

Gerald SCHERNEWSKI, Thomas NEUMANN & Magdalena WIELGAT

Referenzwerte für Hydrochemie und Chlorophyll-a in deutschen Küstengewässern der Ostsee

Hydro-chemical and chlorophyll-a reference conditions in southern German Baltic coastal waters according to the European Water Framework Directive

Abstract

We applied two models for the simulation of historic trophic conditions in German Baltic coastal waters: a 3-D circulation model with a biogeochemical module (ERGOM) for the complete Baltic Sea as well as a simple box-model for a lagoon. The aim is to provide reference data for nitrogen, phosphorus and chlorophyll, which is required for the implementation of the European Water Framework Directive (WFD). We assume that the trophic situation a century ago is well suitable as a reference. We focused on German outer coastal waters as well as the Szczecin (Oder) Lagoon. The Baltic Sea and the lagoon are controlled by nutrient loads from river runoff. Based on literature, we calculated historical loads for the early industrial state about 100 years ago which were used as input data for the model.

For the mixed surface layer of the coastal German Baltic Sea, we calculated maximum winter concentrations for dissolved phosphorus (dissolved inorganic nitrogen) of 0.3 (3) mmol m^{-3} for the situation a century ago. Maximum chlorophyll-a concentrations are around 2.5 mg m^{-3} . A total phosphorus reference concentration of 0.35 mmol m^{-3} for the German outer coastal waters seems to be realistic and is in agreement with reference concentrations of 0.6 mmol m^{-3} TP suggested for near shore Baltic coastal waters. The concentrations of all parameters vary for different coastal waters, depending on exposure to nutrient sources, and show strong interannual variability.

For the Szczecin (Oder) Lagoon, the box model shows for the historic state only 35 % (15 %) of the recent total nitrogen (total phosphorus) concentrations. We suggest reference concentrations for the Kleines Haff (small lagoon) of 30 mmol m^{-3} TN and 0.8 mmol m^{-3} TP. For the Wielki Zalew (large lagoon) we suggest 42 mmol m^{-3} TN and 0.9 mmol m^{-3} TP. A century ago, chlorophyll concentrations were about 70 % lower throughout the vegetation season and reference values of 17 (24) mg m^{-3} Chlorophyll-a for the Kleines Haff (Wielki Zalew) are calculated. Different than today, primary production was not limited by light 100 years ago but nutrients played an important limiting role. All model applications are based on simplifications and therefore certain weaknesses and limitations are innate, which are briefly discussed.

Keywords: background conditions, nitrogen, phosphorus, river loads, Szczecin Lagoon, Pomeranian Bay, Odra river, nutrients, limitation, primary production.

1 Zielsetzung

Unter Nutzung des Ökosystemmodells für die Ostsee (ERGOM) werden die Konzentrationen der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor sowie von Chlorophyll-a in den äußeren, deutschen Küstengewässern der Ostsee um das Jahr 1900 (historische Situation) abgeschätzt. Im Oderhaff (Stettiner Haff) wird zum selben Zweck ein einfaches Boxmodell eingesetzt. Die Ergebnisse können als Referenz- bzw. Hintergrundwerte für Wasserqualitätsbewertungen entsprechend der EU-Wasserrahmenrichtlinie dienen. Die gezeigten Ergebnisse für die deutsche Ostseeküste leiten sich aus den Simulationen für die zentrale Ostsee ab (Schernewski & Neumann 2005).

2 Methoden

2.1 Ableitung historischer Flussfrachten

Die Nährstoffkonzentrationen und die Produktivität der Ostsee hängen von den Nährstoffeinträgen aus den Flusseinzugsgebieten ab. Die deutliche Zunahme der Nährstoffkonzentrationen und Primärproduktion während des vergangenen Jahrhunderts ist auf eine Zunahme der Nährstofffrachten vor allem in den großen Flüssen zurückzuführen (e.g. Nehring & Nausch 1996). Eine Ableitung von Referenzwerten für die Ostsee muss also in den Flusseinzugsgebieten ansetzen. Durch den starken horizontalen Austausch in der Ostsee muss zudem die gesamte Ostsee in die Simulation einbezogen werden, was die Anforderungen an Datensammlung und –aufbereitung sowie an Rechenzeit massiv erhöht. Grundlage für die Simulationen mit dem Ökosystemmodell für die Ostsee (ERGOM) sind dementsprechend die Ableitung und Bereitstellung von Nährstofffrachten in die gesamte Ostsee. Diese Nährstofffrachten sollen die Situation um 1900 widerspiegeln und wurden auf der Grundlage verschiedener Literatur (Hamm 1993, LAWA 1996, LAWA 1998, Behrendt et al. 1999, Humborg et al. 2004, Behrendt & Dannowski 2005) abgeschätzt. Zunächst wurde nach mittleren Nährstoffkonzentrationen für alle Eintragsquellen gesucht, die die Situation vor 1900 widerspiegeln. Diese Werte sind die Referenzwerte für die Fließgewässer. Die Konzentrationen wurden mit den gemessenen Abflussdaten der Jahre 1980 bis 1990 multipliziert um die Frachten und gleichzeitig die Jahresdynamik und interannuelle Variabilität zu erhalten. Die 1980er Jahre wurden gewählt, da das Ostseemodell konkrete Antriebsdaten benötigt. Für die 1980er Jahre liegen vollständige Wetter- und Abflussdaten vor und sie weisen zudem keine Extremjahre auf, wie die frühen 1990er Jahre.

Die Arbeitsgruppe "Zielvorgaben" der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat 1998 eine Güteklassifikation für Nährstoffe in Fließgewässern herausgebracht. In die Güteklasse sind Konzentrationsobergrenzen für die geogenen Hintergrundkonzentrationen in Fließgewässern angegeben: Gesamtstickstoff (TN) < 1 mg g⁻¹; Nitrat-N < 1 mg l⁻¹; Ammonium-N < 0,04 mg l⁻¹; Gesamtphosphor (TP) < 0,05 mg l⁻¹ und Phosphat-P (DIP) < 0,02. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Konzentrationen neben dem geogenen Hintergrund auch bereits Nährstofffreisetzungen durch menschliche Aktivitäten zu einem bedeutenden Teil mit

beinhalten. Die Güteklasse 1 in Bezug auf TP erreichen 5 % aller deutschen Messstellen und diese vor allem in Bereichen, wo hohe Abflüsse die P-Konzentrationen verdünnen. Nur 2 % der deutschen Messstellen fallen beim TN in die Güteklassen 1 und 2 (LAWA 1998). Von diesen Zielvorgabewerten der Güteklasse 1 wird angenommen, dass sie die Situation vor 1900 widerspiegeln. Die Festlegung auf die Zeit vor 1900 ist dabei willkürlich. Gemeint ist eine Situation mit mäßiger Industrialisierung und vor allem vor den starken, düngemittel-bedingten Produktionssteigerungen in der Landwirtschaft.

Die Zielvorgaben der LAWA (1998) wurden von einer Expertenkommission erarbeitet und sind für Deutschland verbindlich. Sie stellen damit die einzige einvernehmliche Datenquelle dar. Für unsere Untersuchungen wurden jeweils die Obergrenzen der Güteklasse 1 zugrunde gelegt, da vor allem die großen Flusseinzugsgebiete schon vor 1900 vergleichsweise intensiv genutzt wurden und bereits von einer merklichen Verschmutzung auszugehen ist. Die aktuellen Daten der großen Flüsse zeigen, dass im Mündungsbereich großer Einzugsgebiete, die wir ausschließlich betrachten, mittlere Verhältnisse zu beobachten sind, die sich zwischen den Flüssen nicht stark unterscheiden. Die deutschen Zielvorgaben wurden auf die großen polnischen Flusseinzugsgebiete der Oder und Warthe übertragen, da dort sowohl klimatisch als auch geologisch vergleichbare Bedingungen herrschen.

Um die so berechneten Flussfrachten auf ihre Plausibilität hin zu untersuchen wurden ergänzende Quellen und Berechnungsmethoden verwendet. Nach Lübbe 1992 (in Hamm 1993) beträgt die Grundfracht für Nährstoffeinträge aus diffusen Quellen in Deutschland bis zu $0,08 \text{ kg P ha}^{-1}$ bzw. bis zu 4 kg N ha^{-1} . Diese Grundfrachten spiegeln immer auch Aspekte der landwirtschaftlichen Praxis wider. Unabhängig von Düngergaben führen Veränderungen in der Landnutzung zu Ungleichgewichten in den Ökosystemen mit der Folge erhöhter Nährstoffausträge. Für die Oder und die Weichsel wurden die Grundfrachten nach Lübbe (1992) sowie Referenzfrachten nach LAWA (1998) berechnet. Am Beispiel der Oder kann das verdeutlicht werden: In den späten 1980er Jahren betrug der Eintrag von N etwa 70.000 t a^{-1} und der P-Eintrag 5000 t a^{-1} . Nach Lübbe (1992) ergeben sich Grundfrachten beim Stickstoff von 30.000 t a^{-1} und beim Phosphor von 600 t a^{-1} (jeweils gelöste Verbindungen). Entsprechend der LAWA-Referenzwerte ergeben sich 24073 t N a^{-1} und 481 t P a^{-1} . Beide Ansätze stimmen recht gut überein.

Zahlreiche Flüsse in Norden Schwedens und Finnlands sind noch in einem weitestgehend unbelasteten Zustand, der sich von dem vor 1900 kaum unterscheidet (Humborg et al. 2004). Für die Flüsse Iijoki, Oulujoki, Kemijoki, Torneälven, Kalixälven, Råneälven, Luleälven, Piteälven, Skeleffeälven, Umeälven, Ångermanälven, Indalsälven, Ljusnan und Dalälven wurden die N- und P-Konzentrationen durch Humborg et al. (2004) zur Verfügung gestellt, aus denen dann die Frachten vor 1900 berechnet wurden. Die starke Wasserführung skandinavischer Flüsse, die andersartige Landnutzung sowie die dünnere Besiedlung bedingen, dass sich hier sowohl für N als auch P wesentlich geringere Konzentrationen in den Flüssen zeigen.

Für die baltischen Flüsse Neva, Narva und Daugawa, die südfinnischen Flüsse Kemijoki und Kokemäenjoki sowie die südschwedischen Flüsse Helgean, Eman-

Motal und Maelaren wurden deshalb Referenzkonzentrationen berechnet, die die regionalen Gegebenheiten berücksichtigen. Hierin flossen Daten zur Landbedeckung, zum Anteil der Landnutzungsarten sowie zur Bevölkerungsverteilung ein. Die gesamten Nährstofffrachten wurden vereinfachend für die Modellsimulation insgesamt 14 Flüssen in der gesamten Ostsee zugeordnet. Für die atmosphärische Deposition wurde 1/10 des mittleren Wertes der 1980er Jahre angenommen.

Im Vergleich zu den mittleren Nährstoffeinträgen in die Ostsee zwischen 1970 und 1990 stellen die für die Berechnung der Referenzwerte in der Ostsee angenommenen Nährstofffrachten eine Reduktion um etwa 68 % beim Stickstoff und 76 % beim Phosphor dar. Im Falle der Oder, die die dominierende Eintragsquelle entlang der deutschen Ostseeküste darstellt ergibt sich eine Reduktion um 65 % beim Stickstoff und 89 % beim Phosphor. Die starke Reduktion der Phosphoreinträge in die Oder ergibt sich durch die aktuell sehr hohen Phosphoreinträge aus Punktquellen. Diese resultieren aus unzureichender Abwasserklärtechnik in Polen. Insgesamt muss aber festgehalten werden, dass die Nährstofffrachten mit den Flüssen in die Ostsee je nach Literaturquelle stark schwanken.

Tab. 1 Abflussmengen und Nährstoffkonzentrationen in 14 Flusseinzugsgebieten der Ostsee. Angegeben sind die mittleren Konzentrationen zwischen 1970 und 1990, die für den Kontrolllauf des Modells sowie die abgeleiteten Referenzkonzentrationen, die die Grundlage für diese Referenzwert-Simulation in der Ostsee bildete. Es wurde davon ausgegangen, dass neben dem PO₄-P auch ein regional variierender Anteil des organisch gebundenen Phosphors in den Flüssen bioverfügbar ist. Die Summe des bioverfügbaren Phosphors wird als Total Dissolved Phosphorus (TDP) bezeichnet.

	km ³ a ⁻¹	1970-1990 [mmol m ⁻³]			Referenzkonzentr. [mmol m ⁻³]		
		NH ₄	NO ₃	TDP	NH ₄	NO ₃	TDP
Goetaaelv	27.3	7.7	54.5	0.4	1.0	10.0	0.2
Helgean	4.0	3.8	36.1	0.2	1.0	10.0	0.2
Eman-Motal	11.3	3.9	27.6	0.4	1.0	10.0	0.2
Maelaren	0.8	72.5	83.0	32.3	1.0	10.0	0.4
Angermansalv	57.6	1.1	6.6	0.1	0.4	3.6	0.1
Umealv	19.3	0.8	4.2	0.1	0.4	3.6	0.1
Lulealv	53.0	1.4	3.7	0.1	0.4	3.6	0.1
Kemijoki	44.8	4.5	9.9	0.5	0.4	3.6	0.1
Kokemäenjoki	14.5	10.5	39.4	1.3	1.0	10.0	0.2
Neva	92.5	11.2	22.5	0.5	1.0	10.0	0.2
Narva	18.4	6.9	43.8	0.9	1.0	10.0	0.2
Daugawa	32.8	25.6	94.5	1.3	2.0	20.0	0.4
Njemen	27.2	21.3	128.5	0.7	2.0	30.0	0.4
Weichsel	49.1	45.8	122.6	3.1	2.9	68.6	0.6
Oder	24.1	28.5	173.5	5.9	2.9	68.6	0.6

2.2 Modellsimulation der Ostsee

Für die Simulationen wird ein existierendes und vielfach genutztes Ostsee-Ökosystemmodell verwendet. Details zum Hintergrund, zum Modell selbst sowie dessen Validierung finden sich in Pacanowski et al. 1990, Janssen et al. 1999, Neumann, 2000, Neumann et al. 2002). Praktische Anwendungen des Modells sind

in Neumann & Schernewski (2001, 2002) sowie Schernewski & Neumann (2002a,b) dokumentiert. Nachfolgend nur einige praktische Informationen zur Simulation: Die horizontale Auflösung des Modells beträgt im westlichen Teil der Ostsee 3 nm (Nautische Meilen) und wird ab der Gotlandsee in nordöstlicher Richtung vergrößert. In der Bottenwiek beträgt die horizontale Auflösung 9 nm. In der Vertikalen ist die Auflösung 3 m in den obersten 100 Metern. Danach beträgt sie 6 m. Das Modell berücksichtigt entsprechend der gewählten räumlichen Auflösung (167*151*77, geographische Länge, Breite und Tiefe) über 1 900 000 Gitterpunkten. Die notwendige zeitliche Auflösung (Stabilität der numerischen Integration) beträgt 6 Minuten. Mit dieser Konfiguration benötigt die Simulation eines Monats ca. 2 Stunden Rechenzeit auf einem *SuperComputer* (IBM pSeries 690 server) unter Nutzung von 32 Prozessoren. Für die Berechnung eines Simulationsjahres wurden in der Praxis etwa 3 Tage Rechnerzeit benötigt.

Die Anfangswerte für die hier beschriebene Simulation wurden aus bereits durchgeführten Simulationen abgeleitet. Die Grundlage bildet ein Szenario bei dem die Nährstofffrachten der Flüsse im Einzugsgebiet der Ostsee um 50 % verringert wurden (Neumann & Schernewski 2005). Die nach 11 simulierten Jahren vom Modell berechneten Konzentrations-Verteilungen in der Ostsee bildeten die Startbedingungen für die im Rahmen dieses Projektes erfolgte Simulation. Die Ergebnisse für die zentrale Ostsee sind in Schernewski & Neumann (2005) ausführlich dokumentiert.

Das Modell startete auf der Basis der meteorologischen Verhältnisse des Jahres 1980 aber mit Nährstoffeinträgen, die denen vor 1900 entsprechen. Nach 11 Simulationsjahren stellen sich zumindest in Küstengewässern Gleichgewichtskonzentrationen ein, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass sie die Situation um 1900 widerspiegeln. Für die Simulation wurden die tatsächlichen meteorologischen Daten der Jahre 1980 bis 1990 verwendet.

2.3 Modellsimulation im Stettiner (Oder) Haff

Das Ostseemodell ist in seiner derzeitigen räumlichen Auflösung nicht für Anwendungen in den inneren Küstengewässern geeignet. Im flachen, ständig durchmischten Stettiner Haff spielen die Gewässerphysik und laterale Transportprozessen bei langfristigen Betrachtungen keine wesentliche Rolle. Hier bietet sich deshalb die Nutzung eines einfachen, dynamischen Boxmodells an, welches lediglich zwischen Großem und Kleinen Haff differenziert. In Wielgat & Witek (2004) findet sich eine detaillierte Modellbeschreibung und eine Validierung. Als Zustandsvariablen werden DIN, PO₄-P im Wasser, N und P im Detritus und im Sediment sowie eine Phytoplanktongruppe berücksichtigt. Als Prozesse werden Mineralisation der Nährstoffe im Wasser und im Sediment, Denitrifikation, Festlegung im Sediment sowie Aufnahme durch Phytoplankton berücksichtigt. Zentrale Eingangsparameter sind Licht, Temperatur und Nährstofffrachten.

Auf Grund seiner Struktur, ist das Modell flexibel und rasch in der Lage die Auswirkungen veränderter Nährstofffrachten im Haff zu simulieren.

3 Ergebnisse und Diskussion

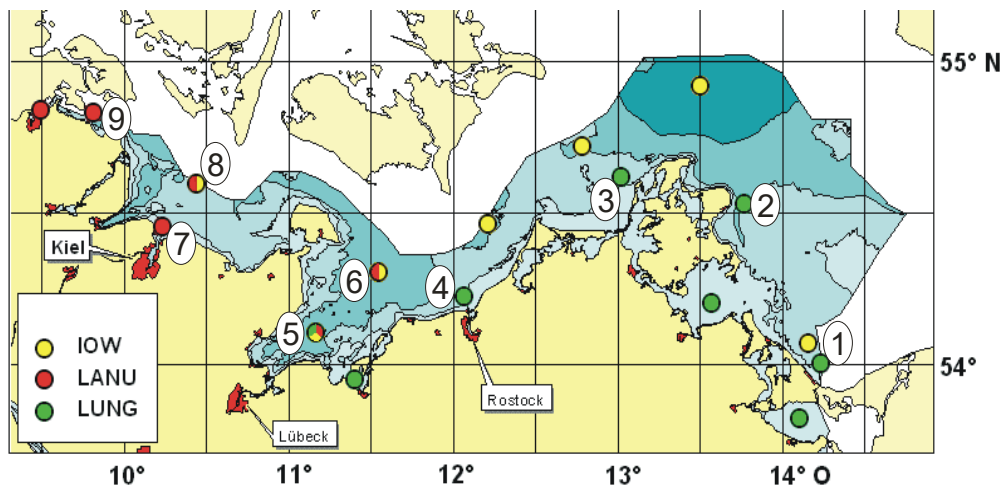
3.1 Referenzwerte für die äußere Ostseeküste

In der Wasserrahmenrichtlinie werden Konzentrationen für Nährstoffe gefordert, die eine sehr gute Wasserqualität beschreiben. Diese Referenzbedingungen sind nicht identisch mit natürlichen Hintergrundkonzentrationen. Die Ostsee und vor allem ihre Küstengewässer werden schon seit Jahrhunderten durch Besiedlung und die landwirtschaftliche Nutzung der Flusseinzugsgebiete beeinflusst. In den Küstengewässern scheinen ein leicht verstärkter Eintrag von Nährstoffen und die damit verbundene beschleunigte Eutrophierung in den 30er Jahren einzusetzen. In der offenen Ostsee steigen die Nährstoffkonzentrationen erst etwa 20-30 Jahre später deutlich an. Wir gehen davon aus, dass die Konzentrationen vor etwa einem Jahrhundert noch einen sehr guten Zustand widerspiegeln und als Referenzwerte bezeichnet werden können. Zu dieser Zeit hat aber schon ein erheblicher menschlicher Einfluss vorgelegen und die Werte sind dadurch sowohl in den Flüssen als auch in den Küstengewässern höher als die natürlichen Hintergrundkonzentrationen.

Bei Nutzung der Daten der LAWA (1998) gehen wir beispielsweise für die Oder von Einträgen in Höhe von $24.073 \text{ t N a}^{-1}$ und 481 t P a^{-1} aus. Eine vereinfachte Berechnung der Hintergrundfrachten für die Oder nach Lübke 1992 (in Hamm 1993) ergibt $600 \text{ t a}^{-1} \text{ P}$ bzw. $30.000 \text{ t a}^{-1} \text{ N}$. Als natürliche Hintergrundfrachten berechnet Behrendt (pers. Mit.) Einträge von 5.500 t N a^{-1} und 208 t P a^{-1} für die gesamte deutsche Ostseeküste. Da das Odereinzugsgebiet zu 90 % auf polnischem Gebiet liegt, sind die Werte nicht direkt vergleichbar. Insgesamt weichen aber die Hintergrundkonzentrationen in den Küstengewässern nicht stark von den Referenzkonzentrationen ab.

Referenzkonzentrationen wurden für 9 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste berechnet. Es wurden dabei die Monitoring-Stationen des LUNG, Güstrow, Mecklenburg-Vorpommern und des LANU, Flintbek, Schleswig-Holstein ausgewählt. Die Lage der Stationen ist aus Abb.1 ersichtlich.

Da das Modell einige Jahre benötigt, bis sich Gleichgewichte entsprechend der modifizierten Nährstoffeinträge einstellen, wurden für Stickstoff und Chlorophyll jeweils nur die letzten beiden simulierten Jahre berücksichtigt. Die übrigen Jahre wurden verworfen.



Nr.	Abk.	Bezeichnung	Tiefe (m)	Koordinaten	
1	OB4	Pomm. Bucht Ahlbeck	12	54°00,4'	14°14,0'
2	O11	Ostsee ö. Saßnitz	22	54°32,1'	13°46,2'
3	O9	Ostsee nw. Hiddensee	15	54°37,4'	13°01,7'
4	O5	Ostsee n. Warnemünde	14	54°13,9'	12°04,0'
5	O22	Ostsee n. Boltenhagen	24	54°06,6'	11°10,5'
6	M2	Mecklenburger Bucht	22.5	54°18,90'	11°33,00'
7		Leuchtturm Friedrichsort	16.5	54°23,86'	10°11,73'
8	N3	Kieler Bucht	17	54°36,00'	10°27,00'
9		Geltlinger /Sonderburg Bucht	28	54°50,10'	09°49,60'

Abb. 1 Messstationen verschiedener Institutionen sowie die Lage der 9 Stationen, für die eine Referenzwertberechnung vorgenommen wurde.

Da das Sediment ein bedeutender Speicher und Puffer für Phosphor ist, reagieren die Phosphorkonzentrationen in der Ostsee nur langsam auf reduzierte Einträge. Die folgende Abbildung zeigt die Jahredynamik für gelösten anorganischen Stickstoff (DIN), gesamten gelösten Phosphor (TDP) sowie Chlorophyll a für die exemplarisch ausgewählten Stationen 4 und 8. Die angegebenen Konzentrationen beziehen sich auf eine 10 m mächtige Oberflächenschicht.

Aus den Daten wurde der Jahresmittelwert für TDP und DIN das Mittel über die Wintermonate Januar bis März berechnet. Beim Chlorophyll a wurde statt des Wintermittelwertes, der Sommermittelwert und damit die maximale Algenbiomasse erfasst. Alle Mittelwerte sind in Tabelle 2 dokumentiert.

Die hohen Stoffeinträge der Oder spiegeln sich deutlich in Form höherer Nährstoff- und Chlorophyll-Konzentrationen im östlichen Bereich der deutschen Ostsee wider. Abgesehen davon unterscheiden sich die Konzentrationen zwischen den Stationen nur sehr begrenzt. Da alle Stationen den intensiven lateralen Transport- und Mischungsprozessen unterliegen und bei stark reduzierten Nährstoffeinträgen der Gradient zwischen der küstennahen Ostsee und der zentralen Ostsee sich offensichtlich deutlich verringert, ist ein Vergleich mit den bestehen Vorschlägen von Referenzwerten sinnvoll.

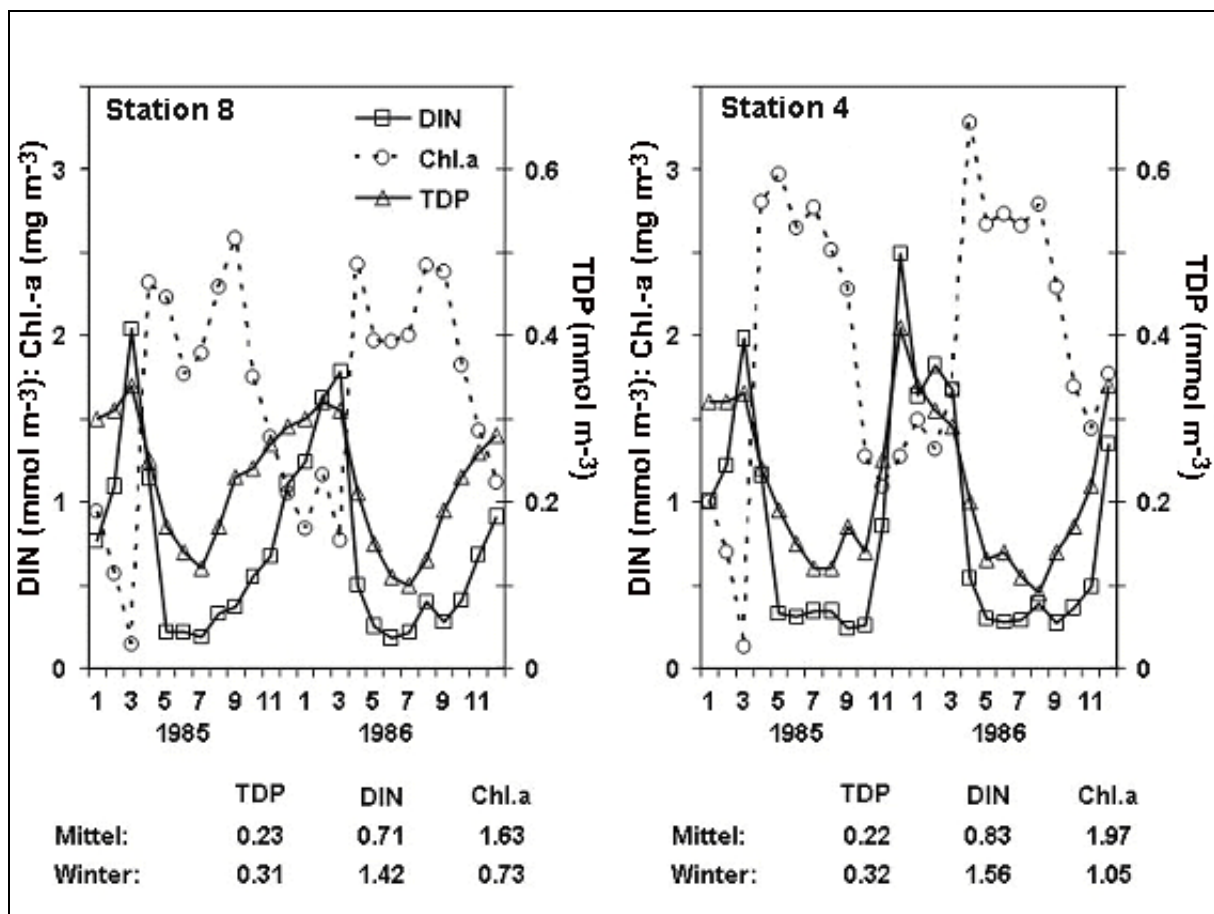


Abb. 2 Jahresgänge von TDP, DIN und Chl.a. Der Jahre 1985 und 1986 für 2 exemplarisch ausgewählte Stationen. Aus derartigen Jahresgängen wurden die Jahresmittelwerte bzw. Wintermittelwerte (Januar-März) in der Referenzsituation errechnet.

Zuvor allerdings noch einige einschränkende Anmerkungen: Das Ostseemodell wurde bereits mehrfach für Nährstoffreduktionsszenarien verwendet und die Ergebnisse kritisch beleuchtet. Um sicherzustellen, dass das Modell tatsächlich zuverlässig rechnet wurden die 1980er Jahre zunächst mit den tatsächlichen Nährstofffrachten durchgerechnet, mit Messdaten verglichen und validiert. Erst danach wurde die Simulation der Referenzsituation gestartet. Die starken Veränderungen der Einträge haben die grundsätzlichen Prozessen in der Ostsee und die Struktur dieses Ökosystems nicht verändert und das Modell verhielt sich robust und zuverlässig. Es wurde schon erwähnt, dass die Simulationszeit von 11 Jahren trotz der bereits angepassten Startbedingungen nur knapp ausreichte, um ein neues Gleichgewicht in der Ostsee einzustellen. Die Ostsee reagiert aufgrund ihrer Größe relativ träge auf äußere Veränderungen. Die angegebenen Referenz-Konzentrationen können sich also im weiteren Verlauf der Simulation noch geringfügig ändern.

Im Modell wurde angenommen, dass alle Einträge in die Ostsee punktförmig durch die 14 größten Flüsse erfolgen. Die diffusen und punktförmigen Einträge entlang der benachbarten Küstenregionen wurden diesen Flüssen zugerechnet. Für Simulationen der offenen Ostsee ist dies aufgrund der Transport- und

Mischungsprozesse unproblematisch. Im Falle Deutschlands bedeutet dies, dass alle Einträge entlang der deutschen Ostseeküste der Oder zugeordnet wurden. Die Bedeutung der Oder wird dadurch künstlich erhöht. Die Auswirkungen anderer kleiner Flüsse auf die Konzentrationen in den vorgelagerten Küstengewässern, beispielsweise in Schleswig-Holstein, bleiben dagegen unberücksichtigt. Um durch diese Vereinfachung keine fehlerhaften Referenzkonzentrationen zu erhalten, mussten die 9 Stationen in der Ostsee außerhalb der Förden und engen Buchten gewählt werden. Zudem erlaubte die räumliche Auflösung des Modells von 3 Seemeilen keine differenzierte Betrachtung kleinerer komplexer Küstengewässer.

Tab. 2 Erste Referenzwerte auf der Basis der Modellsimulation für die 9 Ostseestationen. Grundlage für die Berechnung waren die klimatische Situation der Jahre 1985 und 1986. Auf Grund des vereinfachten Simulationsansatzes dürfen diese Angaben lediglich als Anhaltswerte verstanden werden. Die TDP-Werte spiegeln den bioverfügbaren Phosphor wider. Da in der Ostsee nur ein sehr begrenzter Teil des organischen gelösten Phosphors bioverfügbar ist (Nausch mündl. Mittgn.), liegen die Werte nur geringfügig über denen für PO₄-P.

Parameter/Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TDP (mmol m⁻³):									
Jahresmittel	0,18	0,12	0,18	0,19	0,17	0,19	0,20	0,20	0,12
Mittl. Wintermax.	0,45	0,3	0,37	0,37	0,3	0,34	0,3	0,3	0,18
DIN (mmol m⁻³):									
Jahresmittel	10,0	5,5	1,7	0,8	0,8	1,0	0,7	0,7	1,2
Mittl. Wintermax.	17	5	3	2	2	2	2	2	3
Chl-a (mg m⁻³):									
Jahresmittel	3,0	1,4	1,3	2,0	1,5	1,5	1,9	1,7	1,5
Sommermittel	4,5	2,4	2,1	2,7	2,0	2,3	2,7	2,3	2,9

Auf dem HELCOM-Workshop „Background Concentrations“ im Oktober 2000 in Stockholm (HELCOM, Draft Summary Record, unveröffentlicht) wurden von der Expertenkommission folgende Hintergrund- (Referenz-) Konzentrationen für die zentrale Ostsee (Baltic Proper) vorgeschlagen: 0,15-0,25 mmol m⁻³ Phosphat sowie 1,0-2,5 mmol m⁻³ Nitrat und Nitrit. Die Werte beziehen sich auf die 1950er Jahre und gelten für die Wintermonate zwischen Januar und März bzw. April.

Für die Bucht von Riga gibt die Expertenkommission der HELCOM Herbstkonzentrationen zudem 0,06-0,16 mmol m⁻³ für Phosphor für die Jahre 1932-1934 an.

Die Swedish Environmental Protection Agency gibt in ihren Reports 5052 bzw. 4910 (<http://www.internat.environ.se>) für die Küstengewässer der zentralen Ostsee TP (TN) Sommerwerte von 0,20-0,28 mmol m⁻³ (12-17 mmol m⁻³) und TP (TN) Winterwerte von 0,35-0,41 mmol m⁻³ (12-20 mmol m⁻³) an. Für Küstengewässer im Bereich Kattegat und Skagerak werden TP (TN) Sommerwerte für die zentrale Ostsee von 0,70 mmol m⁻³ (12-18 mmol m⁻³) und TP (TN) Winterwerte von 1,0 mmol m⁻³ (15-21 mmol m⁻³) angenommen.

Brockmann (mündliche Mittlg.) gibt eine Übersicht über Referenzwerte in deutschen Küstengewässern, die die Arbeiten von Dahlke (mündliche Mittlg.) und Brockmann & Topcu (2004) zusammenfasst. Für exponierte äußere Küstenbereiche

(Typen B3,4) werden $\text{PO}_4\text{-P}$ -Werte von $0,3 \text{ mmol m}^{-3}$ und TP-Werte von $0,6 \text{ mmol m}^{-3}$ angegeben. Für regionale äußere Küsten, wie die Kieler und Flensburger Förde sowie die Howachter, Lübecker und Wismarer Bucht hingegen deutlich höhere Werte. Dort liefen die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Werte um $0,8 \text{ mmol m}^{-3}$ und TP-Werte um $0,9 \text{ mmol m}^{-3}$.

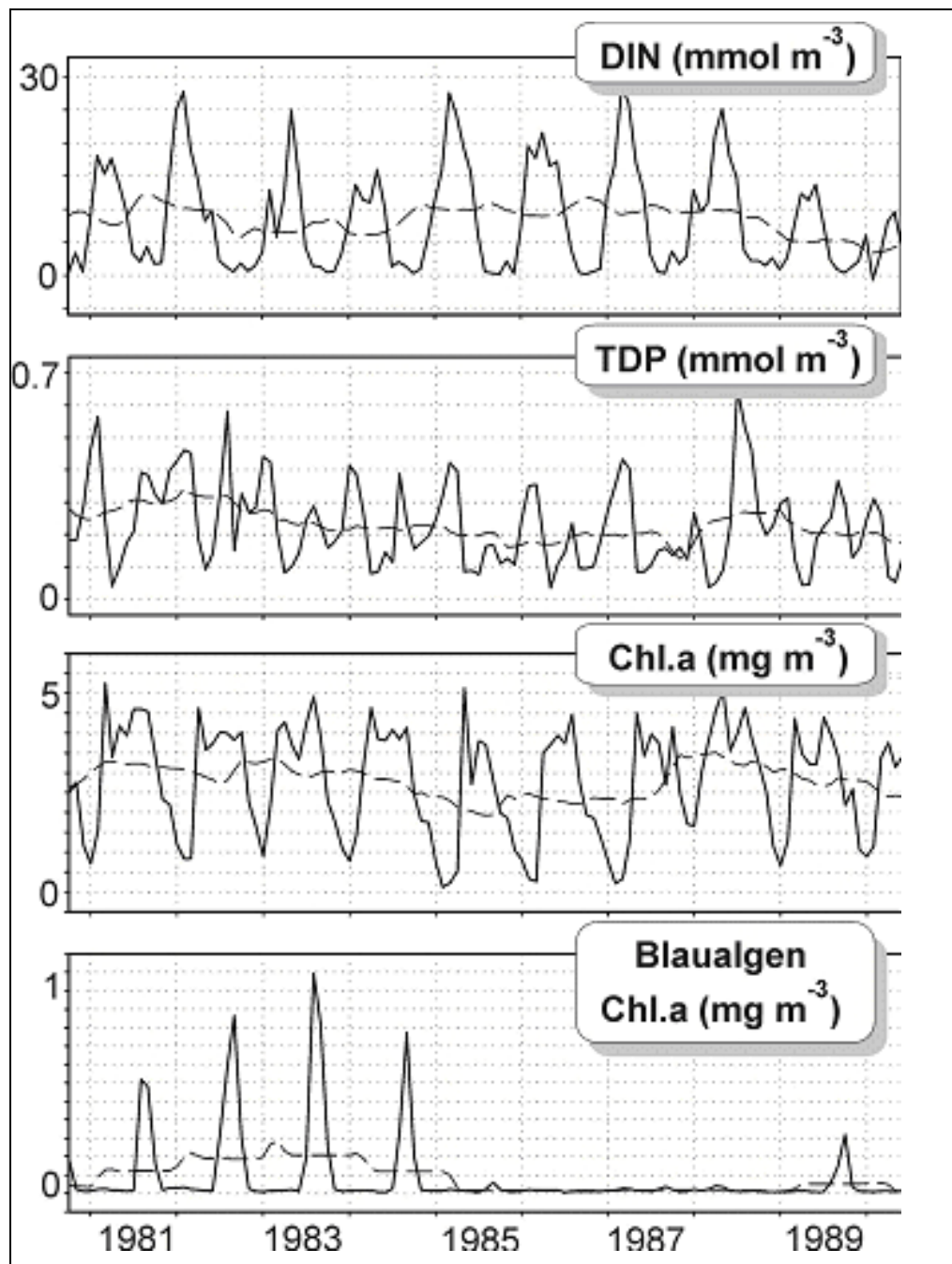


Abb. 3 Oberflächenkonzentrationen von gelösten anorganischen Stickstoff (DIN, mmol m^{-3}), gesamt-gelöstem Phosphor (TDP, mmol m^{-3}), Chlorophyll a (mg m^{-3}) und Chlorophyll a (mg m^{-3}) in Blaualgen in der Ostsee vor der Odermündung (Standort 1 in Abb. 1). Die Konzentrationen basieren auf Modellsimulationen mit historischen Stoffeinträgen und den meteorologischen Bedingungen der 1980er Jahre (verändert nach Schernewski & Neumann 2005).

Die Referenzwerte in Tabelle 2 wurden jeweils aus den Jahren mit der meteorologischen Situation von 1985 und 1986 berechnet. Die Jahre zeigen aufgrund der unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen eine starke interannuelle Variabilität der Nährstoffkonzentrationen (Abb. 3). Die TDP-Werte im Modell spiegeln den bioverfügbaren Phosphor wider. Da in der Ostsee nur ein sehr begrenzter Teil des organischen gelösten Phosphors bioverfügbar ist (Nausch mündl. Mittg.), liegen die TDP-Werte nur geringfügig über denen für $\text{PO}_4\text{-P}$. Bei Zugrundelegung der Jahre 1989 und 1990 würden sich etwas höhere Referenzwerte ergeben. Als typischer mittlerer TP-Wert für äußere Küstengewässer, die durch intensiven Austausch mit der Ostsee geprägt sind, kann aufgrund der Modellergebnisse ein mittlerer Winterwert von $0,35 \text{ mmol m}^{-3}$ als Referenzwert angesehen werden. Dieser stimmt sehr gut mit den schwedischen Daten überein. Berücksichtigt man den unterschiedlichen Bezugszeitraum und die unterschiedliche Küstenferne, so kann auch eine TP-Konzentration von $0,6 \text{ mmol m}^{-3}$ für die unmittelbaren Küstengewässertypen (B3 und B4) als realistisch und konform mit den Modellergebnissen angesehen werden. Die starken Differenzen der Referenzwerte zwischen den äußeren Förden und Buchten in Brockmann (mündl. Mittg.) kann nicht nachvollzogen werden. Ein einheitlicher typbezogener Referenzwert erscheint sinnvoll.

Die Arbeiten von Dahlke (mündliche Mittg.) und Brockmann (mündliche Mittg.) zeigen für äußere Küstengewässer TN-Referenzkonzentrationen von 10 mmol m^{-3} , während in den äußeren Buchten und Förden Konzentrationen zwischen 8 und 19 mmol m^{-3} angegeben werden. Bei den Stickstoffverbindungen besteht eine gute Übereinstimmung zwischen dem Modell und den Daten der zentralen Ostsee. Am Beispiel der Odermündung zeigt sich, wie stark die Konzentrationen in den Küstengewässern durch Flusseinträge beeinflusst sind und wie ausgeprägt die Konzentrationsgradienten von der Küste hin zur offenen Ostsee sein können. Für die von der Oder beeinflusste Pommersche Bucht zeigt das Modell Referenzkonzentrationen (Winterwerte) vom 17 mmol m^{-3} DIN. Diese Werte liegen über denen von Dahlke (mündliche Mittg.) und Brockmann (mündl. Mittg.). Die übrigen vom Modell berechneten Referenzkonzentrationen sind hingegen deutlich niedriger und stimmen weder mit den Werten der genannten Autoren noch mit den schwedischen Küstenreferenzwerten überein. Grundsätzlich erscheint ein Referenzwert für die äußeren küstennahen Gewässertypen von 10 mmol m^{-3} TN aber durchaus realistisch. Die Modellergebnisse gelten allerdings auch für äußere Küstengewässer, die durch intensiven Austausch mit der Ostsee geprägt sind, und lassen sich offensichtlich nicht auf die unmittelbaren Küstengewässer übertragen. Zudem ist der vereinfachte Modellansatz hier problematisch. Durch eine größere räumliche Differenzierung der Eintragsquellen sowie einer realistischeren Verteilung der diffusen Einträge entlang der Küstenlinie, sollte der Gradient der Stickstoffkonzentrationen zwischen offener Ostsee und Küstengewässern zukünftig im Modell besser wiedergegeben werden.

Die vorgestellten Simulationsergebnisse stellen einen ersten Schritt zur Ableitung von Referenzbedingungen dar. Modifikationen im Modell, im Simulationsansatz sowie bei den Grundlagendaten werden in Zukunft zu verbesserten Aussagen führen. Im Detail zeigen die Simulationen zahlreiche zusätzliche

interessante Aspekte. Ein Beispiel ist die deutliche Zunahme von Diatomeen unter den Referenzbedingungen, wohingegen die Blaualgen stark an Bedeutung verlieren. Für Dokumentation der Ergebnisse ostseeweit sowie eine differenzierte Diskussion der Ergebnisse wird auf Schernewski & Neumann (2005) verwiesen.

3.2 Das Stettiner (Oder) Haff

Die Abb. 4 und 5 zeigen die gemessenen und simulierten Konzentrationen von Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) und Stickstoff (Dissolved Inorganic Nitrogen) sowie Chlorophyll-a in den beiden Teilen des Stettiner Haffs (Kleines und Großes Haff, polnisch Wielki Zalew). Basierend auf den meteorologischen Bedingungen zwischen 1995 und 1999 wurde das Modell mit den tatsächlichen sowie den historischen (Referenz-) Nährstoffeinträgen angetrieben. Die historischen Einträge entsprechen auch hier etwa einer Situation von vor 100 Jahren.

Sowohl die aktuellen Nährstoffkonzentrationen als auch die für die Situation vor 100 Jahren simulierten Werte zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Teilen des Haffes sowie starke Variabilitäten zwischen den einzelnen Jahren. In einem System mit Wasseraustauschzeiten um 2 Monaten, wie dem Haff, spielt der Nährstoffvorrat im Wasser im Winter nur eine geringe Rolle für die sommerliche Primärproduktion. Die Nachlieferung über Flüsse ist von entscheidender Bedeutung. Während die Phosphat-Konzentrationen aktuell maximale Werte zwischen 6-8 mmol m^{-3} aufweisen zeigt das Modell für die Situation vor 100 Jahren einen Wert in der Größenordnung um 1 mmol m^{-3} , also nur etwa 15 % des aktuellen Wertes. Für gelösten anorganischen Stickstoff liegen die Maxima aktuell meist zwischen 150 und 300 mmol m^{-3} . Die Simulationen zeigen für die historische Situation Werte um die 50-130 mmol m^{-3} , also etwa 35 % des aktuellen Wertes. Auffällig ist, dass die Maxima für beide Nährstoffe nicht im Winter erreicht werden, sondern in die Vegetationsperiode fallen.

Als konkrete Referenzwerte bieten sich gemittelte maximale Gesamtmengen der Nährstoffe, also TN und TP, als Größen an. Zudem zeigen die starken Unterschiede zwischen Großem und Kleinen Haff, dass eine Differenzierung erforderlich ist. Das Große Haff weist zwischen April und September der Jahre 1995-99 mittlere TN (TP) Konzentrationen von 135 (6,5) mmol m^{-3} auf. Für die historische Situation ergeben sich 42 mmol m^{-3} TN und 0,94 mmol m^{-3} TP. Das Kleine Haff weist zwischen April und September der Jahre 1995-99 mittlere TN (TP) Konzentrationen von 106 (6) mmol m^{-3} auf. Für die historische Situation ergeben sich 30 mmol m^{-3} TN und 0,8 mmol m^{-3} TP.

Als Referenzwerte für das Kleine (Grosse) Haff können 30 (42) mmol m^{-3} TN und 0,8 (0,9) mmol m^{-3} TP angenommen werden. Brockmann (mündliche Mittlg.) nimmt 12,7 mmol m^{-3} TN und 1,13 mmol m^{-3} TP als Referenzwerte an.

Während der Wert für Phosphor realistisch erscheint, kann der Wert für NT nicht durch die Modellsimulationen gestützt werden. Eine TN Konzentration im Kleinen Haff von 12,7 mmol m^{-3} TN kann das Modell selbst bei Annahme von ungestörten, natürlichen Bedingungen, also praktisch keiner menschlichen Aktivität (Situation vor 1500 Jahren) im Odereinzugsgebiet und den daraus resultierenden Fachten voraussichtlich nicht erreichen.

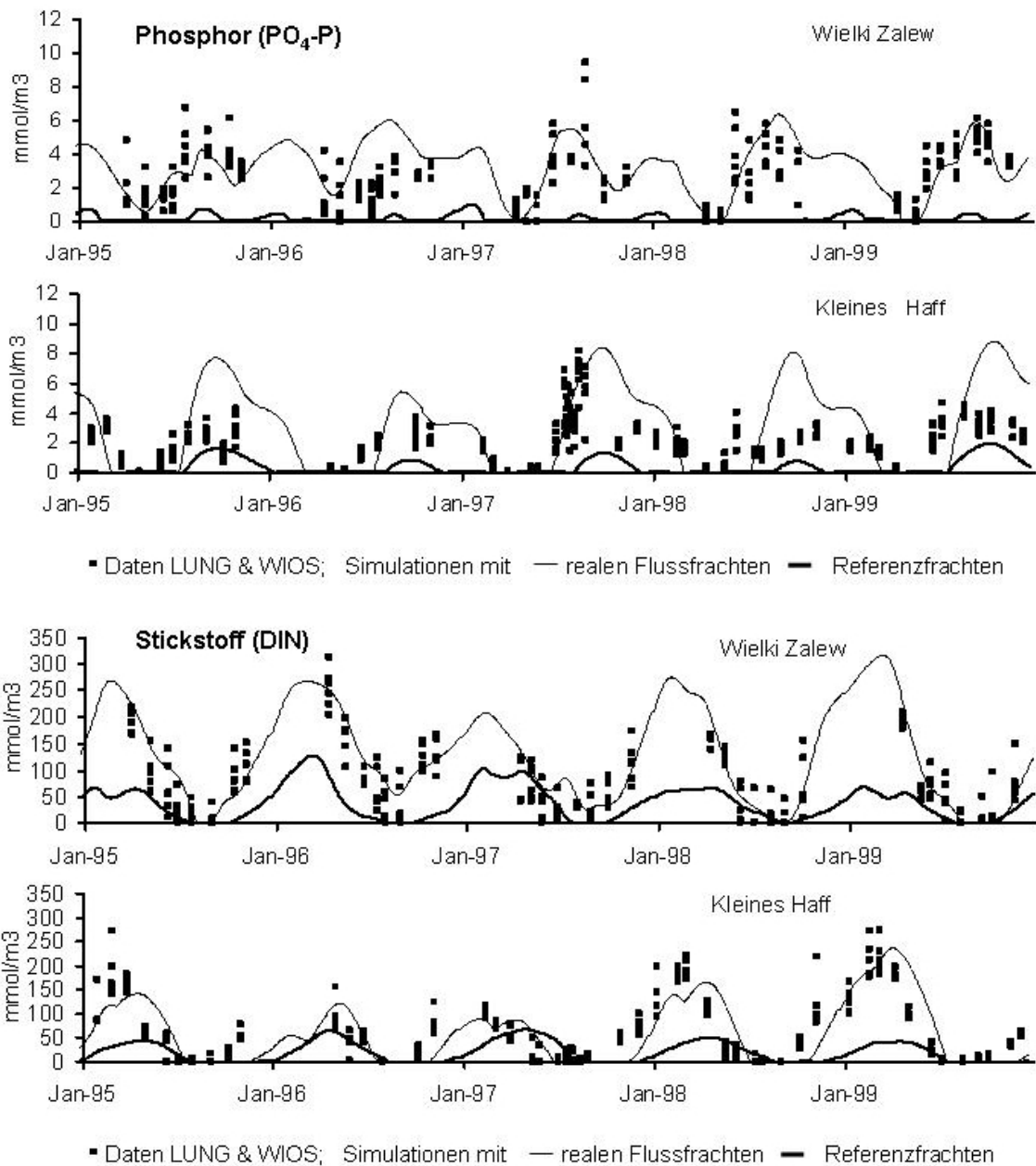


Abb. 4 Gemessene und simulierte Konzentrationen vom Phosphor (PO₄-P) und Stickstoff (Dissolved Inorganic Nitrogen) in den beiden Teilen des Stettiner (Oder) Haffs (Kleines und Großes Haff, polnisch Wielki Zalew). Basierend auf den meteorologischen Bedingungen zwischen 1995 und 1999 wurden das Modell mit den tatsächlichen sowie den historischen (Referenz-) Nährstoffeinträgen angetrieben. Die historischen Einträge entsprechen etwa einer Situation von 100 Jahren. Die Messdaten stammen vom Westpomeranian Inspectorate of Environmental Protection (WIOS) in Szczecin/Poland sowie dem Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) (verändert nach Wielgat & Schernewski subm.).

Die Abnahme der Nährstoffkonzentrationen spiegelt den Rückgang der Frachten durch die wesentlichen Zuflüsse unmittelbar wider. Im Falle der Oder betragen die historischen Frachten von Stickstoff (Phosphor) zwischen April und

September (im Vergleich zu denen der 90er Jahre) etwa 27 % (18%). Die im Vergleich zu Stickstoff geringere Zufuhr von Phosphor schlägt sich also auch in den Konzentrationen im Haff unmittelbar nieder.

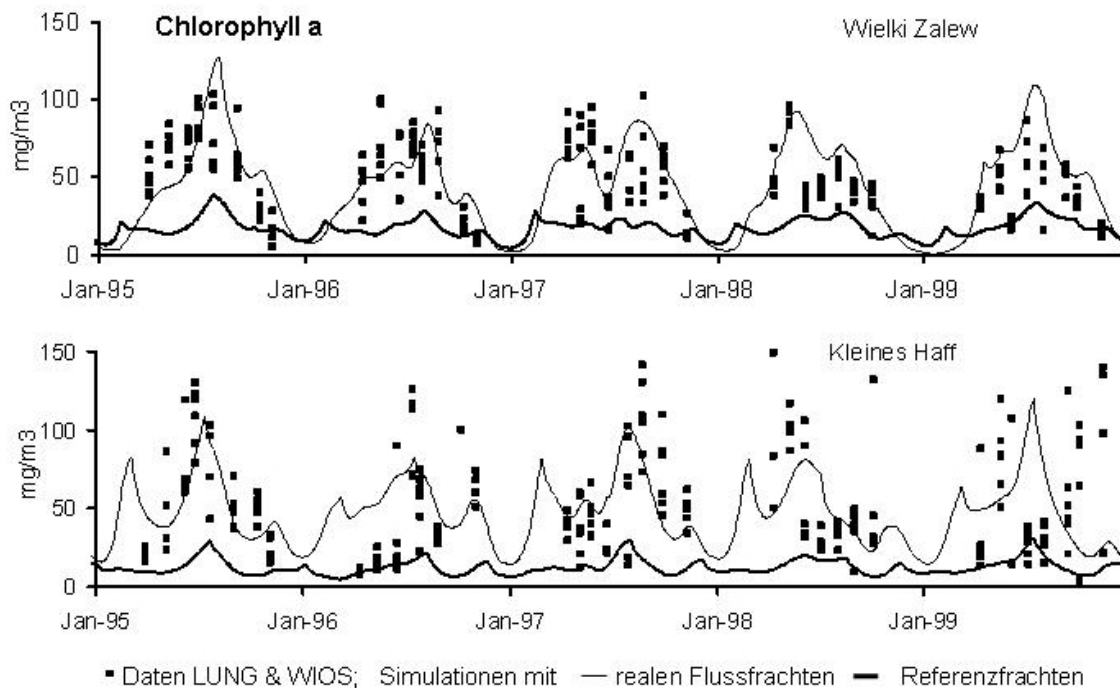


Abb. 5 Gemessene und simulierte Chlorophyll-a Konzentrationen in den beiden Teilen des Stettiner (Oder) Haffs (Kleines und Großes Haff, polnisch Wielki Zalew). Basierend auf den meteorologischen Bedingungen zwischen 1995 und 1999 wurden das Modell mit den tatsächlichen und den historischen (Referenz-) Nährstoffeinträgen angetrieben. Die historischen Einträge entsprechen etwa einer Situation von 100 Jahren. Die Messdaten stammen vom Westpomeranian Inspectorate of Environmental Protection (WIOS) in Szczecin/Poland sowie dem Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) (verändert nach Wielgat & Schernewski subm.).

In Abb. 5 sind die aktuellen und historischen Chlorophyllkonzentrationen in beiden Teilen des Haffs dargestellt. Die mittleren Konzentrationen zwischen April und Mai liegen aktuell bei 62 mg m^{-3} Chlorophyll-a. Im Sommer, zwischen Juli und August, zeigen sich ebenfalls Konzentrationen zwischen 62 und 64 mg m^{-3} Chlorophyll-a. Dies gilt sowohl für das Große als auch für das Kleine Haff, wengleich der zeitliche Verlauf der Konzentrationen sich zwischen beiden Teilen deutlich unterscheidet. Vor einem Jahrhundert hingegen, lagen die Chlorophyll-a Werte im Frühjahr durchschnittlich bei 17 mg m^{-3} im Großen Haff und bei 12 mg m^{-3} Chlorophyll-a im Kleinen Haff. Während der Sommermonate wurden im Kleinen Haff (Großen Haff) 17 (24) mg m^{-3} Chlorophyll-a erreicht. Die Werte erreichen also nur 30 % der aktuellen Konzentrationen.

Das Modell errechnet eine aktuelle jährliche Primärproduktion zwischen 429 und $533 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ im Großen Haff und zwischen 367 to $439 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ im Kleinen Haff. Die historische Primärproduktion liegt im Kleinen (Großen) Haff zwischen 86 und 111 (163 und 232) $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Genauere Ausführungen finden sich in Wielgat & Schernewski (subm.).

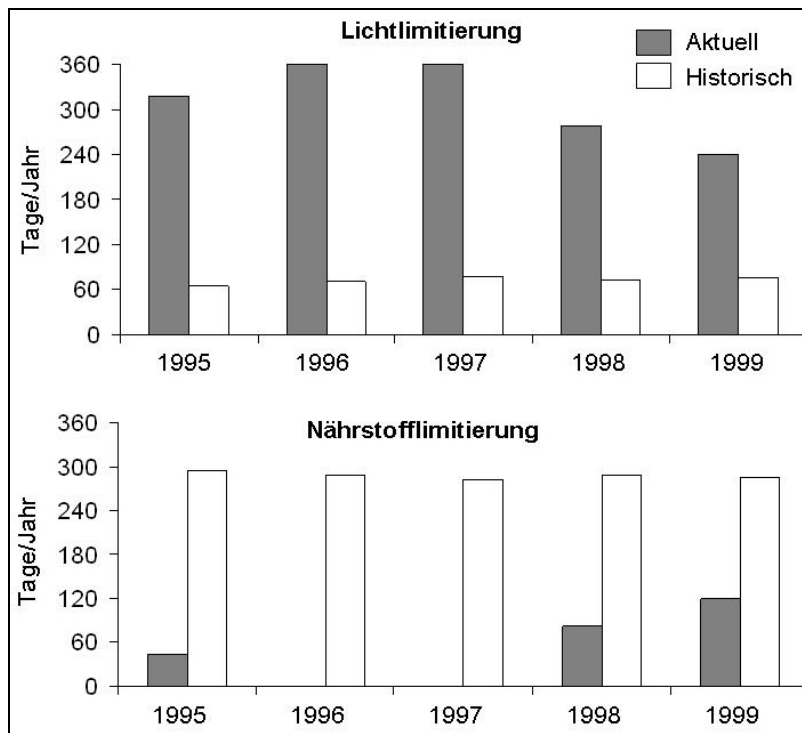


Abb. 6 Historische und aktuelle Limitierung der Primärproduktion im Großen Haff (Stettiner Haff), berechnet auf der Basis der Modellsimulationen (verändert nach Wielgat & Schernewski subm.)

Das Stettiner Haff ist aktuell wesentlich durch Licht limitiert und weist hohe Nährstoffkonzentrationen im Wasser auch während der Vegetationsperiode auf. Entsprechend der Modellberechnungen war dies vor einem Jahrhundert anders und Nährstoffe spielten eine dominierende limitierende Funktion. Allerdings war das Haff auch vor einem Jahrhundert in einem eutrophen Zustand und es erscheint ausgeschlossen, dass ein „guter“ Zustand im Sinne der WRRL im Haff überhaupt möglich ist.

Das einfache Boxmodell spiegelt die aktuellen Bedingungen im Haff zwar sehr gut wider, es ist aber generell fraglich, ob der aktuelle Modellansatz auf den historischen Zustand übertragen werden kann. Es ist durchaus möglich, dass das Haff aufgrund des höheren Makrophytenbesatzes früher ein deutlich anderes Verhalten aufgewiesen hat. Die Ergebnisse müssen dementsprechend mit einer kritischen Distanz betrachtet werden.

Danksagung

Die Arbeiten zur Ostsee wurden im Rahmen des BMBF-Projektes ERGOM 03F0230A, durch das EU-Projekt „Characterisation of the Baltic Sea Ecosystem“ (CHARM) und das UBA-Projekt „Studie zur Ermittlung von Hintergrundwerten bzw. der natürlichen Variabilität von biologischen und chemischen Messgrößen im Meeresmonitoring“ unterstützt. Die Arbeiten im Oderästuar werden durch das BMBF-Projekt „IKZM-Oder“ (www.ikzm-oder.de) 03F0403A gefördert. Wir danken der Baltic

Environmental Database der Universität Stockholm, Abteilung Systems Ecology, für die Daten zu den Flussfrachten und zur Deposition. Für die Bereitstellung von Rechenzeit danken wir dem Computer Zentrum der Universität Rostock, dem John von Neumann Institute for Computation und dem Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN). Weiterhin danken wir M. Landsberg-Ucziwek, Westpomeranian Inspectorate of Environmental Protection (WIOS) in Szczecin/Poland sowie A. Bachor und M. von Weber, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) in Güstow für die Bereitstellung der Daten zum Stettiner Haff.

Literatur

- Behrendt H, Huber P, Kornmilch M, Opitz D, Schmoll O, Scholz G, Uebe R (1999) Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete Deutschlands. Umweltbundesamt, Forschungsbericht 29625515.
- Behrendt H, Dannowski R (eds.) (2005) Nutrients and heavy metals in the Odra river system. Weißensee Verlag, Berlin, 353 p
- European Parliament and the Council (2000) Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities 22.12.2000
- Hamm A (1993) Problembereich Nährstoffe aus wasserwirtschaftlicher Sicht. Agrarspektrum 21: 11-21
- Humborg C, Danielsson Å, Sjöberg B, Green M (2004) Nutrient land-sea fluxes in oligotrophic and pristine estuaries of the Gulf of Bothnia, Baltic Sea. Estuarine Coastal and Shelf Science, 56: 781-793
- Janssen F, Schrum C, Backhaus J (1999) A climatological dataset of temperature and salinity for the North Sea and the Baltic Sea. German Journal of Hydrography. Supplement 9: 245 p
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1998) Beurteilung der Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern in der Bundesrepublik Deutschland. LAWA, ISBN 3-88961-224-5, p. 35.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1996) Die Hauptströme der Flussgebiete Deutschlands. LAWA, ISBN 3-88593-213-X, 77 p
- Nehring D, Nausch G (1996) Fertiliser consumption in the catchment area and eutrophication of the Baltic Sea. Baltic Marine Science Conference, Rönne, Denmark 1996. ICES Cooperative Research Report 257: 8-12
- Neumann T (2000) Towards a 3D-ecosystem model of the Baltic Sea. J. Mar. Sys. pp. 405-419.
- Neumann T, Schernewski G (2001) Cost-effective versus proportional nutrient load reductions to the Baltic Sea: Spatial impact analysis with a 3D-ecosystem model. In: Brebbia C A (ed.) Water Pollution VI - Modelling, Measuring and Prediction. Witpress, Southampton, 269-278
- Neumann T, Fennel W, Kremp C (2002) Experimental Simulation with an Ecosystem Model of the Baltic Sea: A Nutrient Load Reduction Experiment. Global Biogeochemical Cycles 16, No 3, 7-1 - 7-19
- Neumann T, Schernewski G (2002) Will algal blooms in the Baltic Sea increase in future? Model simulations with different eutrophication combat strategies. In: German National IHP-OHP Committee (ed.): Low-lying Coastal Areas – Hydrology and Integrated Coastal Zone Management. UNESCO International Hydrological Programme (IHP) and WMO Operational Hydrology Programme (OHP) – Reports, special issue 13: 139-145
- Neumann T, Schernewski G (2005) An ecological model evaluation of two nutrient abatement strategies for the Baltic Sea. Journal of Marine Systems, Vol 56, No 1-2, 195-206
- Pacanowski RC, Dixon K, Rosati A (1990) The GFDL Modular Ocean Model Users Guide Version 1.0., GFDL Technical Report No. 2, Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, NOAA, Princeton University
- Schernewski G, Neumann T (2002a) Perspectives on eutrophication abatement in the Baltic Sea. Proceedings of the international conference LITTORAL 2002, Porto, Portugal, September 22-26, 2002. 2: 503-512
- Schernewski G, Neumann T (2002b) Impact of river basin management on the Baltic Sea: Ecological and economical implications of different nutrient load reduction strategies. Proceedings of the

- International Conference 'Sustainable Management of Transboundary Waters in Europe',
UNECE, 21 – 24 April 2002, Miedzyzdroje, Poland, 43-51
- Schernewski G, Neumann T (2005) The trophic state of the Baltic Sea a century ago: A simulation study. *Journal of Marine Systems*, 53: 109-124
- Wielgat M, Witek Z (2004) A dynamic box model of the Szczecin Lagoon nutrient cycling and its first application to the calculation of the nutrient budget. In: G. Schernewski, T. Dolch (Eds.): *The Oder estuary, against the background of the Water Framework Directive*. *Meereswiss. Ber.* 57: 99-125
- Wielgat M, Schernewski G (submitted): A model application to derive the pre-industrial water quality of the Szczecin Lagoon (southern Baltic Sea)

Autoren:

Gerald Schernewski
Thomas Neumann
Magdalena Wielgat
Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde
Seestrasse 15
D-18119 Rostock
Telefon: +49 381 5197-0