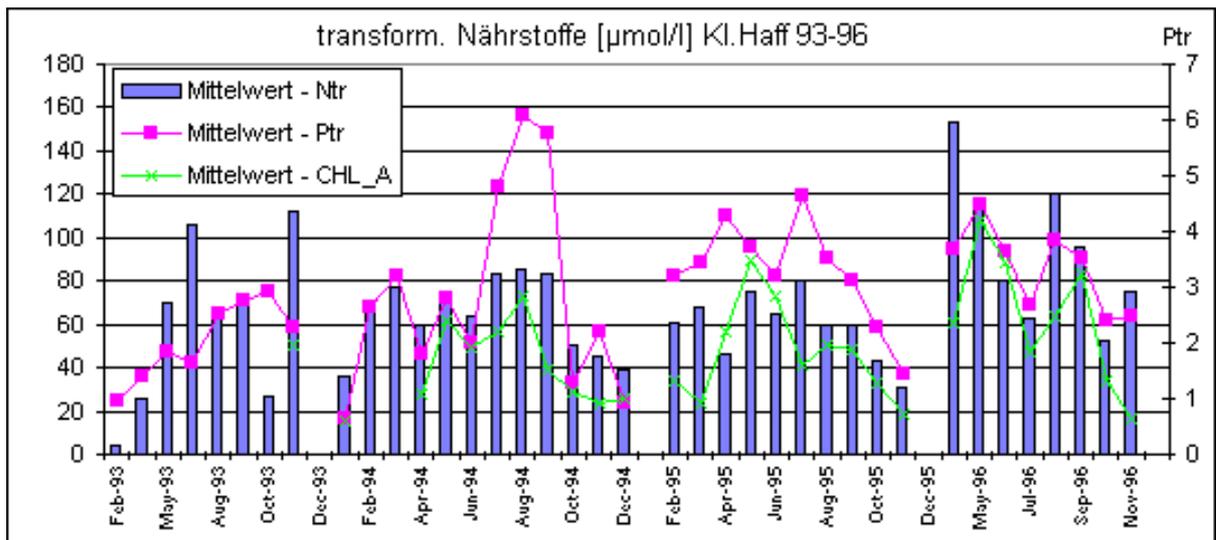


Abb. 7 Monatsmittelwerte transformierter Nährstoffe 1993-96

3.3.2 Nährstoffeinträge

Die Einträge der anorganischen Nährstoffe erfolgen quantitativ gesehen fast ausschließlich durch die in das Ästuar mündenden Flüsse. Entsprechend ihren Abflußmengen stellen Oder und Peene ca. 99% der eingeleiteten N- und P-Frachten (Tab. 5). Für SiO₄ liegen keine Angaben vor, doch ist mit einem ähnlichen Verhalten zu rechnen.

Tab. 5: Frachten von Oder und Peene 1994 und 1995 [t/a]

	Oder '94	Oder '95	Peene '94	Peene '95
DIN	66 000	51 000	6 500	3 300
TN	98 000	77 000	7 300	3 800
DIP	1 600	1490	60	40
TP	5 200	4900	160	90

Andere Einleiter sind Kläranlagen und Schöpfwerke von Entwässerungsgebieten. Die Frachten einiger großer Anlagen für das Jahr 1993 lassen erkennen, daß dieser Beitrag relativ klein ist: im Bereich des Peenestroms trugen die Kläranlagen Wolgast und Karlshagen sowie die Schöpfwerke Karrin und Mölschow zusammen ca. 90 t N und 6 t P ein (Bundesanstalt für Gewässerkunde 1994). Im Bereich des Greifswalder Boddens waren es laut Umweltbericht 1996 (Tab. 6):

Tab. 6: N- und P-Einträge aus Kläranlagen

Kläranlage	1990	1991-93	1994	1995
Stralsund	96 t P 560 t N	10-15 t P 270-300 t N	10 t P 280 t N	4 t P 90 t N
Greifswald	70 t P 280 t N	20 t P 180-200 t N	8t P 120 t N	5 t P 75 t N

Ähnliches gilt für Einträge aus der nassen Deposition: für 1994 und das gesamte Oderästuar ergeben sich nach Angaben des ITP LEIPZIG Einträge von ca. 1000t N und 5 t P, lediglich die Stickstoffeinträge liegen somit in der Größenordnung der Bilanzsummen von Greifswalder Bodden und Haff (Abb. 8 und 9).

3.4 Modellkopplung

Die Ankopplung der Nährstoffdaten des Wasserkörpers an das 2D-Strömungsmodell liefert zwei Klassen von Aussagen:

1. die Nährstofffrachten, die die Verbindungsstellen zwischen je zwei Kompartimenten in der einen bzw. anderen Richtung passieren und die sich daraus

für jedes Kompartiment errechnenden vorzeichenbehafteten Nettojahresbilanzen ([Abb. 8 und 9, .ppt](#)) sowie

2. den zeitlichen Verlauf der Nettoflüsse ZSUM (positiv : Zufluß, negativ : Abfluß) und der zu-/abflußbereinigten Inventarentwicklung SUM. Der Parameter SUM läßt erkennen, ob die im Jahresverlauf gemessenen Inventare zu einem Zeitpunktes durch interne Vorgänge oder durch Zu- oder Abfluß bedingt sind.

Es lassen sich drei Gewässertypen im Oderästuar aushalten ([Abb. 10](#)):

1. Kleines Haff und Achterwasser : Nährstoffzuflüsse spielen keine (DIP) oder eine gegenüber den internen Umsätzen geringere Rolle, so machen z.B. die NO₃-Zuflüsse mengenmäßig nur etwa ca. 20% der internen Umsätze aus.

2. Peenestrom : Die internen Umsätze werden nahezu ausschließlich aus Nährstoffzuflüssen gespeist, der Peenestrom ist daher die größte Senke für anorganische Nährstoffe im Ästuar.

3. Greifswalder Bodden : Bei starkem Wasseraustausch wie 1994 (Tab. 7) dominiert für NO₃ die interne Freisetzung, der Greifswalder Bodden erscheint damit als Nitrat-Quelle. Bei geringem Wasseraustausch (1995) tragen Zuflüsse ca. 25 % der internen Umsätze, der Bodden fungiert nun als Nitrat-Senke. Für DIP stellt der Greifswalder Bodden fast unabhängig vom Wasseraustausch eine permanente Quelle dar, gespeist aus internen Freisetzungsvorgängen.

	1994	1994	1995	1995
V_KOOS	[Mio m ³]	[Rate/Jahr]	[Mio m ³]	[Rate/Jahr]
Ausstrom	-10.708	-3,9	-12.574	-4,6
Einstrom	29.351	10,7	2.950	1,1
Bilanz	18.796	6,8	-9.704	-3,5
V_Ostrand				
Einstrom	-18.139	-6,6	-14.707	-5,3
Ausstrom	37.189	13,5	5.184	1,9
Bilanz	19.049	6,9	-9.707	-3,5

Tab. 7 Wasserbilanzen des Greifswalder Boddens 1994/95 (BUCKMANN 1997)

3.5 Nährstoffe im Sediment

Die [Analysen der Probenahme 1996](#) lassen einige interessante Aspekte erkennen :

1. Die oberen 2-5 cm der reinen Schlicksedimente im [Kleinen Haff](#) und Greifswalder Bodden weisen ein REDFIELD-Verhältnis (mol/mol) C_{org}/P von etwa 100 auf, entsprechend frisch sedimentierter organischer Materie, mit der Tiefe steigt das Verhältnis durch Abnahme der Phosphor - Konzentrationen (P-Freisetzungsvorgänge) drastisch an . Ob die Freisetzung dem

Modell von EINSELE/MORTIMER (Fe^{II} - Phosphat-Adsorption) folgt, ist bei den generell hohen Eisengehalten von $> 2\%$ Fe wahrscheinlich, kann hier aber noch nicht durch Analysenwerte bestätigt werden, sequentielle Extraktionen nach einem modifizierten PSENNER-Verfahren (JENSEN, THAMDRUP 1993) befinden sich noch in Arbeit. Die P-Verarmung in größeren Tiefen mit sinkenden E_h -Werten (bis unter -300mV) steht damit in Übereinstimmung. MORTENSEN et al. (1993) und SMITS & van der Molen (1993) beschreiben ähnliche P-freisetzenden Schichten in eutrophen Ästuaren und dem Küstenbereich der Nordsee.

2. Im [Achterwasser](#), das in vieler Hinsicht eine Sonderstellung im Oderästuar einnimmt (LAMPE 1990, 1993), liegt das C_{org}/P -Verhältnis dagegen mit > 200 auch in den oberen 2 cm weit oberhalb des REDFIELD-Verhältnisses (Tab. 8), was auf intensive Phosphat-Remineralisation in den oberen Millimetern des Sediments oder bereits im Pelagial hindeutet. Diese Vermutung wird unterstützt durch das in der Regel bereits in der oberen 2 cm-Schicht stark negative Redox-Potential im Achterwasser von $< -130\text{ mV}$ (ähnlich bereits von LAMPE (1990) beobachtet), während im Schlick des Kleinen Haffs und des Greifswalder Boddens in dieser Schicht in der Regel E_h -Werte um oder größer als Null gemessen wurden sowie durch die extrem hohen Schwefelgehalte $> 2.5\%$ bereits in den Oberflächenschichten der Achterwasser-Sedimente. In den ebenfalls suboxischen/anoxischen Schlickten des Kleinen Haffs weisen die Oberflächensedimente Schwefelgehalte von 1.2 - 1.5 % auf, erst in Tiefen von mehr als 15 cm werden S-Gehalte von $> 2.5\%$ gemessen.

Station	slice	1	2	3	4	5
AwaN	TOC/TP	241,9	255,9	269,4	285,6	363,5
AwaN	TOC/TN	8,7	8,6	8,9	8,8	8,9
AwaS	TOC/TP	244,0	251,2	275,2	300,9	377,2
AwaS	TOC/TN	8,7	8,6	9,0	9,7	9,6
TH3	TOC/TP	95,5	103,0	156,2	218,6	234,0
TH3	TOC/TN	9,0	9,0	8,7	8,9	9,2
K	TOC/TP	46,3	47,6			
K	TOC/TN	10,1	10,6			
L	TOC/TP	87,8	118,2			
L	TOC/TN	9,6	9,8			
M	TOC/TP	86,6	117,4			
M	TOC/TN	10,1	9,9			

slice: 1=0-2cm, 2=2-5cm, 3=5-10cm, 4=10-15cm, 5=15-20cm,
K, L, M: 1=0-5cm, 2=5-10cm

Tab. 8: REDFIELD-Parameter (molare Verhältnisse) in oberen Sedimentschichten des Oderästuars 1996, Mittelwerte von 9 bis 13 Probenahmen mit je 3 Kernen

Für derartige Vorgänge im Pelagial sprechen Analysen von [Schwebstoffen](#), die im Achterwasser

ebenfalls C/P-Verhältnisse um oder größer 200 aufweisen, immer aber größer sind als im Kleinen oder Großen Haff.

Suboxische Zustände sind im grundnahen Pelagial des Achterwassers nur in den selten auftretenden windstillen Zeiten beobachtet wurden (GOAP - SYNOPTA '94, 28.6.94 - 1.7.94), alle anderen hydrographischen Beobachtungen im Untersuchungszeitraum zeigten normale Sauerstoffsättigungen bis zum Grund. Damit wird eine ganz andere Deutung dieses Phänomens gestützt, die erst aus der Synthese von Untersuchungen innerhalb des GOAP-Projektes deutlich wird (s.u.).

3. Im südlichen Großen Haff ist an der Station K die Oder als Haupteinleiter von anorganischem Phosphat deutlich nachzuweisen, das TOC/TP-Verhältnis liegt noch in 10cm Tiefe mit <50 weit unter dem REDFIELD-Verhältnis, die P-Konzentrationen sind mit 0,5 % doppelt so hoch wie im Kleinen Haff.

4. Im Gegensatz zu den C_{org}/P -Verhältnissen zeigen die C_{org}/N -Relationen mit Werten um 9 in den Oberflächenschichten in Achterwasser und Kleinem Haff keine wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Gewässern (Tab. 8), was auf ähnliche Prozesse der C-Oxidation (Sulfatatmung) und N-Reduktion (Ammonifikation) in den obersten Sedimentschichten beider Gewässer deutet (BLACKBURN, BLACKBURN 1993).

5. Im Kleinen Haff bildet der Jahresgang der Phosphor-Konzentrationen in der oberen 2 cm-Sedimentschicht tatsächlich die [P-Freisetzung im Sommer 1996](#) ab: An der Station TH3 werden im Juli 1996 2.7 mg P/gTS gemessen, im August 2.0 mg P/g TS, entsprechend einer P-Freisetzung von 1.4 g P/m². Das ist etwas mehr als die aus der o-PO₄-Konzentrationen im Pelagial unter Berücksichtigung der externen Einträge (Modellkopplung mit 2D-Modell) abgeschätzte Freisetzung von 0.8 gP/m² für den Sommer 1994, bei ähnlichen Entwicklungen der o-PO₄-Konzentrationen im Pelagial 1996 (Abb. 6) .

6. Die Jahresverläufe der TC-, TN- als auch der [P-Konzentrationen](#) in den Schichten unterhalb 15 cm im Kleinen Haff und im Achterwasser könnte mit ihrem Anstieg im Frühsommer und Frühherbst 1996 bis in 20-25 cm Tiefe vermuten lassen, daß in den Schlickbecken des Achterwassers und des Kleinen Haffs die oberen 20 cm in Intervallen von einigen Monaten offenbar stark durchmischt werden. Diese Mischungstiefe findet sich in allen bisher entnommenen Sedimentkernen aus diesen Gebieten (vgl. Eidam et al. in diesem Band). Hinsichtlich der Zeitskala, auf der diese Durchmischungsvorgänge ablaufen, gibt es jedoch keine präzisen Angaben und die durch die Nährstoffanalysen nahegelegten Intervalle stehen bisher im Widerspruch mit den Ergebnissen anderer Autoren (BLANZ 1996, SHIMMIELD et al. 1995, LEIPE 1997, JANKE mdl. Mitt.)

Der Zusammenhang mit der Temperatur (Durchmischung in den Sommermonaten) sowie die in diesen Schlickbereichen geringe benthische Besiedelung, allenfalls *Chironomidae* (s. GÜNTHER, dieser Band) legen die Vermutung nahe, daß mikrobielle Aktivitäten diese Durchmischung verursachen. Produkte dieser Aktivitäten werden als Gasblasen in den Sedimentkernen regelmäßig gefunden und sind in Sedimentecholotaufnahmen als störender Reflektor in Dezimetertiefe unter der Schlickoberfläche auch oft großflächig verbreitet erkennbar (eigene Untersuchungen im Gebiet, ODER-Projekt unveröffentlicht). Windinduzierte Turbation kommt bei der hohen Erosivität dieser Schlicksedimente für die obersten cm ebenfalls in Frage, eine Wirkungstiefe von 20 cm kann aber praktisch ausgeschlossen werden (BURKHARDT 1997) .

4. Diskussion

4.1 Nährstoffe im Pelagial

Bei alleiniger Bindung in Organismen sollte N-tr/P-tr etwa dem theoretischen REDFIELD-Verhältnis $N/P = 16$ entsprechen. Diese Verhältniszahlen werden aber regelmäßig im gesamten Oderästuar nur in Zeiten höchster sommerlicher biologischer Aktivität erreicht, so im August 94/95, annähernd im Juli 94 und Sept. 94/95, 1996 dagegen gar nicht. Das entspricht den Zeitpunkten minimalen Angebots an gelöstem anorganischem Stickstoff, während ausreichend gelöste Phosphate zur Verfügung stehen, wobei auch die gelöst-organischen Stickstoffvorräte (P-freie Exsudate) bakteriell praktisch vollständig verwertet werden bzw. die Exsudation aus den Algen minimal ist. Damit liegt eine Stickstofflimitierung der Phytoplankton-Entwicklung nahe. Die Limitierung läßt die N-tr-Inventare in den jeweiligen Becken nicht über 2500 t im Greifswalder Bodden, 1400 t im Kleinen Haff und 500 t im Achterwasser anwachsen, trotz steigenden Angebots an gelöstem Phosphat in diesen Zeiten. Eine (vielleicht alternierend auftretende) Lichtlimitierung kommt ebenfalls in Frage (s. Beitrag HUBERT et al. in diesem Band).

Außerhalb dieser Zeiten bewegen sich die N-tr/P-tr-Verhältnisse zwischen 20 und 40 (mit einzelnen Extremwerten über 100), d.h. es liegt ein beträchtlicher Pool an phosphorfreien Exsudaten (Glykolsäure, Aminosäuren etc.) vor.

4.2 Nährstoffe in den Sedimenten

Unter Berücksichtigung der an den Sedimentproben 1996 bestimmten Parameter

- dry bulk density (DBD, Tab. 9),
- über das Jahr gemittelte Konzentrationen in den obersten 2 cm Sediment und
- Kompaktion ($DBD_{15-20\text{ cm}}/DBD_{0-2\text{ cm}}$)

lassen sich aus den Sedimentationsraten, die mit Pollenanalysen für Greifswalder Bodden und Oderhaff bestimmt wurden (LAMPE, JANKE 1997) Akkumulationsraten für Stickstoff (TN), organischen Kohlenstoff (TOC) und Gesamtphosphor (TP) berechnen (Tab. 10).

Die so ermittelten Akkumulationsraten liegen für den Greifswalder Bodden und das Kleine Haff ca. 50 % niedriger als bei LAMPE, JANKE (1997) angegeben (dort nur TOC-AR berechnet) mit nur ca. 10% höheren DBD in den dort untersuchten tieferen Sedimentschichten.

Tiefe [cm]	dry bulk density	TG2	Ari	AchtWasser	Kl.Haff
0-2	DBD [gTS/mlFS]	0.32	0.20	0.05	0.09
2-5	DBD [gTS/mlFS]	0.41	0.23	0.07	0.12
5-10	DBD [gTS/mlFS]	0.51	0.28	0.09	0.13
10-15	DBD [gTS/mlFS]	0.89	0.37	0.11	0.14
15-20	DBD [gTS/mlFS]	1.04	0.37	0.14	0.17
Kompaktion	(15-20)/(0-2)	3.2	1.8	2.8	1.9

Tab. 9: Mittlere dry bulk densities der oberen Sedimentschichten und Kompaktionen im

Oderästuar (TG2: sandiger Schlick, Ari, Achterwasser, Kl.Haff : Schlick)

Station	Daten	Konzentration [% v.TS]	Stabw [% v.TS]	DBD [g/ml]	Kompakt [mm/a]	paläo.SR [mm/a]	aktuell.SR [mm/a]	AR [g/m ² *a]	Sedim/Gewäss [t/a]
Ari	TN	0.60	0.12	0.20	1.8	0.6	1.1	1.33	265
Ari	TOC	5.26	0.42	0.20	1.8	0.6	1.1	11.56	2311
Ari	TP	0.12	0.00	0.20	1.8	0.6	1.1	0.27	53
TH3	TN	1.34	0.06	0.09	1.9	1.1	2.1	2.51	422
TH3	TOC	10.33	0.77	0.09	1.9	1.1	2.1	19.40	3260
TH3	TP	0.26	0.03	0.09	1.9	1.1	2.1	0.48	81
TH6	TN	1.28	0.12	0.09	1.9	1.1	2.1	2.40	402
TH6	TOC	10.07	1.13	0.09	1.9	1.1	2.1	18.91	3178
TH6	TP	0.29	0.03	0.09	1.9	1.1	2.1	0.54	90
AwaN	TN	1.84	0.08	0.05	2.8		-4.2	-3.89	-210
AwaN	TOC	13.74	0.55	0.05	2.8		-4.2	-29.00	-1566
AwaN	TP	0.15	0.01	0.05	2.8		-4.2	-0.31	-17
AwaS	TN	1.86	0.11	0.05	2.8		-4.2	-3.92	-212
AwaS	TOC	14.03	0.93	0.05	2.8		-4.2	-29.60	-1599
AwaS	TP	0.16	0.01	0.05	2.8		-4.2	-0.33	-18

Tab. 10: Charakteristische Sedimentparameter und daraus berechnete Akkumulationsraten TN: Gesamtstickstoff, TOC: gesamter organ. Kohlenstoff, TP: Gesamtphosphor; slice 1: 0-2 cm Sedimentschicht, paläo.SR: Sedimentationsrate der letzten 700 Jahre nach LAMPE, JANKE (1997), aktuell.SR: paläo.SR*Kompaktion {Achterwasser angenommen, x}.}, AR: Akkumulationsrate, Sedim im Gewässer: AR*Schlickfläche des Gewässers (Grw.Bodden: 200 km², Kleines Haff: 168 km², Achterwasser: 54 km²)

Im Vergleich zu den Bilanzen des Jahres 1995, die aus der Kopplung mit dem Strömungsmodell erhalten wurden ([Abb. 8 und 9](#)) ergibt sich folgendes Bild: Im Kleinen Haff liefert das Modell mit 167 t N-tr Überschuß 1995 nur 40 % des 1996 durch Sedimentation entzogenen Stickstoffs, beim Phosphor sind es 90 %. Verglichen mit 1996 lagen aber die gemessenen Konzentrationen für N-tr und P-tr 1995 deutlich niedriger. Die Jahresmittelwerte betragen lediglich N-tr (1995) = 62% N-tr (1996) bzw. P-tr (1995) = 89% P-tr (1996). Das sagt zwar noch nichts über die Transportbilanzen aus, deutet aber die Ursache der Differenzen an. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Akkumulationsraten.

Im Greifswalder Bodden ergibt das Modell mit 734 t Überschuß N-tr und -142 t Verlust P-tr in der Transportbilanz keine Übereinstimmung mit den im Sediment akkumulierten Mengen von 265 t N und 53 t P. Als Ursache kommen die geringe Stationsdichte und mangelnde Repräsentanz für das Gesamtgebiet der Wasserstationen im Greifswalder Bodden in Frage, die nicht in der Nähe der Profile liegen, über die die Hauptmenge des Wasseraustauschs erfolgt (VP_KOOS und VP_SUEN + VP_SUEM).

Im Achterwasser sind die Verhältnisse offenbar ganz anders, hier liefert das Kopplungsmodell einen Transportverlust von 295 t N und 30 t P, während mit angenommenen positiven Sedimentationsraten etwa halb so große Mengen sedimentieren sollten. Da das Achterwasser strömungsmechanisch relativ einfach gebaut ist und der Wasserstation hohe Repräsentanz zuzubilligen ist, folgt, daß im Achterwasser entweder keine Nettosedimentation stattfindet oder daß das Modell falsche Ergebnisse liefert. Nach den Untersuchungen von BLANZ (1996) treten im Sediment des zentralen Achterwassers PCB noch in mehr als 25 cm Tiefe auf. Zwar konnten SHIMMIELD et al. 1995 anhand der ²¹⁰Pb-Verteilung nur eine einheitliche Durchmischung bis in 12 cm Tiefe finden (was vielleicht darauf beruht, daß beide nicht am selben Kern gearbeitet

haben), aber auch die Primärproduktionsdaten von WESTPHAL (405 g C/m²a, davon 30% Nettoproduktion) lassen nicht auf Nullsedimentation schließen. Der Fehler kann eventl. in der vereinfachenden Annahme bestehen, die Gewässer als ideale Rührkessel zu betrachten, in denen die eingetragene Fracht sofort gleichmäßig verteilt wird. Damit wird die Fehlerbreite des hier praktizierten Ansatzes sichtbar.

4.3 Kopplung mit 2D-Modell

Die Jahresbilanzen aus der Modellkopplung für die hydrologischen Jahre 1994 und 1995 zeigen die Quellen und Senken der wichtigsten Nährstoffe im Oderästuar (Abb. 8 und 9). Das im GOAP-ZWISCHENBERICHT 1997 verwendete Verfahren der Ankopplung an das 2D-Strömungsmodell wurde nach Kenntnisnahme des Abschlußberichtes von BUCKMANN (1997) für die Einführung der Peeneabflüsse geändert. Der in diesem Bericht dargestellte mittlere Wasserstand im westlichen Oderästuar, mit deutlichem Pegelabfall zwischen Karnin und Zecherin, dem Mündungsgebiet der Peene, ließ eine Korrektur der Wassertransporte mit dem im Modell fehlenden Peeneabfluß nur peenestromabwärts, an den Profilen Lassen, Krummin, Karlshagen, Freest, SUES und VP_RUDEN zu, eine Korrektur an den Profilen KARNIN und GRENZE (wie im ZWISCHENBERICHT 1997 ausgeführt) ist eher unangebracht.

Für die Nitratbilanzierung ergeben sich außerdem Probleme aus den großen Unterschieden der Wasseraustauschraten im Greifswalder Bodden, die das 2D-Modell für 1994 und 1995 ergibt. Für Stickstoff stellt der Greifswalder Bodden offenbar eine schwache Senke dar, die enormen Unterschiede der Wasseraustauschraten zwischen 1994 und 1995 lassen Aussagen zur Quellen-/Senken-Funktion - 1994 fungiert das Gewässer scheinbar als Quelle, 1995 als Senke - jedoch nur mit großen Vorbehalten zu.

4.4 Vergleich mit der Jahresreihe 1972-1981

In dem Parameter SICHTTIEFE (SECCHI) läßt sich trotz der immanenten subjektiven Elemente die summarische Auswirkung der ökologischen Faktoren darstellen. Der Vergleich mit der Zeitreihe 1972-81 zeigt in allen Gewässerteilen geringfügig größere Sichttiefen in den monatlichen Mittelwerten, die infolge der Schwankungsbreiten statistisch allerdings nicht signifikant sind. Auffällig ist aber die Verringerung der Sichttiefen im Greifswalder Bodden in den Sommermonaten Juli/August sowohl in den Mittel- als auch in den Minimalwerten der Jahre 1993-96. Die im südlichen Kleinen Haff im Projektzeitraum und danach (Sept.94, Nov. 95, Okt 97) mehrfach beobachteten Sichttiefen > 3m (Grundsicht), sind 1972-81 möglicherweise deshalb niemals beobachtet wurden, weil dieses Gebiet abseits der WWD-/StAUN-Beobachtungsstationen liegt.

Die Gehalte der anorganischen Nährstoffe DIN und SiO₄ lagen 1993-96 innerhalb der 1972-81 beobachteten Schwankungsbreiten. Eine Ausnahme macht nur der südliche Peenestrom, der mit 673µmol DIN/l während des Frühjahrshochwassers 1994 deutlich höhere Werte aufwies als in ähnlichen Hochwassersituationen in der Zeitreihe 1972-81 (z.B. März 1978: 457 µmol DIN/l) .

Dagegen fallen die in allen Teilen des Ästuars, mit Ausnahme des Greifswalder Boddens, 1993-96 gegenüber 1972-81 deutlich verringerten Monatsmittel der o-PO₄-Gehalte auf, insbesondere sind in den Sommermonaten die Konzentrationen von >5 µmol P/l auf <3 µmol P/l reduziert. Nur im Übergang zum Großen Haff (Meßpunkt T.Haff) sind geringere Abnahmen der sommerlichen Phosphatkonzentrationen beobachtet worden. Diese Tendenzen lassen sich sogar in den Jahresmittelwerten nachweisen (Tab. 11).

Tab. 11: Jahresmittelwerte charakteristischer Parameter in Gewässerteilen des Oderästuars im [Vergleich 1993-1996 mit der Jahresreihe 1972-1981](#)

Diese Verringerung der Phosphatbelastung folgt zeitversetzt den Veränderungen in den Gewässern der alten Bundesländer in den 80-er Jahren, weitgehend als Folge der Umstellung auf phosphatfreie Waschmittel und der Modernisierung der Kläranlagen im deutschen Einzugsgebiet des Oderästuars seit 1990. Die ebenfalls deutliche Verringerung der Phosphatfrachten der Oder ist aber wohl weitgehend auf die ökonomisch bedingte, drastische Reduzierung des [Düngemittleinsatzes](#) im [polnischen](#) Teil des Odereinzugsgebietes zurückzuführen (FAO 1996). Andererseits zeigen die hohen NO_3 -Werte im Mündungsbereich der Peene (südlicher Peenestrom, SPS) eine in den letzten Jahren offenbar steigende Stickstoffzufuhr im deutschen Teil des Oderästuars .

5. Zusammenfassung([Quellen und Senken](#))

1. Das Kleine Haff stellt trotz großer interner Umsätze für die Nährstoffe aus der Oder nur eine schwache Senke dar, bei NO_3 und P-tr werden 20-25% des Eintrags aus dem Großen Haff (im folgenden Haffeintrag genannt) entzogen, bei N-tr 5%. Beim gelösten anorganischen Phosphat verhält sich das Kleine Haff indifferent, 1994 als schwache Quelle (+ 5%), 1995 war die Bilanz +/- 0. Das Kleine Haff erscheint ähnlich wie das Achterwasser als autochthon bestimmtes Gewässer, weist aber noch eine Nettosedimentation mit einer Massenakkumulationsrate MAR von etwa $190 \text{ g/m}^2 \cdot \text{a}$ ($0,3\% \text{ P} \rightarrow 50 \mu\text{molP m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) auf.
2. Der Peenestrom ist die bedeutendste Senke für anorganische Nährstoffe im westlichen Oderästuar. Hier werden 40-50% der eingetragenen Phosphate und Nitrate in Bioproduktion umgesetzt.
3. Die Peene ist im westlichen Oderästuar als Quelle bei den Stickstoffeinträgen von mindestens gleich großer Bedeutung wie die Oder (110-140% des Haffeintrags), bei Phosphor mit weniger als 20% des Haffeintrags aber von geringerer Bedeutung (Ausnahme Hochwasserjahr 1994: 70% o- PO_4) .
4. Das Achterwasser stellt mit seiner fast ganzjährig hohen Produktivität im Verhältnis zu seiner Größe und den geringen Wasseraustauschraten eine bedeutende Quelle für transformierte Nährstoffe dar, die scheinbar ca. 10 % der Peenestromfracht ausmachen. Aus Modellgründen wird hier ein größerer Fehler vermutet, der sich nur durch eine engabständigere Probenahme und Aufteilung des Gewässers in weitere Kompartimente umgehen ließe.
5. Der Greifswalder Bodden ist neben den Einleitern Oder und Peene die größte Quelle von Phosphor, sowohl als o- PO_4 (ca. 100% des Haffeintrags) als auch in transformierten P-Formen P-tr (ca. 50% des Haffeintrags). Diese Funktion erscheint relativ unabhängig von den Wasseraustauschraten.
6. Das Phosphorinventar von 12 g P/m^2 in den obersten 5cm im Schlick des Kleinen Haffs, dem am stärksten belasteten Teil des Oderästuars neben dem Großen Haff, läßt in Verbindung mit den beobachteten kurzfristigen Remobilisierungsraten von ca. 1.5 g

P/m^2 (in 30 Tagen: $1615 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), dem abnehmenden Inventar in tieferen Sedimentschichten (geogener Untergrund bei 0.05% P, d.h. max. 16 gP/m^2 zwischen 5 und 20cm Sedimenttiefe), eine Latenzzeit zur Aufrechterhaltung des jetzigen Phosphatinventars im Wasser von ca. 10 Jahren erkennen. Das impliziert aber die unrealistische Annahme, daß zukünftig kein Phosphat eingetragen wird. In der Oder ist wohl eher mit einem zukünftigen Wiederanstieg der P-Belastung zu rechnen, wenn sich die Landwirtschaft in dem zukünftigen [EU-Mitglied Polen erholt](#). Die Realisierung des [hot-spot-Programms der HELCOM](#) durch die EU reduziert allenfalls ca. 50% der P-Einträge, die aus Punktquellen stammen. Die diffusen Einträge vorwiegend aus der Landwirtschaft sind davon nur mittelbar betroffen.

7. Der permanente Austrag von Phosphor aus dem Greifswalder Bodden läßt Hoffnung auf eine langfristige Verbesserung der Nährstoffsituation dieses Gewässers im Sinne einer Retrophierung.

8. Für das intensiv beprobte Jahr 1996, für das auch exakte Abflußmessungen der Peene vom STAUN Ueckermünde ab April durchgeführt wurden, fehlen bisher Rechnungen eines Strömungsmodells. Diese Modellrechnungen sollten unbedingt in einem Nachfolgeprojekt für dieses gut beprobte Jahr 1996 durchgeführt werden. Es ergäbe sich daraus auch die Möglichkeit, sich bisher widersprechende Aussagen zu überprüfen.

6. Literatur

ANDERSSON, L. & L. RYDBERG (1993): Exchange of Water and nutrients between the Skagerrak and the Kattegat. - *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **36**: 159-181

BACHOR, A. (1990): Räumliche und zeitliche Veränderungen ausgewählter hydrographisch-chemischer Parameter in den Küstengewässern der DDR. - *Wiss. Z. Univ. Greifswald, Math.-nat. R.* **39** (3): 29-34.

BLACKBURN, T. H. & N. D. BLACKBURN (1993): Rates of microbial processes in sediments. - *Phil. Trans. Royal Soc. Lond. A.* **344**: 49-58.

BLANZ, T. (1996): Dokumentation und Massenbilanz des Chlorbiphenyl-Eintrags der Oder in die Südpommersche Bucht. - *Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität Kiel*, **277**: 101pp.

BRANDT, K. (1894/96): Ueber das Stettiner Haff. - *Wiss. Meeresuntersuch. N. F.* **1** (2): 107 - 141.

BREITENBACH, E.: noch unveröffentlichte Ergebnisse. - *Inst. f. Geographie Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald*.

BUCKMANN, K. (1997): Berechnung der Wasseraustauschprozesse mittels eines zweidimensionalen HN-Modells. - *GOAP Abschlußbericht 1997*.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (1994): Gutachten zu Stoffhaushalt und Wasserbeschaffenheit als Bestandteil der Umweltverträglichkeitsstudie Fahrwasserausbauvorhaben Nördlicher Peenestrom, BfG-Bericht 0816, Berlin.

- Burkhardt, K. (1997): Experimentelle Untersuchungen zu Erosions- und Sedimentationsprozessen im Oderästuar. - Unveröff. Report, Univ. Greifswald, Institut für Geographie, 31 S.
- CORRENS, M. (1973): Über die Wasserstandsverhältnisse des Kleinen Haffs und des Peenestroms. *Wiss. Z. Univ. Berlin, Math.-nat. R.* **22** (6): 677 - 692.
- CORRENS, M. (1977): Grundzüge von Hydrographie und Wasserhaushalt der Boddengewässer an der Küste der Deutschen Demokratischen Republik. - *Acta hydrochim. et hydrobiol.* **5** (6): 517 - 526.
- CORRENS, M. (1978): Water balance in the bodden waters along the GDR coastline. - *J. Hydrol. Sci.* **5** (1): 81 - 86.
- DAHLKE, S., LAMPE, R., MEYER, H., MUSIELAK S. & H. WESTPHAL (1995): Nährstoffe im Oderästuar: zur Funktion des Gewässers als Transformator. - GOAP Zwischenbericht 1995, Teilprojekte 2, 2a, 2c und 3, 1-12.
- FAO (1994): Fertilizer Yearbook .
- GÜNTHER, B. (1997): Die Bedeutung des Makrozoobenthos für den Kohlenstoffumsatz im Sediment. - GOAP Abschlußbericht.
- Institut für Troposphärenphysik Leipzig (1995): persönl. Mitteilung.
- JENSEN, H. S. & B. THAMDRUP (1993): Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. - In: Boers, P. C. M., Cappenberg, T. E. & W. van Raaphorst (eds.): *Proceedings of the Third International Workshop on Phosphorus in Sediments*, 47-59 (= *Hydrobiologia*; **253**).
- LAMPE, R. (1990): Neue Untersuchungsergebnisse zur Hydrographie des Greifswalder Boddens. - *Wiss. Z. Univ. Greifswald, Math.-nat. R.* **39** (3): 38-41.
- LAMPE, R. (1993): Environmental state and material flux in the western part of the Oder river estuary - results and consequences. - *Peterm. Geogr. Mitt.* **137**: 275 - 282.
- LAMPE, R. & H. MEYER (1995): Räumliche und zeitliche Muster der Verteilung von Wasserinhaltsstoffen im Westteil des Oder-Ästuars. - *Wasser, Boden* **47**(9): 14 - 19.
- LAMPE, R. & W. JANKE (1997): New Investigations about the sedimentation history of the Westpomeranian estuaries. - Vortrag 5th Conference of the Baltic Marine Geologists (BMG), Vilnius, 6.-11.10.1997.
- LAMPERT, W. & U. SOMMER (1993): *Limnoökologie*. - Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 440 S.
- LAUN Stralsund: Monatsberichte Zustand der Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns.
- Leipe, T. (1997): Geochemische Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Oderhaff zur Rekonstruktion der Eutrophierung und anthropogenen Belastung. - *Bodden* **5**: 97 - 108.
- LEIPE, T. BRÜGMANN, L. & U. BITTNER, 1989): Zur Verteilung von Schwermetallen in rezenten Brackwassersedimenten der Boddengewässer der DDR. -

Chem. Erde **49** (1): 21 - 28.

MERTINKAT, M. L. (1986, 1991): Der Wasserhaushalt der Bodden - und Haffgewässer 1966 - 1985 (1966 - 1990). - Unveröff. Manusk. WWD Warnemünde.

Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt, Mecklenburg-Vorpommern (1997): Umweltbericht 1996. - Schwerin .

MLODZINSKA, Z. (1980): Hydrochemia. - In: Zalew Szczecinski, Warszawa, 248-285 (poln.)

MORTENSEN, P. B., JENSEN, H. S., RASMUSSEN, E. K. & B. THAMDRUP (1993): Seasonal variation in P-pools, porewater SRP and P-release in a coastal marine sediment. - In: Boers, P. C. M., Cappenberg, T. E. & W. van Raaphorst (eds.): Proceedings of the Third International Workshop on Phosphorus in Sediments, 101-102 (= Hydrobiologia; **253**).

NEHRING, D. et.al. (1990): Nutrients. - In: Status of the Baltic Sea - A Sea in Transition. - Ambio, Spec. Rep. **7**: 5-7.

NIXON, S. W. & V. LEE (1981): The flux of carbon, nitrogen and phosphorus between coastal lagoons and offshore waters. - UNESCO technical papers in marine science **33**: 325-345.

OSADCZUK, A., LAMPE, R., MEYER, H. & D. SOBIERAJ (1996): Characteristics of recent sediments from Szczecin Bay. - Rozpr. Hydrotechniczne (Hydrotechnical Transactions) **60**: 119 - 128.

PASTUSZAK, M., NAGEL, K. & G. NAUSCH (1996): Variability in nutrient distribution in the Pomeranian Bay in September 1993.- Oceanologia, **38** (2): 195 - 225.

STAUN Ueckermünde: mdl. Mitteilung

SCHMIDT, I. (1990): Beziehungen zwischen Phytoplankton und Nährstoffverhältnissen im südlichen Greifswalder Bodden. - Wiss. Z. Univ. Greifswald, Math.-nat. Reihe **39**: 35-38.

SCHMIDT, I. (1991): Beziehungen zwischen Algenentwicklung und Einflußfaktoren im südlichen Greifswalder Bodden. - In: 1. Nat. Konferenz zum Schutz der Ostsee. UBA-Texte 14/91: 107 - 123.

SCHMIDT, I. (1996): Langzeitdatenreihen aus dem westlichen Arm des Oder-Ästuars; Möglichkeiten und Grenzen des Informationsgewinns. - GOAP, unveröff. Mskr.

SCHNESE, W. (1973a): Untersuchungen zur Produktionsbiologie des Greifswalder Boddens (südliche Ostsee). I: Die Hydrographie - Salzgehalt, Sauerstoffgehalt, Temperatur und Sestongehalt. - Wiss. Z. Univ. Rostock, Math.-nat. R. **22** (6 / 7): 629 - 639.

SCHNESE, W. (1973b): Untersuchungen zur Produktionsbiologie des Greifswalder Boddens (südliche Ostsee). II: Die Verteilung von Phosphor, Stickstoff und Silicium in den Jahren 1962 - 1965. - Wiss. Z. Univ. Rostock, Math.-nat. R. **22** (6/7): 641 - 656.

SCHOKNECHT, G. (1973): Einige Untersuchungsergebnisse über die Wasserbeschaffenheit des Greifswalder Boddens.- Acta hydrobiol. hydrochim. **1** (4): 387 - 395.

SCHOKNECHT, G. & M. CORRENS (1973): Untersuchungen über Salzgehalt und Temperaturverhältnisse des Kleinen Haffs. - Wiss. Z. Univ. Berlin, Math.-nat. R. **22** (6): 705 - 717.

SHIMMIELD, G., BRAND, T. et al. (1995): ODER-project final report. - EC Environment Programme (PL 9103989): 9 - 25.

SMITS, J. G. C. & D. T. van der MOLEN(1993): Application of SWITCH, a model for sediment-water exchange of nutrients, to Lake Veluwe in The Netherlands. - In: P. C. M. Boers, T. E. Cappenberg, W. van Raaphorst (eds.): Proceedings of the Third International Workshop on Phosphorus in Sediments. - Developments in Hydrobiology **84**. Reprinted. Boers, P. C. M., Cappenberg, T. E. & W. van Raaphorst (eds.), Proceedings of the Third International Workshop on Phosphorus in Sediments, 47-59 (= Hydrobiologia **253**).

UMWELTBUNDESAMT: DATEN ZUR UMWELT 1990/91.

Wasserstrassenamt STRALSUND (1995): Dokumentation der Sturmflut am 03. und 04.11.1995.