

ENVIRONMENTAL RESEARCH OF THE FEDERAL MINISTRY OF THE
ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY
Research Report 200 25 211
UBA-FB 000276

Nährsalz-Atlas der zentralen und nördlichen Nordsee

Brockmann, U. and D.H. Topcu

Centre for Marine and Climate Research Institute for Biogeochemistry and Marine Chemistry
University of Hamburg

1. Einleitung

Mit Unterstützung des Umweltbundesamtes (FKZ 200 25 211) wurde ein Nährsalz-Atlas von der zentralen und nördlichen Nordsee für den Zeitraum von 1984 - 2000 erstellt, ergänzt durch Salzgehalts- und Temperaturdaten. Der Atlas enthält Karten, Vertikalprofile, Korrelationsdiagramme und Zeitserien. Er wird Anfang 2002 veröffentlicht, versehen mit einer CD-ROM mit farbigen Abbildungen und dem kompletten Datensatz. Hier werden einige Beispiele dargestellt.

Die Gradienten der Nährsalze, die saisonal von den biologischen Stoffumsätzen, Fluss-Einträgen, Im- und Exporten geprägt werden, reflektieren den jeweiligen Status für einen Teil der Phasenverteilung der Nährsalzelemente N und P im Ökosystem der Nordsee. Die Nährsalzkonzentrationen während des Winters bilden die Startbedingungen für die jährliche Planktonentwicklung im Frühjahr und die nachfolgende saisonale Umsetzung der Nährstoffelemente. Während des Sommers sind die Nährsalze in der Deckschicht weitgehend verbraucht und ihr Umsatz zu dieser Jahreszeit am schnellsten.

Der Stoffumsatz, der Austauschprozesse mit dem Sediment, örtliche Einträge und spezifische regionale Strömungsmuster umfasst, erzeugt eine räumliche Differenzierung des Nährsalzregimes in der Nordsee, das von der Topographie, der Schichtung, von Tidezyklen, Restströmungen und lokalen Einträgen beeinflusst wird.

Der Fluss der Nährstoffelemente und des Kohlenstoffes durch das Nahrungsnetz wird für quantitative Ökosystemanalysen verwendet und dient auch als Bezugssystem für die Phasenverteilung von Schadstoffen. Daten, die während des Winters, bei minimaler biologischer Aktivität, gewonnen wurden, sind besonders geeignet für die Bewertung von Trends und kurzzeitigen Veränderungen des Nordsee-Ökosystems. Diese Daten werden auch für den Antrieb und die Überprüfung von Ökosystemmodellen, für die Berechnung von Budgets (Radach & Lenhart 1995, ASMO 1998, Baretta et al. 1998) und für die Trendberechnung (Radach et al. 1996, Visser et al. 1996) benötigt.

Da eine Rückkopplung zwischen den Nährsalzgradienten vor der Küste und den verminderten Nährsalzkonzentrationen in den Ästuaren beobachtet wurde (De Jonge et al. 1996), müssen Daten von der zentralen Nordsee als Referenz berücksichtigt werden, um Prozesse im Küstenwasser wie Eutrophierungseffekte und die Bildung von Problemblüten verstehen zu können (Smayda 1990).

Nährstoffproben wurden von den Fischereiforschungsschiffen ANTON DOHRN und WALTHER HERWIG während der Erfassung des Jungfisch- und Sommerfischbestandes von 1984 bis 2000 gewonnen, ergänzt durch Fahrten der Forschungsschiffe VALDIVIA und GAUSS. Während der meisten Fahrten wurden die Proben an Bord vor ihrer Fixierung mit Quecksilberchlorid filtriert. Die Analysen wurden mit Autoanalyzern durchgeführt. Salzgehalts- und Temperaturdaten wurden von den Physikalischen Ozeanographen zur Verfügung gestellt.

Diese Daten werden in einem Atlas dargestellt als Oberflächen- und Bodenkarten vom Winter und Sommer, überwiegend von der zentralen und nördlichen Nordsee, ergänzt durch Karten des Salzgehaltes und der Temperatur, T/S-, Misch- und Korrelationsdiagrammen, die die Einflüsse der verschiedenen Quellen und Senken anzeigen und für die jeweils alle Daten verwendet wurden. Von den Sommerfahrten werden ausgewählte Vertikalschnitte gezeigt. Mittelwerte von Nährsalzen und ihre Variabilität werden für die Oberfläche und den Meeresboden dargestellt. Als Zeitserien aus ausgewählten Gebieten werden die Entwicklungen an der Wasseroberfläche und in Bodennähe gezeigt.

Die Karten und Zeitserien wurden mit dem Programm SURFER 7 (Golden Software), die x/y-Diagramme mit GRAPHER (Golden Software) dargestellt. Die Orte der Probennahme sind jeweils als Punkte markiert worden.

2. Beispiel einer Fahrt

Während des Sommers 2000 wurde die Beprobung mit FS GAUSS in einem großen Teil der Nordsee vom 9.8. bis 23.8. durchgeführt.

Die Nährsalzerschöpfung an der Wasseroberfläche war für Nitrat mit weniger als $0.2 \mu\text{M}$ am stärksten in der zentralen Nordsee ausgeprägt, während im umgebenden Küstenwasser infolge der Flusseinträge auch die Nitratkonzentrationen anstiegen (Abb. 1). In Bodennähe der nördlichen Nordsee und entlang der Norwegischen Rinne erhöhte der Einstrom aus dem Atlantik Nitratkonzentrationen auf mehr als $10 \mu\text{M}$.

Ammonium blieb an der Wasseroberfläche im Fließgleichgewicht zwischen Remineralisierung und Assimilation meistens unter $1 \mu\text{M}$, erreichte aber im Bodenwasser der zentralen Nordsee mit $2-4 \mu\text{M}$ hohe Konzentrationen, hervorgerufen durch die Remineralisation sedimentierter Biomasse und die langen Aufenthaltszeiten dieser von der Oberfläche abgeschlossenen Wassermassen (Lenhart & Pohlmann 1997).

3. Beispiele von Mittelwerten und ihrer Variabilität

Die Nordsee wurde in Gebiete von 01° geographischer Länge und $30'$ geographischer Breite unterteilt (jeweils ca. $3,000 \text{ km}^2$), um Mittelwerte räumlich differenziert aus 18 Fahrten (1986/87 wurden zwei Fahrten durchgeführt) berechnen zu können.

Mittelwerte wurden für den Winter und den Sommer berechnet. Für den Sommer wurde wegen der größeren Zeitunterschiede der Forschungsfahrten und der stärkeren Stoffumsätze in dieser Jahreszeit zusätzlich Mittelwerte für den frühen (Mai-Juni) und späten (Juli-August/September) Sommer berechnet. Die Variabilität (Standardabweichungen in % vom Mittelwert) gibt Hinweise auf die Repräsentativität der räumlich unterschiedlich intensiven Beprobung und lässt regionale Schwerpunkte hoher Veränderlichkeit zwischen den einzelnen Jahren hervortreten. Die regionale Variabilität ist für die Bewertung der Nährstoffsituation für örtliche Maßnahmen von Bedeutung.

Die Winter-Daten offenbarten den weitreichenden Einfluss des nährsalzreichen (über 10 μM Nitrat) atlantischen Einstroms von Norden und die Flusseinträge, die besonders das Küstenwasser beeinflussen, das als Folge der Fluktuationen der Abflüsse von Jahr zu Jahr einer hohen Variabilität unterliegt (Abb. 2).

Die winterliche Primärproduktion über der Doggerbank verminderte deutlich die Nährsalzkonzentrationen, besonders die des Nitrats (unter 5 μM). In der zentralen Nordsee lagen die Konzentrationen zwischen 5 und 10 μM , nahe der Humber-Mündung über 10 μM und im kontinentalen Küstenwasser über 20 μM . Vor der flachen nordfriesischen Küste, in der vereinten Flussfahne von Elbe und Weser, stiegen die Konzentrationen im Mittel auf mehr als 30 μM an.

Die mittleren Nitratgradienten waren infolge der starken vertikalen Durchmischung an der Oberfläche und in Bodennähe ähnlich, mit der Ausnahme der Norwegischen Rinne, in die sich der nordatlantische Einstrom ausbreitete ($>10 \mu\text{M}$), und des Norwegischen Küstenwassers, das auch im Winter eine haline Schichtung aufweisen kann ($<7 \mu\text{M}$).

Das heißt, dass von nahezu allen Rändern der Nordsee Nitrat zugeführt wird.

Die Variabilität der Nitratkonzentrationen, die an der Oberfläche und in Bodennähe ähnlich war, war in der nördlichen und zentralen Nordsee am geringsten ($<20\%$) und entlang der Front des kontinentalen Küstenwassers am höchsten ($>60\%$). Dies ist ein Ausdruck der von Jahr zu Jahr wechselnden Ausdehnung des nährsalzreichen Küstenwassers und der Konstanz der Nitrateinträge z.B. in die Deutsche Bucht.

Während des frühen Sommers waren die Nitratkonzentrationen in der 30-50 m mächtigen Deckschicht der zentralen Nordsee mit weniger als 0,5 μM erschöpft (Abb. 3). Dieses Gebiet wurde eingerahmt von nährsalzreichem Atlantik- und Küstenwasser. Wegen der geringen Konzentrationen in der mittleren Nordsee war dort die Variabilität ähnlich hoch wie im Frontenbereich des kontinentalen Küstenwassers, das sich je nach Wetterlage unterschiedlich weit ausbreitete.

Infolge erhöhter Nitrateinträge aus den Flüssen und vom Atlantik und länger anhaltender Festlegung des Silikats in den Schalen der Kieselalgen wurden im Vergleich zur zentralen Nordsee ($\text{N/Si} < 1$) entlang den Küsten und am nördlichen Rand höhere N/Si -Verhältnisse (>2) angetroffen.

Die Variabilität des N/Si -Verhältnisses war ähnlich verteilt wie die des Nitrats, von dem sie abhängt. Die geringe Variabilität entlang der britischen Küste ist ein Anzeichen für einen ständigen Stickstoffüberschuss in Bezug zum wenig anthropogen beeinflussten Silikat in diesem Gebiet.

Generell wirkt die Nordsee als Senke für Nährsalze, die in Biomasse umgewandelt werden, die dann nach ihrer Sedimentation zum Teil in den Sedimenten, besonders der tiefen Norwegischen

Rinne, verbleibt. Ein Teil des Stickstoffs verlässt die Nordsee wieder gasförmig infolge der bakteriellen Denitrifikation.

4. Beispiele von Zeitserien

Zeitserien wurden von räumlichen Mittelwerten für vier ausgewählte Gebiete (nördliche und mittlere Nordsee, Doggerbank, Deutsche Bucht) berechnet.

Als ein Beispiel werden die Winter-Daten von der mittleren Nordsee gezeigt (Abb. 4). Während des Winters sind die Werte an der Oberfläche und über dem Boden sehr ähnlich.

Die Temperatur stieg von etwa 6°C zwischen 1984 und 1987 auf mehr als 7.8°C 1988 an, gefolgt von einer nur geringen Abnahme um 0.9°C auf ca. 6.8°C 1993. Die Temperatur blieb auf diesem Niveau mit Ausnahme von 1998 (7.94°C).

Der Salzgehalt wies besonders geringe Werte für 1989 (34.84) und 1995 (34.90) auf, Jahre mit einem hohen Index der winterlichen Nordatlantischen Oszillation (NAO) des Luftdruckgradienten (Island-Azoren) (Mork & Blindheim 2000). Maximale Salzgehalte wurden 1985 (35.18), 1991 (35.20) und 1998 (35.20) bei niedrigem NAO-Index festgestellt.

Die Veränderlichkeit der Phosphatkonzentrationen zeigte sich zwischen 1988 und 1997 in einem gewissen Ausmaß invers zu der des Salzgehaltes. Dies weist auf einen stärkeren Einfluss aus der südlichen, weniger salzhaltigen Nordsee hin als von dem nährsalzreichen nordatlantischen Einstrom. Phosphat und Nitrat zeigten für den gemessenen Zeitraum eine abnehmende Tendenz.

Nitrat wies besonders bis 1991 einen ähnlichen Verlauf wie der Salzgehalt auf, was als nordatlantischer Einfluss gewertet werden kann. Nach einem Maximum von 10 µM im Winter 1985 ging Nitrat auf ca. 7 µM 1987 zurück und variierte anschließend zwischen 6 and 8 µM.

5. Schlussfolgerungen

- * Die Primärproduktion über der Doggerbank beeinflusste während des Winters und Sommers die Nährsalzverhältnisse in der zentralen Nordsee weitreichend, denn der Reststrom versetzte das nährstoffarme Wasser nordöstlich.
- * Stickstoff (Nitrat als Hauptkomponente) war der am stärksten limitierende Nährstoff in den zentralen Oberflächengewässern und in den flachen Gebieten in der gesamten Wassersäule. Diese Aussage wird durch die geringen Konzentrationen und niedrigen N/P- und N/Si-Verhältnisse gestützt.
- * Die flache südliche Nordsee war während des Sommers infolge einer häufigeren Erosion der Dichtesprungschicht nährstoffärmer als die tiefere nördliche Nordsee.
- * Die Ammoniumkonzentrationen stiegen bereits durch Remineralisation sedimentierter Biomasse während des frühen Sommers im Bodenwasser der zentralen Nordsee, das eine lange Aufenthaltszeit hat.
- * Die Variabilität von Jahr zu Jahr war am höchsten im norwegischen und kontinentalen Küstenwasser, hervorgerufen durch wechselnde Ausdehnung (Windrichtung) und Süßwasserzufuhr.
- * Die Langzeit-Veränderungen zeigten einige Zusammenhänge mit dem NAO-Index, besonders

für den Winter.

* Da die dargestellten Nährsalzgradienten neben biogeochemischen Einflüssen auch physikalischen Einflüssen unterliegen, müssen, um die Nährstoffumsätze besser verstehen zu können, parallel auch gelöste und partikuläre Stickstoff- und Phosphorverbindungen bestimmt werden (Brockmann & Kattner 1997).

* Die jährliche Umwandlung der anorganischen Nährsalze beeinflusst die Chemie der gesamten Wassersäule der Nordsee durch Anlagerungs- und Sedimentationsprozesse (Brockmann et al. 1994).

6. Literatur

ASMO (1998): Assessment and monitoring, Report of the ASMO modelling workshop on eutrophication issues. The Hague, The Netherlands, OSPAR, ca. 50pp.

Baretta, J.W., H.J.G. Baretta-Bekker, H.J.G., Ruurdij, P. (1998): Data needs for ecosystem modelling. ICES J.Mar.Sci.55, 756-766

Brockmann, U.H., Haarich, M., Rick, H.-J., Hühnerfuss, H., Schmidt, D., Kersten, M., Steinhart, H., Landgraf, O., Aletsee, L., Dürselen, C.-D. & Becker, V. (1994): Seasonal correlation between nutrients and contaminants. In: J. Sündermann (Ed): Circulation and contaminant fluxes in the North Sea. Springer-Verlag, Berlin, 485-520

Brockmann, U.H. & Kattner, G. (1997): Winter-to-summer changes of nutrients, dissolved and particulate organic material in the North Sea. Dt.hydrogr.Z. 49, 229-242

De Jonge, V.N., Bakker, J.F. & van Stralen, M. (1996): Recent changes in the contributions of River Rhine and North Sea to the eutrophication of the western Dutch Wadden Sea. Neth.J.Aquat.Ecol. 30, 27-39

Lenhart, H. & Pohlmann, T. (1997): The ICES-boxes approach in relation to results of a North Sea circulation model. Tellus 49A, 139-160

Mork, K.A. & Blindheim, J. (2000): Variations in the Atlantic Inflow to the Nordic Seas, 1955 - 1996. Deep Sea Res.47, 1035-1057

Radach, G., Gekeler, J., Becker, G., Bot, P., Castaing, P., Colijn, F., Damm, P., Danielssen, D., Foeyn, L., Gamble, J., Laane, R., Mommaerts, JP, Nehring, D. & Pegler, K., van Raaphorst, W. & Wilson, J. (1996): The NOWESP Research Data Base, Dt.Hydrogr.Z. 48, 241-259

Radach, G. & Lenhart, H.J. (1995): Nutrient dynamics in the North Sea: Fluxes and budgets in the water column derived from ERSEM. Neth. J.Sea Res. 33, 301-335

Smayda, T. J. (1990): Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: Evidence for a global epidemic, In: E. Graneli, B. Sundström, L. Edler & D.M. Anderson (eds): Toxic Marine Phytoplankton, Elsevier, 29- 51

Visser, M., Batten, S., Becker, G., Bot, P., Colijn, F., Damm, P., Danielssen, D., van den Eynde, D., Föyn, L., Frohse, A., Groeneveld, G., Laane, R., van Raaphorst, W., Radach, G., Schultz, H. & Sündermann, J. (1996): Time series analysis of monthly mean data of temperature, salinity, nutrients, suspended matter, phyto- and zooplankton at eight locations on the northwest European shelf. Dt.Hydrogr.Z. 48, 299-324

7. Legenden

Abb.1 Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen (μM) an der Wasseroberfläche und in Bodennähe im Sommer 2000 (9.8.-23.8.)

Abb.2 Mittlere Nitratkonzentrationen und ihre Variabilität an der Wasseroberfläche und in Bodennähe während des Winters für den Zeitraum 1984-2000

Abb.3 Mittlere Nitratkonzentrationen und N/Si-Verhältnisse und ihre Variabilität an der Wasseroberfläche während des frühen Sommers (Mai-Juni, 1986, 1991-1995)

Abb.4 Zeitserien in der mittleren Nordsee während des Winters (Mittelwerte eines Gebietes von $56^{\circ}30'N$ bis $57^{\circ}30'N$ und von 0° bis $2^{\circ}E$)

NUTRIENT ATLAS of the Central and Northern North Sea

Brockmann U. and Topcu, D.H.

University of Hamburg
Centre for Marine and Climate Research
Institute for Biogeochemistry and Marine Chemistry
Martin-Luther-King-Platz 6
D 20146 Hamburg

1. Introduction

Funded by the German Federal Environmental Agency (FKZ 200 25 211) a nutrient atlas has been prepared for the central and northern North Sea, compiling data from 1984 to 2000, supplemented by salinity and temperature measurements. The atlas containing maps, transects, correlation diagrams and time series will be published in the beginning of 2002, supplemented by a CD-ROM which contains coloured pictures and the complete data. Some examples are given here.

Gradients of nutrients which are seasonally modified by nutrient cycling, discharges, imports and exports, reflect the current status of one part of the phase distribution of the elements N and P within the North Sea ecosystem. Winter nutrient concentrations determine the starting conditions for the phytoplankton spring bloom and subsequent seasonal cycling of nutrient elements. During summer turnover of nutrients is fastest and most of the nutrients are consumed within the mixed layer.

The turnover processes, which include the interaction with the sediment as well as the local discharges and regionally specific advection patterns, create a regional differentiation of the nutrient regime in the North Sea influenced by sediment topography, stratification, tidal action, residual currents and localised discharges.

The fluxes of nutrient elements as well as carbon through the food web are used for quantitative ecosystem analyses, and they serve as reference for the phase distribution of contaminants as well. Especially winter data at minimum biological activity are used to assess changes and fluctuations of the North Sea ecosystem. The data are also necessary for forcing and validation of ecosystem models, formulation of budgets (Radach & Lenhart 1995, ASMO 1998, Baretta et al. 1998) and calculation of trends (Radach et al. 1996, Visser et al. 1996).

Since a feedback has been detected between offshore nutrient gradients and reduced nutrient concentrations of inshore environments (De Jonge et al. 1996), data from the central North Sea have to be considered as references to understand coastal processes including eutrophication effects and the formation of harmful blooms (Smayda 1990).

Nutrient samples were taken from the fishery research vessels ANTON DOHRN and WALTHER HERWIG during the Young Fish and Summer Fish Surveys from 1984 to 2000, supplemented by cruises of RV VALDIVIA and RV GAUSS. During most of the cruises samples were filtered already onboard before fixation by mercury chloride. Analyses were performed by Autoanalyzer methods. Salinity and temperature data were provided by physical oceanographers.

These data are presented in an atlas, including surface and near-bottom nutrient maps of winter and summer 1984 - 2000 mostly from the central and northern North Sea, supplemented by salinity and temperature maps as well as by t/S, mixing and nutrient correlation diagrams, combining all data. These diagrams indicate the different sources and sinks. For the summer cruises selected transects are shown. Means of nutrients and standard variations are presented as surface and bottom maps as well. Time series from surface and bottom are shown for selected areas.

Maps and time series have been plotted using SURFER 7 (Golden Software), x/y-diagrams with GRAPHER (Golden Software). Sampling locations are indicated by dots.

2. Example of a cruise

During summer 2000 sampling was performed from 9.8 to 23.8. with R.V. GAUSS involving large parts of the North Sea.

The extension of nutrient exhaustion at the surface was largest for nitrate ($<0.2 \mu\text{M}$) in the central North Sea, surrounded by nitrate-rich coastal waters fed by river discharges (Fig. 1). The inflow of nutrient-rich Atlantic water along the Norwegian Trench increased nitrate in the bottom water to above $10 \mu\text{M}$.

Ammonium remained in a steady state between remineralisation and uptake mostly below $1 \mu\text{M}$ at the surface. High ammonium ($2-4 \mu\text{M}$) concentrations were found in the bottom water of the central North Sea, caused by remineralisation of sedimented biomass and the long retention time of these water masses, isolated from the mixed layer (Lenhart & Pohlmann 1997).

3. Examples of mean concentrations and variabilities

The North Sea was divided into areas of 01° longitude and 30 min latitude (about $3,000 \text{ km}^2$ each), in order to allow a locally differentiated calculation of means. For the calculation of means 18 (two cruises in 1986/7) data sets were involved.

Means have been calculated for the winter and summer. For the summer, due to the larger differences of sampling time and faster turnover during this season, additional means have been calculated for early (May - June) and late summer (July - August/September). The variability of data indicates the representativeness of more or less frequently sampling and allows the identification of areas characterised by high variability from year to year. The regional variability is important for assessing regional nutrient regimes with respect to management measures.

The winter data revealed the far-reaching inflow of the nutrient-rich ($>10 \mu\text{M}$ nitrate) Atlantic water from the north, and of river discharges, mainly affecting the coastal water which showed a high variability due to interannual fluctuation of discharges (Fig. 2).

During winter the primary production above the Dogger Bank reduced the nutrients significantly, especially nitrate ($<5 \mu\text{M}$). In the central North Sea concentrations were between 5 and $10 \mu\text{M}$, near the Humber mouth $>10 \mu\text{M}$, and in the Continental Coastal Water (CCW) $>20 \mu\text{M}$. Off the shallow North Frisian coast concentrations increased above $30 \mu\text{M}$ due to the Elbe/Weser river plumes.

Mean nitrate gradients were similar at the surface and near the bottom due to complete vertical

mixing with the exception of the Norwegian Trench, along which the North Atlantic inflow spread, causing high nitrate concentrations ($>10 \mu\text{M}$) which were covered by the less haline Norwegian coastal water, which may cause stratification even during the winter, allowing reduction of nutrients ($<7 \mu\text{M}$ nitrate) by primary production.

This means that the North Sea was fed with nutrients along nearly all borders.

Variability of nitrate which was similar at the surface and near the bottom was lowest in the northern and central North Sea ($<20\%$) and highest along the border of the CCW ($>40\%$). This indicated the variable extension of the nutrient-rich CCW and the constancy of nitrate discharges e.g. into the GB.

During early summer nitrate was depleted ($<0.5 \mu\text{M}$) in the 30 - 50 m deep mixed layer of the central North Sea (Fig.3). This area was surrounded by the nutrient-rich Atlantic and coastal water.

Variability was highest in central areas due to low concentrations and, in the frontal area of the CCW, affected by changing extensions due to changing wind directions.

N/Si ratios were below 1 at the surface in large parts of the central North Sea and increased (>2) along the coasts and at the border towards the Atlantic, indicating higher N-discharges and longer lasting Si-fixation.

Gradients of variability of N/Si-ratios were similar as those of nitrate of which it is dependent. The low variability along the British coast indicates a permanent surplus of nitrogen in relation to the less anthropogenically affected silicate in this area.

Generally, the North Sea acts as a sink for nutrients, which are converted to biomass and trapped following sedimentation in the sediments, especially those of the deep Norwegian Trench. Part of the nitrogen leaves the North Sea as volatile gases due to bacterial denitrification.

4. Examples of time series

Time series have been calculated as spatial means for four selected areas (Northern North Sea, middle North Sea, Dogger Bank, German Bight).

As an example winter data from the middle North Sea are shown (Fig. 4). During winter surface and bottom values are similar.

Temperatures increased from about 6°C between 1984 and 1987 to more than 7.8°C in 1988, followed by an only small decrease of 0.9°C to 6.8°C in 1993. This level was kept except for 1998 (7.94°C).

Salinity showed minima in 1989 (34.84) and in 1995 (34.90), years with a high NAO-index (Mork & Blindheim 2000). Maxima were observed in 1985 (35.18), 1991 (35.20) and 1998 (35.20) at low NAO-index values.

Variations of phosphate concentrations were to some degree inverse to those of salinity between 1988 and 1997, indicating more influences from the southern, less haline North Sea since 1988 than by the nutrient-rich Atlantic inflow. Phosphate and nitrate showed a decreasing tendency during the sampled period.

Changes of nitrate were similar as salinity especially until 1991, indicating influence by the

North Atlantic inflow. Following a maximum of 10 μM in winter of 1985, nitrate decreased to about 7 μM in 1987, varying between 6 and 8 μM during the following years.

5. Conclusions

- * The primary production above the Dogger Bank affected during winter and summer the nutrient regime in the central North Sea significantly, supported by the system of residual currents spreading the nutrient-poor water plume northeastward.
- * Nitrogen (nitrate as a main component) was the most limiting nutrient in central waters at the surface and in shallow regions in the total water column. This was documented by low concentrations and low N/P- and N/Si-ratios as well.
- * The shallow southern North Sea was during the summer nutrient-poorer than the deeper northern part, due to more frequent erosion of densiclines.
- * Ammonium concentrations increased seasonally in the bottom water of the central North Sea, which has a long residence time, already during early summer by remineralisation of sedimented biomass.
- * Interannual variability was highest in the Norwegian and Continental Coastal Waters, due to changing extension (prevailing wind direction) and freshwater discharges.
- * Long-time changes showed some correlation with the NAO-index, especially for the winter time.
- * Since the presented nutrient gradients were controlled not only by geochemically processes but also by advection, understanding of nutrient conversion needs the consideration of dissolved and particulate nitrogenic and phosphoric compounds, measured from subsamples for nutrient analyses (Brockmann & Kattner 1997).
- * The annual conversion of inorganic nutrients affects the chemistry of the whole water column of the North Sea by scavenging (Brockmann et al. 1994b).

6. Literature

- ASMO (1998): Assessment and monitoring, Report of the ASMO modelling workshop on eutrophication issues. The Hague, The Netherlands, OSPAR, ca. 50pp.
- Baretta, J.W., H.J.G. Baretta-Bekker, H.J.G., & Ruardij, P. (1998): Data needs for ecosystem modelling. *ICES J.Mar.Sci.*55, 756-766
- Brockmann, U.H., Haarich, M., Rick, H.-J., Hühnerfuss, H., Schmidt, D., Kersten, M., Steinhart, H., Landgraf, O., Aletsee, L., Dürselen, C.-D., & Becker, V. (1994): Seasonal correlation between nutrients and contaminants. In: J. Sündermann (Ed): Circulation and contaminant fluxes in the North Sea. Springer-Verlag, Berlin, 485-520
- Brockmann, U.H., & Kattner, G. (1997): Winter-to-summer changes of nutrients, dissolved and particulate organic material in the North Sea. *Dt.hydrogr.Z.* 49, 229-242
- De Jonge, V.N., Bakker, J.F., & van Stralen, M. (1996): Recent changes in the contributions of River Rhine and North Sea to the eutrophication of the western Dutch Wadden Sea.

Neth.J.Aquat.Ecol. 30, 27-39

Lenhart, H., & Pohlmann, T. (1997): The ICES-boxes approach in relation to results of a North Sea circulation model. *Tellus* 49A, 139-160

Mork, K.A., & Blindheim, J. (2000): Variations in the Atlantic Inflow to the Nordic Seas, 1955 - 1996. *Deep Sea Res.*47, 1035-1057

Radach, G., Gekeler, J., Becker, G., Bot, P., Castaing, P., Colijn, F., Damm, P., Danielssen, D., Foeyn, L., Gamble, J., Laane, R., Mommaerts, J.P., Nehring, D. & Pegler, K., van Raaphorst, W., & Wilson, J. (1996): The NOWESP Research Data Base, *Dt.Hydrogr.Z.* 48, 241-259

Radach, G., & Lenhart, H.J. (1995): Nutrient dynamics in the North Sea: Fluxes and budgets in the water column derived from ERSEM. *Neth. J.Sea Res.* 33, 301-335

Smayda, T. J. (1990): Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: Evidence for a global epidemic, In: E. Graneli, B. Sundström, L. Edler & D.M. Anderson (eds): *Toxic Marine Phytoplankton*, Elsevier, 29-51

Visser, M., Batten, S., Becker, G., Bot, P., Colijn, F., Damm, P., Danielssen, D., van den Eynde, D., Föyn, L., Frohse, A., Groeneveld, G., Laane, R., van Raaphorst, W., Radach, G., Schultz, H., & Sündermann, J. (1996): Time series analysis of monthly mean data of temperature, salinity, nutrients, suspended matter, phyto- and zooplankton at eight locations on the northwest European shelf. *Dt.Hydrogr.Z.* 48, 299-324

7. Legends

Fig.1 Nitrate and Ammonium concentrations (μM) at the surface and near the bottom during summer 2000 (9.8.-23.8.)

Fig.2 Mean nitrate gradients and their variability during winter (1984-2000) at the surface and near the bottom

Fig.3 Mean nitrate concentrations and N/Si-ratios at the surface and its variability during early summer (May-June, 1986, 1991-1995)

Fig.4 Time series in the middle North Sea during winter (means of an area 56°30'N-57°30'N, 0°-2°E)