

ISSN 0946-6010

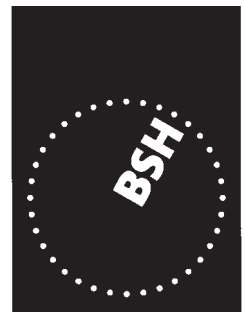


BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Nordsee und Deutsche Bucht 2002

Ozeanographischer Zustandsbericht

Berichte des BSH **33**



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Nordsee und Deutsche Bucht 2002

Ozeanographischer Zustandsbericht

Autoren:

Peter Loewe

Gerd Becker

Uwe Brockmann

Alexander Frohse

Kai Herklotz

Holger Klein

Achim Schulz

**Berichte des
Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie
Nr. 33/2003**

In der Reihe „Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie“ werden Themen mit Dokumentationscharakter aus allen Bereichen des BSH veröffentlicht. Durch die Publikation nimmt das BSH zu den Inhalten der Beiträge keine Stellung. Die Veröffentlichungen in dieser Berichtsreihe erscheinen nach Bedarf.

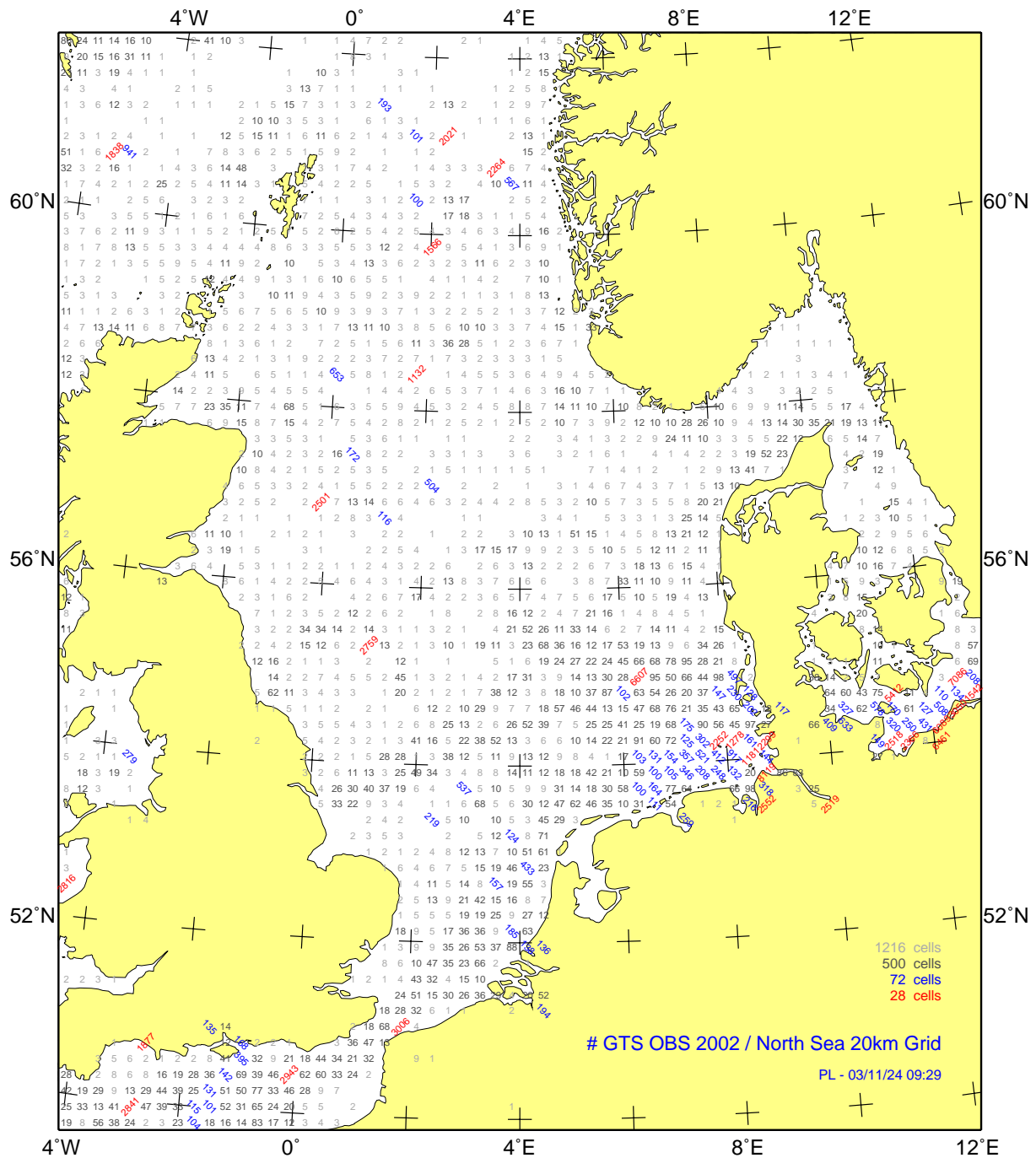
Der *Ozeanographische Zustandsbericht* im Internet:

www.bsh.de (Menü: Produkte → Bücher → Berichte des BSH)

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2003
www.bsh.de

ISSN-Nr. 0946-6010

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des BSH reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.



Häufigkeitsverteilung von Oberflächentemperaturmeldungen (SST) in 2002 aus dem Global Telecommunication System (GTS) der WMO. Obwohl SST der bestbeobachtete ozeanographische Zustandsparameter ist, ist eine Beobachtungsdichte von weniger als 10 Meldungen im ganzen Jahr (grau) in weiten Seegebieten abseits der Schifffahrtsrouten (ca. 70% der Gesamtfläche) unbefriedigend. Die meisten „hochfrequenten“ Beobachtungsplattformen (> 999 Meldungen, rot) sind Stationen des britischen MAWS Netzwerks und MARNET Stationen des BSH.

Frequency distribution of SST reports in 2002 from WMO's Global Telecommunication System (GTS). Even though SST is the best-observed ocean state parameter there are vast areas (about 70% of the entire domain) of scarce data coverage (< 10 observations, gray) off the shipping routes. Most "high frequency" stations (> 999 observations, red) belong to the UK's MAWS network and BSH's MARNET.

Inhalt

Zusammenfassung	7
Summary.....	9
1 Einführung.....	11
2 Nordsee.....	13
2.1 Atmosphäre.....	14
2.1.1 Nordatlantische Oszillation.....	15
2.1.2 NAO 2002.....	17
2.2 Zirkulation.....	19
2.2.1 Winterzirkulation und NAO.....	19
2.2.2 Saisonale Modellströmungen in 2002.....	20
2.3 Oberflächentemperatur (SST).....	22
2.3.1 Analyse-Technik.....	22
2.3.2 Jahresgang 2002.....	23
2.3.3 Temperaturentwicklung seit 1968 und NAO.....	25
2.3.4 Temperaturregimes.....	27
2.4 Oberflächensalzgehalt (SSS).....	30
2.5 T/S/O ₂ Vertikalschnitte.....	31
2.6 Nährsalze.....	35
2.6.1 Winter 2002.....	35
2.6.2 Sommer 2002.....	38
3 Deutsche Bucht.....	45
3.1 Strömung und Seegang.....	45
3.1.1 Zirkulationsmuster.....	45
3.1.2 Wind und Seegang.....	48
3.2 Oberflächentemperatur (SST).....	51
3.2.1 Strahlung auf Norderney.....	51
3.2.2 Helgoland SST 2002.....	52
3.2.3 Temperaturentwicklung seit 1873 und NAO.....	53
3.3 Oberflächensalzgehalt (SSS).....	55
3.3.1 Helgoland SSS 2002.....	56
3.3.2 SSS-Entwicklung seit 1873.....	57
3.4 Temperaturschichtung an MARNET-Stationen.....	58
3.5 Nährsalze.....	59
3.5.1 FS Gauß Winterreise 377.....	60
3.5.2 MARNET Station <i>Deutsche Bucht</i>	61
3.6 Elbehochwasser.....	63
3.6.1 Meteorologischer Hintergrund.....	63
3.6.2 Abflussraten und Salzgehalt.....	65
4 Ausblick.....	69
Literatur / References	71
Abbildungsverzeichnis	75
Tabellenverzeichnis	79
Figure Index.....	81
Table Index	85
Abkürzungen / Acronyms	87
Autoren / Authors.....	89

Zusammenfassung

Dies ist die Erstausgabe des *Ozeanographischen Zustandsberichts für Nordsee und Deutsche Bucht*, der vom BSH jährlich herausgegeben werden wird. Das Etikett *ozeanographisch* scheint für den auf meeresphysikalische Zustandsvariablen fokussierten Pilotbericht weitgefasst. Es bringt jedoch die Absicht zum Ausdruck, künftige Ausgaben durch Befunde aus anderen Unterdisziplinen der Ozeanographie substantiell zu erweitern. Insbesondere ist die Integration von Ergebnissen der meereschemischen Überwachung des BSH geplant.

Der ozeanographische Zustand wird mit aktuellen Beobachtungs- und Modelldaten für das Jahr 2002 dokumentiert. Sofern klimatologische oder andere Vergleichsdaten existieren bzw. akquiriert werden konnten, wird der Zustand bewertet. Wo diese Voraussetzungen einer dezidierten Bewertung fehlen, wird versucht, aus der Kenntnis physikalischer Prozesse und Zusammenhänge deduktiv zu einer qualitativen Zustandseinschätzung zu gelangen.

Eine lückenlose 4-dimensionale raumzeitliche Zustandsbeschreibung oder gar Zustandsbewertung ist gegenwärtig nicht möglich. Die einzig realistische Perspektive bieten rigoros validierte, zuverlässige Modelle, die mithilfe von Datenassimilationstechniken ozeanographische Beobachtungen, insbesondere auch Satellitendaten, in Zustandssimulationen einbeziehen.

Nordsee

Die ozeanographische Zustandsentwicklung der Nordsee wird von veränderlichen atmosphärischen Randbedingungen gesteuert. Die wichtigste Einflussgröße in der kühleren Jahreszeit ist die durch den NAO-Index quantifizierte Nordatlantische Oszillation. Die NAO in 2002 schwankte bis in den Hochsommer um ein hohes positives Niveau, fiel im September steil in ihre negative Phase ab und führte anschließend eine amplitudenverstärkte Oszillation auf flachem Niveau aus. Ein Phasendiagramm der dynamischen NAO-Zustände seit 1879 lässt drei Attraktorregionen erkennen, die offenbar Ausdruck dekadenlanger und dann spontan wechselnder Präferenzen der NAO für ihre negative bzw. positive Phase sind.

Die saisonale Nordsee-Zirkulation in 2002 wird durch Strömungsfelder des operationellen BSH-Modells beschrieben. Im Winterhalbjahr war das Strömungsfeld stark ausgeprägt und richtungsstabil, im Sommerhalbjahr schwach und unbeständig. Ob Abweichungen in Intensität und Muster von externen Modellklimatologien auf Anomalien im atmosphärischen Antrieb oder auf Modelldefekte zurückzuführen sind, kann nicht entschieden werden.

Die Oberflächentemperatur (SST) ist die weltweit bestbeobachtete ozeanographische Zustandsgröße. Anhand der am BSH seit 1968 erstellten wöchentlichen SST-Analysen für die Nordsee ergibt sich für 2002 die Rekord-Jahresmitteltemperatur von 11.0 °C, die gleichzeitig den vorläufigen Höhepunkt einer seit 1989 andauernden Warmphase markiert. Das abrupte Ende der vorherigen dekadenlangen Kaltphase ging mit einem extremen NAO⁺-Ereignis im Winter einher. Wie räumliche Verteilungen der monatlichen SST-Anomalien für 2002 zeigen, lag die SST ganzjährig und nahezu im gesamten Seegebiet über den Klimanormalwerten.

Geographische Verteilungen des Oberflächensalzgehalts (SSS) sind für Januar/Februar und Juli durch Überwachungsdaten belegt. Der atlantische Einfluss nahm im Norden gegenüber den Vorjahren zu, der Einstrom zwischen den Orkney- und Shetlandinseln (Fair Isle Strom) war abgeschwächt; die Transporte atlantischen Wassers durch den Englischen Kanal waren gering. Die Sommeraufnahme (vor dem Elbehochwasser) zeigt die Ausbreitung erhöhter winterlicher Süßwassereinträge durch die kontinentalen Flüsse und den Ostsee-Ausstrom auf nahezu die gesamte östliche Hälfte der Nordsee. Dieser Sachverhalt wird durch die vertikale Salzgehaltsverteilung entlang von sechs West-Ost-Schnitten untermauert.

Auf den gleichen Überwachungsfahrten wurden Nährsalze analysiert, die als oberflächen- und bodennahe geographische Verteilungen präsentiert werden. In der winterlichen, durchmischten Nordsee sind die vertikalen Unterschiede gering. Im Sommer sind deutliche Unter-

schiede auch durch biologische Produktion und Remineralisierung oberhalb bzw. unterhalb der Sprungschicht bedingt. Diese entgegengesetzten biologischen Prozesse werden auch anhand vertikaler Sauerstoffsättigungsschnitte dokumentiert. Insgesamt lagen die Nährsalzkonzentrationen meist im Bereich der langjährigen Mittelwerte des Zeitraums 1984-2000. Die höchsten Konzentrationen wurden generell im Seegebiet *Deutsche Bucht* angetroffen.

Deutsche Bucht

Die Zustandsbeschreibung der Deutschen Bucht beruht auf lokalen Beobachtungen und Modellsimulationen, deren Repräsentativität für das Seegebiet mit der Länge des Mittelungszeitraums wächst. Eine Ausnahme bildet die hier präsentierte Zirkulationsstatistik, die auf einer subjektiven Klassifizierung täglicher oberflächennaher Strömungsfelder des BSH-Modells beruht. Das zyklonale Strömungsmuster trat auch 2002 mit etwa 40% am häufigsten auf, war aber gegenüber den Vorjahren durch eine ungewöhnlich stabile Phase zu Jahresbeginn gekennzeichnet, die als Folge einer starken Westwindzirkulation (NAO⁺) zu gelten hat.

Wind- und Seegangsverhältnisse werden mit Windmessungen am Feuerschiff *Deutsche Bucht*, Seegangsdaten des DWD-Modells für diese Position sowie Seegangsmessungen bei Helgoland dokumentiert. Die Richtungsverteilungen für Wind und Seegang waren einander ähnlich und zweigipflig. Die Windverteilung zeigte ein breites Maximum, das sich von S bis W erstreckte, und ein schärferes für Winde aus östlichen Richtungen (ENE bis ESE). Höhere und extreme Geschwindigkeiten bis zu 25 m/s gingen mit Richtungen zwischen SW und NW einher. In diesen Sektoren wurden auch die größten Wellenhöhen von 7-8 m beobachtet.

Oberflächentemperatur (SST) und –salzgehalt (SSS) werden anhand der bis 1873 zurückreichenden Zeitreihen von Helgoland Reede bewertet. 2002 war das zweitwärmste Jahr seit Beginn der Messungen. Das Jahresmittel von 11.0 °C stimmt mit demjenigen für die Nordsee identisch überein. Ferner besteht exzellente Übereinstimmung beider Zeitreihen im gemeinsamen Zeitbereich (1968-2002) bzgl. wechselnder Kalt- und Warmphasen. Die seit 1989 andauernde Warmphase ist die längste und intensivste seit 130 Jahren für Helgoland. Dieses Ergebnis gilt mit großer Sicherheit auch für die Nordsee insgesamt. Die statistische Abhängigkeit der SST von der NAO ist nicht-stationär und nur für das Winterhalbjahr nachweisbar. - Zu signifikanten Überschreitungen der Langzeitmittel kam es bei den Abflussraten nicht nur ab August, sondern auch – und zwar verfrüht – im Spätwinter 2001/2002. Die Salzgehalte bei Helgoland waren deshalb im Herbst und Winter anomal niedrig, während sie in der übrigen Zeit des Jahres über den Normalwerten lagen. Die jahreszeitliche SSS-Entwicklung zeigt daher für 2002 einen gegenüber dem klimatologischen Jahresgang gegensinnigen Verlauf, bzw. eine Phasenverschiebung von sechs Monaten. Dieser Verlauf ist charakteristisch für das gegenwärtige salzreiche Regime, das ebenfalls 1989 einsetzte. Salzreiche und frische Phasen korrespondieren offenbar – mindestens in den vergangenen 40 Jahren – mit den für die SST festgestellten Warm- und Kaltregimes. Möglicherweise gilt dies für die Nordsee insgesamt.

Der Jahresgang der Nährsalzkonzentrationen wird durch automatische Analysen an der MARNET Station *Deutsche Bucht* belegt. Hohe Niederschläge und Abflussraten führten im Februar zu steilen Konzentrationsanstiegen, die mit dem lokalen Salzgehalt invers korrelieren. Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August sind wegen des mehrwöchigen Ausfalls der Analysatoren ab 17. September kaum nachvollziehbar, die Salzgehaltsmessungen in der zweiten Jahreshälfte aufgrund der Biofouling-Problematik von zweifelhaftem Wert.

Auslöser des Elbehochwassers war eine Vb- oder *Hintertür*-Zyklone, die vom Atlantik einen Umweg über das Mittelmeer einschlug, die Ostalpen passierte und am 12. August über Ostdeutschland stationär wurde. Stürmische nordwestliche Winde auf der Rückseite des Tiefdruckwirbels führten infolge des Staueffekts im Luv der Mittelgebirge zu einer Verdopplung der Niederschläge. Die Flutwelle erreichte am 4. September als Salzgehaltssignal Helgoland Reede. Ein sekundäres Minimum trat hier am 20. September ein und signalisiert die Rückkehr der frischen Wassermassen aus Norden aufgrund einer zwischenzeitlichen Umstellung des Wind- und Strömungsfeldes.

Summary

This document is the pilot edition of the *Oceanographic Status Report for the North Sea and German Bight* that will be published annually by BSH. While the qualifier *oceanographic* may appear too broad-scale, for the pilot report largely restricts itself to physical state variables, it provides an appropriate roof for future contributions from other oceanographic fields. In particular, work is underway to accommodate results from the BSH's marine chemical monitoring beginning with the next issue.

The oceanographic state in 2002 is documented by recent observations and modeling data. If climatological or other reference data exist or could be acquired, the state is assessed. Where these prerequisites to a firm assessment are lacking, an educated guess at the quality of the state is attempted from limited knowledge of physical processes and interrelations.

A complete 4-dimensional spatiotemporal documentation – let alone an assessment – of the oceanographic state is not currently possible. The only realistic perspective to eventually get reasonably close to this goal is rigorously validated, dependable models. In addition, such models need to employ data assimilation techniques to imbed and enhance oceanographic observations, in particular satellite data, in ocean state simulations.

North Sea

The spatiotemporal evolution of the oceanographic state is governed by variations in atmospheric boundary forcing. The most important single factor of influence during the cold season is the North Atlantic Oscillation (NAO) quantified through an NAO Index. In 2002, the NAO performed oscillations about a high positive level through mid-summer before experiencing a sharp drop to its negative phase in September that was followed by an amplified oscillation around a flat level. A phase portrait of dynamical NAO states since 1879 shows three regions of attraction which appear associated with decade-long and spontaneously changing preferences of the NAO for its negative and positive phase, respectively.

The seasonal circulation in 2002 is described by velocity fields from BSH's operational model. Currents were strongly developed and highly persistent in winter and fall but weak and changeable in spring and summer. Whether departures in intensity and pattern from external model climatologies are attributable to anomalous atmospheric forcing or model deficiencies cannot presently be resolved.

Sea surface temperature (SST) is the best observed ocean state parameter worldwide. Weekly SST analyses for the North Sea have been carried out at BSH since 1968. It turned out that the overall annual mean SST of 11.0 °C for 2002 not only is the highest on record but also marks the ad interim climax of the current intense warm episode that jumped into existence in 1989. The abrupt termination of the preceding decade-long cold phase was accompanied by an extreme NAO⁺ event. Geographical distributions of monthly SST anomalies in 2002 show that SSTs were considerably above normal both throughout the year and next to basin-wide.

Geographical distributions of sea surface salinity (SSS) are estimated from observational data collected during monitoring cruises in January/February and July. The Atlantic influx in the north was more intense in comparison to preceding years, the Fair Isle current was abated, and transports of Atlantic water through the English Channel were low. The summer distribution (prior to the flood event of Elbe river) reflects the spread almost throughout the eastern half of the North Sea of increased continental runoff and Baltic outflow in winter. Extensive spreading is corroborated through six vertical west-east salinity transects.

Nutrient data obtained from the same cruises are presented geographically for near-surface and bottom levels. Vertical differences in concentration are small in winter, when the North Sea is well mixed. In summer, notable differences above and beneath the discontinuity layer

are due in part to biological production and remineralization, respectively. Evidence for these opposing biological processes is also found in vertical profiles of oxygen saturation along latitudinal transects. In the gross, nutrient concentrations were close to long-term means for the period 1984-2000. Generally, highest concentrations were observed in the German Bight.

German Bight

The oceanographic state of the German Bight is estimated from local observations and model data, which are the more representative of this sea area the coarser the averaging period. An exception is the circulation statistics presented here, which is based on a subjective classification of daily near-surface current fields as produced by the BSH model. Also in 2002, cyclonic circulation was the most frequent pattern, at about 40%. The most notable difference as compared to previous years consisted in a prolonged stable phase of this circulation type in January and February as a result of contemporaneous vigorous westerly winds (NAO⁺).

Wind and wave conditions are documented by wind measurements at light-vessel *Deutsche Bucht*, wave data from the DWD (Deutscher Wetterdienst) model at the same position, as well as wave measurements near Helgoland. The distributions of wind and wave directions closely resembled one another and, in particular, were bimodal. The wind distribution showed a broad maximum extending from S to W, and a sharper, narrow maximum for easterly winds (ENE to ESE). Higher and extreme wind speeds up to 25 m/s were recorded at wind directions between SW and NW. The highest waves reached 7 to 8 m and were observed to roll in from the same directions.

Sea surface temperature (SST) and salinity (SSS) are assessed from time series at Helgoland Roads. 2002 is the 2nd warmest year on record dating back to 1873. The annual mean SST of 11.0 °C is in exact accord with the annual mean North Sea SST. Moreover, both SST series are in excellent agreement about alternating cold and warm regimes in their common space of time (1968-2002). It thus appears safe to say that the contemporary warm phase that commenced in 1989 is the longest and most intense in 130 years for both Helgoland Roads and the entire North Sea. The statistical dependence of SST on the NAO is non-stationary and not detectable outside the winter half-year.

Continental runoff rates significantly exceeding long-term means occurred not only since August but also – prematurely – in late winter 2001/2002. Hence, salinities at Helgoland Roads were anomalously low in fall and winter and above normal during the rest of the year. As a result, the phase advance in 2002 features a six month shift vis-à-vis the climatological annual cycle. This phase shift appears typical of the current saline regime that has prevailed since around 1989. At least since the 1960s, saline and fresh regimes appear to have corresponded to the observed warm and cold SST regimes. Possibly this holds true for the entire North Sea.

Nutrient concentrations from automatic analyzers at MARNET station *Deutsche Bucht* largely cover the 2002 annual cycle. Exceedingly large precipitation and runoff rates caused steep jumps in concentrations in February that correlate inversely with simultaneous salinity measurements. The impacts of the Elbe river's flood of the century in August were next to untraceable from the data records because of a several-week equipment failure from September 17. In addition, SSS data for the better part of the second half of the year were either discarded on account of biofouling or still appear compromised for this reason or others.

The final cause of the Elbe-flood was a Vb or *backdoor* depression that, after a detour across the Mediterranean, traversed the Eastern Alps and became stationary over eastern Germany on August 12. Gale-force northwesterly winds in the rear of this vast depression caused a doubling in precipitation due to orographic convection along the windward side of the highlands. The flood showed in a significant drop in salinity on September 4 at Helgoland Roads. A secondary depression in salinity on September 20 signifies the return of diluted waters from the north on account of changing wind and current patterns in between both datings.

1 Einführung

Hintergrund

Die anthropogene Beeinträchtigung der Meere durch die allgemeine industrielle Aktivität des Menschen und speziell die rapide zunehmende direkte wirtschaftliche Nutzung liefert einen dringenden, über ein wissenschaftliches Interesse weit hinausgehenden Grund, die natürliche Veränderlichkeit und anthropogene Veränderungen der Meere systematisch zu erfassen und tiefer zu verstehen, um das Ausmaß menschlicher Eingriffe zu kontrollieren und Schäden zu begrenzen oder womöglich rückgängig zu machen.

Nicht erst durch die in fünfjährigen Abständen von OSPAR veranlassten *Quality Status Reports* für die Nordsee weiß man, dass die natürliche Variabilität insbesondere der Schelfmeere auf unterschiedlichen Zeitskalen sehr groß ist und belastbare Aussagen zum Qualitätszustand erschwert. Der ICES hat deshalb 1998 begonnen, für den gesamten Nordatlantik Daten und Bewertungen in den *Annual Climate Status Reports* (www.ices.dk/status/) jährlich zu publizieren. Eine Bewertung des ozeanographischen (klimatischen) Zustandes der Nordsee ist zwar im *Annual Climate Status Report* enthalten, aber im Gesamtumfang eher summarisch und nicht prozessorientiert.

Mit dem vorliegenden ersten *Ozeanographischen Zustandsbericht für Nordsee und Deutsche Bucht*, einer Synopse insbesondere eigener Beobachtungs- und Modelldaten, versucht das BSH einen substantiellen Beitrag zur Erhellung der angerissenen Problematik zu leisten.

Zielsetzung und Durchführung

Die ozeanographischen Aktivitäten des BSH dienen in ihrer Gesamtheit der Erfüllung einer zentralen Aufgabe: Erfassung, Vorhaltung, Interpretation und Verbreitung von Information zur Zustandsentwicklung des Meeres. Diese Aktivitäten, die über Hydrographie und Ozeanmodellierung bis hin zur Meereschemie nahezu das gesamte Spektrum der Disziplin Ozeanographie abdecken, sind auf die deutschen Hausmeere fokussiert aber nicht beschränkt, denn für Meer und Atmosphäre und die darin ablaufenden Prozesse sind ökonomische oder hoheitliche Grenzen nicht existent. Die Verhältnisse in der Deutschen Bucht stehen in engem Zusammenhang mit denen in der Nordsee, die wiederum ebenso wie das Wettergeschehen in Deutschland von den ozeanographischen und atmosphärischen Verhältnissen im und über dem Nordatlantik dominiert werden. Der *Ozeanographische Zustandsbericht* beschäftigt sich folgerichtig gleichermaßen mit Deutscher Bucht und Nordsee und geht darüber hinaus kurz auf die Bedingungen im Nordatlantik (Nordatlantische Oszillation) ein.

Der erste *Ozeanographische Zustandsbericht für Nordsee und Deutsche Bucht* ist weder Datenreport, noch pedantische Dokumentation des *Meereswetters* auf der Zeitskala von Hörfunknachrichten, noch buchhalterische Faktensammlung. Die Zielsetzung für diesen Pilotbericht bestand vielmehr in einer Bestandsaufnahme relevanter BSH-eigener Datensätze, in der Akquirierung ergänzender substantieller Beobachtungs- und Modelldaten kooperierender Institute, einer darauf aufbauenden diagnostischen Analyse und Interpretation des ozeanographischen Zustands im Gesamtzusammenhang, und endlich einer homogenen synoptischen Präsentation der Ergebnisse.

Aufgrund der offensichtlichen zeitlichen Rahmenbedingungen sowie begrenzter Kapazitäten und Ressourcen beschränkt sich der Pilotbericht thematisch auf Hydrographie und Nähr-

salze und kann demzufolge nur eine halbwegs interdisziplinäre Darstellung und Betrachtung wesentlicher Prozesse bieten.

Im einzelnen geht es insbesondere darum, Besonderheiten bzw. Anomalien in der Entwicklung der Zustandsvariablen herauszustellen und diese sowohl auf der Grundlage physikalischer Zusammenhänge zwischen diesen Zustandsgrößen selbst, als auch als Folgeerscheinung atmosphärischer Antriebsmechanismen zu erklären. Darüber hinaus wird der Zustand im Jahr 2002 im Kontext der historischen Entwicklung betrachtet, wenn die Datelage dies zulässt. Obgleich hier und dort Hinweise für eine mögliche künftige Entwicklung erkennbar scheinen, sind seriöse Wahrscheinlichkeitsprognosen gegenwärtig nicht möglich und unterbleiben deshalb.

Die Ausführung des Berichts ist von der Idee geleitet, nicht nur Fachkollegen, sondern auch Entscheidungsträgern und nicht zuletzt der interessierten Öffentlichkeit einen Zugang zu den nicht immer einfachen Sachverhalten zu ermöglichen. Insbesondere bei der Darstellung von Analyse- und Auswertemethodik oder relevanter theoretischer Arbeitsergebnisse sind trotz des guten Vorsatzes sicher noch Verbesserungen möglich.

Die Zustandseinschätzung für die Nordsee und die Deutsche Bucht ist *klassisch* gegliedert. Nach einer kurzen Einführung in die Ozeanographie der Nordsee, werden zuerst die atmosphärischen Bedingungen im Jahr 2002 über dem Nordatlantik und der Nordsee beschrieben. Es folgen Analysen des hydrographischen Zustands und der Nährsalzverhältnisse für die Nordsee und dann – detaillierter – für die Deutsche Bucht. Die Ursachen und Auswirkungen des Elbehochwassers werden im letzten Kapitel beschrieben. Im Ausblick werden u.a. die Problematik einer profunden und vollständigen Zustandsbewertung diskutiert und Vorstellungen zur Weiterentwicklung des Berichts präsentiert.

2 Nordsee

Bei den Bewertungen des Zustandes der Nordsee (OSPAR 2000) hat sich durchgesetzt, dieses Seegebiet durch den Westeingang des Englischen Kanals, den 62 °N Breitenparallel und das Kattegat zu begrenzen. Das so definierte Nordseegebiet hat eine Ausdehnung von 750000 km², ein Volumen von 94000 km³ und eine mittlere Tiefe von 125 m. Das errechnete Volumen ist mehr als doppelt so groß wie das der Nordsee nach den *alten* IHO-Definitionen (ICES 1980). Die in *Abb. 2-1* dargestellte Tiefenkarte basiert auf einem neuen digitalen bathymetrischen Datensatz des Dansk Hydraulik Institut.

Die Nordsee ist ein relativ flaches Schelfmeer mit einer im Norden weiten Öffnung zum Nordatlantik. Das ozeanische Klima der Nordsee - charakterisiert durch Salzgehalt und Temperatur - wird in großem Maße durch die nördliche Öffnung der Nordsee zum Atlantik bestimmt. Im Südwesten hat der Atlantik durch den flachen Englischen Kanal und durch die enge Dover-Straße einen geringeren Einfluss auf die Nordsee. Die Ostsee ist durch den Großen und den Kleinen Belt sowie durch den Sund mit dem Kattegat/Skagerrak und der Nordsee verbunden.

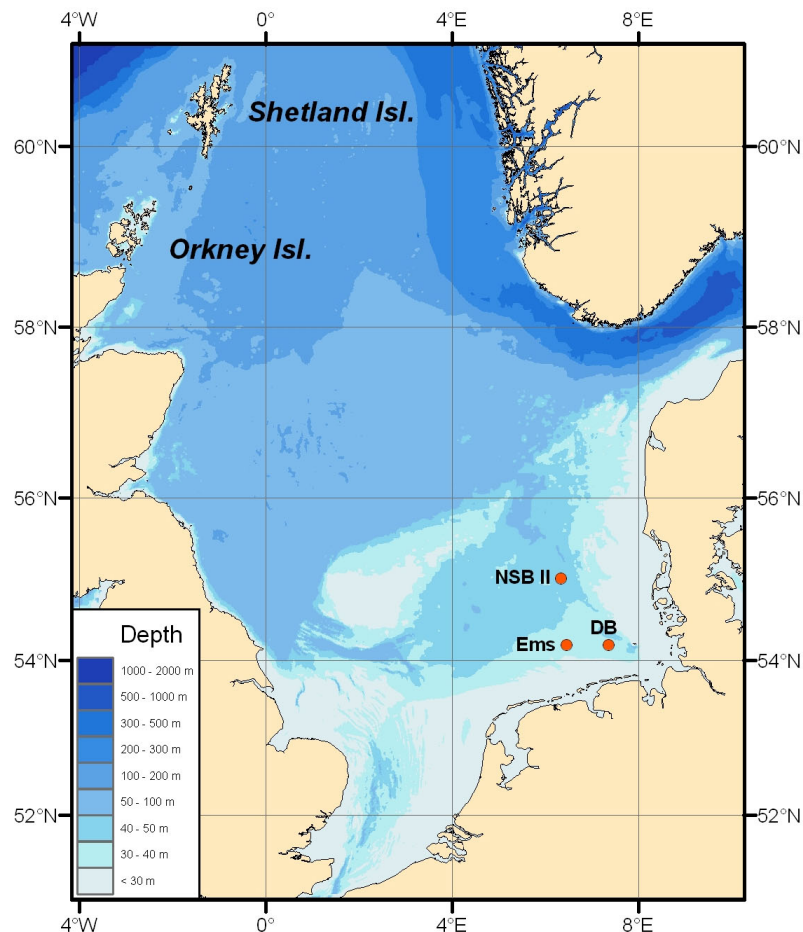


Abb. 2-1 Bathymetrie der Nordsee (mit MARNET Stationen). Auflösung 1/3 sm. Datenquelle: Dansk Hydraulik Institut.

Fig. 2-1 Bathymetry of the North Sea (including MARNET stations). Resolution 1/3 nm. Data courtesy of Dansk Hydraulik Institut.

Die komplexen ozeanographischen Bedingungen sind einerseits durch den Zustrom atlanti-

schen Wassers mit Salzgehalten über 35, andererseits durch die erheblichen Süßwassereinträge der Flüsse und den salzarmen Ausstrom aus der Ostsee gekennzeichnet. Der Süßwassereintrag durch Niederschlag über der Nordsee wird weitgehend durch die Verdunstung kompensiert.

Der Nordatlantik übt insgesamt einen dämpfenden Einfluss auf die Nordsee aus. So beträgt die Amplitude der jährlichen Temperaturwelle in der durchmischten Deckschicht am Nordeingang etwa 2.5 °C, in der Deutschen Bucht dagegen mehr als 7.5 °C (Becker 1981). In der Nordsee bildet sich in der Zeit zwischen April/Mai und September/Oktobre eine permanente Temperatursprungschicht, die die durchmischte Bodenwasserschicht von der durchmischten Deckschicht trennt. Die Amplitude der Jahreswelle der Temperatur in Bodennähe beträgt in der zentralen und nördlichen Nordsee weniger als 1 °C. Zwischen dem vertikal durchmischten und dem geschichteten Wasser bilden sich Frontalzonen, Gebiete starker horizontaler Gradienten der Temperatur, die als *tidal mixing fronts* (Pingree et al. 1978) bezeichnet werden und in Satellitenbildern gut sichtbar sind.

Die Nordsee unterliegt einer starken zwischenjährigen Variabilität, die vor allem durch den Atlantik gesteuert wird. Während die Wärmebilanz überwiegend durch die lokalen Strahlungs- und Wärmeflusskomponenten atmosphärisch beeinflusst wird, werden die Salz- und Nährstoffbilanzen von der Advektion aus dem Atlantik dominiert.

2.1 Atmosphäre

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) ist in einer Vielzahl von Studien zur Erklärung der Variabilität verschiedenster Naturerscheinungen in der Nordhemisphäre herangezogen worden (Marshall et al. 2001, Hurrell 2003). Obwohl viele andere Faktoren im Netzwerk der Wechselwirkungen Einfluss nehmen, ist die NAO oft als wichtigste Einzelgröße für einen hohen Anteil der Variabilität diverser Beobachtungsgrößen verantwortlich. Auch die atmosphärische Variabilität über der Nordsee wird in der kühleren Jahreszeit von der NAO dominiert. Die Abhängigkeit der hydrographischen Zustandsgrößen (Strömung, Temperatur, Salzgehalt) vom atmosphärischen Antrieb zeigt sich folgerichtig im Winter in einer nachweisbaren Abhängigkeit dieser Parameter in Muster und Intensität vom Zustand der NAO. Für andere nicht-hydrographische Zustandsgrößen der Wassersphäre sind mittelbare, auch zeitverzögerte Zusammenhänge zur NAO über hydro- und thermodynamische Prozesse möglich.

Der exponentielle Anstieg von NAO-Veröffentlichungen in den vergangenen zehn oder zwanzig Jahren ging mit einer Popularisierung der Thematik einher, die kaum hinter derjenigen des El-Niño Phänomens zurücksteht. Die Aufdeckung von NAO-Zusammenhängen aller Art, unter hohem Publikationsdruck und als akademischer Volkssport, hat nicht selten übereilte Schlussfolgerungen produziert, die sich sonderbarerweise bevorzugt im *Allgemeinwissen* festsetzen, und zu einer Begriffsverwirrung beigetragen, die bereits beim Genus der NAO beginnt. *Der* NAO belegt nicht nur die grassierende Verhunzung der deutschen Sprache, sondern zeugt, falls *der* NAO-Index gemeint ist, manchmal auch von Ignoranz gegenüber der Tatsache, dass *der* – einzige oder universelle – NAO-Index nicht existiert.

Diese Umstände, vor allem aber die schon angedeutete Relevanz des Phänomens NAO für die Nordsee, rechtfertigen die hier gebotene grundlegende Darstellung, deren besonderes Anliegen, über die Präsentation relevanter aktueller Arbeitsergebnisse hinaus, in einer Verklärung von Begrifflichkeiten sowie im Aufzeigen der definitiv begrenzten Tauglichkeit der NAO als *Generalschlüssel zum Verständnis der Welt* besteht.

Der Abschnitt *Atmosphäre* beschränkt sich inhaltlich auf die NAO, obgleich sich der atmosphärische Einfluss auf die Nordsee natürlich nicht in der NAO erschöpft. Darüber hinaus gehende meteorologische Beiträge – etwa objektive Zirkulationsstatistiken, wie sie von der Climate Research Unit der University of East Anglia (CRUEA) für Großbritannien, oder vom

DWD für Deutschland erstellt werden – sind für künftige Ausgaben des Zustandsberichts geplant. Die besonderen meteorologischen Verhältnisse, die dem Hochwasser der Elbe im August vorausgingen, werden in *Abschnitt 3.6.1* behandelt. Im Übrigen wird auf den Klimastatusbericht des DWD (www.ksb.dwd.de) verwiesen, der auch einige Beiträge zum Küstenklima enthält.

2.1.1 Nordatlantische Oszillation

Die NAO ist eine atmosphärische Massenschaukel zwischen Island und den Azoren. Der NAO-Index beschreibt die Auslenkung dieses *Massependels* als Differenz standardisierter Luftdruckanomalien¹ an zwei meteorologischen Stationen in den atmosphärischen Aktionszentren – Azorenhoch und Islandtief. Ein positiver Index steht für einen anomal starken, südwärts gerichteten Druckgradienten und entsprechend anomal starke geostrophische Westwinde. Ein stark negativer Index kann eine Umpolung des Druckgradienten (Azorentief und Islandhoch) mit Ostströmung bedeuten (z.B. Winter 1963), während ein moderat negativer Index eine Abschwächung der klassischen Situation (Westströmung) beinhaltet, diese aber nicht *auf den Kopf stellt*. Ein negativer NAO-Mode im Winter ist in Westeuropa mit Kälte und Trockenheit verbunden, ein positiver NAO-Mode geht mit maritimen Wintern (warm und nass) einher (*Abb. 2-2*).

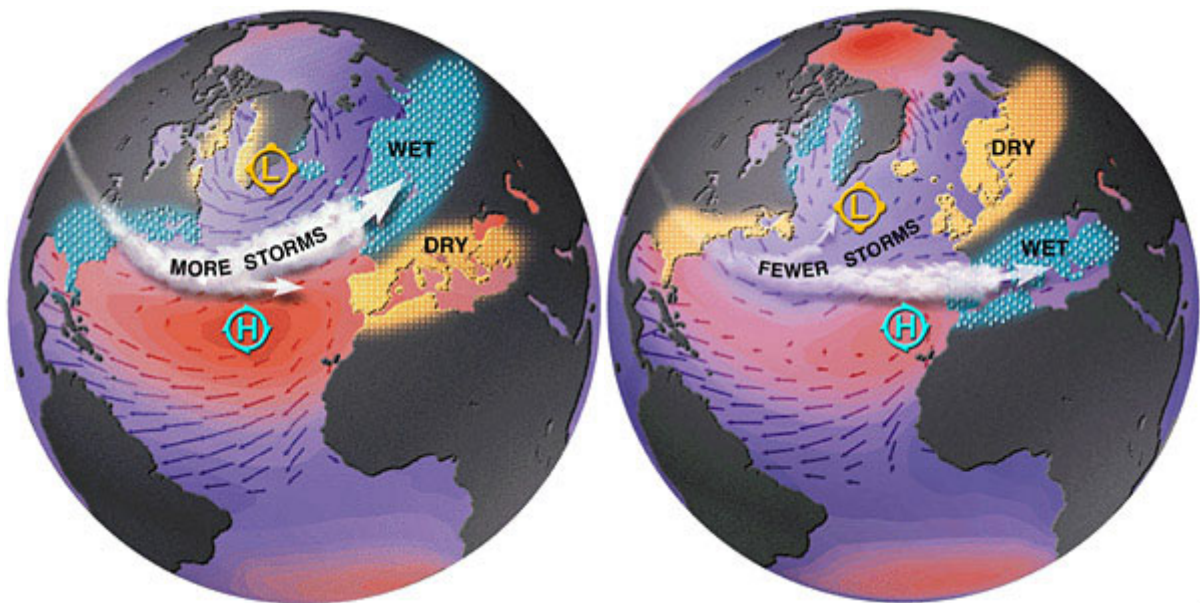


Abb. 2-2 Druck- und Windverteilung über dem Nordatlantik für positive (links) und negative NAO-Zustände im Winter. Quelle: www-avisocls.fr/html/applications/climat/nao_explication_uk.html, M. Visbeck (Lamont-Doherty Earth Observatory).

Fig. 2-2 SLP and wind distribution over the North Atlantic for positive (left) and negative NAO modes in winter. Source: www-avisocls.fr/html/applications/climat/nao_explication_uk.html, M. Visbeck (Lamont-Doherty Earth Observatory).

¹ Manche Autoren verzichten auf Standardisierung. Die standardisierte Druckanomalie ist eine auf die Standardabweichung *normierte* (nicht normalisierte!) dimensionslose Zahl, welche die Druckabweichung in Standardabweichungs-Einheiten angibt. Standardisierung irgendeiner monatlichen Druckanomalie Δp – also etwa der Abweichung eines Monatsmitteldrucks vom Langzeitmonatsmittel des Basiszeitraums 1961-1990 – bedeutet Division von Δp durch die (zwischenjährige) Standardabweichung der 30 Monatsmittelwerte im Basiszeitraum vom Langzeitmonatsmittel. Der NAO-Index ist als Differenz standardisierter Druckanomalien ebenfalls dimensionslos. Vgl. auch *Abschnitt 2.3.3*, Stichwort Perzentile.

Es gibt inzwischen eine Reihe von NAO-Indizes, die sich hinsichtlich Stationswahl, Standardisierungszeitraum (Basisperiode), Saisonlänge und demzufolge im Zahlenwert unterscheiden (vgl. *Abschnitt 2.1.2*). Für diesen Bericht wird ein NAO-Index herangezogen, der sich auf Arbeiten von Koslowski und Loewe (1994) und Loewe und Koslowski (1998) gründet. Er beschreibt die Differenz der für den Zeitraum 1961-1990 standardisierten monatlichen Druckanomalien bei Ponta Delgada (Azoren) und Akureyri (Island) im Zeitraum 1879-2003.

Der *dynamische Zustand* der NAO lässt sich durch den NAO-Index (Auslenkung x) und dessen Änderungsgeschwindigkeit (v) beschreiben und in einem sog. Phasendiagramm (v vs. x) darstellen (*Abb. 2-3*).

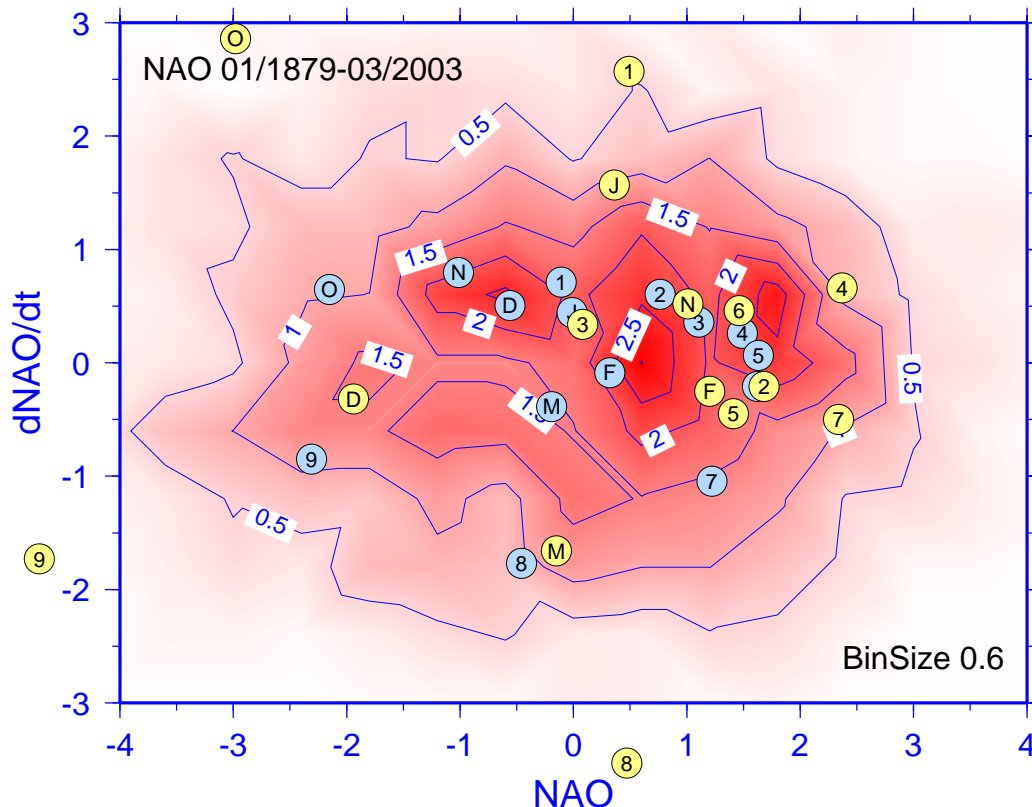


Abb. 2-3 Phasendiagramm der NAO als relative Häufigkeitsverteilung der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879. Die Konturen 0.5, 1, 1.5 und 2% sind Linien gleicher rel. Zustandsdichte (d.h. rel. Anzahl Zustände pro Klassenintervall, 0.6×0.6) und umhüllen 81, 64, 39 bzw. 17% aller Zustände. Die Sequenz der 15 gelben bzw. blauen Kreise (1,2,...,8,9,O,N,D,J,F,M) zeigt die Entwicklung der rohen (gelb) bzw. über 6 Monate tiefpassgefilterten (blau) monatlichen dynamischen NAO-Zustände im Zeitraum Januar 2002 bis März 2003.

Fig. 2-3 NAO phase portrait as percent frequency distribution of monthly dynamic NAO states since 1879. Contours 0.5, 1, 1.5 and 2% are lines of equal rel. state density (i.e. rel. # of states per square-bin, 0.6×0.6). The sequences of 15 yellow and 15 blue circles (1,2,...,8,9,O,N,D,J,F,M) show the temporal evolution from January 2002 through March 2003 of raw (yellow) and low-pass filtered (6 month, blue) monthly mean states, respectively.

Das Phasenportrait eines einfachen Harmonischen Oszillators (z.B. lineares ungedämpftes Pendel) liefert eine Ellipse. Die Dichteverteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Pendelmasse ist u-förmig, also bimodal (2 Maxima in den Umkehrpunkten ($v=0$), Minimum im Nulldurchgang ($x=0$, $v=\max$)).

Die monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879 verteilen sich deutlich komplexer über den gesamten Phasenraum. Die 0.5, 1, 1.5 und 2% Konturen umhüllen 81, 64, 39 bzw. 17% aller Zustände (Abb. 2-3). Interessanterweise treten nicht die erwarteten zwei, sondern drei (bis vier) Häufungen oder Moden¹ auf, welche an Zustandsleitern von Energieeigenwerten in quantenmechanischen Systemen erinnern. Diese Verteilungsgipfel konzentrieren sich um die Indizes 1.8, 0.6, -0.6 (und -1.8). Eine Deutung des ersten und zweiten Modes als Resultat einer Schwingung um $x=1.2$ sowie des zweiten und dritten Modes als Schwingung um das tiefere Niveau $x=0$ würde u.a. die starke Ausprägung des mittleren Modes erklären.

Wenn Zeitabschnitte wie etwa die 1960er oder 1990er Jahre als Phasen tiefer bzw. hoher NAO-Zustände bezeichnet werden, entsteht die Vorstellung einer Phasenrastung (*phase lock*) oder eines Stillstands der Oszillation. In solchen charakteristischen durch spontane Übergänge abgegrenzten Zeitabschnitten (Regimes) herrschen stattdessen offenbar Oszillationen um bevorzugte, relativ scharf unterscheidbare Niveaus vor. Diese Regimes scheinen sich in den in *Abschnitt 2.3.4* diskutierten Temperaturregimes der Nordsee abzubilden.

Ein brauchbarer Modellansatz zur Reproduktion der statistischen Eigenschaften und möglicherweise Vorhersage der NAO ist vielleicht ein modifizierter Duffing-Oszillator (Duffing 1918) mit double-u, triple-u oder sogar multi-u Potential und periodisch-stochastischem Antrieb. Das Potentialbarrieren trennen verschiedene Regimes, während stochastische Resonanz bei schwachperiodischem Antrieb spontane Regimeübergänge generieren kann. Ähnliche Oszillatoren wurden zur Erklärung von Eis- und Warmzeiten vorgeschlagen.

2.1.2 NAO 2002

Neben der relativen Häufigkeit der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879 zeigt *Abb. 2-3* (gelbe Kreise) die Zustandsentwicklung der NAO von Januar 2002 bis März 2003. Die Abfolge der ungefilterten Zustände ist scheinbar durch eine chaotische Sprunghaftigkeit gekennzeichnet, die eine höhere zeitliche Auflösung wünschenswert erscheinen lässt. Denn von Januar bis August ist eine sehr schnelle Flip-Flop-Oszillation zwischen den beiden positiven Moden – um das Indexniveau $x=1.2$ – nur mit Mühe erkennbar (vgl. deshalb *Tab. 2-1 und Abb. 2-4*). 6 der 15 Zustände entfallen auf die Attraktorregionen (rel. H. > 2%), bilden jedoch keine konsekutive Sequenz.

Erst nach Filterung des hochfrequenten Lärms wird für 2002 ein geschlossener elliptischer Zyklus sichtbar (*Abb. 2-3*, blaue Kreise). Der erste $\frac{1}{4}$ -Zyklus ist durch langsame Zustandsänderungen im Attraktorbereich gekennzeichnet. Im zweiten Halbjahr hingegen werden $\frac{3}{4}$ des Zyklus mit 3-facher Geschwindigkeit durchlaufen. Der unterbesetzten Zustandsdichte im dritten Quadranten ist zu entnehmen, dass Übergänge vom positiven zum negativen NAO Mode typischerweise deutlich abrupter vollzogen werden als umgekehrt.

Die Abszissenwerte der gelben (*Ik*) und blauen (*lpf6(Ik)*) Kreise, d.h. die Monatswerte des NAO-Index, sind in *Tab. 2-1* für das Jahr 2002 zusammengefasst und verschiedenen NAO-Indizes anderer Autoren gegenübergestellt. Die beste Übereinstimmung ($r=0.98$) besteht zwischen dem *Ik*- und dem *Hurrel*-Index, denen die gleiche südliche Station (Ponta Delgada) zugrunde liegt. Die linearen Korrelationen *Ik* versus *cruuea* ($r=0.73$) und *Ik* versus *cpccdb* ($r=0.69$) sind gleichermaßen schlecht. Im ersten Fall erklärt sich dies aus der Entfernung von ca. 2000 km zwischen den südlichen Stationen; im zweiten Fall aus dem Umstand, dass der *cpccdb*-Index nicht als Stationsindex definiert ist, sondern auf einer statistischen Analyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes basiert, in die auch die Verhältnisse im Vor- und Folgemonat einfließen. Folglich sollte den numerischen Indexwerten insgesamt keine zu hohe quantitative Bedeutung beigemessen werden.

¹ Ob mit Mode wie hier ein (relatives) Maximum in einer Häufigkeits- oder Wahrscheinlichkeitsverteilung gemeint ist, oder aber die Phase der NAO, ergibt der Zusammenhang.

NAO	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
<i>lk</i>	0.49	1.68	0.08	2.37	1.41	1.46	2.34	0.47	-4.71	-2.98	1.01	-1.94
<i>lpf6(lk)</i>	-0.11	0.76	1.11	1.49	1.63	1.62	1.22	-0.46	-2.31	-2.15	-1.02	-0.56
<i>cruuea</i>	2.31	3.01	0.09	0.91	-0.05	0.90	-0.71	-0.61	-3.58	-1.50	-0.27	-0.98
<i>hurrell</i>	0.50	1.70	0.90	2.20	1.90	1.90	1.60	0.60	-4.40	-2.00	1.30	-2.40
<i>cpccdb</i>	0.40	1.60	0.50	2.20	-0.70	0.40	0.70	0.20	-0.60	-1.40	-0.50	-1.30

Tab. 2-1 NAO-Index 2002. *lk*: Ponta Delgada & Akureyri (Loewe und Koslowski 1998), *lpf6(lk)*: tiefpassgefiltert über 6 Monate. *cruuea*: Gibraltar & Südwest Island (www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm). *hurrell*: Ponta Delgada & Stykkisholmur (www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.other.html). *cpccdb*: Amplitude des NAO-Musters aus rotierter Hauptkomponentenanalyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).

Table 2-1 NAO Index 2002. *lk*: Ponta Delgada & Akureyri (Loewe und Koslowski 1998), *lpf6(lk)*: low-pass filtered (6 month). *cruuea*: Gibraltar & Southwest Island (www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm). *hurrell*: Ponta Delgada & Stykkisholmur (www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.other.html). *cpccdb*: Amplitude of NAO pattern from rotated principal component analysis of 700 hPa height anomalies (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).

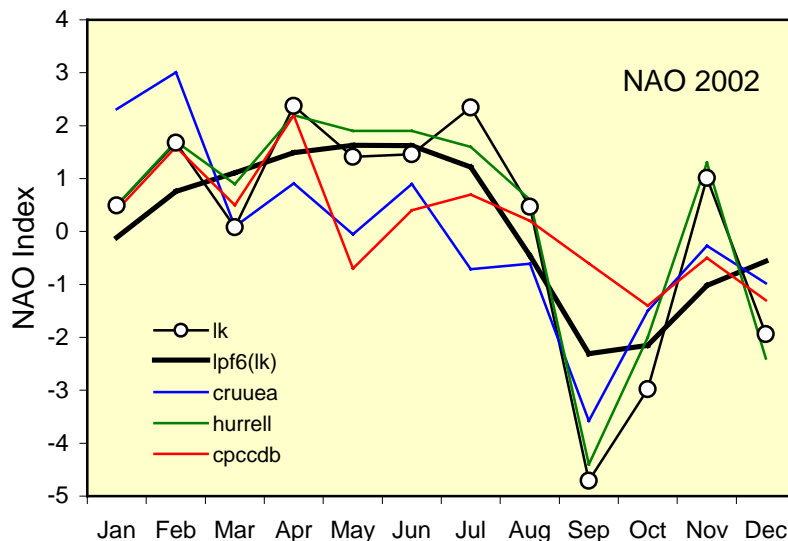


Abb. 2-4 NAO-Index 2002. Erläuterungen in Tab. 2-1.

Fig. 2-4 NAO Index 2002. Cf. Table 2-1.

Darüber hinaus sollte man sich im Klaren sein, dass die NAO zwar im Sommerhalbjahr definiert werden kann, jedoch in dieser Zeit keine herausragende Fernwirkung auf die Nordsee ausübt. Die Hintergründe dafür werden am Beispiel der 130-jährigen Helgoländer Temperaturreihe in *Abschnitt 3.2.3* diskutiert.

Aus *Abb. 2-4* ist ersichtlich, dass die qualitative Zustandsentwicklung der NAO von allen Indizes richtig wiedergegeben wird. Danach oszilliert der NAO-Index bis zur Jahresmitte auf hohem Niveau und fällt im Hochsommer schnell auf ein extremes Minimum ab. Dieser Abfall mündet in eine amplitudenverstärkte Oszillation um das 0-Niveau, die sich (mindestens) bis in den Sommer 2003 fortsetzt.

2.2 Zirkulation

Während punktuell für die Nordsee zahlreiche Datensätze von verankerten Strömungsmessern mit Registrierdauern zwischen einer Woche und drei Monaten vorliegen, ist das räumliche Zirkulationsmuster der Nordsee und dessen zeitliche Variation erst durch numerische Modellsimulationen erschlossen worden.

2.2.1 Winterzirkulation und NAO

Neuere Modellsimulationen mit beobachteten Luftdruck- bzw. Windantriebsfeldern über Zeiträume von 3-4 Dekaden zeigen große Unterschiede in der Verteilung und Stärke der mittleren Strömung, die mit entsprechenden Unterschieden in der großräumigen Luftdruckverteilung über dem Nordatlantik in Zusammenhang stehen.

Aus Modellsimulationen für den Zeitraum 1958 bis 1997 (Schrum und Siegismund 2002) sind für einen NAO-Index >2 (ausgeprägte Westwindwetterlage) und einen NAO-Index <-2 (abgeschwächte Zufuhr atlantischer Luft mit stärkerer meridionaler Komponente) die resultierenden Zirkulationsmuster der Nordsee für die Wintermonate Dezember bis März extrahiert worden (Abb. 2-5).

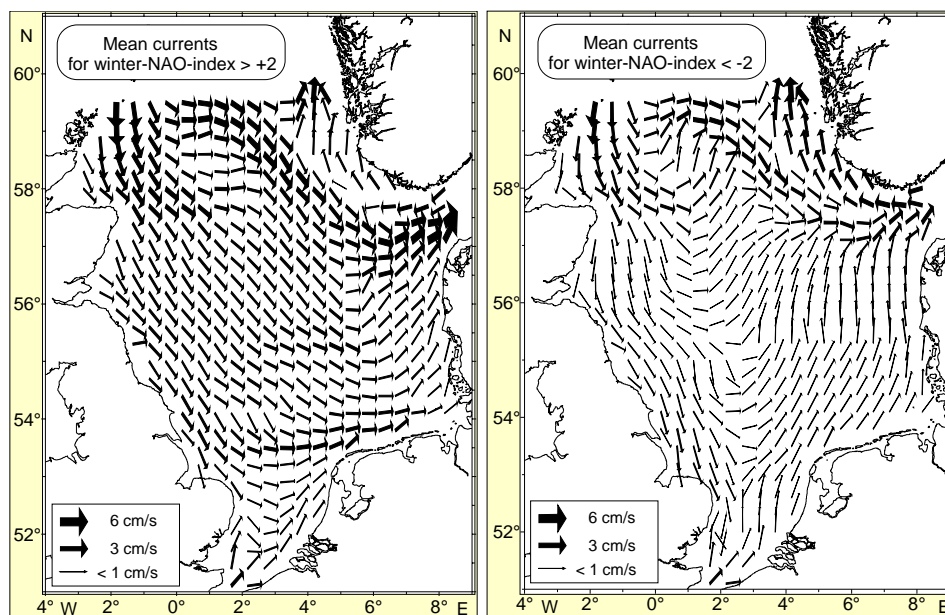


Abb. 2-5 Oberflächenzirkulation der Nordsee im Winter (Dezember bis März) bei negativem und positivem NAO-Mode (nach Schrum und Siegismund 2002).

Fig. 2-5 North Sea surface circulation in winter (December through March) for negative and positive NAO mode (after Schrum and Siegismund 2002).

Es ergeben sich deutliche Unterschiede, die folgendermaßen charakterisiert werden können:

- Bei einem niedrigen, negativen NAO-Index gibt es eine ausgeprägte Zirkulation, die sich aber auf die nördliche Nordsee beschränkt. Der Einstrom über dem Westhang der Norwegischen Rinne reicht bis an das westliche Skagerrak und geht dann re-zirkulierend in den Baltischen Ausstrom/Norwegischen Küstenstrom über.
- Bei einem hohen NAO-Index verteilt sich der nördliche atlantische Einstrom bei insge-

samt größeren Stromgeschwindigkeiten gleichförmiger über die gesamte Nordsee. Das Skagerrak ist in stärkerem Maße durch Atlantikwasser beeinflusst. Die südliche Nordsee und die Deutsche Bucht sind an den nördlichen Einstrom gekoppelt.

- Der Einstrom durch den Englischen Kanal scheint durch die unterschiedlichen NAO-Zustände nur unwesentlich beeinflusst zu sein. Allerdings konnten am offenen Modellrand zum Atlantik wegen fehlender Beobachtungen keine aktuellen Randbedingungen vorge-schrieben werden, so dass die Variabilität im atlantischen Signal unberücksichtigt blieb.

2.2.2 Saisonale Modellströmungen in 2002

Aus dem operationellen Strömungsmodell des BSH (Dick et al. 2001) wurden erstmals saisonale Felder der Oberflächenströmung berechnet und in *Abb. 2-6* als Vektormittel für die vier Quartale (JFM = Januar-Februar-März usw.) des Jahres 2002 dargestellt. Die Länge der Vektoren zeigt die Strömungsstärke als Versatz in km/Woche an; die unterlegte Farbe gibt die Beständigkeit (Stabilität) der Strömung an. Blaue Farbtöne stehen dabei für eine höchst variable Strömungsrichtung, Rottöne für eine hohe Beständigkeit der Richtung.

Die Zirkulationsmuster sind im Winterhalbjahr (JFM und OND) stark ausgeprägt und persistent. Im Sommerhalbjahr (AMJ und JAS) fällt die mittlere Strömung dagegen deutlich schwächer aus und die Beständigkeit ist gering. Eine quantitative klimatologische Bewertung ist derzeit noch nicht möglich, da die Validation von Strömungsmodellen noch am Anfang steht.

- Die ausgeprägte und persistente Stömung im Winter (JFM) entspricht weitgehend der Erwartung. Ungewöhnlich ist die vollständige Rezirkulation des Baltischen Ausstroms / Norwegischen Küstenstroms in den nördlichen Ast des Jütland-Stroms. Dadurch wird der Ausstrom über der Norwegischen Rinne erheblich reduziert.
- Die Zirkulation im Frühjahr (AMJ) zeigt südlichen, aber keinen nördlichen Einstrom. Der Baltische Ausstrom läuft nicht entlang der norwegischen Südküste, sondern konzentriert sich - scharf um Skagen drehend - im südlichen Teil des Skagerrak.
- In den Sommermonaten (JAS) ist die Strömung insgesamt schwach und variabel. Ein deutlicher Einstrom ist im Norden nicht erkennbar; Nordseewasser wird in den Engli-schen Kanal transportiert. Der Baltische Ausstrom greift weit nach Westen über ($\sim 1^\circ\text{E}$), so dass in der zentralen Nordsee niedrige Salzgehalte auftreten sollten. Diese sind je-doch so nicht beobachtet wurden (FS Gauß Reise 405).
- Für das Herbstquartal (OND) ist die starke Durchströmung der Nordsee vom Englischen Kanal kennzeichnend. Ein mittlerer Einstrom vom Nordeingang bildet sich nicht ab.

Das operationelle BSH-Modell liefert insgesamt unerwartete, den bisherigen (ungenü-genden) Kenntnissen widersprechende saisonale Strömungsmuster. Auch ein qualitativer Vergleich mit den von Schrum und Siegismund (2002) vorgelegten klimatologischen Strö-mungskarten aus einer 40-jährigen Modellsimulation ergibt deutliche Unterschiede. In wel-chem Umfang diese Unterschiede auf Anomalien im atmosphärischen Antrieb in 2002 oder/und Modelldefekte zurückzuführen sind, kann gegenwärtig nicht entschieden werden. Mit der vorstehenden adhoc-Analyse wird deshalb die wissenschaftliche Diskussion über die Qualität numerischer Modelle stimuliert und erneut die Frage nach einer Validation gestellt.

Eine konsistente Klimatologie des BSH-Modells könnte eine Bewertungsbasis liefern, er-scheint aber aufgrund der andauernden Modellentwicklung sowie aufgrund des hohen Re-

chenaufwands für eine Re-Analyse gegenwärtig nicht praktikabel. Alternativ bietet sich an, die Ergebnisse verschiedener Nordseemodelle unter möglichst identischen Antriebsbedingungen zu vergleichen (model intercomparison, e.g. Smith et al. 1996), um so Schwachstellen in der Formulierung und Parametrisierung physikalischer Prozesse aufzudecken. Identifikation, Quantifizierung oder auch nur Kenntnis solcher Modelldefekte sind nicht nur relevant für eine profunde Zustandsbewertung auf Modellbasis; die Weiterentwicklung des Modells sollte auf die Behebung so identifizierter Defizite fokussieren.

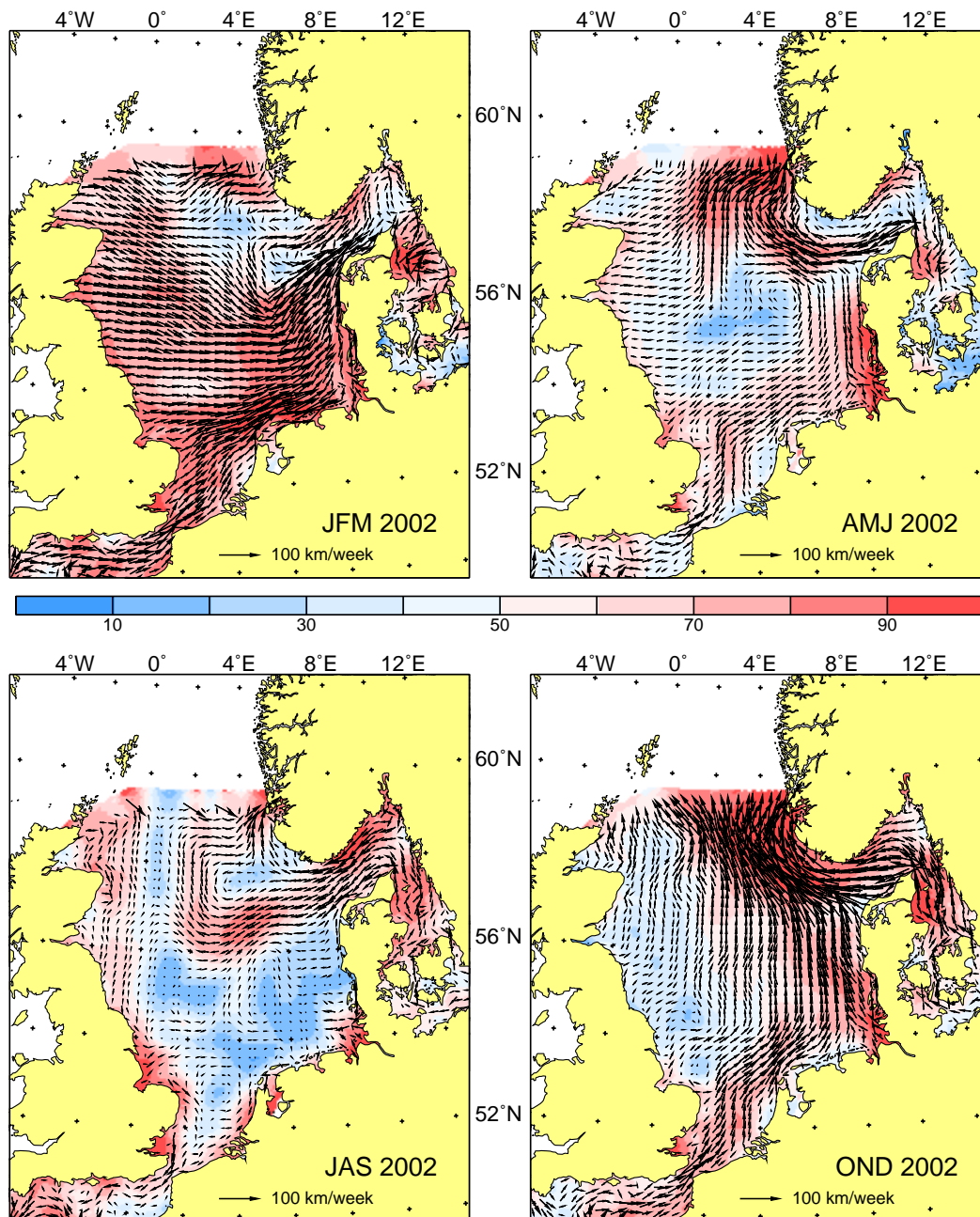


Abb. 2-6 Saisonale Oberflächenzirkulation in 2002 (JFM = Januar-Februar-März, AMJ ...). Die Vektormittel wurden aus wöchentlichen Strömungsfeldern des BSH-Modells berechnet. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.

Fig. 2-6 Seasonal surface circulation in 2002 (JFM = January-February-March, AMJ ...). Vector means from weekly currents fields (BSH-Model). Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

2.3 Oberflächentemperatur (SST)

Die Oberflächentemperaturen der Nordsee werden im BSH seit September 1968 wöchentlich analysiert. Inzwischen umfasst das Archiv etwa 1800 digitale Temperaturfelder, die auf einem flächentreuen 20 sm-Gitter vorliegen. Der Datensatz dokumentiert nicht nur die raumzeitliche Entwicklung eines Schlüsselparameters des physikalischen Meereszustands in den vergangenen 35 Jahren; als Integrator des meteorologischen Antriebs lässt sich die Meeresoberflächentemperatur auch zur Feststellung von Klimaänderungen in der Nordsee-Region nutzen. Konsistenz und Umfang des Datenmaterials erlauben darüber weit hinaus gehende statistische Untersuchungen und belastbare Aussagen.

2.3.1 Analyse-Technik

Die operationelle SST-Analyse am BSH besteht seit 1994 aus drei sequentiellen Schritten:

- Qualitätskontrolle und Gitterung von In-situ-Beobachtungen (Schiffe, Bojen).
- Objektive statistische Schätzung des In-situ-Temperaturfeldes (In-situ-Analyse).
- Mischung von In-situ- und Satellitenanalyse in beobachtungsarmen Seegebieten.

Die Analyse wird auf einem flächentreuen Lambertgitter mit horizontaler Auflösung 20 km durchgeführt. Gitterung (*bucketing*) und Mittelung (*composite*) aller über die Woche gemeldeten Temperaturen (*GTS*) führt zu einer Flächendeckung von nur 10-20%, die sich jedoch durch Einsatz eines exakten statistischen Interpolators – *Kriging* – auf 60-80% steigern lässt.

Wie bei der inverse-distance Interpolation sind die statistischen Schätzwerte gewichtete Linearkombinationen der Nachbardaten. Die Gewichte sind jedoch nicht einfach Funktionen der Entfernung, sondern werden aus Kovarianzbeziehungen zwischen den Daten in einer Weise bestimmt, die den Schätzfehler (*kriging variance*) minimiert. Diese Eigenschaft sowie die Tatsache, dass der mittlere Fehler verschwindet, macht Kriging zum BLUE-Schätzer (*best linear unbiased estimator*). Der Schätzfehler wird zur Beurteilung der Qualität der Schätzwerte und ggf. zur Eliminierung unbrauchbarer Schätzungen verwendet.

Zur Schließung verbliebener Lücken im In-situ-Temperaturfeld (*master field*) werden Temperaturdaten der NOAA-AVHRR Satelliten (*slave field*) über eine Mischtechnik eingebunden (Reynolds 1988). Die Technik beruht auf der *Ausbeutung* der Satellitenanalyse zur Lösung der Poisson-Gleichung, $\text{divgrad SST}_{\text{insitu}} = Q$, in den Lückengebieten. Nachdem der Quellterm Q aus der Satellitenanalyse substituiert wurde ($Q = \text{divgrad SST}_{\text{sat}}$), ergibt sich diese einfach durch sukzessive Überrelaxation unter Dirichlet-Randbedingungen. Die resultierende Mischanalyse (*blended analysis*) unterscheidet sich von der In-situ-Analyse nur in solchen Gebieten, in denen keine zuverlässigen statistischen Schätzwerte berechnet werden können.

Die aktuelle Ausgabe der *North Sea SST Blended Analysis* wird Mittwochs unter www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Meeresoberflaechentemperatur/index.jsp veröffentlicht.

2.3.2 Jahresgang 2002

Mit einer Mitteltemperatur von 11.0 °C war 2002 das wärmste Jahr seit Beginn der Analysen in 1968.

Der Jahresgang der über das gesamte Seegebiet gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperatur ist in *Abb. 2-7* dargestellt. Die saisonale Entwicklung der Temperatur vollzog sich praktisch ganzjährig, jedoch insbesondere im Spätsommer und Herbst, im Bereich der oberen Umhüllenden des Ensembles von inzwischen 35 Jahresgängen.

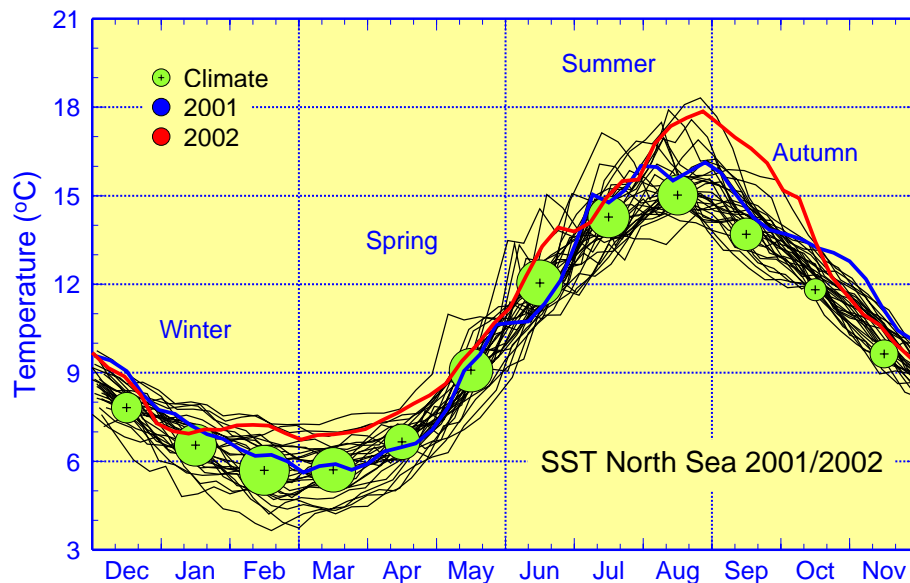


Abb. 2-7 Jahresgang der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen in 2002 mit Ensemble der Jahresgänge seit 1968 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971-1993) und zwischenjährigen Standardabweichungen (Kreisradius).

Fig. 2-7 Seasonal cycle of areal mean weekly SST of the North Sea from December 2001 through November 2002 and ensemble of corresponding cycles since 1968. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation.

Im September erreichte die Mitteltemperatur eine Rekordhöhe von 16.2 °C, während die Monate April, August und Oktober die zweitwärmsten nach 1990, 1997 bzw. 2001 waren.

Aus den geographischen Verteilungen der monatlichen Anomalien in *Abb. 2-8* ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperaturen nicht nur ganzjährig, sondern auch nahezu im gesamten Seegebiet über der Klimanorm lagen. Die räumlich gemittelten Anomalien waren in den Monaten Februar-März-April sowie August-September-Oktober signifikant zu warm (d.h. überschritten das 95% Perzentil). Die Abweichungen der Temperaturentwicklung vom klimatologischen Jahresgang sind wesentlich bedingt durch entsprechende Anomalien der großräumigen atmosphärischen Zirkulation. Insbesondere konnte ein starker Zusammenhang zwischen den räumlichen Temperaturverteilungen – außerhalb der Einstromgebiete – im Zeitraum Januar bis April und erneut im September (lag-Korrelation) und der Nordatlantischen Oszillation im Winter aufgezeigt werden (Loewe 1996). Das Verschwinden der Korrelationen in den Einstromgebieten macht deutlich, dass die NAO-bedingten Anteile der Temperaturanomalien in der Nordsee direkt aus entsprechenden Schwankungen im lokalen Wärmeaustausch mit der Atmosphäre resultieren und nicht aus Schwankungen im Einstrom von Atlantikwasser hervorgehen.

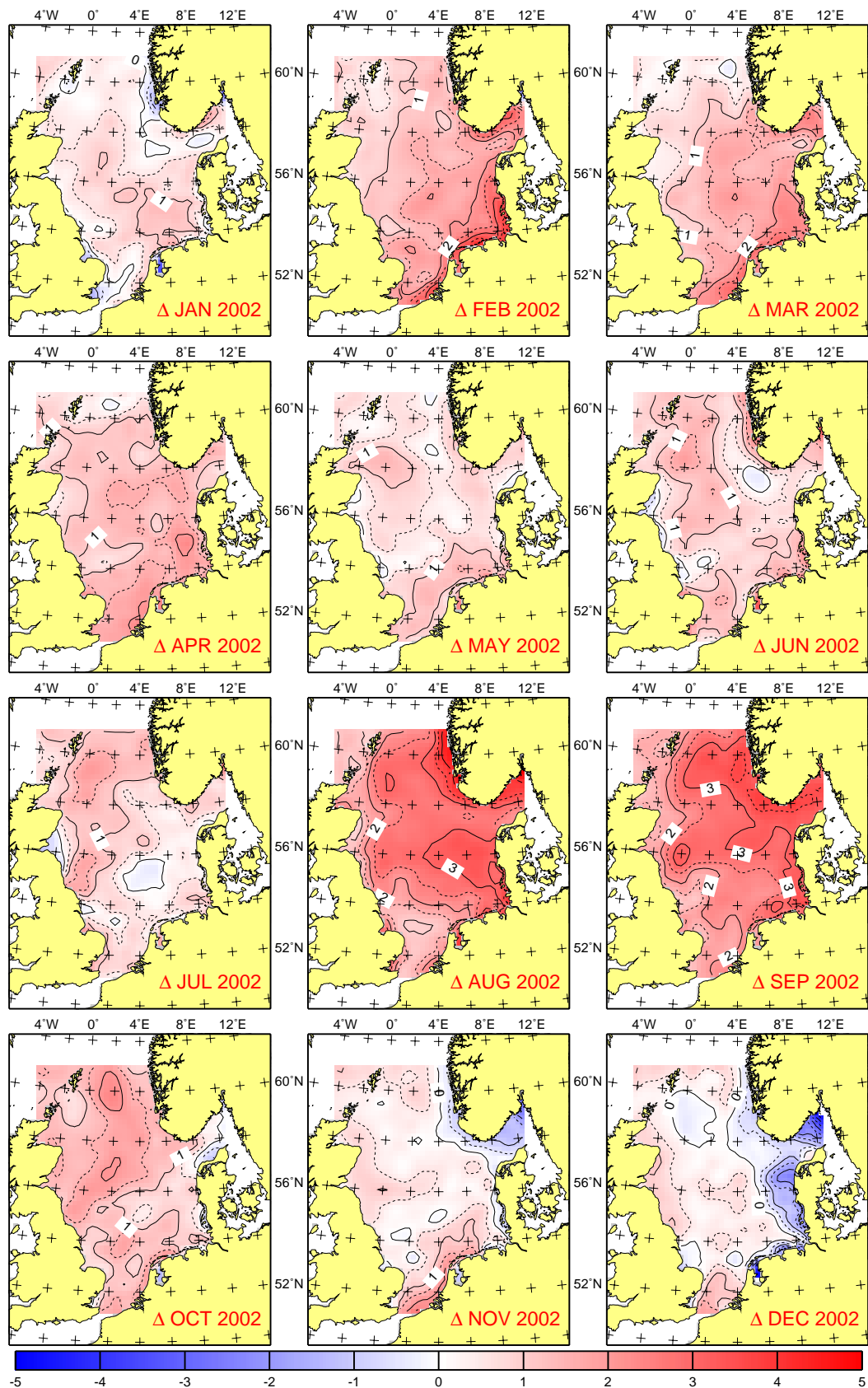


Abb. 2-8 Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee in 2002 als Abweichungen von der 1971-1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K.

Fig. 2-8 Monthly SST anomalies in 2002 as departures from 1971-1993 climatology. Contour interval is 0.5 K.

Die extreme Warmanomalie der Oberflächentemperaturen im August stand in ursächlichem Zusammenhang mit blockierendem Hochdruck über Fennoskandien und der Umlenkung nordatlantischer Tiefdruckstörungen nach Südeuropa. Das saisonale Temperaturmaximum trat dadurch erst Ende August ein, also drei Wochen später als normal. Der anschließende saisonale Temperaturrückgang verlief bis Oktober infolge des jetzt stark negativen NAO-Index erheblich verlangsamt. Die ausbleibenden Herbststürme waren wesentliche Ursache für die Persistenz der Warmanomalie mit Extremtemperaturen im September und Oktober und für die Verschiebung des Zusammenbruchs der Temperaturschichtung auf den Spätherbst.

2.3.3 Temperaturentwicklung seit 1968 und NAO

Die grundsätzliche Entwicklung der Oberflächentemperatur der Nordsee in den vergangenen 35 Jahren ist aus *Abb. 2-9* ersichtlich, in der die räumlich gemittelten Monatstemperaturen mit Abweichungen von der Klimabasisperiode 1971-1993 und zugehörigen Perzentilen dem NAO-Index (Loewe und Koslowski 1998) in einer Pseudo-2D-Darstellung gegenübergestellt sind. Zur Unterstreichung der Besonderheiten wurden alle Zeitserien einer 1-D Tiefpassfilterung unterzogen.

Die Perzentile beruhen auf der Z-Statistik standardisierter Anomalien (Standardeinheiten) und ermöglichen eine objektive Bewertung anomaler Temperaturzustände (in K). Jede Realisierung z definiert eine Ordinate, welche die Fläche (=1) unter der Standardnormalverteilung unterteilt. Das zugehörige Perzentil p gibt den relativen Flächenanteil links von z an und indiziert so die Eintrittswahrscheinlichkeit oder Signifikanz des Ereignisses. Ein p -Wert $< 1\%$ bzw. $> 99\%$ identifiziert demnach ein seltenes und extremes Kalt- bzw. Warmereignis, das nur 1-mal in 100 Jahren erwartet wird.

Außergewöhnliche Anomalien traten *Abb. 2-9* zufolge in den Wintern der Jahre 1970, 1979, 1985-87, 1989-90 und 1996 auf. Die Kaltanomalien unterlagen einem quasi-periodischen Rhythmus von 8 Jahren, der sich durch eine entsprechende zyklische Komponente des Winter NAO-Index plausibel erklären lässt (Loewe und Koslowski 1998). Interessant ist, dass der positive Mode der NAO keine signifikante Spuren in der Temperaturgeschichte hinterließ. Das Warmereignis von 1989-90 bildet die einzige Ausnahme und steht am Anfang einer bis heute andauernden Warmphase, die in 2002 ihren vorläufigen Höhepunkt erreichte.

Ein weiteres auffälliges Merkmal der historischen Temperaturentwicklung sind signifikante Warmanomalien in den Herbstmonaten seit 1995. Diese unterliegen einer quasi-biennialen Wiederholungstendenz (1995, 1997, 1999, 2002), die vielleicht in mittelbarem Zusammenhang mit der quasi-biennialen Oszillation (QBO) der stratosphärischen Winde in den Tropen steht (Loewe und Koslowski 1998). Tatsache ist, dass die NAO auch eine signifikante quasi-periodische Komponente von 2.3 Jahren enthält, die offenbar an Variationen des Azorenhochs gebunden ist. Voraussetzung für die Herbstanomalien waren überdurchschnittliche Erwärmungen im Hochsommer, zu denen es entweder durch blockierende Hochdrucklagen über Skandinavien (2002) oder durch die Ausbildung einer Hochdruckbrücke zwischen Azoren und Nordosteuropa kam. Dass die Anomalien erst im Herbst und nicht bereits im Hochsommer als signifikant zu warm in Erscheinung traten, erklärt sich aus dem Umstand, dass die zwischenjährige Variabilität der Temperaturen im Herbst sehr gering, im Sommer hingegen recht groß ausfällt (vgl. *Abb. 2-7*). Die Langlebigkeit der Herbstanomalien resultierte hingegen aus dem verspäteten Einsetzen der Herbststürme infolge negativer NAO-Zustände (*Abb. 2-9*). In dieser Jahreszeit und unter den geschilderten Umständen besteht demnach eine inverse Korrelation zwischen NAO und Temperatur.

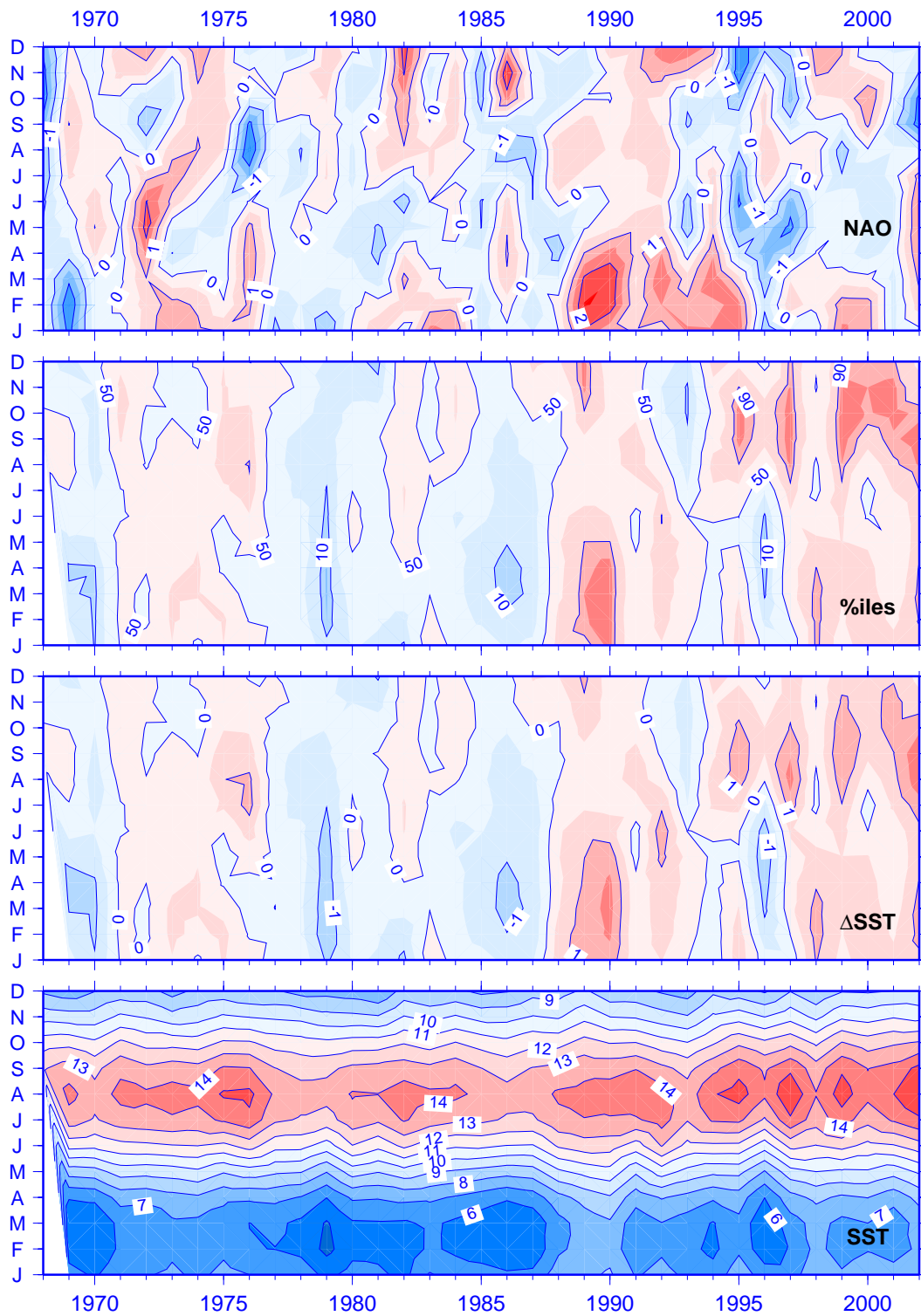


Abb. 2-9 Monatsmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee ($^{\circ}$ C) mit Anomalien (K) und Perzentilen (%) und NAO-Index (Loewe und Koslowski 1998). Tiefpassfilterbreite 6 Monate. Farbstufen für Perzentile: 1,5,10,25,50,75,90,95,99%.

Fig. 2-9 Monthly mean North Sea SST ($^{\circ}$ C) with anomalies (K) and percentiles (%), and NAO-Index (Loewe and Koslowski 1998). Low-pass filter width 6 month. Color-steps for percentiles: 1,5,10,25,50,75,90,95,99%.

2.3.4 Temperaturregimes

Die zwölf monatlichen Warmanomalien in 2002 sind Teil der bislang längsten ununterbrochenen Folge (Run) positiver Abweichungen von den Klimanormalwerten (Basis Periode 1971-1993). Dieser Run begann im Juli 2001 und dauert immer noch an (Oktober 2003). Seit 1988 waren 75%, seit 1997 sogar 88% aller Monate wärmer als normal. Das gleiche Phänomen wurde von Ullrich (2002) für die Bodenlufttemperaturen des DWD-Stationsnetzes festgestellt.

Dieser Sachverhalt scheint darauf hinzuweisen, dass die gegenwärtig für die Berechnung der Anomalien benutzte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (Gauß) für den Zeitraum 1971-1993 nicht mehr adäquat ist. Oder anders ausgedrückt, dass die Verteilung instationär ist und sich Mittelwert oder sogar Form der Verteilung verändert haben. Das klimatologische Jahresmittel (1971-1993) von 9.9 °C unterscheidet sich jedoch statistisch nicht vom Jahresmittel für die gegenwärtige Klimanormalperiode 1971-2000 (10.0 °C).

Einen tieferen Einblick in die Problematik bietet *Abb. 2-10*, welche eine Rangstatistik der Jahresmitteltemperaturen der Nordsee seit 1971 zeigt, die sich aus der Sortierung dieser Temperaturen nach fallendem Wert ergibt. Das bislang wärmste Jahr, nämlich 2002, erhält also Rang 1. Für die weitere Betrachtung wird der 32-jährige Zeitraum in zwei gleichlange Abschnitte unterteilt, die Rangskala halbiert und Ränge unterhalb/oberhalb des Medians als kalte/warme (blau/rot) Jahre aufgefasst.

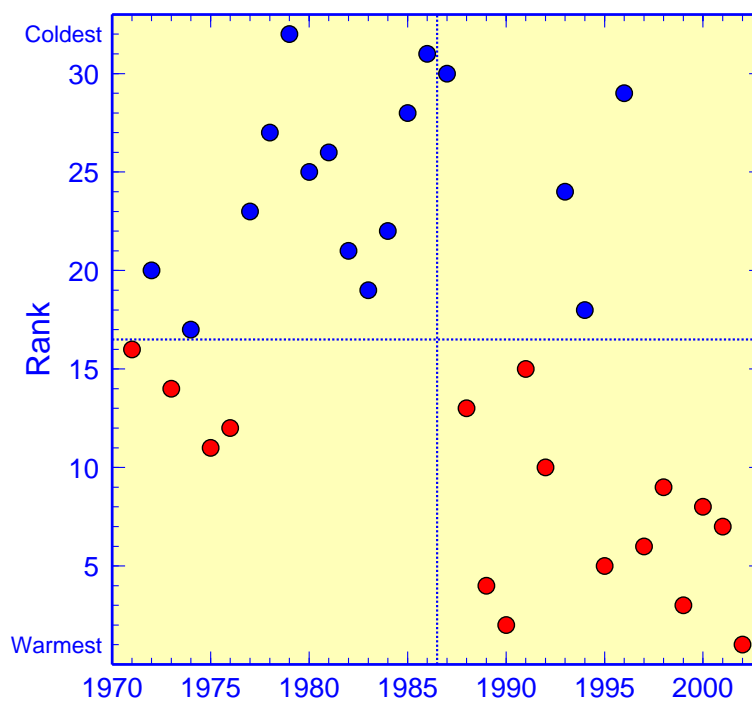


Abb. 2-10 Rangstatistik der Jahresmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee.

Fig. 2-10 Ranked annual mean North Sea SST.

Eine zufällige Entwicklung der Oberflächentemperatur seit 1971 sollte intuitiv in einer Gleichverteilung der Ränge über die so entstanden 4 Quadranten resultieren (d.h. 8 Ränge je Quadrant). Ein geeigneter Zufallsgenerator wäre eine *Lottofee*, die 1971 beginnend, für jedes Jahr blind eine Kugel aus einer Urne mit 16 blauen und 16 roten Kugeln zieht, bis diese leer ist. Da hier nur an der Anzahl roter und blauer Kugeln in den 4 Quadranten gelegen sein soll, genügt es aus Symmetriegründen 16 Kugeln gleichzeitig für den ersten

Zeitabschnitt zu ziehen. Der beschriebene Zufallsprozess hat eine hypergeometrische Wahrscheinlichkeitsmassenverteilung mit Mittelwert 8 (d.h. 8 rote und 8 blaue Kugeln ist das wahrscheinlichste Ergebnis der Ziehung) und Varianz 2.06.

Die tatsächliche Verteilung der *Kugeln* in *Abb. 2-10* weicht hiervon signifikant ab. Die sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit von lediglich 0.6% ist ein starker Beleg für die Überzufälligkeit (*Nichtzufälligkeit*) des Ergebnisses 12 warme und 4 kalte Jahre im Zeitraum 1987-2002. (Die *Lottotfee* hat offenbar nicht blind gezogen, sondern hat Launen oder Vorlieben und gemogelt.) Entsprechende monatliche Rang-Statistiken liefern für Februar, März, und April das gleiche Ergebnis wie für die Jahresmitteltemperaturen. Für die Monate September bis Januar (ohne Dezember) und Mai entfallen jeweils 11 der 16 Realisierungen auf den roten Bereich der Rangskala. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von mindestens 11 roten Rängen beträgt 4%.

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, dass der gegenwärtigen Warmphase eine davon deutlich unterscheidbare Kaltphase vorausging. Im Beobachtungszeitraum lassen sich bei differenzierterer Betrachtung drei solcher Phasen feststellen, nämlich 1971-1976 (Mittel: 10.1 °C), 1978-1987 (9.5 °C) und 1989-2001 (10.3 °C). Diese Phasen sind interessanterweise erstens durch sehr schroffe Übergänge voneinander getrennt und zweitens praktisch trendfrei. Insofern spiegelt ein linearer Trend von 0.9 °C über den Gesamtzeit von 35 Jahren eine graduelle Erwärmung vor, die so nicht stattgefunden hat. Anwendung des T-Tests ergibt mit Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%, dass die Temperaturen der Kaltphase einer anderen Grundgesamtheit entstammen als diejenigen der Warmphasen. Mit anderen Worten: signifikante Verschiebungen des Mittelwerts (Klammerwerte) sind mit Phasensprüngen um 1977 und 1988 assoziiert. Während die Warm- oder Kaltphasen selbst mit längeren Präferenzen der NAO für Schwingungen um positive bzw. negative Niveaus einherzugehen scheinen (vgl. *Abschnitt 2.1.1*), könnten die Phasenübergänge mit spontanen Änderungen solcher *Vorlieben* in Verbindung stehen (vgl. dazu *Abb. 2-9*). Interessanterweise trat der die Kaltperiode einleitende Phasensprung um 1977 zeitgleich mit der Annäherung der *Great Salinity Anomaly* (Dickson et al. 1988) an den europäischen Kontinent auf.

Um dem Regime-Charakter der Temperaturentwicklung Rechnung zu tragen (und damit eine Überbewertung der gegenwärtigen hohen Temperaturen zu vermeiden), erscheint eine Bewertung der Anomalien auf Basis einer gemischten (mindestens bimodalen) Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung angezeigt, die aus den quasistationären Temperaturregimes abzuleiten wäre. Bei der geplanten Umstellung der Klimatologie auf den Zeitraum 1971-2000 werden diese Überlegungen Berücksichtigung finden.

Die Helgoländer Reihe dokumentiert die Temperaturentwicklung in der südöstlichen Nordsee über 130 Jahre (vgl. *Abschnitt 3.2.2*). Sie kann als Proxy für die mittlere Oberflächentemperatur der Nordsee vor 1968 herangezogen werden, denn die Ähnlichkeit beider Zeitreihen im gemeinsamen Zeitbereich ist eklatant (*Abb. 2-11*). Die jüngste Warmphase, die 1989 einsetzte, ist demnach die längste und intensivste seit Beginn der Beobachtungen.

Die Temperaturentwicklung zwischen 1920 und 1940 zeigt einen qualitativ ähnlichen Verlauf wie diejenige seit Ende der 1970er Jahre. Über die Frage, ob demnächst (wie in den Kriegsjahren) ein Übergang in eine neue Kaltphase stattfinden wird, lässt sich nur spekulieren. Dafür sprechen die jetzt schon ungewöhnliche Länge der gegenwärtigen Warmphase, Anzeichen für eine zunehmende Präferenz der NAO für ihren negativen Mode, sowie der seit der Nachkriegszeit aktive quasi-periodische Zyklus von 8 Jahren, der sein letztes Minimum 1996 erreichte. Andererseits ist es denkbar, dass ein nachhaltiger Regimeübergang von kritischen Parametern abhängt, die im gegenwärtigen Klima nicht mehr dauerhaft erreicht bzw. unter- oder überschritten werden können. Ein triviales Analogon ist der an die Meerwassergefrieretemperatur gebundene Phasenübergang Eis-Wasser, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit in der südlichen Ostsee in einem Global-Warming Szenarium drastisch reduziert sein dürfte.

Abschließend sei bemerkt, dass die gegenwärtige Warmphase keineswegs eine nur lokale oder regionale Anomalie darstellt. Das gleiche Phänomen zeigt sich u.a. in den Bodenlufttemperaturen des Stationsnetzes des DWD (Ullrich 2002), der seit 1989 verringerten Eisbedeckung der Arktis (www.bsh.de/aktdat/mk/ICE/M54/ICE_monthly_d.html) und sogar in den seriellen Anomalien der globalen Oberflächentemperatur für den Zeitraum 1961-2001 (vgl. Fig. 6 in Waple et al. 2002). Dies ist nicht allzu verwunderlich eingedenk der Tatsache, dass die *Nordatlantische Oszillation* und die räumlich weiter gefassten Begriffe *Arktische Oszillation* (AO) und *Nordhemisphärischer Ring-Modus* (*Northern Annular Mode*, NAM), wenn sie nicht im Kern das gleiche dynamische Phänomen beschreiben, mindestens nahe Verwandte sind.

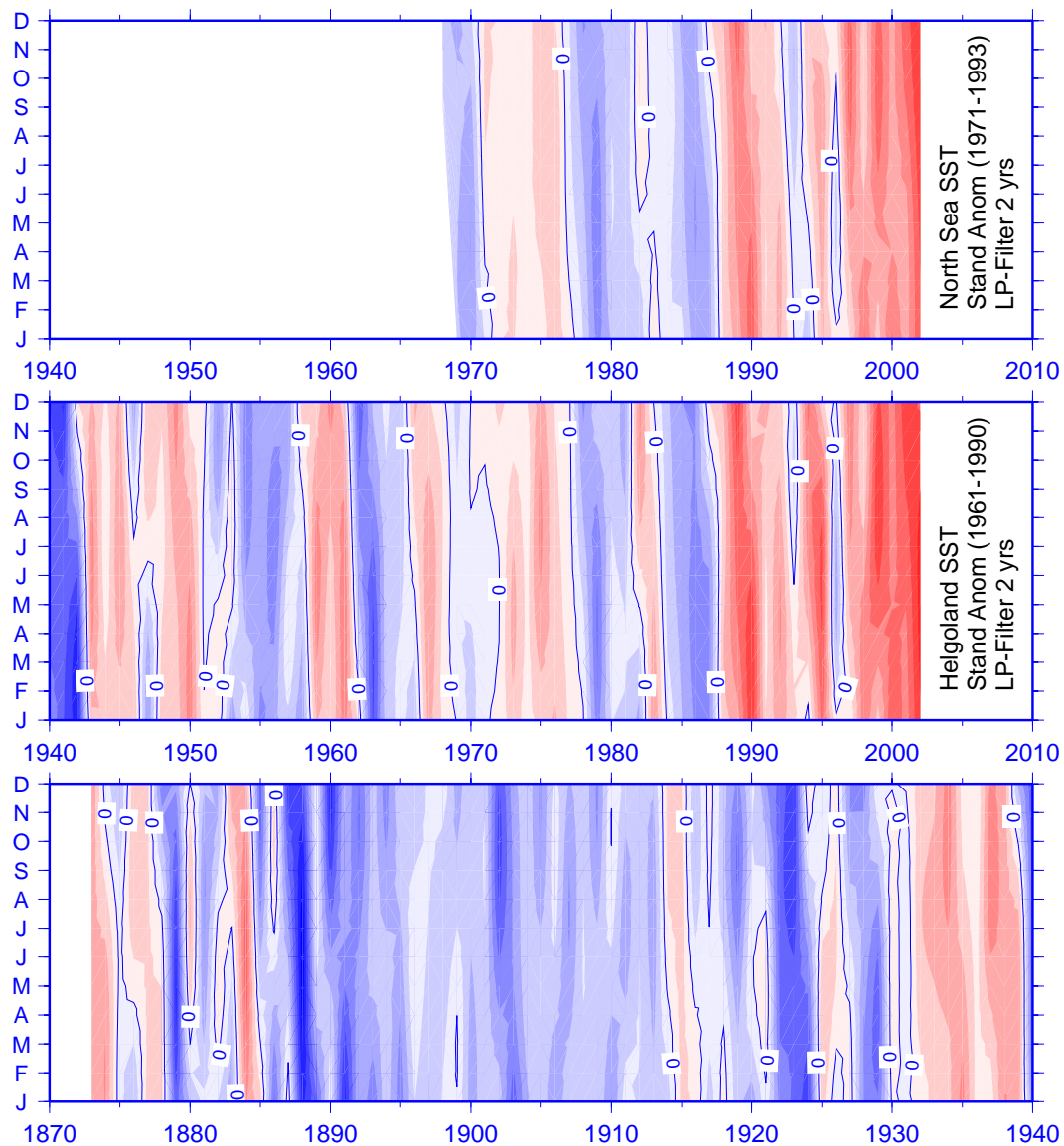


Abb. 2-11 Temperaturregimes: Nordsee (oben) und Helgoland (unten und Mitte). Standardisierte Anomalien, Tiefpassfilterbreite: 2 Jahre, Konturintervall: 0.25 Standardabweichungen.

Fig. 2-11 SST regimes: North Sea (top) and Helgoland (bottom and middle). Standardized anomalies, low-pass filter width: 2 years, contour interval: 0.25 standard deviations.

2.4 Oberflächensalzgehalt (SSS)

Der Salzgehalt der Nordsee hängt einerseits vom Einstrom atlantischen Wassers mit Salzgehalten über 35 und andererseits von den Süßwassereinträgen der Flüsse ab. Der nordöstliche Teil der Nordsee im Bereich des Skagerraks und der Norwegischen Rinne wird in der Oberflächenschicht durch den niedrigen Salzgehalt des Baltischen Ausstroms geprägt.

In einer Untersuchung des Einflusses der NAO auf die Salzgehaltsverteilung in der Nordsee (Janssen 2002) wird gezeigt, dass der Flächenanteil des atlantischen Wassers in der Nordsee in starkem Maße – und mit einer Zeitverzögerung von einem Jahr – vom Winter NAO-Index abhängt (hier: Mittel über die Monate Dezember bis März). Ein hoher Winter NAO-Index hat eine verstärkte Zirkulation und einen stärkeren Einstrom atlantischen Wassers in die Nordsee zur Folge.

Für die Beschreibung des Oberflächensalzgehaltes liegen zwei Datensätze aus dem Winter sowie ein Datensatz aus dem Juli 2002 vor (Abb. 2-12).

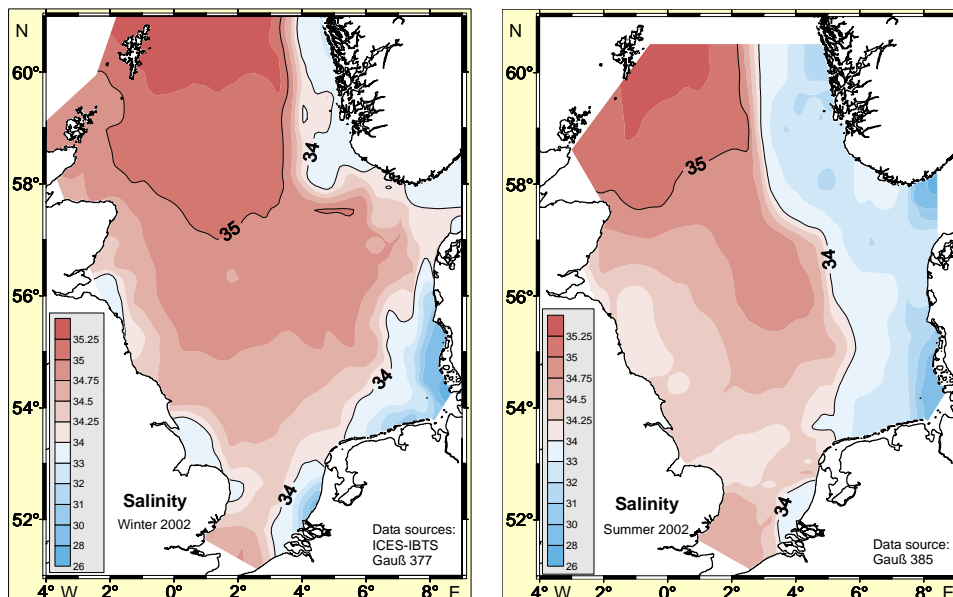


Abb. 2-12 Oberflächensalzgehalt der Nordsee im Winter (links, ICES International Bottom Trawl Survey, 18. Januar bis 28. Februar, und FS Gauß, Reise 377, 14. bis 23. Januar) und Sommer 2002 (FS Gauß, Reise 385, 16. bis 31. Juli).

Fig. 2-12 North Sea surface salinity in winter (left, ICES IBTS, January 18 through February 28, and RV Gauß, Cruise 377, January 14-23) and summer 2002 (RV Gauß, Cruise 385, July 16-31).

Sommer- und Winteraufnahme dokumentieren gleichermaßen, dass der atlantische Einfluss im Norden der Nordsee nach einer Stagnationsperiode wieder zunimmt (vgl. die seriellen Salzgehaltsanomalien im Faroe Shetland Channel, ICES 2003). Die Ausdehnung der 35-Isohaline in der nördlichen bis an die zentrale Nordsee zeigt den direkten Einstrom von Atlantikwasser. Es treten in der Nordsee maximale Salzgehalte von etwa 35.2 auf. Auffällig ist, dass der zwischen den Orkneys und den Shetland-Inseln beobachtete Fair-Isle Strom nur schwach ausgeprägt ist und der Einstrom östlich der Shetland Inseln verläuft. Dies bestätigen auch schottische Daten (ICES 2003), die im Fair-Isle Strom gewonnen wurden. Dort normalisieren sich nach einem relativen Minimum im Jahr 2001 die Salzgehaltswerte wieder. Norwegische Daten (ICES 2003) zeigen über dem westlichen Abhang der Norwegischen Rinne dagegen bereits wieder Salzgehalte über dem langjährigen Mittel (> 35.2).

Weder bei der Winteraufnahme noch bei der Sommeraufnahme treten in der südlichen Bucht zwischen Themse- und Rheinmündung Salzgehalte über 35 auf. Der Einstrom durch den Englischen Kanal scheint daher nur gering zu sein. Dies wird bestätigt durch englische Daten, die auf der 52° N Felix-Rotterdam-Route gewonnen wurden (ICES 2003).

Die Salzgehaltsverteilung in der Deutschen Bucht im Winter spiegelt die erhöhte Süßwasserzufuhr im Februar wider ($S < 30$), die sich allerdings noch auf die innere Deutsche Bucht beschränkt. Bei der Sommeraufnahme, die noch vor dem Elbehochwasser entstand, haben sich die erhöhten Süßwassereinträge durch die kontinentalen Flüsse und durch den Ausstrom der Ostsee auf nahezu die gesamte östliche Hälfte der Nordsee ausgebreitet.

2.5 T/S/O₂ Vertikalschnitte

Die Abb. 2-13 bis Abb. 2-15 zeigen die vertikalen Temperatur-, Salzgehalts- und Sauerstoff-Verteilungen auf sechs West-Ost-Schnitten, wie sie mit dem Schleppsystem *Delphin* während der Gauß-Reise 385 (16. bis 31. Juli 2002) gemessen wurden.

Die Lage der Schnitte ist aus der Weiserkarte oben rechts in den Abbildungen ersichtlich. Für die Darstellung wurden die Messdaten vertikal auf 1 dbar Stufen reduziert. Der horizontale Abstand zwischen zwei Messwerten beträgt in Abhängigkeit von der Tauchtiefe maximal 700 m, so dass beispielsweise der Schnitt entlang 58° N mit etwa 95.000 Daten belegt ist.

Die Deckschicht mit höchsten Temperaturen von ca. 17.5 °C vor Jütland (56° N) wird durch die deutlich erkennbare Temperatursprungschicht von der Bodenschicht getrennt, deren Temperaturminimum bei 7 °C nördlich der Doggerbank in der zentralen Nordsee liegt. Der starke Temperaturgradient in 20 bis 40 m Tiefe ist für die Nordsee in den Sommermonaten typisch und verhindert den Transport von Wärme und Sauerstoff aus der warmen Deckschicht in die 5 bis 8 °C kältere Bodenschicht. Umgekehrt wird der Transport von Nährstoffen aus der Bodenwasserschicht in die Deckschicht durch die Sprungschicht in gleicher Weise blockiert. Die Sprungschicht ist mit nur 5 m Dicke am markantesten in der zentralen Nordsee (57° N) ausgeprägt.

Der Schnitt entlang 55° N führt über die Doggerbank und schneidet westlich der Doggerbank den sogenannten *cold water pool* an. Selbst auf der flachen Doggerbank ist im westlichen Teil eine schwache Temperaturschichtung erkennbar. Östlich der Doggerbank zeigt sich ebenfalls eine ausgeprägte Temperaturschichtung mit einer nur dünnen Bodenwasserschicht, deren geringes Volumen bei dem bakteriellen Abbau organischer Substanz zu einer schnelleren Zehrung des gelösten Sauerstoffs führt.

In der Norwegischen Rinne (Ostabschnitte der Profile entlang 58° N, 59° N und 60° N) wird durch den niedrigen Salzgehalt des Baltischen Ausstroms ein Salzgehaltsgradient zum tiefer liegenden Atlantischen Wasser erzeugt, der zusätzlich den Temperaturgradienten verstärkt.

In der Darstellung der Salzgehaltsprofile ist der massive Einfluss des Atlantischen Wassers mit Werten > 35 bis in die zentrale Nordsee hinein klar erkennbar (Profile entlang 58° N, 59° N und 60° N). Nur in Arealen mit Einstrom von salzarmem Wasser (kontinentale Abflüsse: Profile entlang 55° N und 56° N; Baltischer Ausstrom: Profile 58° N, 59° N und 60° N) bilden sich ausgeprägte vertikale und auch horizontale Salzgehaltsgradienten. Auffällig ist das weite Vordringen des salzarmen Wassers des Baltischen Ausstroms bis etwa 3° E entlang 58° N. Die niedrigen Salzgehalte in der Deutschen Bucht und vor der jütländischen Küste im Osten zeigen den erhöhten Eintrag von Süßwasser in der ersten Hälfte des Jahres 2002.

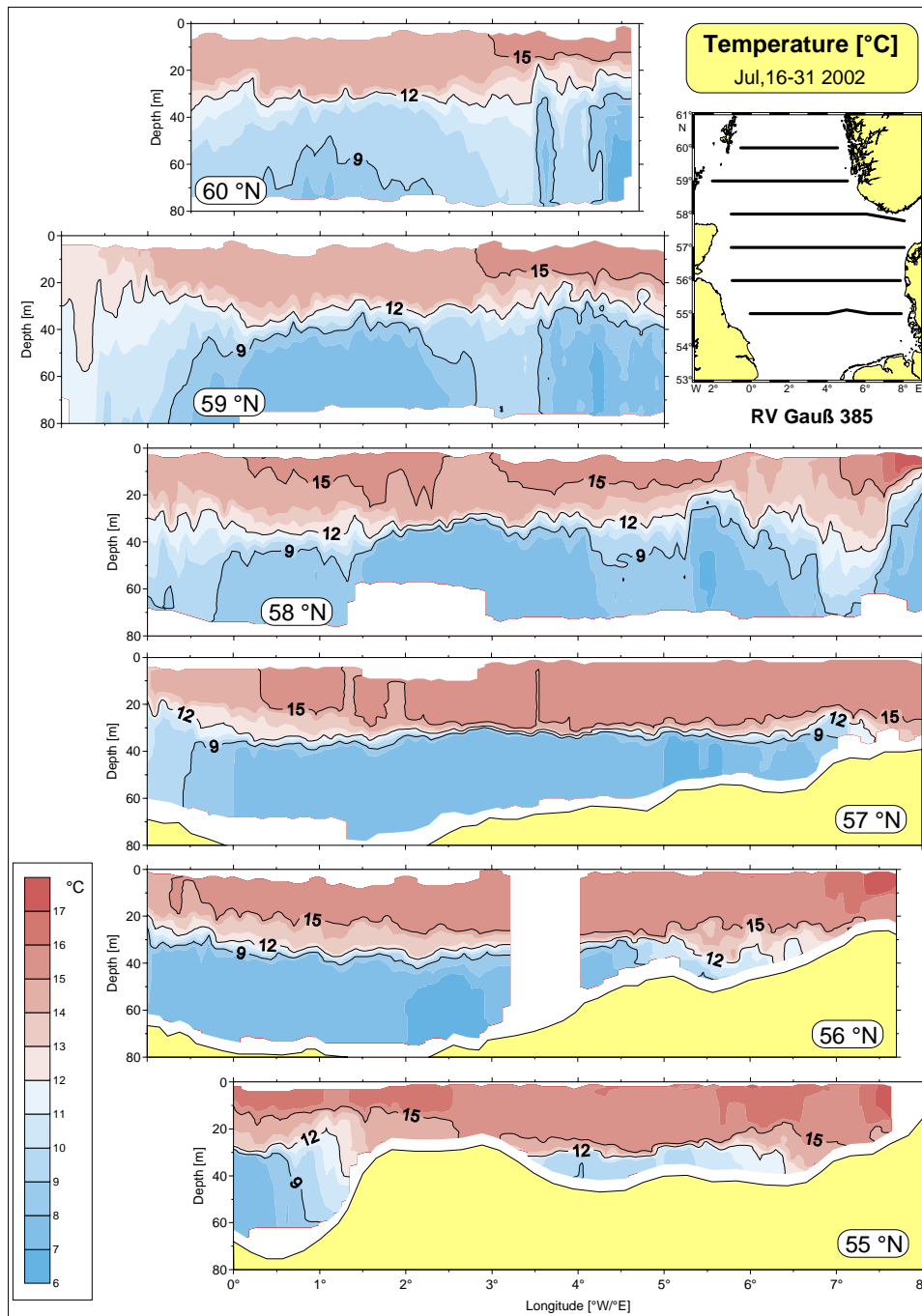


Abb. 2-13 Temperaturschichtung im Sommer (FS Gauß, Reise 385).

Fig. 2-13 Temperature stratification in summer (RV Gauß, Reise 385).

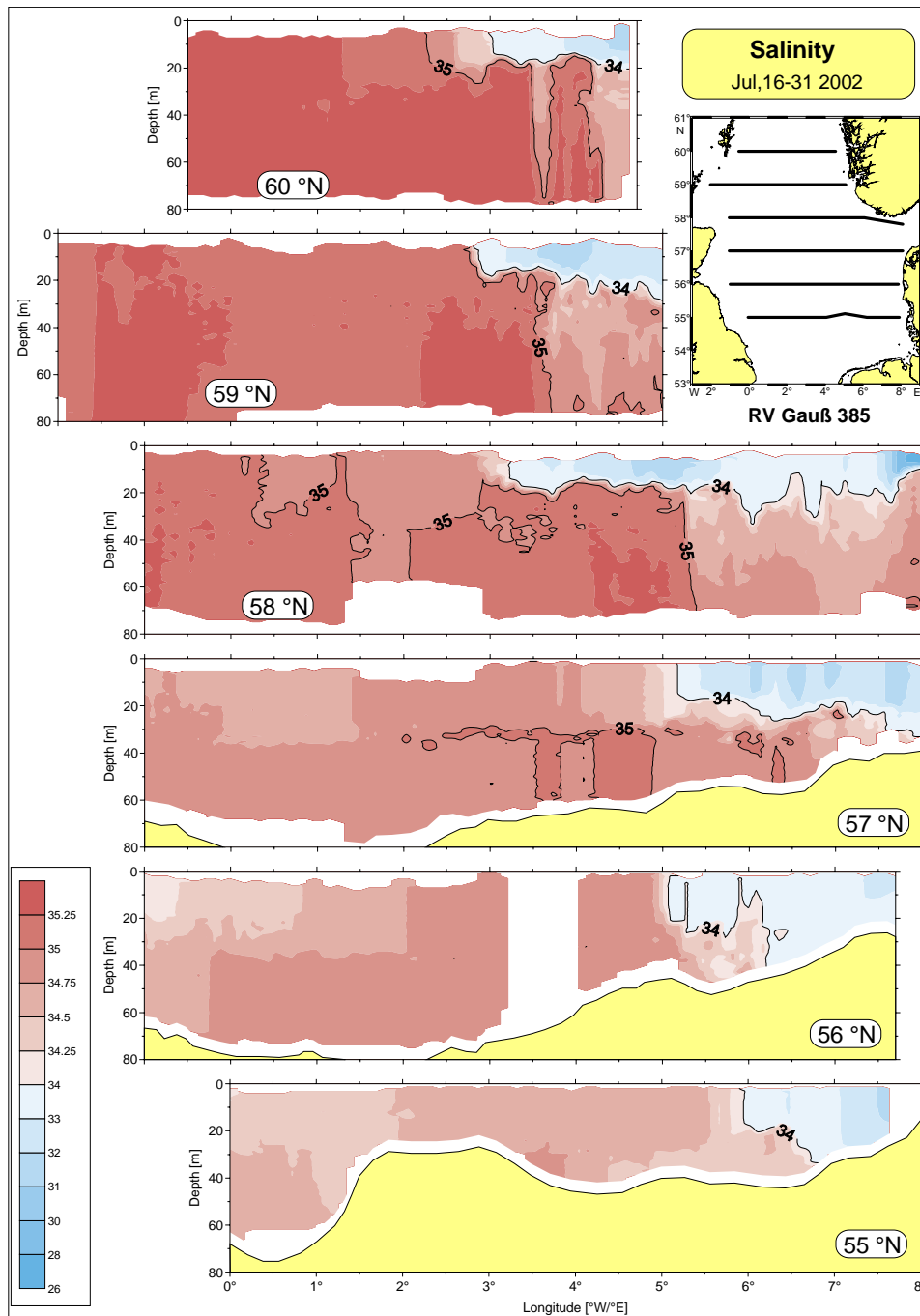


Abb. 2-14 Salzgehaltsschichtung im Sommer (FS Gauß, Reise 385).

Fig. 2-14 Salinity stratification in summer (RV Gauß, Cruise 385).

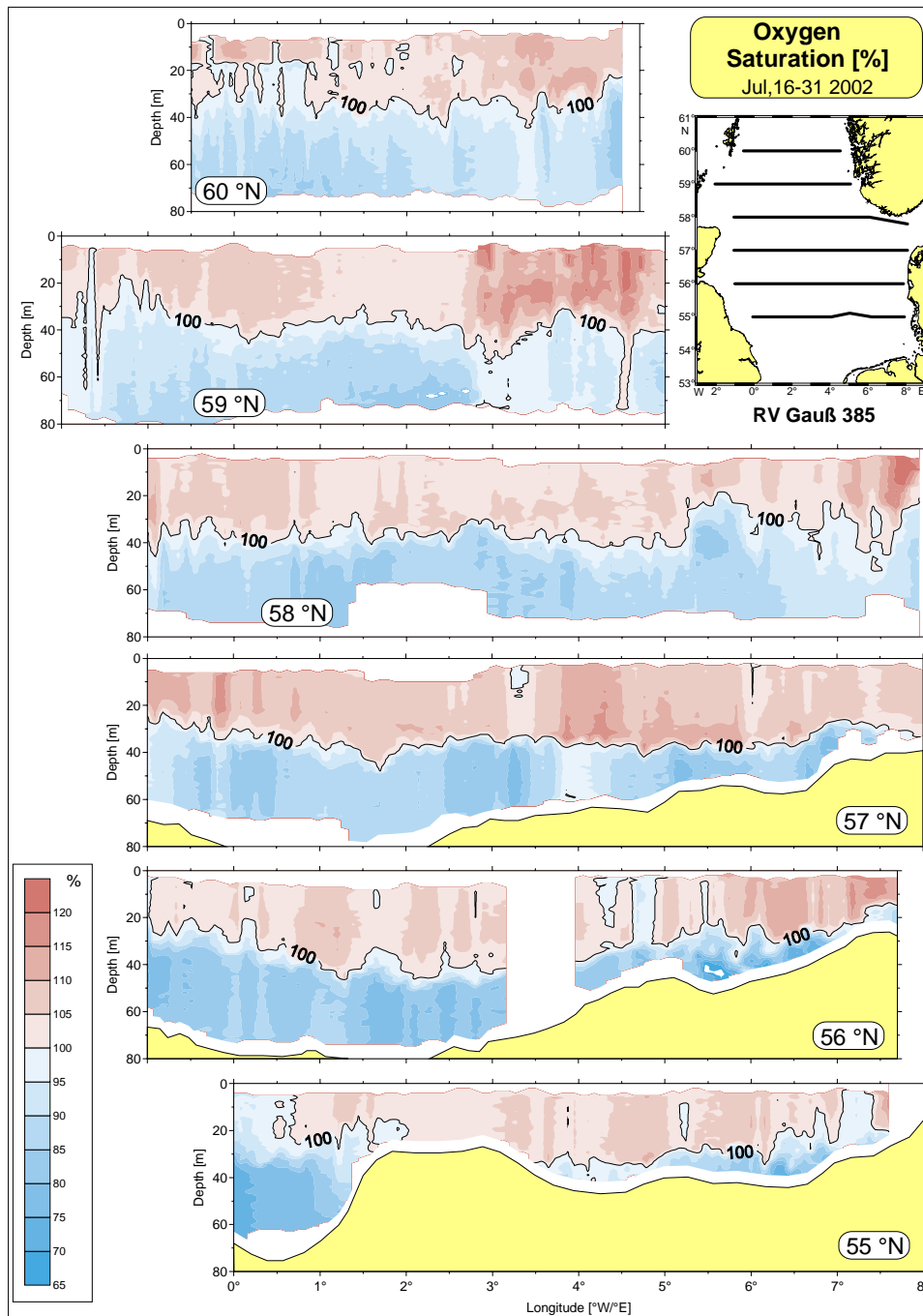


Abb. 2-15 Sauerstoffsättigung im Sommer (FS Gauß, Reise 385).

Fig. 2-15 Oxygen saturation in summer (RV Gauß, Cruise 385).

Das für die Nordsee-Aufnahme benutzte Schleppsystem *Delphin* war auch mit einem Sauerstoffsensoren bestückt. Die Messwerte der Schleppsonde wurden anhand der titrierten Wasserproben von 53 CTD-Stationen kalibriert. Die Vertikalschnitte zeigen die typischen sommerlichen Sauerstoffbedingungen der Nordsee. Infolge der Primärproduktion liegen die Sauerstoffsättigungswerte in der Deckschicht durchweg über 100%. Vor der jütländischen Küste und im Norwegischen Küstenstrom zeigen mehr als 120% Sättigung eine noch kräftige Primärproduktion an. Unterhalb der Deckschicht liegen die Sättigungswerte überwiegend zwischen 70 bis 90%. Das sind ökologisch gute Werte für diese Jahreszeit. Nur östlich der Doggerbank werden Werte unter 70% - minimal 60% - beobachtet. Da die saisonale Temperatursprungschicht auch noch im August und in der ersten Hälfte des September Bestand hatte, trat das Minimum der Sauerstoffsättigung erst zu einem späteren Zeitpunkt ein.

2.6 Nährsalze

Nährsalze wie Phosphat, Nitrat (Nitrit), Ammonium und Silikat sind Nährstoffe zum Aufbau des Phytoplanktons (der im Meer treibenden mikroskopisch kleinen einzelligen Algen), auf dessen Biomasseproduktion die gesamte marine Nahrungskette basiert. Durch anthropogene Einflüsse erhöhte Nährsalzkonzentrationen in Küstennähe können zunächst zu Algenblüten führen, die u. U. auch giftige Arten enthalten. Im weiteren Verlauf können Algenblüten indirekte Ursache für Sauerstoffmangel im Bodenwasser sein, der nach dem Absterben der Algen durch Abbauprozesse entstehen kann.

Die erhöhten Flusswassereinträge (vgl. *Abb. 3-16*) aber auch der wieder stärkere Einfluss des Nordatlantik auf die Nordsee (vgl. *Abb. 2-12*) legen die Vermutung nahe, dass im Jahr 2002 ein erhöhter Transport von Nährstoffen in die Nordsee¹ stattgefunden hat. Eine quantitative Aussage hierzu ist beim derzeitigen Kenntnisstand, bzw. wegen der dünnen Datengrundlage und der hohen raumzeitlichen Variabilität der Nährstoffe nicht möglich. Nur ein verstärktes Monitoring auch außerhalb der Küstengewässer und die Entwicklung leistungsfähiger Ökosystemmodelle werden hier Abhilfe schaffen können.

Im Folgenden werden Nährstoffdaten aus verschiedenen Messkampagnen und Datenquellen präsentiert. Die Einschätzung der Nährstoffsituation im Jahr 2002 stützt sich dabei wesentlich auf den Vergleich mit langjährigen Mittelwerten für den Zeitraum 1984-2000, die im *Nutrient Atlas of the Central and Northern North Sea* publiziert wurden (Brockmann und Topcu 2002).

2.6.1 Winter 2002

Wie in den Vorjahren wurden im Rahmen des *International Bottom Trawl Survey (Young Fish Survey)* des ICES auch im Januar/Februar 2002 in mittleren und nördlichen Gebieten der Nordsee Proben für die Nährsalzanalyse genommen und fixiert. Diese Proben wurden später in Hamburg analysiert. Zur Wahrung quasi-synoptischer Verhältnisse wird vom IBTS hier nur der Datensatz des FS Walther Herwig (Reise 236) herangezogen und durch die Analysen des BSH aus der jährlichen Winteraufnahme der Deutschen Bucht (FS Gauss, Reise 377) ergänzt. Basis der anschließenden Diskussion sind die geographischen Nährsalzverteilungen, die für die Oberfläche und die bodennahe Schicht gezeigt werden (obgleich die vertikalen Unterschiede in der winterlichen, durchmischten Nordsee eher gering sind).

Phosphat

Die Phosphatkonzentrationen in der zentralen und nördlichen Nordsee lagen mit 0.6 – 0.7 $\mu\text{mol/l}$ im Bereich des langjährigen Mittels, in begrenzten nördlichen Bereichen bei 0.7 – 0.8 $\mu\text{mol/l}$ und an der schottischen und dänischen Küste bei 0.5 – 0.6 $\mu\text{mol/l}$ (*Abb. 2-16*). Die minimalen Werte bei den Fischerbänken und in der äußeren Deutschen Bucht sind vermutlich ein Effekt der winterlichen Primärproduktion über der Doggerbank (Brockmann und Wegner 1985, Brockmann und Topcu 2002). Da die Doggerbank im Winter 2002 nicht beprobt wurde, lässt sich diese Hypothese jedoch nicht substantiieren. Hohe Konzentrationen $>1 \mu\text{mol/l}$ vor der schleswig-holsteinischen Küste spiegeln vor allem den Eintrag durch die Elbe wider, deren Flussfahne sich nordwärts ausbreitete.

¹ Die Nährsalzkonzentration des Nordatlantikwassers ist natürlich niedriger als diejenige der eutrophierten Küstenzonen. Die Menge der einströmenden atlantischen Wassermassen ist jedoch derart beträchtlich, dass der Nitrateintrag in die Nordsee denjenigen über die Flüsse um etwa das vierfache übertrifft (Laane 1996, Becker 2002).

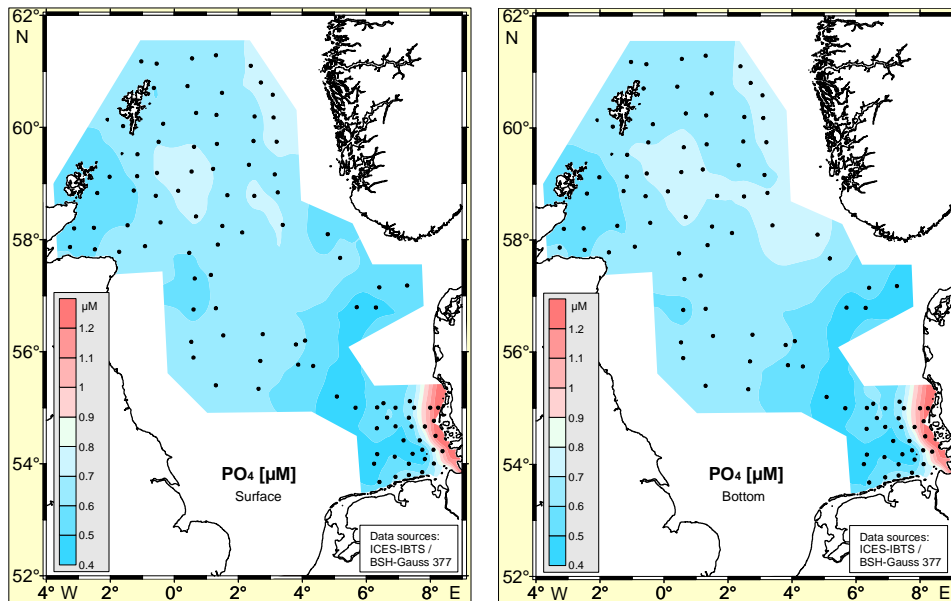


Abb. 2-16 Phosphat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Winter. Quellen: ICES IBTS (FS Walther Herwig 236, 19.1.-13.2.) und FS Gauß 377, 14.-23. Januar.

Fig. 2-16 Phosphate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in winter. Data: ICES IBTS (RV Walther Herwig 236, Jan 19 - Feb 13) and RV Gauß 377, Jan 14-23.

Silikat

Die Silikatkonzentrationen lagen in der zentralen Nordsee mit $3.5 - 4 \mu\text{mol/l}$ um $1 \mu\text{mol/l}$ unter dem langjährigen Mittel (Abb. 2-17). Am nordwestlichen Eingang der Nordsee und bei den Fischerbänken traten als Folge der winterlichen Primärproduktion die niedrigsten Konzentrationen ein (3 und $3.5 \mu\text{mol/l}$), die etwa den langjährigen Mittelwerten von $3 - 4 \mu\text{mol/l}$ entsprachen. Konzentrationen über $16 \mu\text{mol/l}$ im kontinentalen Küstenwasser wurden auch in den Vorjahren beobachtet.

Nitrat und Nitrit

Die Nitratkonzentrationen entsprachen mit Werten über $8 \mu\text{mol/l}$ in weiten Bereichen den langjährigen Mittelwerten (Abb. 2-18). Im von der winterlichen Primärproduktion über der Doggerbank beeinflussten Gebiet lagen die Konzentrationen unter $8 \mu\text{mol/l}$, zwischen dem kontinentalen Küstenwasser und dem zentralen Nordseewasser sogar unter $4 \mu\text{mol/l}$ und damit im Bereich des in der Zeit von 1984-2000 beobachteten langjährigen Minimums zwischen 3 und $5 \mu\text{mol/l}$.

Auch die Konzentrationen von Nitrit (in Abb. 2-18 enthalten), einem Zwischenprodukt bei der Nitrifizierung und Denitrifizierung, lagen meist unter $0.1 \mu\text{mol/l}$ und damit im Bereich der langjährigen Mittelwerte, die eine relativ hohe Streuung aufweisen. Erhöhte Werte $> 1 \mu\text{mol/l}$ vor der dänischen Küste dürften ihren Ursprung in der bakteriellen Nitrifizierung in der Frontalzone zum ammoniumreichen Küstenwasser haben (Brockmann und Topcu 2002).

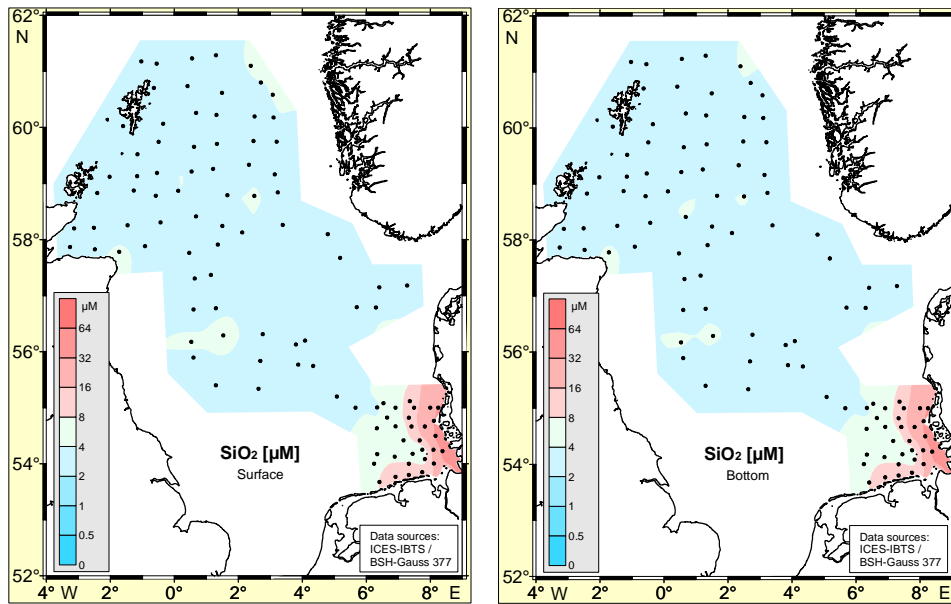


Abb. 2-17 Silikat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Winter. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Quellen: ICES IBTS (FS Walther Herwig 236, 19.1.-13.2.) und FS Gauß 377, 14.-23. Januar.

Fig. 2-17 Silicate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in winter. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Data: ICES IBTS (RV Walther Herwig 236, Jan 19 - Feb 13) and RV Gauß 377, Jan 14-23.

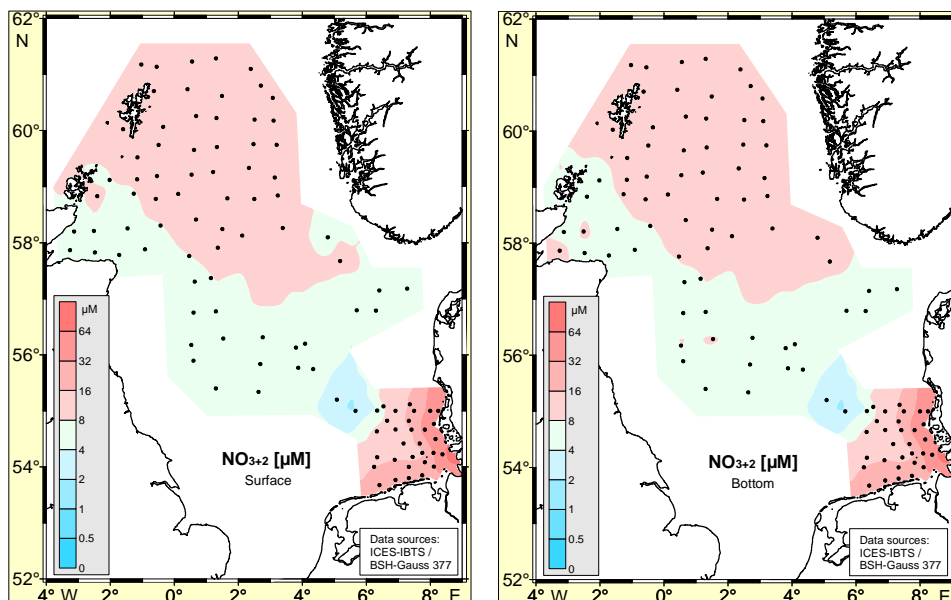


Abb. 2-18 Nitrat & Nitrit ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Winter. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Quellen: ICES IBTS (FS Walther Herwig 236, 19.1.-13.2.) und FS Gauß 377, 14.-23. Januar.

Fig. 2-18 Nitrate & Nitrite ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in winter. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Data: ICES IBTS (RV Walther Herwig 236, Jan 19 - Feb 13) and RV Gauß 377, Jan 14-23.

2.6.2 Sommer 2002

Aus den sommerlichen Nährsalzmessungen in der Deckschicht lässt sich ableiten, welches der Nährsalze jeweils regional das Phytoplanktonwachstum begrenzt, bzw. in welchem Ungleichgewichtszustand sich die Nährsalze befinden. Dies ist wichtig, um für langfristige Effekte beeinflussbarer Einträge (Land, Atmosphäre) Maßnahmen einleiten zu können. Die Messungen in der Bodenwasserschicht zeigen den Grad des aktuellen Abbaus frisch sedimentierter Planktonbiomasse und helfen, sich entwickelnde Sauerstoffdefizite zu erklären. Gleichzeitig sind sie ein Indiz für die Verweildauer von Wassermassen unter der Deckschicht. Dies gilt speziell für Ammonium, das als ausschließliches Remineralisierungsprodukt gilt, und Silikat, dessen Remineralisierung aus den Schalen der Kieselalgen besonders lange dauert. Insgesamt zeigen die Gradienten der sommerlichen Nährsalze, als Integral der biogeochemischen Prozesse, wie weit jeweils die saisonalen Stoffumsetzungen gediehen sind.

Ein umfangreicher Datensatz liegt von der 385. Reise des FS Gauß (16.–31.7.2002) vor. Neben den *klassischen* anorganischen Nährsalzen wurden weitere chemische Parameter analysiert, von denen hier der gelöste *Sauerstoff (Sättigung)*, die *Chlorophyll-a* Konzentration und die *Wassertrübung* (als Maß für die Schwebstoffkonzentration) anhand von geographischen Verteilungen diskutiert werden. Aufgrund der sommerlichen Schichtung (Diffusionsperre) sowie komplementärer biologischer Prozesse (Produktion vs. Abbau) oberhalb bzw. unterhalb der Sprungschicht treten eklatante Unterschiede zwischen den Oberflächen- und Bodenverteilungen auf.

Phosphat

Die Phosphatkonzentrationen (*Abb. 2-19*) waren durch die andauernde Primärproduktion an der Oberfläche in der geschichteten zentralen und westlichen Nordsee im Sommer 2002 bis auf 0.06 - 0.12 $\mu\text{mol/l}$ abgesunken. Die Konzentrationen in der offenen Nordsee lagen damit etwas über den mittleren langjährigen Werten von $< 0.1 \mu\text{mol/l}$ und denen der Vorjahre 2001 und 2000.

In der flacheren südlichen Nordsee waren die Phosphatkonzentrationen auf 0.12 – 0.25 $\mu\text{mol/l}$ reduziert. Im Einflussbereich der Flussfahne von Elbe und Weser wurden Konzentrationen im Wertebereich 0.5 – 1 $\mu\text{mol/l}$ gemessen. Die hohen Phosphatkonzentrationen in Bodennähe waren im Sommer 2002 geprägt vom atlantischen Einstrom in die nördliche Nordsee, wo Konzentrationen um 0.9 $\mu\text{mol/l}$ beobachtet wurden. Nördlich der Doggerbank traten deutlich erhöhte Konzentrationen von 0.7 – 0.9 $\mu\text{mol/l}$ auf. Während die Konzentrationen und auch die Gradienten in der nördlichen Nordsee etwa den langjährigen Mittelwerten entsprachen, wurden derart hohe Werte unmittelbar nördlich der Doggerbank bisher nicht beobachtet. Da dort auch relativ hohe Silikat- ($> 4 \mu\text{mol/l}$) und Nitratkonzentrationen ($> 8 \mu\text{mol/l}$) angetroffen wurden, sind diese ungewöhnlichen Verhältnisse möglicherweise auf ein früheres atlantisches Einstromereignis zurückzuführen. Offensichtlich können viele Prozesse in Teilbereichen der Nordsee nicht isoliert betrachtet und verstanden werden, sondern erfordern eine hinreichende Kenntnis des Gesamtsystems.

Silikat

Die Silikatkonzentrationen in der nördlichen Nordsee (*Abb. 2-20*) lagen an der Wasseroberfläche unter 1 $\mu\text{mol/l}$ und entsprachen langjährigen Mittelwerten. Die bodennahen Konzentrationen oberhalb 5 $\mu\text{mol/l}$ in der nordöstlichen Nordsee resultierten aus dem atlantischen Einstrom über die Norwegische Rinne und entsprachen – wie im Vorjahr – den langjährigen Mittelwerten. Die regional abgesetzten, hohen Konzentrationen nördlich der Doggerbank wurden ähnlich nur im Jahr 2000 beobachtet.

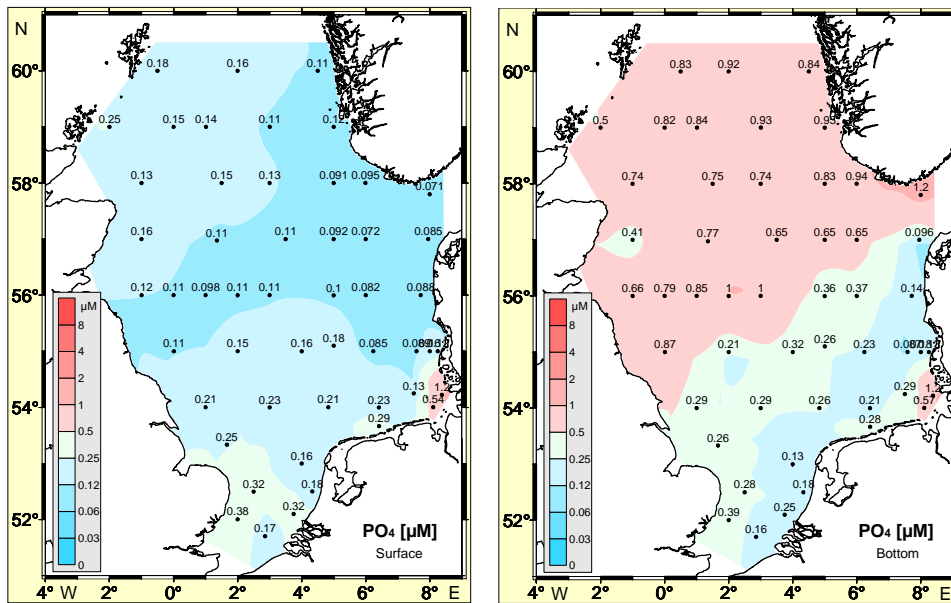


Abb. 2-19 Phosphat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.

Fig. 2-19 Phosphate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.

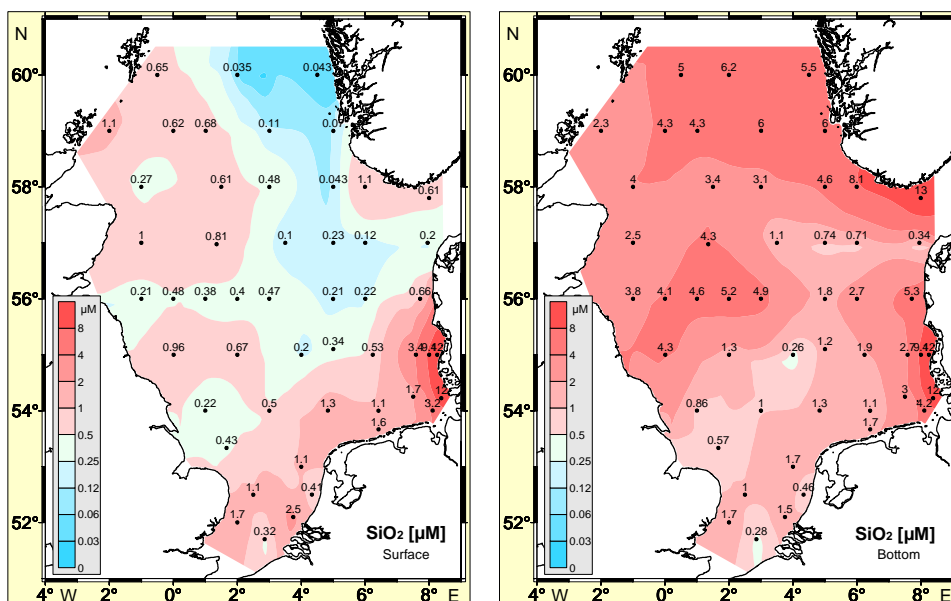


Abb. 2-20 Silikat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.

Fig. 2-20 Silicate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.

Nitrat und Nitrit

Die Oberflächenkonzentrationen von Nitrat (Abb. 2-21) unterschritten in vielen Gebieten 0.05 $\mu\text{mol/l}$ und lagen damit niedriger als in den Vorjahren ($< 0.1 \mu\text{mol/l}$). In Bodennähe ergaben sich für hohe Konzentrationen ($> 8 \mu\text{mol/l}$) ähnliche regionale Verteilungsmuster wie für Silikat und Phosphat und entsprechende Abweichungen zu vorhergehenden Jahren. In der zentralen Nordsee entsprachen die Nitritkonzentrationen sowohl an der Wasseroberfläche ($< 0.05 \mu\text{mol/l}$), als auch in Bodennähe ($> 0.1 \mu\text{mol/l}$) denjenigen vorausgehender Jahre und den langjährigen Mittelwerten.

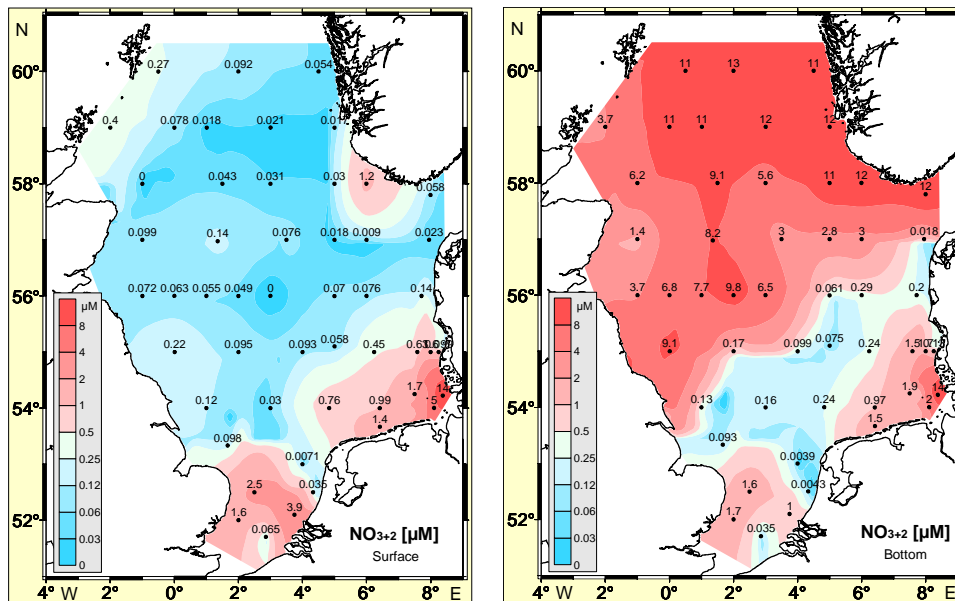


Abb. 2-21 Nitrat & Nitrit ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.

Fig. 2-21 Nitrate & Nitrite ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.

Abgesetzt von den Einträgen aus Elbe und Weser wurden relativ hohe Si/P und N/P Verhältnisse in der Deutschen Bucht und dem anschließenden Küstenwasser festgestellt. Das N/P-Verhältnis entsprach den langjährigen Beobachtungen und deutet einen Phosphatmangel an, d.h. Phosphat wirkt hier limitierend. An der Oberfläche der zentralen Nordsee herrschte hingegen Mangel an Stickstoffverbindungen, d.h. in diesem Bereich liegen N-limitierende Verhältnisse vor.

Chlorophyll

In der schon größtenteils und der Jahreszeit entsprechend nährstoffarmen Deckschicht waren die Chlorophyllkonzentrationen (Abb. 2-22) mit Werten unter $0.1 \mu\text{g/l}$ am niedrigsten. Im nährstoffreichen Küstenwasser und im Bereich des nördlichen atlantischen Einstroms stiegen die Konzentrationen bis über $0.5 \mu\text{g/l}$ an. Auch in Bodennähe der flacheren südlichen Nordsee wurden erhöhte Chlorophyllwerte gemessen, die auf die Sedimentation frischer Phytoplankton-Biomasse hinweisen. Maximale Chlorophyllkonzentrationen traten generell zwischen 20 und 40 m Wassertiefe auf (vgl. a. Abb. 2-15). Denn neben ausreichendem Licht

standen an der Dichtesprungschicht oder an Fronten entweder noch Nährsalze für die Primärproduktion zur Verfügung, oder waren erst kurz zuvor verbraucht worden.

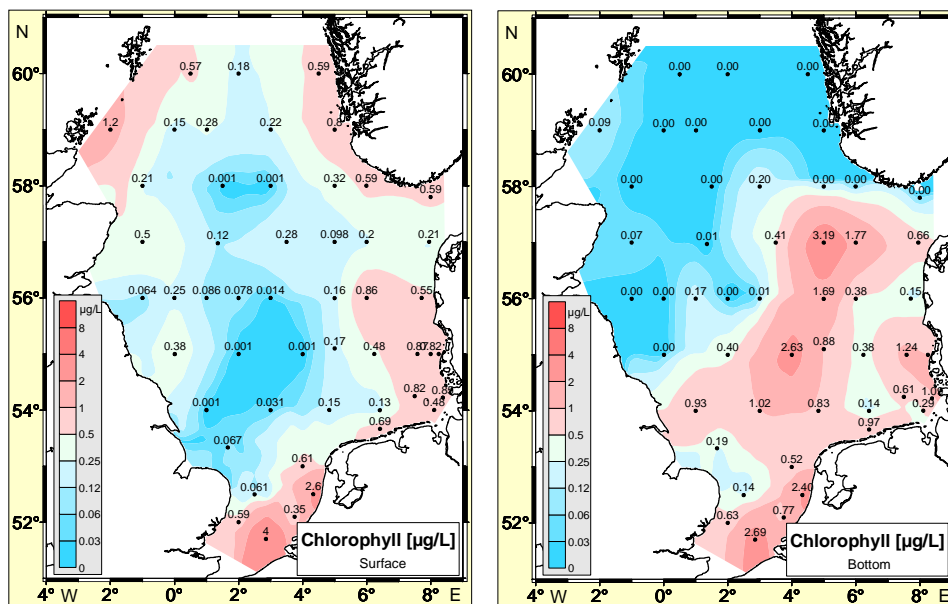


Abb. 2-22 Chlorophyll ($\mu\text{g/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.

Fig. 2-22 Chlorophyll ($\mu\text{g/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.

Sauerstoff

An der Wasseroberfläche wird häufig die physikalisch mögliche Sauerstoffsättigung von 100% überschritten (Abb. 2-15 und Abb. 2-23), weil bei der Photosynthese des Phytoplanktons Sauerstoff entsteht. Die Sauerstoffsättigung in den Wassermassen unterhalb der Sprungschicht sinkt hingegen teilweise unter 80%, weil der Abbau sedimentierten Phytoplanktons in der bodennahen Wasserschicht zu einer Sauerstoffzehrung führt und die Dichtesprungschicht einen vertikalen Austausch verhindert.

Unterschiede in den Sauerstoffsättigungen der Abb. 2-15 und Abb. 2-23 sind vor allem auf die verschiedene raumzeitliche Auflösung der jeweils benutzten Datensätze zurückzuführen. Der Abb. 2-23 liegen die aus diskreten Proben titrierten Sauerstoffsättigungswerte zugrunde; für die Abb. 2-15 wurden die quasi kontinuierlich vorliegenden Delphinmessungen benutzt, mit denen auch lokale Minima erfasst werden konnten.

In den Vorjahren wurden noch geringere Sättigungswerte beobachtet. Besonders niedrige Werte finden sich im Bodenwasser unterhalb von Gebieten hoher Primärproduktion und in Bereichen mit geringem lateralen Wassermassenaustausch. Darüber hinaus wird beim Abbau sedimentierter Biomasse Ammonium freigesetzt und durch bakterielle Zersetzung unter Sauerstoffverbrauch über das Zwischenprodukt Nitrit wieder zu Nitrat oxidiert. Daher treten erhöhte Ammonium- und Nitritkonzentrationen oft gemeinsam oder in der Nähe geringer Sauerstoffkonzentrationen auf.

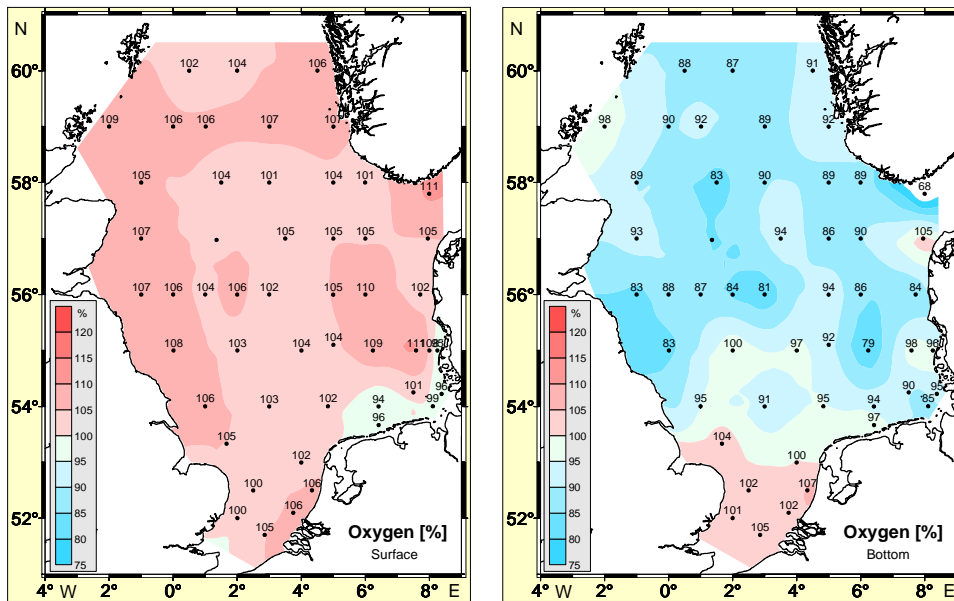


Abb. 2-23 Oberflächen- und Bodenverteilung der Sauerstoffsättigung (%) im Sommer. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.

Fig. 2-23 Surface and bottom distribution of oxygen saturation (%) in summer. Data: RV Gauß 385, July 16-31.

Trübung

Die Wassertrübung (Abb. 2-24) wurde mit einem Nephelometer in NTU (Nephelometric turbidity units) gemessen.

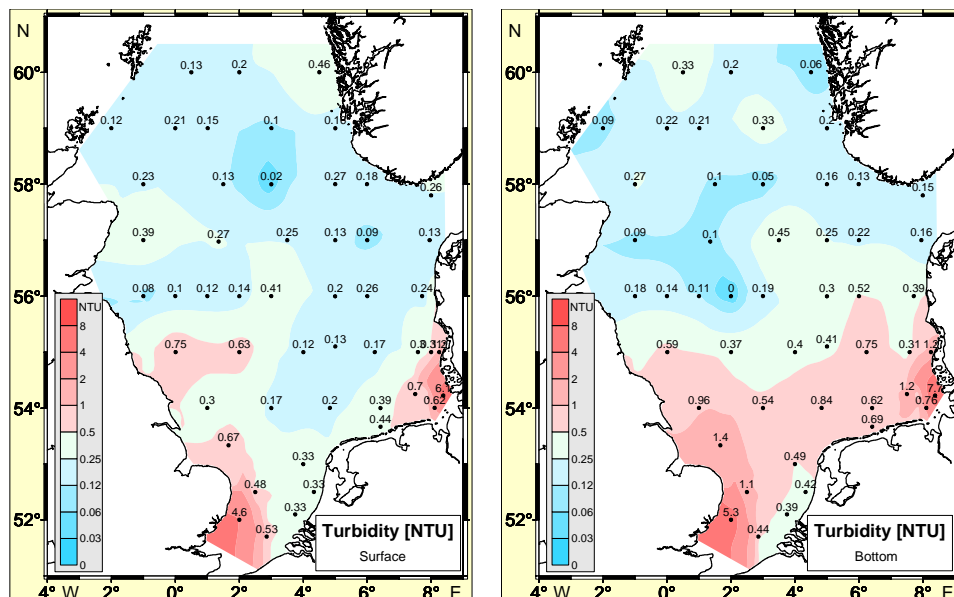


Abb. 2-24 Wassertrübung (NTU) an Oberfläche und Boden im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.

Fig. 2-24 Surface and bottom turbidity (NTU) in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.

Die Trübung steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den Schwebstoffen (SPM Suspended Particulate Matter), deren Konzentrationen in der Nordsee allgemein zwischen 6 und 20 mg/l liegen. Die Schwebstoffgradienten weichen deutlich von denen des partikulären Kohlenstoffes ab, denn die suspendierten Partikel sind überwiegend mineralischer Natur. Deshalb zeichnen sich die flachen Gebiete der Nordsee, in denen durch Seegang (insbesondere Dünung) und Gezeiten Sediment resuspendiert wird, durch erhöhte Schwebstoffkonzentrationen aus.

Die höchsten Trübungswerte wurden im Bereich der Flussfahnen von Elbe und Weser gemessen, denn die in das Küstenwasser eingetragenen Schwebstoffe werden infolge der ästuarinen Zirkulation verstärkt resuspendiert. Ortsfeste Messungen zeigen, dass die Trübungssignale in der Deutschen Bucht grundsätzlich von einem halbtägigen Gezeitensignal überlagert sind (König et al. 1994). Die wind- und abflussbedingten Signalkomponenten sind jedoch i.d.R. größer als das aus der wechselnden Advektion von Wassermassen aus der Nordsee bzw. aus den Wattengebieten resultierende Gezeitensignal.

Die niedrigsten Trübungswerte wurden in der nördlichen und zentralen Nordsee beobachtet.

3 Deutsche Bucht

Die Deutsche Bucht umfasst den südöstlichen Teil der Nordsee. Es ist ein flaches Meeresgebiet, das an seinem südlichen und östlichen Rand von den Wattengebieten der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küste begrenzt wird. Eine ausführliche Beschreibung der ozeanographischen Bedingungen findet sich in Becker et al. (1992). Zwei große kontinentale Flüsse, Weser (mittlerer Abfluss 350 m³/s) und Elbe (mittlerer Abfluss 800 m³/s) münden in die Deutsche Bucht. Beide Flüsse transportieren große Mengen an Schadstoffen in die Deutsche Bucht, die sich dort durch physikalische und bio-geochemische Prozesse mit dem Nordseewasser vermischen.

Die Topographie der Deutschen Bucht ist das Ergebnis des Rückzuges der glazialen Eisbedeckung und des ansteigenden Wasserspiegels in den letzten 10000 Jahren. Die Bathymetrie der Deutschen Bucht wird geprägt durch die ausgedehnten friesischen Wattengebiete und das postglaziale Elbetal, das die Deutsche Bucht von der jetzigen Elbemündung in nordwestlicher Richtung durchschneidet und die Doggerbank östlich von Tail End passiert. Das Helgoländer Loch ist mit einer Tiefe von etwa 50 m die tiefste Stelle der Deutschen Bucht; Sedimentation und Resuspension von Schlick sorgen hier für eine große Variabilität der Schwebstoffkonzentrationen.

Die ozeanographischen Bedingungen der Deutschen Bucht werden durch die Zirkulation der gesamten Nordsee, durch die Wechselwirkung der starken Gezeitenströme mit der Topographie, den Einfluss des Windes und durch die Süßwassereinträge von Elbe und Weser geprägt. Während die Gezeitenströme eine Homogenisierung der Wassersäule bewirken, wird durch den variablen Süßwassereinfluss eine vertikale Schichtung aufgebaut. Zwischen dem infolge der Süßwassereinträge frischem Küstenwasser ($S < 30$) und dem Nordseewasser bilden sich Salzgehaltsfronten aus, die einer starken Dynamik unterliegen (Dippner 1992).

3.1 Strömung und Seegang

Generell herrscht in der Nordsee eine großräumige zyklonale Zirkulation vor, die mit einem starkem Einstrom von atlantischem Wasser am NW-lichen Rand (Fair-Isle Strom) und Ausstrom über der Norwegischen Rinne (Norwegischer Strom) verbunden ist (Klein et al. 1994, Otto et al. 1990). Die Stärke der Nordseezirkulation hängt von der vorherrschenden Luftdruckverteilung über dem Nordatlantik ab. Qualitativ erhält die Deutsche Bucht bei einem hohen NAO-Index stärkere Anteile atlantischen Wassers aus dem Nordeingang der Nordsee, bei niedrigem NAO-Index sind dagegen stärkere Anteile aus dem Englischen Kanal, bzw. der Südlichen Bucht zu erwarten.

Die im Mittel zyklonale Nordseezirkulation wird durch das aktuelle Windfeld über der Nordsee fortlaufend modifiziert, so dass sich die im folgenden beschriebenen Zirkulationsformen in der Deutschen Bucht ausbilden können.

3.1.1 Zirkulationsmuster

Die oberflächennahe Zirkulation in der Deutschen Bucht wurde anhand vektorieller Tagesmittelwerte (Reststrom) der Strömungsgeschwindigkeiten untersucht, die mit dem operationellen Strömungsmodell *BSHcmod* simuliert wurden. Dazu wurden Karten des täglichen Reststroms in der obersten Modellschicht (0-8 m) zwischen 53° 15' N und 55° 30' N und zwischen 6° 30' E und 9° E analysiert und das tägliche Reststrommuster neun charakteristischen Zirkulationstypen zugeordnet.

Neben den Typen *CY* (zyklonal, deutlicher Einstrom am SW-Rand, Ausstrom am N- und NW-Rand) und *AC* (antizyklonal, Einstrom am N- und NW-Rand, Ausstrom am W-Rand) wurden sechs weitere Kategorien (*SN*, *NS*, *EW*, *WE*, *SE-NW*, *NW-SE*) für die jeweils vorherrschende Strömungsrichtung definiert (Abb. 3-1). Strömungsmuster, die z.T. Wirbelstrukturen enthalten, aber keinem der genannten Muster zugeordnet werden konnten, wurden in der Sonderkategorie *V* (variabel) zusammengefasst.

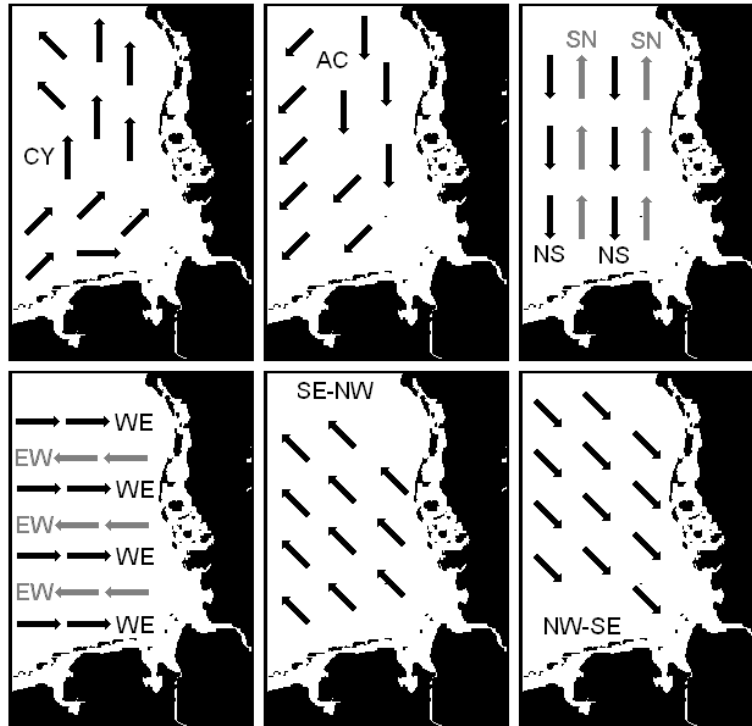


Abb. 3-1 Schematik der Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht.

Fig. 3-1 Classification scheme for daily residual currents in the German Bight.

Die relative Häufigkeit der Zirkulationsmuster in 2002 wurde derjenigen für den Fünfjahreszeitraum 1997-2001 in Abb. 3-2 gegenübergestellt. Die markante Differenz beim Typ *V* erklärt sich aus der zum Jahreswechsel 1999/2000 eingeführten höheren Gitterauflösung des Modells. Dadurch konnten ab dem Jahr 2000 Wirbelstrukturen aufgelöst werden, die in den Vorjahren anderen Zirkulationstypen zugeordnet worden sind.

Die absoluten Häufigkeiten der Zirkulationsmuster im Zeitraum 1997-2002 wurden in der Stapeldarstellung der Abb. 3-3 nach Einzeljahren aufgeschlüsselt. Dabei fällt auf, dass der Typ *V* in 2002 auch gegenüber den beiden Vorjahren, in denen bereits das feinere Modellgitter benutzt wurde, deutlich häufiger aufgetreten ist. In den Monaten Juni und Juli, und z.T. auch noch im August konnten in der Deutschen Bucht Wirbelstrukturen im Reststrommuster beobachtet werden, die sich z.T. über mehrere Tage verfolgen ließen (siehe Abb. 3-4).

Neben der Dominanz des *V*-Musters im Sommer 2002 ist die im Vergleich zu den Vorjahren ungewöhnlich stabile Phase zyklonalen Reststroms (*CY*) zu Jahresbeginn bemerkenswert. Zwischen dem 10. Januar und dem 12. Februar wurde an nur zwei Tagen ein anderer Zirkulationstyp beobachtet (Abb. 3-4). Im Januar und Februar kam es infolge des anomal positiven NAO-Modes zu einer Häufung südwestlicher bzw. westlicher Starkwinde über der Nordsee (vgl. Abschnitt 2.1.2), wodurch sich der atlantische Einstrom gleichförmiger und mit höheren Stromgeschwindigkeiten in der Nordsee verteilte (vgl. Abb. 2-5). Damit stabilisierte sich auch die an den nördlichen Einstrom gekoppelte Zirkulation in der Deutschen Bucht.

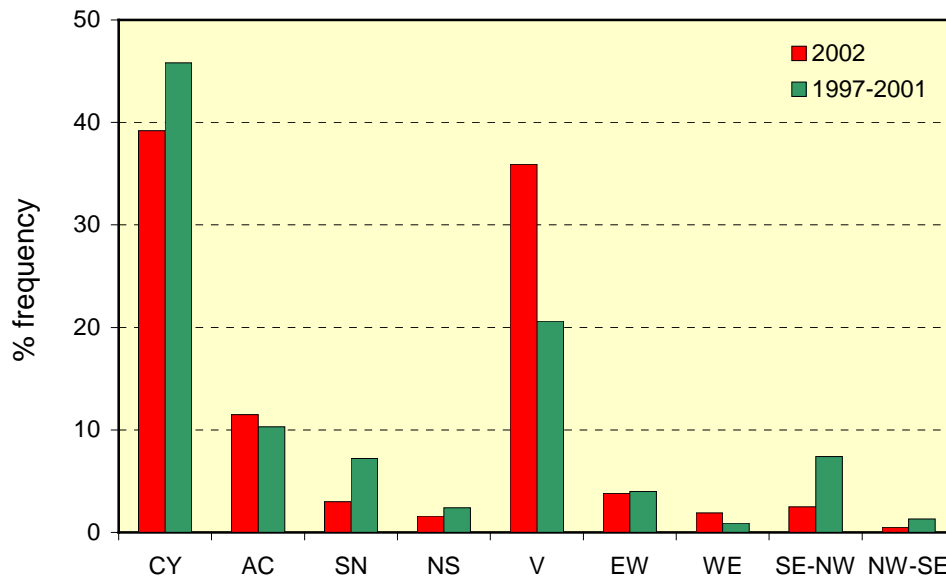


Abb. 3-2 Relative Häufigkeit der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in 2002 und im Mittel der Jahre 1997-2001.

Fig. 3-2 Percent frequency of circulation patterns in 2002 vs. 5-year mean (1997-2001).

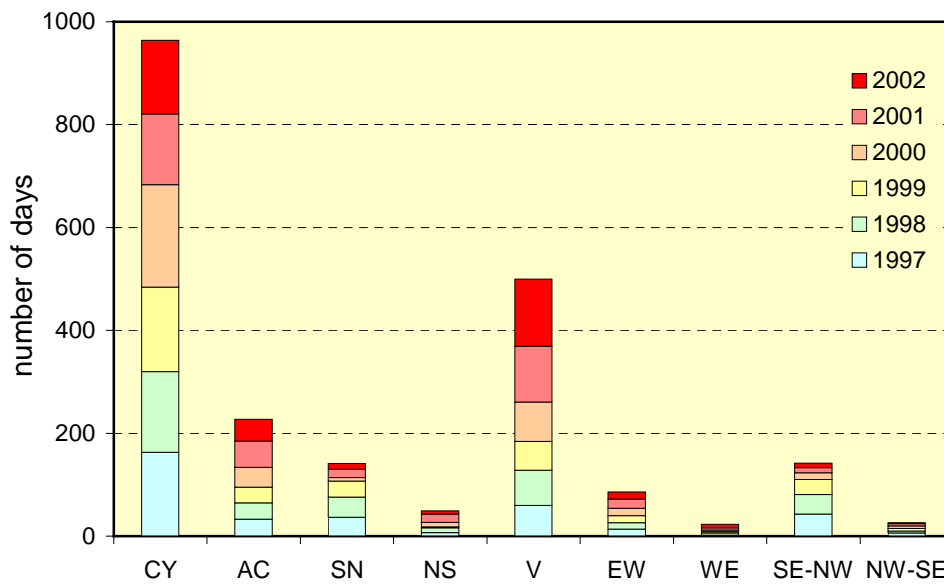


Abb. 3-3 Absolute Häufigkeit der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht im Zeitraum 1997-2002.

Fig. 3-3 Absolute frequency of circulation patterns in the German Bight for 1997-2002.

2002	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Jan	#	ac	sn	v	cy	ac	v	cyclonic														ac	cyclonic		v	cy					
Feb	cyclonic										ac	ns	v	#	cy	v	cy	v	cyclonic												
Mar	cy	ns	v	we	cy	we	v	we	cy	sn	ac	cyclonic			anticyclonic	v	cy	v	cyclonic												
Apr	cy	sn	se-nw	ew	ac	variable		ew	v	ew	variable					cy	v	cy	v	cyclonic											
May	cy	v	cy	ac	ew	variable		se-nw	cy	v	cy	v	ew	v	cyclonic										v	cyclonic					
Jun	v	sn	cy	cy	cy	v	cyclonic		we	v	cy	variable				cy	we	variable			cy										
Jul	cyclonic		variable		cyclonic				variable		anticyclonic		v	ns	v	ns	variable		sn	v											
Aug	v	cy	variable					cy	v	ac	variable			cyclonic		variable		ew	v	ew											
Sep	ac	v	cyclonic			cy	variable		anticyclonic					ew	ac	v	ac	v													
Oct	variable		ns	v	ac	v	ew	ew	ac	v	sn	v	cy	v	cy	v	cy	v	cyclonic		variable	ac									
Nov	v	cy	sn	cyclonic		v	sn	cyclonic			variable		ew	cyclonic		variable		cyclonic													
Dec	cyclonic		v	ac	ew	v	ac	variable			sn	v	ac	variable		sn	cy	sn	cyclonic		ew	v									

Abb. 3-4 Zeitliche Abfolge der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in 2002. (# = nw-se).
 Fig. 3-4 Chronology of circulation patterns in the German Bight in 2002. (# = nw-se).

3.1.2 Wind und Seegang

Der Seegang wird naturgemäß entscheidend von der Windgeschwindigkeit gesteuert. Die Höhe der Windsee hängt aber nicht nur von der Windgeschwindigkeit ab, sondern auch von der Zeit, die der Wind auf die Wasseroberfläche einwirkt (Wirkdauer) und von der Windstreichlänge (Fetch), d.h. der Strecke, über die der Wind wirkt. So ist die Windstreichlänge in der Deutschen Bucht bei Ost- und Südwinden deutlich geringer als bei Nord- und Westwindlagen. Als Maß für die Windsee wird die signifikante oder auch kennzeichnende Wellenhöhe (swh) angegeben, d.h. die mittlere Wellenhöhe des oberen Drittels der Wellenhöhenverteilung.

Die Wind- und Seegangsverhältnisse in der Deutschen Bucht in 2002 werden anhand der Windmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) auf dem Unbemannten Feuerschiff *Deutsche Bucht* (UFS-DB), der Berechnungen des vom DWD betriebenen Seegangmodells für die Position UFS-DB sowie der BSH-Waverider-Messungen bei Helgoland dokumentiert (siehe Abb. 3-5). Der zeitliche Abstand der Werte beträgt 1 Stunde bei den meteorologischen Daten, 3 Stunden beim Seegangmodell und etwa 55 Minuten bei den Seegangsmessungen. Aufgrund von Übertragungsfehlern und Wartungsarbeiten kam es bei den Wind- und Seegangsmessungen gelegentlich zu Datenlücken.

Die zeitliche Entwicklung von Wind und Seegang (Abb. 3-5) wird gemeinsam mit den zugehörigen 2D-Häufigkeitsverteilungen diskutiert (Tab. 3-1 bis Tab. 3-3). Letztere wurden mit ungefilterten Daten berechnet, weshalb höhere Spitzenwerte auftreten als in der Zeiteriendarstellung. Man beachte ferner, dass Richtungsangaben für Wind und Seegang deren Herkunft anzeigen (während Strömungsrichtungen so vereinbart sind, dass sie angeben, wohin der Strom setzt). Diese Richtungen stimmen mit denjenigen auf einem 16-Punkte Kompass überein und definieren hier die Klassenmitten von 22.5° Sektoren. In Tab. 3-2 wurden nur Wellenhöhen > 0 berücksichtigt, da sich für eine Wellenhöhe von Null keine Richtung definieren lässt. Entsprechendes gilt für den Wind in Tab. 3-1.

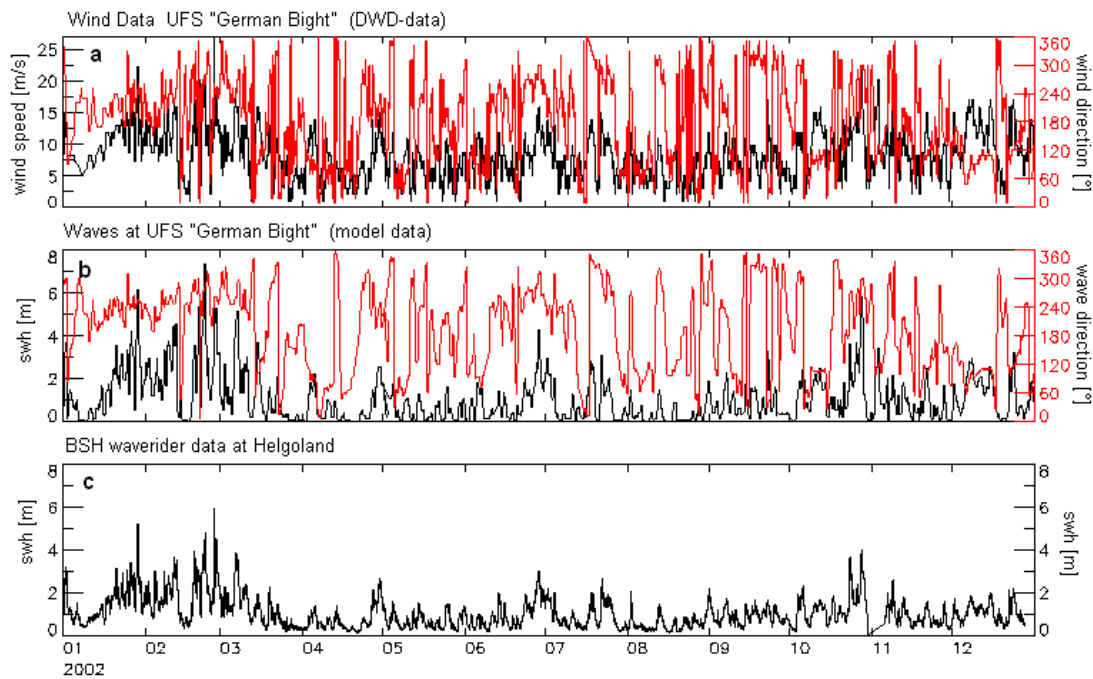


Abb. 3-5 Zeitserien der beobachteten Windgeschwindigkeit und -richtung am UFS-DB (oben), der signifikanten Wellenhöhe (swh) und Seegangsrichtung an der Gitterposition UFS-DB (Modelldaten, Mitte) und der swh bei Helgoland (Waverider-Messung, unten). Alle Zeitserien wurden mit einem Median-Filter über 5 Messzyklen geglättet.

Fig. 3-5 Time series of observed wind speed and direction at lightvessel Deutsche Bucht (top), significant wave height (swh) and wave direction at grid position lightvessel German Bight (model data, middle), and swh near Helgoland (Waverider data, bottom). All data smoothed over 5 measuring cycles applying a median filter.

Die Richtungsverteilungen für Wind und Seegang sind bimodal und ähnlich (s. Zeilensummen in Tab. 3-1 u. Tab. 3-2). Die Windverteilung zeigt ein breites Maximum, das sich über die Richtungen S bis W erstreckt (38%), und ein schärfer definiertes für Winde aus östlichen Richtungen (27%, ENE bis ESE). Der prägnante Verteilungsgipfel im E-Sektor erreicht 12% und scheint im Widerspruch zu Alltagserfahrung und Erwartung. Klimatologische Mittelwerte für 1981-2000 zeigen durchaus eine ähnliche bimodale Struktur mit Gipfeln im W- und E-Sektor. Hinsichtlich des absoluten Maximums kam es in 2002 jedoch zu einer anomalen Vertauschung. Ostwinde traten vor allem ab Oktober etwa 3-mal so häufig auf wie gewöhnlich, während Winde aus S bis W nur zu Jahresbeginn extrem häufig vorkamen (Lefebvre 2003). Die Vorzugsrichtungen des Seegang sind mit WSW und ESE schärfer definiert und gegenüber den Windrichtungen in einer Weise verschoben, die anscheinend die geographischen Rahmenbedingungen (Küstenverlauf, Topographie) bzw. eine vorherrschend zyklonale Zirkulation reflektiert.

Höhere und extreme Geschwindigkeiten gingen überwiegend mit Windrichtungen zwischen SW und NW einher. In diesen Sektoren wurden auch die größten Wellenhöhen simuliert. Erwähnenswert ist weiter, dass sich die Randverteilungen von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhen (Spaltensummen) deutlich unterscheiden. Während erstere üblicherweise vom DWD durch eine Weibull-Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung beschrieben wird, kann letztere durch eine Rayleigh-Verteilung mit Maximum im Wellenhöhenintervall 0.5 – 1 m charakterisiert werden.

Im klimatologischen Jahrgang (1950-1986) treten in der inneren Deutschen Bucht die höchsten Windgeschwindigkeiten mit etwa 9 m/s im November auf und fallen dann bis zum

wind direction	wind direction	wind speed bins (m/s)										row totals
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24	24-28	28-32	32-36	36-40	
NW	315.0°	0.6	1.7	2.5	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	5.2
NNW	337.5°	0.4	1.1	1.2	0.4	<0.1	-	-	-	-	-	3.2
N	0.0°	0.7	2.2	1.6	0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	<0.1	4.7
NNE	22.5°	0.6	1.8	0.7	0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	-	3.2
NE	45.0°	0.8	2.1	0.7	0.2	<0.1	-	-	-	-	-	3.8
ENE	67.5°	0.8	2.8	2.1	0.4	0.1	-	-	-	-	-	6.3
E	90.0°	1.4	4.2	3.6	2.5	0.2	-	-	-	-	-	12.0
ESE	112.5°	0.7	2.7	3.0	1.5	0.0	0.1	-	-	-	-	8.3
SE	135.0°	0.6	2.2	2.0	0.3	<0.1	-	-	-	-	-	5.1
SSE	157.5°	0.7	2.1	1.4	0.1	-	-	-	-	-	-	4.3
S	180.0°	1.0	2.9	3.4	1.0	<0.1	<0.1	-	-	-	-	8.3
SSW	202.5°	0.7	2.3	2.7	0.9	0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	6.8
SW	225.0°	0.7	2.8	2.3	1.2	0.2	<0.1	<0.1	-	-	-	7.2
WSW	247.5°	0.6	2.4	2.8	1.1	0.3	<0.1	<0.1	-	-	-	7.4
W	270.0°	1.0	2.3	3.9	1.1	0.3	<0.1	<0.1	-	-	-	8.6
WNW	292.5°	0.7	1.8	2.1	0.8	0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	5.6
column totals		12.0	37.5	36.1	12.1	1.8	0.3	0.1	-	-	<0.1	100

Tab. 3-1 Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für Windgeschwindigkeit und -richtung am UFS Deutsche Bucht.

Table 3-1 Censored percent frequency distribution of wind speed and direction at UFS-DB.

wave direction	wave direction	significant wave height bins (m)										row totals
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	
NW	315.0°	2.6	2.0	0.8	0.5	0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	6.0
NNW	337.5°	2.1	1.9	0.7	<0.1	-	-	<0.1	-	-	-	4.8
N	0.0°	2.2	0.8	<0.1	<0.1	-	<0.1	-	-	<0.1	-	3.2
NNE	22.5°	1.6	0.5	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-	2.3
NE	45.0°	2.6	0.5	0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	-	-	3.3
ENE	67.5°	4.5	1.3	0.3	-	-	-	-	-	-	-	6.1
E	90.0°	3.9	2.4	1.1	0.2	-	-	-	-	-	-	7.6
ESE	112.5°	4.2	3.6	2.2	0.5	-	-	-	-	-	-	10.5
SE	135.0°	3.8	0.9	0.1	-	-	-	-	-	-	-	4.8
SSE	157.5°	2.9	0.8	<0.1	-	-	-	-	-	-	-	3.8
S	180.0°	3.0	1.0	0.1	-	-	-	-	-	-	-	4.1
SSW	202.5°	4.1	2.1	0.6	0.1	-	-	-	-	-	-	6.9
SW	225.0°	4.3	2.5	1.8	0.4	-	0.1	-	-	-	-	9.2
WSW	247.5°	5.2	2.4	1.8	1.6	0.7	0.1	<0.1	-	-	<0.1	11.9
W	270.0°	3.2	2.9	1.6	0.6	0.5	0.3	<0.1	0.1	-	-	9.2
WNW	292.5°	3.2	1.2	0.5	0.7	0.2	0.3	0.1	0.1	-	-	6.3
column totals		53.4	26.8	12.0	4.8	1.6	0.9	0.3	0.2	<0.1	<0.1	100

Tab. 3-2 Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für die signifikante Wellenhöhe (swh) und Seegangsrichtung am UFS Deutsche Bucht (Modelldaten). Zustände swh=0 (15% der Zeit) blieben unberücksichtigt.

Table 3-2 Censored percent frequency distribution of significant wave height (swh) and wave direction at UFS-DB (model data). States swh=0 (15% of the time) not included.

Februar auf 7 m/s ab. Im März erreicht die Geschwindigkeit ein lokales Maximum von 8 m/s, um danach rasch abzufallen und zwischen Mai und August auf einem flachen Niveau von etwa 6 m/s zu verweilen, bevor sie ab Mitte August ebenso rasch auf das Maximum im Spätherbst ansteigt (BSH 1994). Dieser auf Monatsmitteln basierende Jahresgang ist auf die Höhe der Windsee (swh) übertragbar. In 2002 wich die zeitliche Entwicklung von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe (Abb. 3-5) jedoch vom klimatologischen Jahresgang ab. Die höchsten Windgeschwindigkeiten traten nicht im November, sondern im Januar und Februar auf (vgl. auch *Abschnitt 2.1.2*).

swh bins (m)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	total
% frequency	58.5	31.1	8.0	1.9	0.4	0.1	<0.1	-	-	-	100

Tab. 3-3 Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (swh) bei Helgoland (Waverider-Daten, keine Seegangsrichtung).

Table 3-3 Percent frequency distribution of significant wave height (swh) near Helgoland (Waverider data, no wave direction sensor).

Der Waverider vor Helgoland misst nur die Wellenhöhe, nicht die Seegangsrichtung. Im Vergleich zur Position UFS-DB sind die Wellenhöhen bei Helgoland im Mittel geringer (siehe *Tab. 3-3*). Die südlich der Insel liegende Boje ist insbesondere bei nördlichen Winden durch Insel und Düne geschützt. Ferner kommt es durch die starken topographischen Gradienten im Bereich des Helgoländer Lochs und des Helgoländer Riffs zu Beugungs- und Brechungsvorgängen. Vergleichsmessungen, die in den letzten Jahren an verschiedenen Positionen in der Deutschen Bucht durchgeführt wurden, zeigten stets eine gute Übereinstimmung zwischen Seegangmodell und Beobachtung (Klein et al. 1999).

3.2 Oberflächentemperatur (SST)

3.2.1 Strahlung auf Norderney

Die lokale Wassertemperatur ergibt sich aus der Strahlungsbilanz und den fühlbaren und latenten Wärmeflüssen an der Grenzfläche Wasser-Luft (wenn dynamische Prozesse vernachlässigbar sind). Eine wichtige Komponente der Oberflächenenergiebilanz ist die Globalstrahlung, d.h. die Summe der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung. Messungen der Globalstrahlung werden vom Deutschen Wetterdienst auf Norderney durchgeführt und freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Die Globalstrahlung in 2002 lag im Winter und Herbst oberhalb des klimatologischen Jahresgangs (Basisperiode 1971-2000), während Frühjahr und insbesondere Sommer durch unternormale Einstrahlung gekennzeichnet waren (*Abb. 3-6*). Die extreme Warmanomalie, die in der Deutschen Bucht und der Nordsee insgesamt im August bereits voll ausgebildet war (*Abb. 2-8*), lässt sich demzufolge nicht durch eine entsprechende Einstrahlungsanomalie erklären. Allerdings scheint die Persistenz dieser Temperaturanomalie mit dem deutlichen Überschuss an Globalstrahlung ab der zweiten Augusthälfte und im September im Zusammenhang zu stehen.

Für weitreichendere Aussagen wäre zunächst die Repräsentativität der Station Norderney für die Region Deutsche Bucht zu überprüfen. Ein weiteres Manko stellen bislang fehlende Messungen zu den übrigen Komponenten der Energiebilanz dar, ohne die der Energieaustausch an der Meeresoberfläche kaum nachvollziehbar ist.

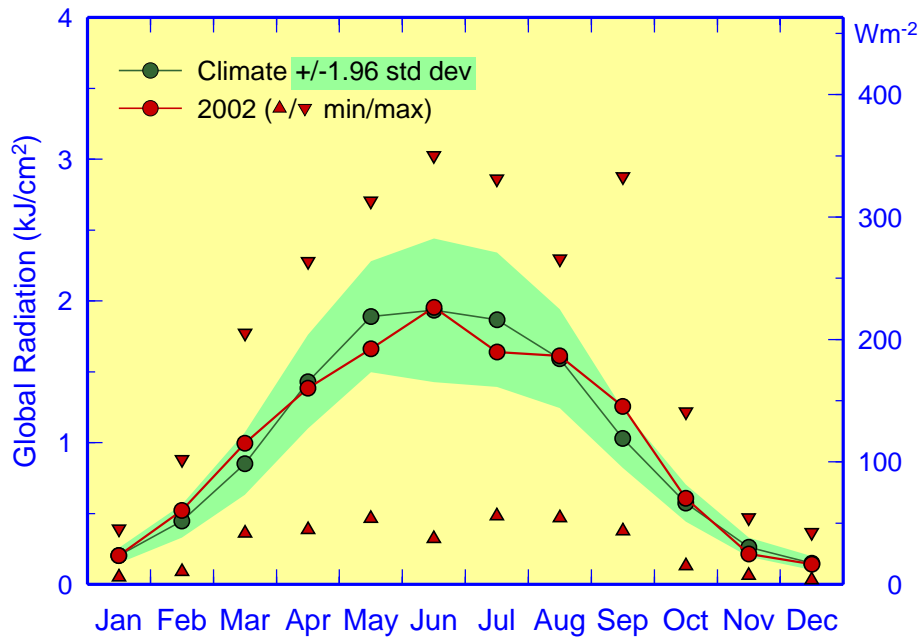


Abb. 3-6 Jahresgang 2002 der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971-2000) mit 95%-Band (± 1.96 zwischenjährige Standardabweichungen). 1 kJcm^{-2} entspricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm^{-2} .

Fig. 3-6 Seasonal cycle in 2002 of monthly averaged daily global radiation totals at Norderney together with intramonthly extremes, 1971-2000 base period monthly means, and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). 1 kJcm^{-2} is equivalent to a radiation flux density of 116 Wm^{-2} .

3.2.2 Helgoland SST 2002

Neben der nunmehr 35-jährigen Zeitserie der Nordsee SST (die als Flächenmittel aus den digitalen Analysen des Nordseetemperaturfeldes abgeleitet wurde, vgl. *Abschnitt 2.3*) gibt es einige wenige lange Temperaturreihen von ortsfesten Beobachtungen aus der Nordsee. Dazu zählen die Zeitreihe von Den Helder, Niederlande, sowie die Temperaturmessungen der ehemaligen Biologischen Anstalt Helgoland (jetzt AWI), die in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts begannen und heute noch fortgeführt werden. Obwohl mehrfache Unterbrechungen zu Datenlücken in der Helgoländer Reihe führten, konnten die Monatsmitteltemperaturen mit Hilfe von Beobachtungen aus der näheren Umgebung (Feuerschiffe) rekonstruiert werden, so dass die Helgoländer Reihe die Temperaturentwicklung in der südöstlichen Nordsee jetzt über mehr als 130 Jahre vollständig dokumentiert (Becker et al. 1997).

Der Jahresgang der Oberflächentemperatur in 2002 ist in *Abb. 3-7* dargestellt. Die Temperatur lag fast ganzjährig deutlich, im Hochsommer und Frühherbst signifikant, über den klimatologischen Mittelwerten. Erst im Spätherbst trat eine Normalisierung ein. Dieser Verlauf unterscheidet sich kaum von der Temperaturentwicklung an den MARNET-Stationen und entspricht dem Jahresgang der Mitteltemperatur für die gesamte Nordsee (vgl. *Abb. 2-7*). Die Jahresmitteltemperaturen bei Helgoland und für die Nordsee stimmen mit $11.0 \text{ }^\circ\text{C}$ identisch überein. Das Jahr 2002 war damit nach 1990 ($11.1 \text{ }^\circ\text{C}$) für Helgoland das zweitwärmste Jahr seit Beginn der Messungen vor 130 Jahren.

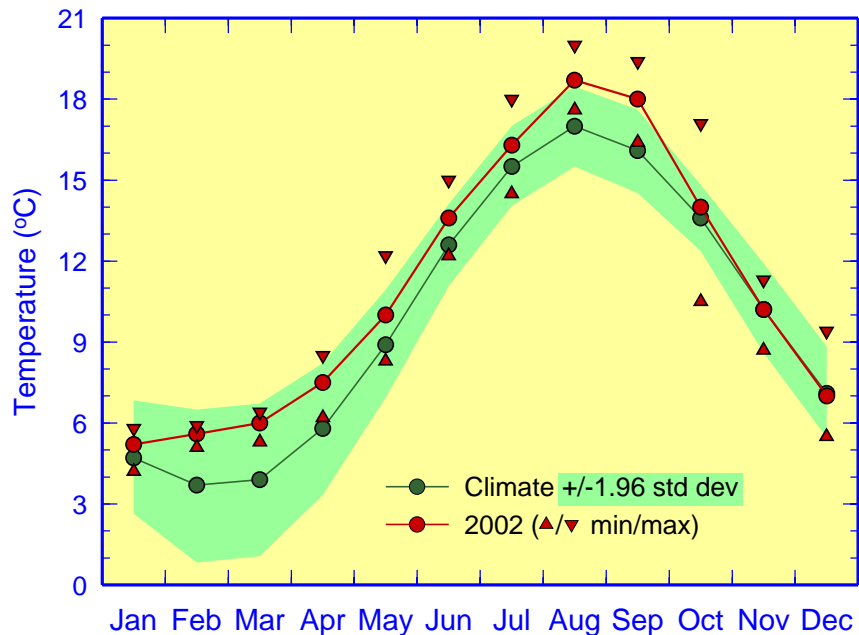


Abb. 3-7 Jahresgang 2002 der monatlich gemittelten Oberflächentemperatur bei Helgoland-Reede mit Klimatologie (1971-2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). (Quelle: BAH, BSH.)

Fig. 3-7 Seasonal cycle 2002 of monthly mean SST at Helgoland-Reede together with 1971-2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). (Source: BAH, BSH.)

3.2.3 Temperaturentwicklung seit 1873 und NAO

Die historische Temperaturentwicklung ist in Abb. 3-8 für den Gesamtzeitraum 1873-2002 zusammengefasst. Die hohe Variabilität auf saisonalen, zwischenjährigen und dekadischen Zeitskalen ist gut erkennbar. Auffällig sind sehr kalte Zeitabschnitte zwischen 1888 und 1895, in den 1920er Jahren, Anfang der 1940er Jahre (extreme Kriegswinter) und zu Beginn der 1960er Jahre. Längere Warmphasen in den 1930er Jahren, Mitte der 1970er und beginnend um 1990 sind ebenfalls evident (vgl. auch Abb. 2-11). Die Helgoland-Reihe zeigt insbesondere, dass die Winter in den letzten 15 Jahren milder geworden sind und die *maritime Vegetationsperiode* analog zu den Bedingungen in Mitteleuropa sich verlängert hat.

Die Temperaturreihe enthält einen linearen Trend von etwa 0.6 bis 0.8 °C über den Gesamtzeitraum (Becker et al. 1997). Die Aussagekraft linearer Trends ist jedoch wegen der hohen dekadischen Variabilität sehr begrenzt oder sogar irreführend (vgl. Abschnitt 2.3.4). Eine Wavelet-Analyse der Jahresmitteltemperaturen ergab, dass ein signifikanter 8-jähriger Quasizyklus erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts einsetzt (Frohse, pers. Mitteilung). Das gleiche Ergebnis wurde für den Winter NAO-Index von Loewe und Koslowski (1998) festgestellt.

Beispielhaft für die wesentlich auf das Winterhalbjahr beschränkte Bedeutung der NAO in Nordwesteuropa zeigt Abb. 3-9 *rollende Korrelationen* mit den monatlichen Oberflächentemperaturen von Helgoland im gemeinsamen Zeitraum 1879-2002. Die Korrelationen wurden dabei monatsweise, also für die Zeitreihen der Januare, Februare usw., bestimmt – allerdings nicht für den Gesamtzeitraum, sondern für überlappende (*rollende*) Zeitfenster von 15 Jahren – und jeweils dem zentralen Jahr des Fensters zugeordnet. Die Darstellung beginnt deshalb 1886 und endet 1995.

Aus *Abschnitt 2.1.1* ist bekannt, dass die NAO im Winter in Nordwesteuropa die Rolle eines Moderators des Kontinentalklimas einnimmt. Die Temperaturverhältnisse sind hier umso maritimer, je stärker Warmluftadvektion vom Nordatlantik zur Geltung kommt (NAO⁺), und umso *sibirischer* je geringer diese ausfällt (NAO⁻). Dieser Zusammenhang muss sich in einer positiven NAO-SST Korrelation niederschlagen, und wird in *Abb. 3-9* erwartungsgemäß wiedergegeben.

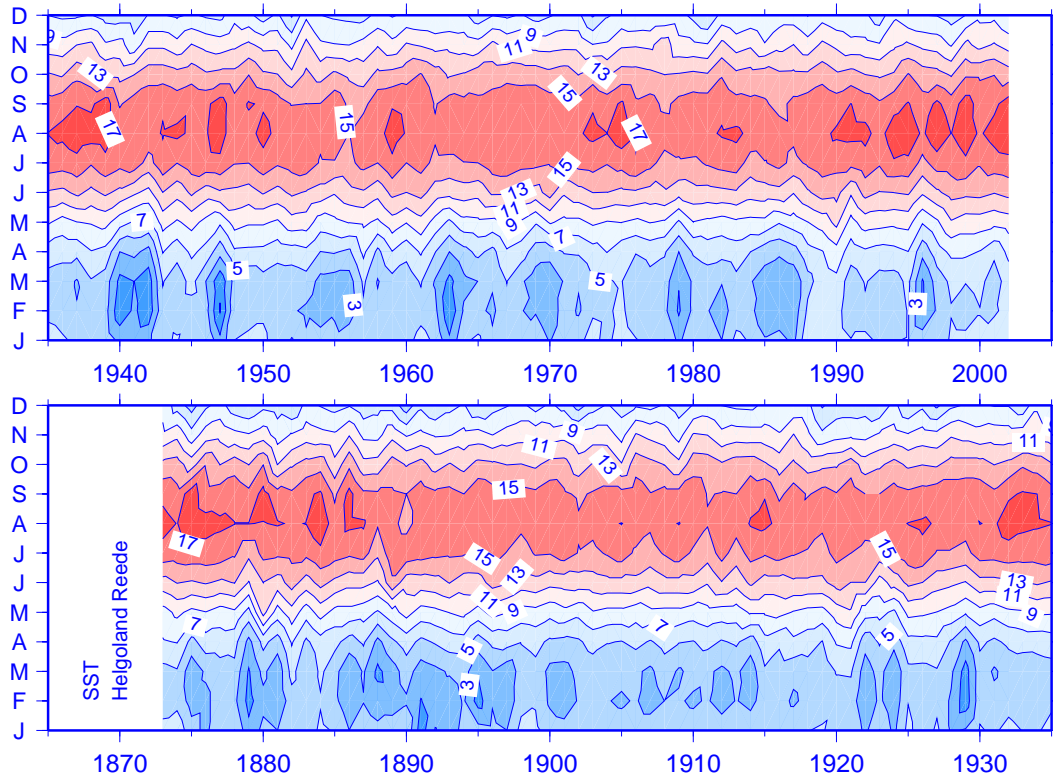


Abb. 3-8 Pseudo-2D Zeitserie der monatlich gemittelten Oberflächentemperatur (°C) bei Helgoland-Reede seit 1873. (Quelle: BAH, BSH.)

Fig. 3-8 Pseudo-2D time series of monthly mean SST (°C) since 1873 at Helgoland-Reede. (Source: BAH, BSH.)

Im Sommer, nach dem Vorzeichenwechsel im Temperaturkontrast Ozean-Kontinent, sollte sich an der Moderatorrolle der NAO nichts ändern, denn verstärkte (verminderte) Kaltluftadvektion vom Nordatlantik für NAO⁺ (NAO⁻) Zustände müsste jetzt kühlere (sehr warme) Temperaturbedingungen zur Folge haben und in einer negativen NAO-SST Korrelation zum Ausdruck kommen. Ein derartiger Zusammenhang ist in *Abb. 3-9* allenfalls ansatzweise im Mai der 1960er Jahre erkennbar und demnach statistisch nicht nachweisbar.

Dies bedeutet nicht, dass die sommerlichen Temperaturen nicht maritim moderat sind, sondern dass das maritime Sommerklima nicht NAO-gesteuert ist. Die Ursache hierfür besteht in der diffusen Ausprägung des Islandtiefs in dieser Jahreszeit, die sich wiederum aus gegenüber dem Winterhalbjahr erheblich reduzierten meridionalen Temperaturgegensätzen über dem Nordatlantik erklärt. Die atmosphärische Zirkulation ist dann zu schwach, um eine spürbare Fernwirkung (tele-connection) in der Region Nordsee zu erzeugen. Die vermutete negative Korrelation zwischen Westströmung und Temperatur im Sommer lässt sich jedoch für weiter östlich gelegene Zonalindizes – wie etwa die Druckdifferenz Paris-London – eindeutig nachweisen (Slonosky et al. 2001).

Aus Abb. 3-9 ist ferner ersichtlich, dass die NAO-SST Korrelation selbst im Winter keineswegs stationär, abschnittsweise nur marginal signifikant ist und zu Beginn des 20. Jahrhunderts sogar das Vorzeichen wechselt. Auch dieser Umstand sollte dazu Anlass geben, die Bedeutung der NAO nicht über zu bewerten. Die NAO steht in Konkurrenz mit anderen Zirkulationsformen, die ihre Bedeutung offensichtlich qualifizieren können.

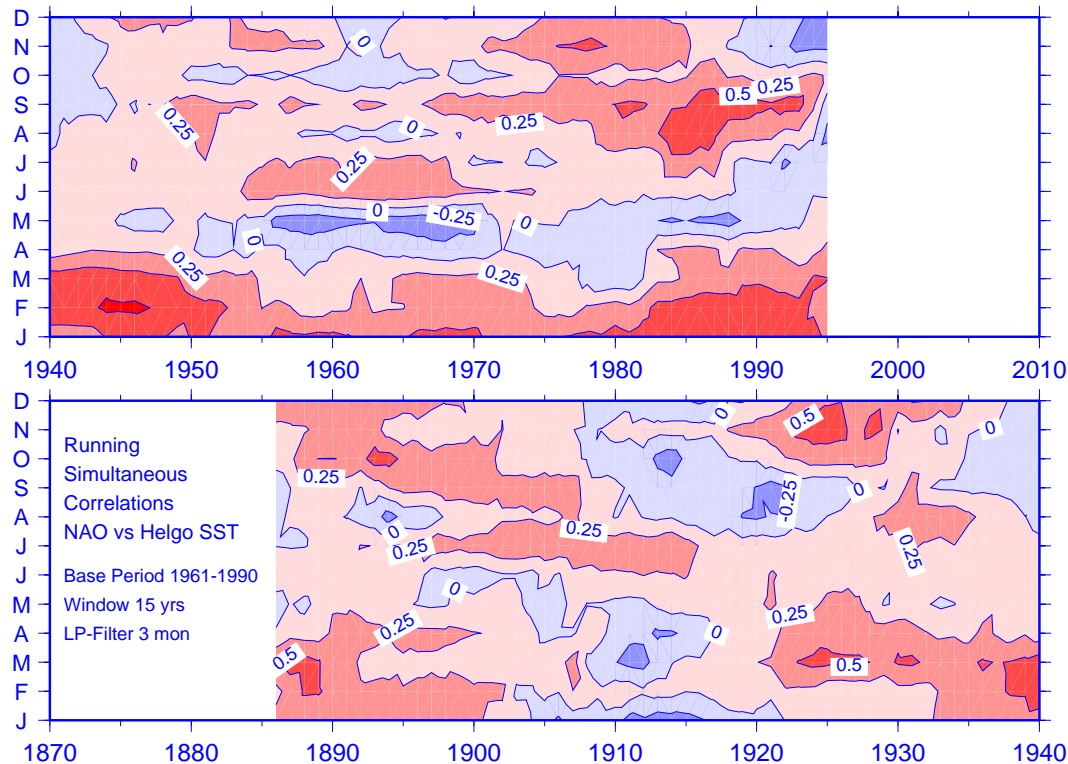


Abb. 3-9 Rollende Korrelationen zwischen NAO und Helgoland-Reede SST.

Fig. 3-9 Rolling correlations NAO versus Helgoland-Reede SST.

Interessanterweise scheinen die Korrelationsmaxima im Winter einem 50- bis 60-jährigen Zyklus zu folgen. Eine ähnliche Quasi-Periodizität zeigt die SST im Hochsommer (vgl. Abb. 3-8). Ein möglicher Zusammenhang mit Zyklen gleicher Länge, die sich in Modellstudien der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik ergaben, sei dahingestellt (Slonosky et al. 2001).

3.3 Oberflächensalzgehalt (SSS)

Elbe und Weser, in geringeren Maße auch der Rhein, beeinflussen die Salzgehaltsverteilung der Deutschen Bucht und bestimmen durch den Eintrag von Nährsalzen (Phosphat, Nitrat, Silikat) sowie von Schadstoffen die ökologischen Bedingungen in diesem Seegebiet.

In einer Untersuchung der thermohalinen Schichtung der Deutschen Bucht (Frey 1990) bildet sich bei der Darstellung der halinen Schichtung deutlich die mittlere Lage der Elbwasserfahne ab. Danach liegt Helgoland im Mittel in der Hauptachse des Elbeausstroms. Neuere Auswertungen der TUVAS-Daten (Frohse, unveröffentl. Bericht) zeigen jedoch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Lage der Frontalzone zwischen dem *river plume water* und dem Wasser der Deutschen Bucht. Die Ursachen für die Verlagerung der Frontalzone sind neben der Abflussmenge der Elbe, die lokale meteorologische Situation, die Gezeiten und das großräumige Strömungsmuster in der Deutschen Bucht. Die Frontalzone schwenkt mit ihrer westlichen Begrenzung über Helgoland nach Westen und zurück, so dass scharfe,

sprunghafte Änderungen des Salzgehaltes beobachtet werden. Frontalzonen sind dynamisch instabil; Fronten mäandrieren, was schließlich zur Ablösung mesoskaliger Wirbel führt. Diese dynamischen Prozesse bestimmen in der Deutschen Bucht insbesondere die Variabilität des Salzgehaltes.

In der Deutschen Bucht spiegelt die Salzgehaltsverteilung im Winter (vgl. Abb. 2-12) die noch auf die innere Deutsche Bucht beschränkte, erhöhte Süßwasserzufuhr des Februar wider ($S < 30$). Bei der Sommeraufnahme (noch vor dem Auguthochwasser) haben sich die erhöhten Süßwassereinträge durch die kontinentalen Flüsse und durch den Ausstrom der Ostsee auf nahezu die gesamte östliche Hälfte der Nordsee ausgebreitet. Von besonderem Interesse ist in 2002 das *Jahrhunderthochwasser* der Elbe und seine Auswirkung auf die Deutsche Bucht.

3.3.1 Helgoland SSS 2002

Der saisonale Zyklus des Salzgehalts bei Helgoland im Jahr 2002 ist in Abb. 3-10 dem klimatologischen Jahresgang (1971-2000, grün) gegenübergestellt. Letzterer zeigt deutlich den üblichen Rückgang im Salzgehalt durch erhöhte Flusswassereinträge im April und Mai (Frühjahrs Hochwasser) und ein Wiederansteigen ab September. Die Salzgehaltsentwicklung in 2002 zeichnete sich durch einen hierzu vollkommen konträren Verlauf aus.

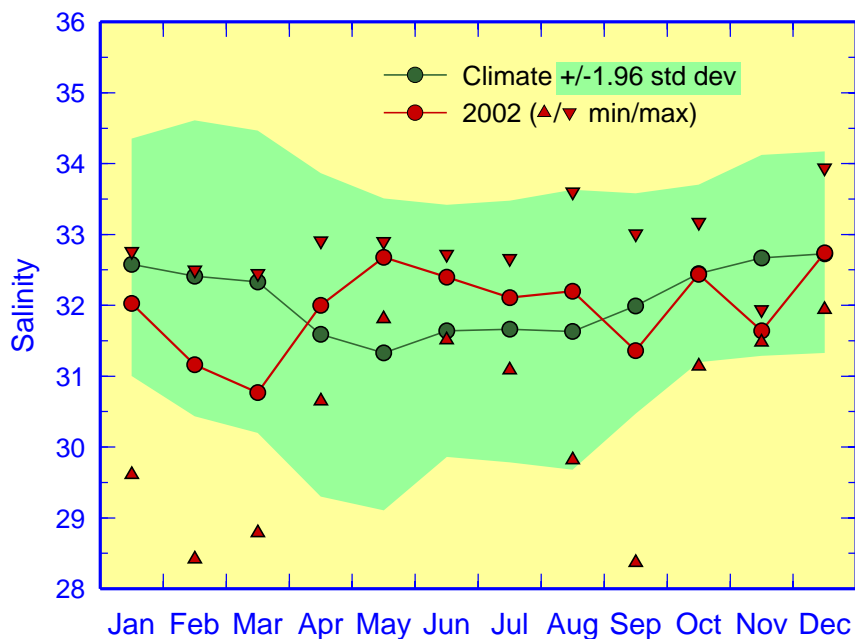


Abb. 3-10 Jahresgang 2002 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971-2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). (Quelle: BAH, BSH.)

Fig. 3-10 Seasonal cycle 2002 of monthly mean SSS at Helgoland-Reede together with monthly extremes, 1971-2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). (Source: BAH, BSH.)

Durch den milden Winter und hohe Niederschläge in Form von Regen trat bereits im Februar und März das normalerweise erst im April und Mai zu beobachtende saisonale Abflussmaximum ein (vgl. Abb. 3-16). Entsprechend verfrüht, nämlich ebenfalls im März, erreichte der Salzgehalt bei Helgoland Reede sein Jahresminimum. Aufgrund der ausgebliebenen Früh-

jahrsschmelze bzw. des sofortigen, vorzeitigen Abflusses des winterlichen Regenwassers konnte der Salzgehalt bei Helgoland schon zum Mai auf das Jahresmaximum ansteigen. Im August wurde ein sekundäres Maximum erreicht, während September und November erneut die hohen Süßwassereinträge durch die Elbe widerspiegeln.

Dauerregistrierungen zeigen, dass das Elbehochwasser am 4. September 2002 Helgoland und am 20. September die Station *Deutsche Bucht* erreicht hat. Der hohe Süßwassereintrag in die Deutsche Bucht ist demnach nicht nur auf die *Jahrhundertflut* im August 2002 (maximal etwa 3500 m³/s), sondern auch auf die hohen Abflüsse im Februar, März und November, Dezember zurückzuführen. (s. *Abb. 3-16* und Nies et al. 2003a).

3.3.2 SSS-Entwicklung seit 1873

Die werktäglichen Oberflächenbeobachtungen der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH / AWI) schließen auch Salzgehaltsmessungen ein, die wie die Messungen der Oberflächentemperatur bis 1873 zurückreichen.

Aufgrund der hohen Variabilität des Salzgehaltes bei Helgoland (*Abb. 3-11*) und wegen methodischer Probleme bei der Bestimmung des Salzgehaltes zu Beginn der Messreihe sollten langfristige Trendaussagen unterbleiben. Es gibt keine deutlichen Anzeichen für eine langfristige Veränderung der Salzgehaltsbedingungen bei Helgoland und in der Deutschen Bucht, wenn auch die Variabilität nach 1960 vermutlich infolge der Elbeausbaumaßnahmen zugenommen hat.

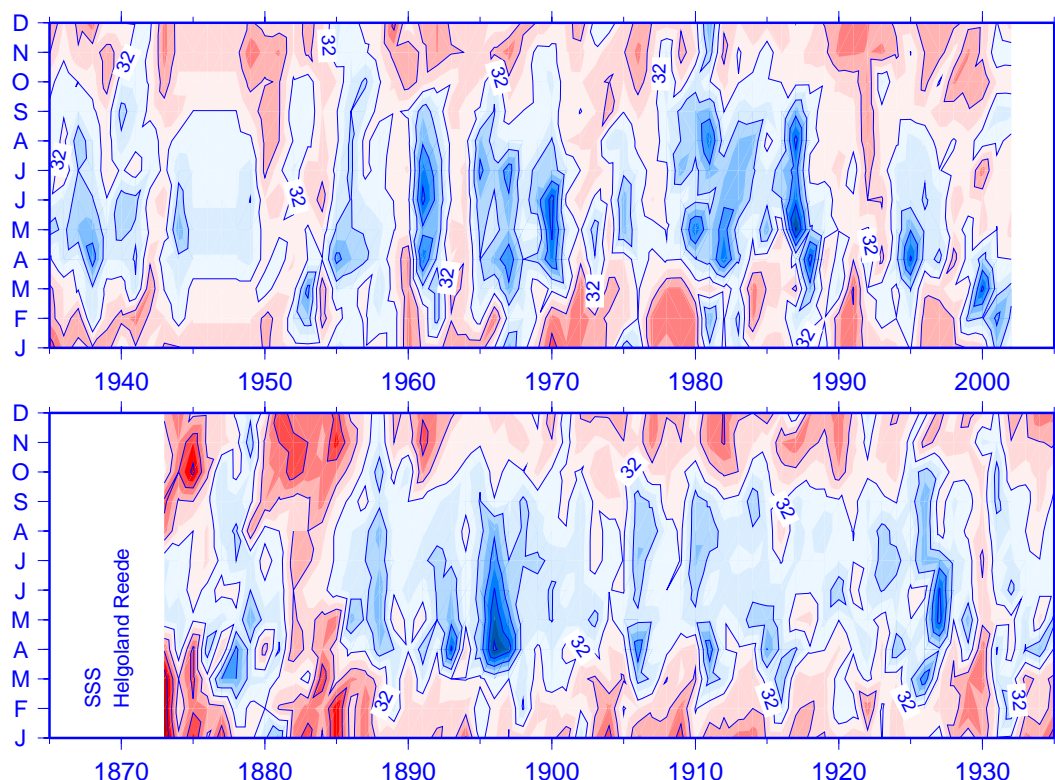


Abb. 3-11 Pseudo-2D Zeitserie des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts bei Helgoland Reede seit 1873. Konturintervall: 1, Farbintervall: 0.5. (Quelle: BAH, BSH.)

Fig. 3-11 Pseudo-2D time series of monthly mean SSS since 1973 at Helgoland-Reede. Contour interval: 1, color spacing 0.5. (Source: BAH, BSH.)

Obwohl eine *Regimeanalyse* wie für die Oberflächentemperatur (vgl. Abschnitt 2.3.4 und Abb. 2-11) bislang nicht durchgeführt wurde, würde eine solche wohl (wenigstens) für die vergangenen 30 Jahre zu ähnlichen Ergebnissen führen, nämlich dergestalt, dass die Warm- und Kaltphasen in diesem Zeitraum mit salzreichen und salzarmen Phasen korrespondieren. Besonders augenfällig ist das abrupte Ende der sehr frischen Dekade der 1980er Jahre, dem extrem salzarmen Bedingungen unmittelbar vorausgingen, und das zeitgleich mit dem spontanen Übergang zur gegenwärtigen Warmphase eintrat. Die seither andauernde salzreiche Phase zeichnet sich besonders durch anomal hohe Werte im Sommerhalbjahr aus. Darüber hinaus fällt eine graduelle Vorverlegung des saisonalen Minimums vom Frühjahr in den Winter auf.

In welchem Umfang sich diese Besonderheiten aus der NAO erklären lassen, muss an dieser Stelle unbeantwortet bleiben. Inwieweit sich die sog. *Great Salinity Anomaly* (Dickson et al. 1988) in der geschilderten Entwicklung manifestiert, ist eine mit der vorausgehenden in Zusammenhang stehende, ebenso interessante Frage, zumal der Übergang zum salzarmen Regime um 1976 sich etwa zeitgleich mit der Annäherung der GSA an den europäischen Kontinent ereignete.

3.4 Temperaturschichtung an MARNET-Stationen

In der Deutschen Bucht bestand das Marine Umweltmessnetz des BSH (*MARNET*) im Jahr 2002 aus den drei Stationen *UFS Deutsche Bucht*, *TW Ems* und *NSB II*, deren Positionen aus Abb. 2-1 ersichtlich sind. Auf diesen unbemannten Stationen wurden u. a. Temperatur und Salzgehalt in unterschiedlichen Tiefenniveaus stündlich gemessen und via Satellit in Echtzeit an das BSH übermittelt. Wegen technischer Probleme (Biofouling, Zusammenbruch der Stromversorgung und/oder der Kommunikation, etc.) waren die Zeitreihen im Jahr 2002 lückenhaft. Zusätzlich zu den MARNET-Daten liegen werktägliche Oberflächenbeobachtungen der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH/AWI) vor.

Die Deutsche Bucht lässt sich als relativ homogenes Gebiet bezüglich langfristiger Veränderungen durch die Helgoländer Reihe beschreiben (Becker und Kohnke 1975). Zur Beschreibung kurzfristiger Ereignisse, wie etwa die Ausbreitung des Elbehochwassers, sind die MARNET-Daten unverzichtbar, zumal sie im Gegensatz zur Helgoländer Reihe auch Informationen zur Vertikalverteilung von Temperatur und Salzgehalt bieten. Der Wegfall der MARNET-Station *UFS ELBE 1* nach der Havarie im Jahr 1999 ist in diesem Zusammenhang ein schwerer Verlust, denn diese Station registrierte unmittelbar den Eintrag durch die Elbe in die Deutsche Bucht.

Dargestellt werden die Isoplethen der Temperatur an den Stationen Deutsche Bucht, TW EMS und NSB II (Abb. 3-12). Die Jahresminima und –maxima an den drei Stationen liegen zwischen 5.1 und 6.1 °C sowie 20.1 und 20.8 °C. Die Temperaturschichtung setzt an allen Stationen Anfang Mai ein und wird ohne große zeitliche Unterschiede im September bis Oktober abgebaut. Insgesamt ist die thermische Schichtung an den MARNET-Stationen im Jahr 2002 aber relativ schwach.

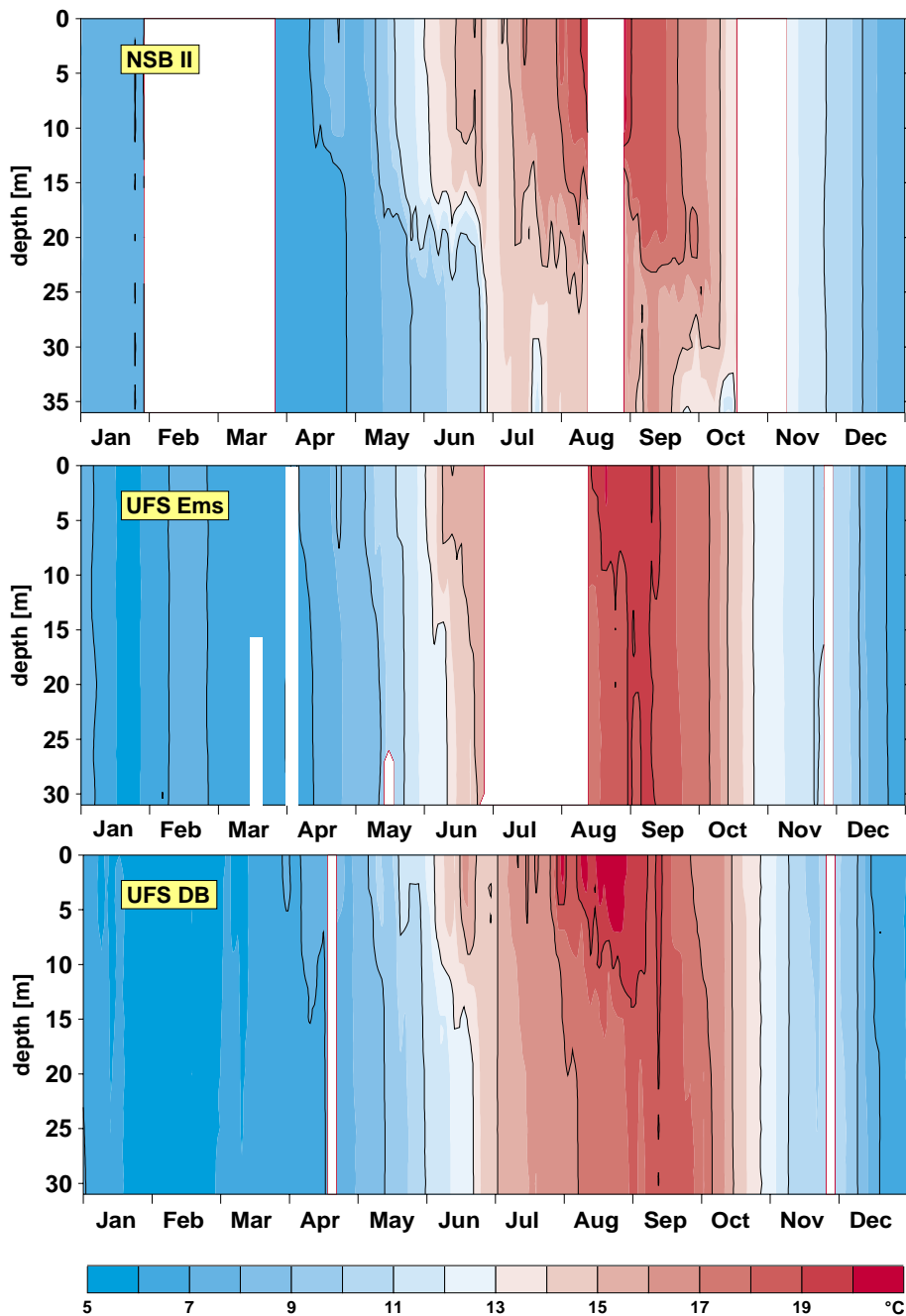


Abb. 3-12 Temperaturschichtung (°C) im Jahr 2002 an den MARNET-Stationen Deutsche Bucht, Ems und NSB II. Sensortiefen: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.

Fig. 3-12 Temperature stratification (°C) in 2002 at MARNET stations Deutsche Bucht, Ems and NSB II. Sensor depths: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.

3.5 Nährsalze

Die Betrachtung der Nährsalze in der Deutschen Bucht beschränkt sich auf die winterlichen Verhältnisse, wenn ein durch biologische Prozesse weitgehend ungestörter starker Zusammenhang zu den hydrographischen Bedingungen besteht. Dazu werden Ergebnisse einer Routine-Überwachungsfahrt und Zeitreihen von der MARNET Station *Deutsche Bucht* präsentiert. Für die Nährsalzsituation insbesondere des Sommers wird auf den *Hochwasserbericht* (Nies et al. 2003a) verwiesen.

3.5.1 FS Gauß Winterreise 377

Mit der Überwachungsfahrt des FS Gauß (Reise 377 vom 14. - 23. Januar) wurden vom BSH Daten zu den Verteilungen von Nährstoffen in der Deutschen Bucht im Winter 2002 erhoben. Da das Wasser der Jahreszeit entsprechend ungeschichtet war, wurden an 30 Stationen lediglich 2 Tiefen beprobt und unmittelbar analysiert.

Die Nährstoffverteilungen von Phosphat, Silikat und Stickstoff (vgl. *Abb. 2-16* bis *Abb. 2-18*) ergeben sich aus dem Zusammenspiel der Eintragsstärke der Flüsse, der Richtung des Nettotransports und der fortschreitenden Verdünnung. Diese Einflussgrößen integrieren sich in der Salzgehaltsverteilung (*Abb. 2-12*), welche deshalb in mittelbarem engen Zusammenhang zu den Nährstoffverteilungen steht.

Dieser Zusammenhang kommt in einer starken inversen linearen Korrelation zum Ausdruck und lässt sich für zwischenjährige Vergleiche und Trendabschätzungen nutzen (Körner und Weichart 1992). Lineare Regression der Konzentrationen des jeweiligen Nährstoffs auf die zugehörigen Salzgehaltsmessungen liefert verschiedene Regressionsgeraden für die jährlichen Überwachungsfahrten im Winter. Für eine durch ihren Salzgehalt *S* charakterisierte Wassermasse ergibt sich die typische Nährstoffkonzentration aus der Regressionsgeraden als Ordinatenwert zu *S*.

Bei einem Salzgehalt von 30, also in der küstennahen Zone, liegt die Phosphatkonzentration 2002 bei $0.93 \mu\text{mol/l}$ mit einer Schwankungsbreite von $\pm 0.24 \mu\text{mol/l}$. Der Phosphatwert lag 1978 mit $2.54 \pm 0.52 \mu\text{mol/l}$ mehr als doppelt so hoch und erreichte im weiteren Verlauf etwa 1995/97 sein Minimum. Seither bewegen sich die Phosphat-Konzentrationen ohne erkennbaren Trend auf niedrigem Niveau und innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite. Der Silikatwert beträgt $24 \pm 5 \mu\text{mol/l}$, der gebundene Stickstoff liegt bei $34 \pm 4 \mu\text{mol/l}$. Eine Darstellung der zwischenjährigen Variabilität der Nährsalzkonzentrationen im Winter findet man bei Nies et al. 2003a (*Abb. 29 a.a.O.*).

In weiten Teilen der Deutschen Bucht herrscht ein Salzgehalt um 33. Hier sind alle Nährstoffkonzentrationen nur noch halb so hoch wie in der Küstenzone. Die Phosphatkonzentration beträgt gegenwärtig $0.56 \pm 0.24 \mu\text{mol/l}$. Die Silikatwerte liegen aktuell bei $8 \pm 5 \mu\text{mol/l}$. Der gebundene Stickstoff ergibt sich derzeit zu $14 \pm 4 \mu\text{mol/l}$.

Auffällig ist bei den Silikatkonzentrationen eine Schwingung von 1990 bis 1996, die sich von 1996 bis 2002 wiederholt (Nies et al. 2003a). Sie zeigt sich bei *S*=33 und auch bei *S*=34. Ein ähnliches Verhalten zeigen die Konzentrationen von Nitrat/Nitrit.

Eine Zusammenfassung der aktuellen Ergebnisse für *Kontinentales Küstenwasser* und *Wasser der Deutschen Bucht* bietet *Tab. 3-4*.

Gauß 377	Phosphate	Silicate	Nitrate & Nitrite
S=30	0.93 ± 0.24	24 ± 5	34 ± 4
S=33	0.56 ± 0.24	8 ± 5	14 ± 4

Tab. 3-4 Nährsalzkonzentrationen in $\mu\text{mol/l}$ für charakteristische Wassermassen im Januar 2002.

Table 3-4 Nutrient concentrations ($\mu\text{mol/l}$) for characteristic water masses in January 2002.

3.5.2 MARNET Station *Deutsche Bucht*

Seit 2001 werden auf der MARNET-Station Deutsche Bucht (54° 10' N, 07° 27' E; vgl. Abb. 2-1) auch Nährstoffe quasi-kontinuierlich gemessen. Die Technologie wurde im Rahmen der BMBF-Projekte CANVAS und SAMSON entwickelt (Nies et al. 2003b).

Abb. 3-13 zeigt die täglichen Nährstoffkonzentrationen an der Station *Deutsche Bucht* für Phosphat, Silikat und Nitrat/Nitrit in $\mu\text{mol/l}$ zusammen mit dem Salzgehalt in 6 m Tiefe.

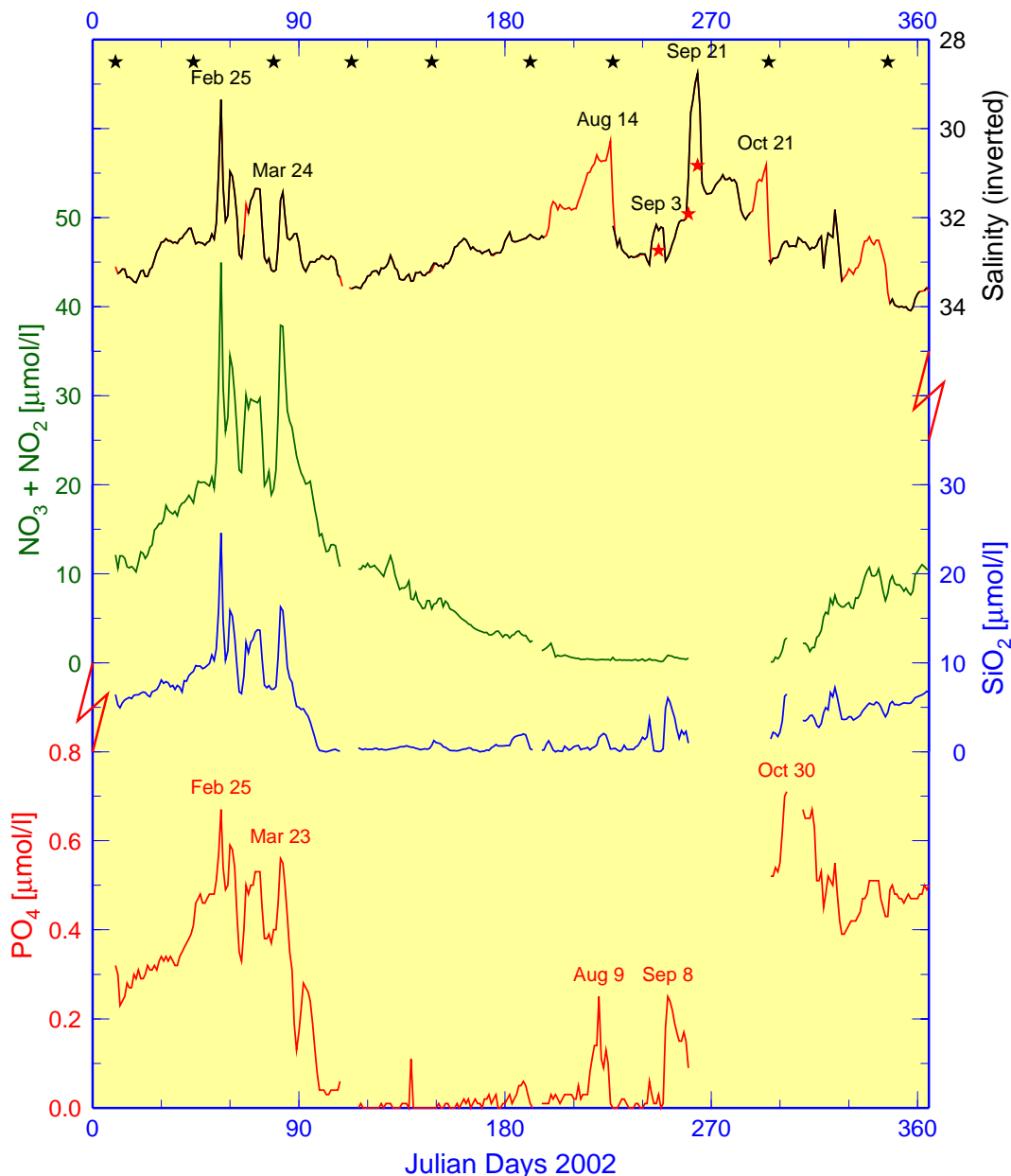


Abb. 3-13 Nährsalzkonzentrationen (Phosphat, Silikat, Nitrat & Nitrit in $\mu\text{mol/l}$) und Salzgehalt (invertiert) an der MARNET Station *Deutsche Bucht*. Datumsangaben für Maxima (Nährstoffe) und Minima (Salgehalt), Sterne für Wartungstermine (schwarz) oder Salzgehaltsvergleichsmessungen mit FS Gauß (rot).

Fig. 3-13 Nutrient concentrations (phosphate, silicate, nitrate & nitrite in $\mu\text{mol/l}$) and salinity (inverted) at MARNET Station *Deutsche Bucht*. Datings indicate maxima (nutrients) and minima (salinity), stars maintenance work (black) or reference measurements of RV Gauß (red).

Die Tagesmittelwerte der Nährstoffe (des Salzgehalts) wurden aus mindestens 20 (14) Stundenwerten berechnet wurden. Aufgrund von massiven technischen Problemen sind die Zeitreihen noch lückenhaft. Sie decken zwar den Jahresgang weitgehend ab, geben aber ausgerechnet über die Auswirkung des Augusthochwassers kaum Aufschluss. Die roten Abschnitte der Salzgehaltskurve sind entweder *undersampled* (< 14 Messungen) oder gelten aufgrund gewissenhafter Prüfungen und Plausibilitätsbetrachtungen als unrealistisch und wurden aus dem offiziellen Datensatz entfernt (D. Machozcek, pers. Mitt.).

In den Wintermonaten Januar, Februar und der ersten Märzhälfte ist die biologische Aktivität minimal. In dieser Phase des Jahres liegen die Mittelwerte der Phosphatkonzentration für 2002 bei 0.4 µmol/l, die der Nitrat/Nitrit-Konzentration bei 19.8 µmol/l und die der Silikatkonzentration bei 9.1 µmol/l. Mit beginnender Primärproduktion ab Mitte März nehmen die Nährstoffkonzentrationen ab. Bei Phosphat ist bereits nach drei Wochen ein Minimum erreicht, das unterhalb der Nachweisgrenze von 0.05 µmol/l der automatischen Analytoren liegt. Danach ist Phosphat der limitierende Faktor bei der Primärproduktion, wodurch sich die Zehrung von Nitrat/Nitrit reduziert. Die Nitrat/Nitrit-Konzentrationen erreichen Anfang Juli ihr Minimum mit Werten < 1 µmol/l und bilden dann bis in den September hinein den limitierenden Faktor bei der Primärproduktion. Während dieser Periode steigen die Phosphatkonzentrationen langsam an und erreichen zwischenzeitlich im Stundenbereich Extremwerte mit Konzentrationen > 0.8 µmol/l. Ob die Extremwerte um den 8. September Konsequenz des gleichzeitigen Zusammenbruchs der thermischen Schichtung oder/und Auswirkung des Augusthochwassers der Elbe sind, kann nicht zweifelsfrei entschieden werden (vgl. *Abschnitt 3.6.2*).

Da die biochemische Dynamik in den Wintermonaten ihr Minimum erreicht, ist dieser Jahresabschnitt für Korrelationsrechnungen zwischen Salzgehalt und Nährstoffen besonders geeignet (vgl. *Abschnitt 3.5.1*). Die Ergebnisse für den Winter 2002 sind in *Tab. 3-5* zusammengefasst. Die aus den Regressionsgeraden bestimmten Konzentrationen für S=30, S=33 bzw. S=34 gelten für *Kontinentales Küstenwasser, Wasser der Deutschen Bucht, bzw. Nordseewasser*.

UFS DB	Phosphate	Silicate	Nitrate & Nitrite
Samples	1501	1411	1423
aS + b	-0.12S + 4.19	-4.2S + 149.9	-8.6S + 299.5
±err₉₅(b)	0.12	2.5	5.4
GoFit (R²)	0.679	0.874	0.861
LinCorr (R)	0.824	0.935	0.928
S=30	0.69	19.5	41.2
S=33	0.34	6.9	15.4
S=34	0.22	2.6	6.8

Tab. 3-5 Nährstoff-Salzgehalts Korrelationen im Winter 2002 (10. Januar – 20. März) an der MARNET Station Deutsche Bucht.

Table 3-5 Nutrient-Salinity correlations in winter 2002 (January, 10 – March, 20) at MARNET Station Deutsche Bucht.

Die Resultate befinden sich nur teilweise in guter Übereinstimmung mit denjenigen, die auf der Überwachungsfahrt des FS Gauß (Reise 377) vom 14. bis 23. Januar 2002 gewonnen wurden (vgl. *Abschnitt 3.5.1*, *Tab. 3-4*). Dies ist nicht wirklich erstaunlich, weil die Ergebnisse der Gaußreise einerseits auf einer vergleichsweise kleinen quasi-synoptischen räumlichen Stichprobe fußen, und andererseits die Reise selbst gegenüber dem Eintritt der saisonalen Nährsalzmaxima (Salzgehaltsminimum) verfrüht durchgeführt wurde. Die Kleinheit der Stichprobe dürfte die gegenüber den Stationsergebnissen insgesamt hohe Fehlermarge erklären, während die begrenzte Übereinstimmung für S=30 ihre Ursache eher in der Reisezeit hat.

3.6 Elbehochwasser

Die Sommerüberschwemmungen in Europa – ein Jahrtausendhochwasser? fragt die Münchner Rück (2003). Denn einerseits gingen die katastrophalen Überschwemmungen im Einzugsgebiet der Elbe mit massiven Überschwemmungen in weiten Teilen Europas einher (Südfrankreich, Norditalien, Österreich, Tschechien ..., vgl. Abb. 3-14), andererseits sind vergleichbare Überschwemmungskatastrophen nur aus dem Mittelalter bekannt (z.B. A.D. 1342, vgl. Tetzlaff et al. 2001). Für Deutschland waren die Überschwemmungen in 2002 mit volkswirtschaftlichen Schäden von 9.2 Mrd. € die *teuerste* Naturkatastrophe in der Geschichte des Landes.

Der Begriff *Jahrhunderthochwasser (JH)* beinhaltet, dass solche Ereignisse auf Basis der Extremwertstatistik nur einmal in 100 Jahren zu erwarten sind. Tatsächlich sind in Deutschland allein in den vergangenen 10 Jahren fünf Hochwasserereignisse eingetreten, denen das Attribut *JH* zuteil wurde (Grieser und Beck 2003): Rhein (Dez. 93 und Jan. 95), Oder (Jul. 97), Donau (Mai 99) sowie Elbe und Donau (Aug. 2002). Die Wahrscheinlichkeit für ein *JH* in Deutschland in einem beliebigen Jahr sei $p = 1\%$, dann ist diejenige für das Nichteintreten eines derartigen Ereignisses offensichtlich $100 - p = 99\%$. Die *Anzahl der JH* ($= x$) in einer Stichprobe N unabhängiger Jahre ist eine Zufallsvariable, die eine Binomialverteilung mit den Parametern p und N hat. Die Wahrscheinlichkeit für $x = 5$ in $N = 10$ Jahren ist mit 1:42 Mio 3-mal geringer als ein Hauptgewinn im Samstaglotto.

Die rezente Häufung von *JH* ist ein starkes Indiz für die Instationarität der zugrunde liegenden Extremwertstatistik (vgl. dazu *Abschnitt 2.3.4*), die in Anbetracht der nachweislichen Zunahme von Starkniederschlägen (Rudolf und Rapp 2003) plausibel erscheint. Ein intensivierter Wasserkreislauf, der direkt an erhöhte Energieumsätze in der Atmosphäre gekoppelt ist, gehört zu den wichtigsten Ergebnissen der Global-Warming Projektionen numerischer Klimamodelle.

3.6.1 Meteorologischer Hintergrund

Die katastrophalen Überschwemmungen der Elbe waren Folge einer ungünstigen Verkettung verschiedener meteorologischer Faktoren in einer außergewöhnlichen Wetterlage. Diese sog. Vb-Lage, eine Bezeichnung für eine besondere Zugstrasse von Tiefdruckgebieten, löste mit Extremniederschlägen auch das Oderhochwasser im Juli 1997 aus.

Kennzeichnend für den Hochsommer 2002 war ein stationäres Hochdruckgebiet über Fennoskandien, welches nicht nur die extreme Erwärmung von Nord- und Ostsee bedingte, sondern insbesondere die entlang der atlantischen Polarfront ostwärts wandernden Zyklonenwellen blockierte und zur Aufspaltung und zum Ausweichen in die Arktis und den Mittelmeerraum zwang. Die stark mäandrierende Meridionalzirkulation über Europa zeigte sich insbesondere in wiederholten hochreichenden Kaltluftvorstößen, die in scharfen Trögen, von denen sich selbstständige Wirbel abschnürten (Kaltlufttropfen), bis Nordafrika ausgriffen. Der geschilderte Sachverhalt spiegelt sich in hohen Niederschlägen über Südeuropa sowie Nordnorwegen und Spitzbergen (Abb. 3-14).

Durch kräftige Regenfälle im Einzugsgebiet der Elbe in den vorangegangenen Wochen waren der Boden bereits tief wassergesättigt und die Flusswasserstände hoch, bevor das deströse Niederschlagsereignis am 12. August eintrat. Die ursächliche synoptische Wetterentwicklung wurde von Steinacker (2002) fundiert beschrieben und bildet hier die Basis einer Kurzfassung.

Ein massiver Kaltlufteinbruch durch den Trichter zwischen Pyrenäen und Westalpen ins westliche Mittelmeer löste am 10. August im Golf von Genua – unterstützt durch die Lee-

wirkung der Alpen und vor allem die labilisierende Wirkung der feuchtwarmen Grundschicht (SST $\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) – eine kräftige Zyklonenese (Tiefdruckentwicklung) aus, die infolge hochreichender Konvektion zunächst mit Starkniederschlägen von den Balearen bis zu den Dinarischen Alpen einherging. Durch kräftige Warmluftzufuhr an den Flanken des Höhentrogs kam es im Verlauf zur fatalen Abschnürung eines Höhentiefs, dass sich jetzt infolge seiner Unabhängigkeit von der Höhenströmung nur noch langsam ostwärts verlagerte und im Alpenraum zu andauernden und ergiebigen Niederschlägen führte.

Erst am 12. August erreichte das Höhentief die Oberungarische Tiefebene; das zugehörige Bodentief wanderte zeitgleich über die Ostalpen hinweg in die Lausitz. Dabei wurde an der Ostflanke des Tiefdruckkomplexes in breiter Bahn feuchtwarme (subtropische) Luft aus dem Mittelmeer, dem Schwarzen Meer und der Ostsee angesogen und großskalig gehoben. Das kondensierte Flüssigwasser führte zu flächenhaften Rekordniederschlägen in Oberösterreich, Tschechien und Sachsen.

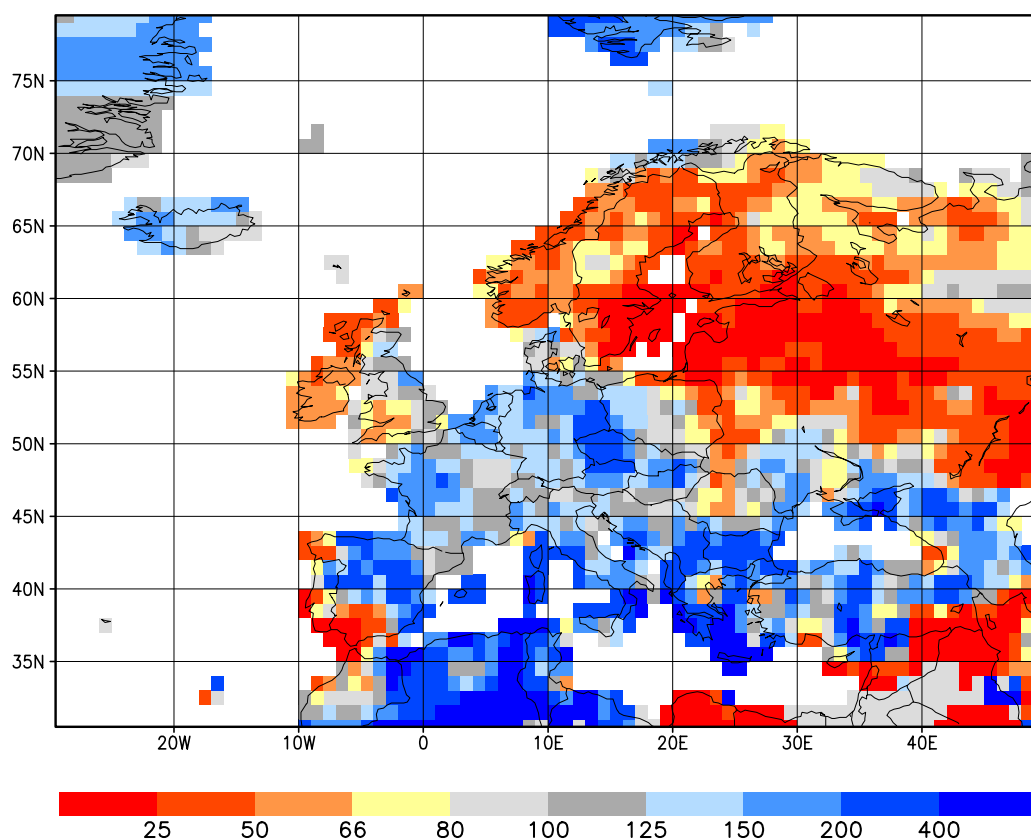


Abb. 3-14 Niederschlagsanomalie [%] als Verhältnis der Niederschlagssumme im August 2002 zum Augustmittel des Zeitraums 1961-1990. (Quelle: <http://gpcc.dwd.de>)

Fig. 3-14 Precipitation anomaly [%] as ratio of August 2002 precipitation total to 1961-1990 base period August mean. (Source: <http://gpcc.dwd.de>)

Eine dramatische Verschärfung der Niederschlagssituation entstand durch die gleichzeitige Ausbreitung eines Hochdruckgebiets von der Biscaya her nach Deutschland, die zum Aufbau eines starken Druckgradienten an der Rückseite des Regentiefs führte. Dadurch konnte sich in einem Streifen von Ostdeutschland bis an die österreichischen Nordalpen eine stürmische nordwestliche Strömung etablieren, die durch den Stau effekt im Luv der Gebirge (Erzgebirge, Böhmerwald, Nordalpen) für zusätzliche Hebung und eine Verstärkung der Niederschläge verantwortlich war. Diese orographische Hebung an den Mittelgebirgen bewirkte nach Rudolf und Rapp (2003) eine Verdoppelung der Niederschlagsmengen.

Das Maximum der Niederschlagsanomalie trat folgerichtig im Erzgebirge ein (Abb. 3-14). An der DWD-Station Zinnwald-Georgenfeld überschritt die Niederschlagssumme im August mit 470 mm den 30-jährigen Mittelwert von 103 mm um 355%. Davon entfielen 353 mm allein auf den 24 h Zeitraum zwischen 3 h des 12. August und 3 h des Folgetages (Rudolf und Rapp 2003). In Dresden wurde am 17. August ein Höchstpegelstand von 940 cm gemessen, der nach den bis 1275 zurückgehenden historischen Aufzeichnungen niemals erreicht wurde (BfG 2002).

3.6.2 Abflussraten und Salzgehalt

Im langjährigen Jahresmittel (1971-2000) fließen am Wehr Neu-Darchau 22 km³/a (685 m³/s) Elbewasser in Richtung Nordsee. Mit 36 km³/a gehört das Jahr 2002 neben 1981, 1987 und 1995 zu den abflussreichsten Jahren (Abb. 3-15). Der augenfällige Rhythmus von 6 bis 8 Jahren wird in vielen geophysikalischen Zeitreihen der Region gefunden und könnte mit einem ähnlichen quasizyklischen Mode der Nordatlantischen Oszillation in Verbindung stehen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Trotz vergleichbar hoher Gesamtabflussmengen in den genannten Jahren, nimmt 2002 wegen der Flutkatastrophe im August eine Sonderstellung ein.

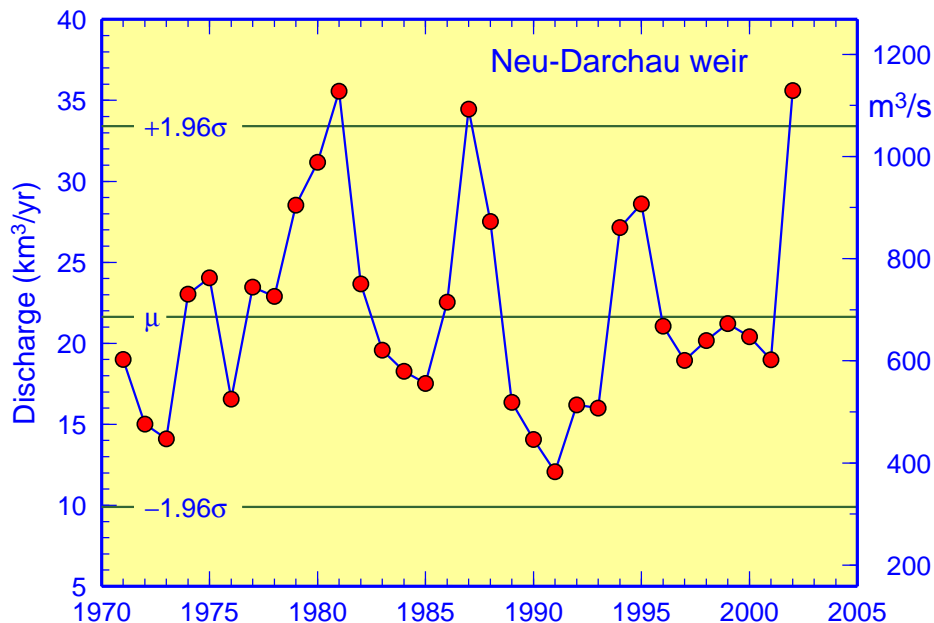


Abb. 3-15 Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau, mit Langzeitmittel (1971-2000) und 95%-Grenzen ($\mu \pm 1.96\sigma$). 1 km³/a entspricht 31.7 m³/s. Deutliche positive Abweichungen vom Langzeitmittel (21.64 km³/a) traten quasizyklisch alle 6-8 Jahre ein. (Quelle: WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-15 Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971-2000) and 95%-limits ($\mu \pm 1.96\sigma$). 1 km³/yr is equivalent to 31.7 m³/s. Notable departures from long-term mean (21.64 km³/yr) recurred at a frequency of 6-8 years. (Data: WSA-Lauenburg.)

Die Abflussraten lagen in 2002 nicht nur ab August sondern auch im vorangegangenen Spätwinter – also für insgesamt sieben Monate – erheblich über den langjährigen Mittelwerten (Abb. 3-16). Damit traten in 2002 gleich zwei saisonale Anomalien ein, die zwei Standardabweichungen überschritten. Unter Voraussetzung einer Gaußverteilung sollten derart starke Anomalien nur 2-3 mal in 100 Jahren vorkommen. Inwieweit die anomalen Abflüsse in

2002 aus veränderten atmosphärischen Zirkulations- und Niederschlagsmustern und was-serbaulichen Maßnahmen resultieren ist fraglich (Jakobeit et al. 2003, BfG 2002).

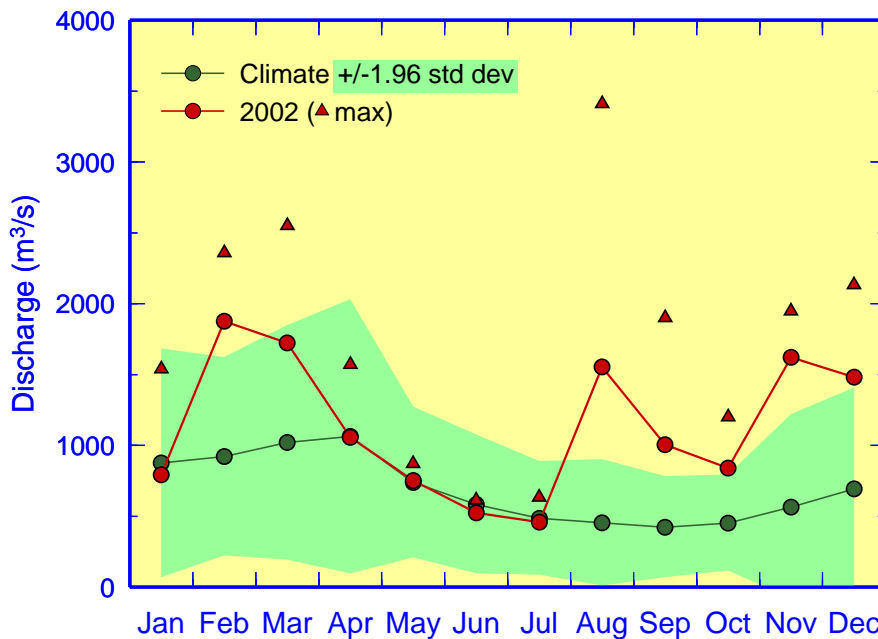


Abb. 3-16 Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe in 2002 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971-2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). 1000 m^3/s entsprechen $2.592 km^3/Monat$. Im Februar/März und ab August kam es zu extremen Abweichungen von der Monatsklimatologie. (Quelle: WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-16 Monthly mean and maximum runoff of Elbe River in 2002 at Neu-Darchau weir together with 1971-2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). 1000 m^3/s are equivalent to $2.592 km^3/month$. In February/March and since August extreme departures from climatology were recorded. (Data courtesy of WSA-Lauenburg.)

Die hohen Elbe-Abflüsse (Abb. 3-16) traten als deutliche, aber statistisch nicht signifikante negative Monatsanomalien im Salzgehalt bei Helgoland in Erscheinung (vgl. Abb. 3-10). Die Auswirkung des Elbe-Abflusses auf den Salzgehalt bei Helgoland sowie an der nur 15 sm weiter westlichen MARNET Station *Deutsche Bucht* (DB) lässt sich auf kürzeren Zeitskalen differenzierter betrachten (Abb. 3-17). Die inverse Darstellung des Salzgehalts – und mithin der parallele statt antiparallele Verlauf von Salzgehalts- und Abflussraten – erleichtert dabei die visuelle Erfassung der starken Abhängigkeit des Salzgehalts von der Abflussrate. Die beiden Salzgehaltszeitreihen zeigen über weite Strecken einen zueinander simultan-parallel und gegenüber der Abflussratenreihe einen verzögert-parallelen Verlauf. Die Abhängigkeit zwischen den Phasenunterschieden (Verzögerungen) und Oberwassermenge ist dabei derart, dass höhere Abflussraten mit kürzeren Laufzeiten zwischen Neu-Darchau und Deutscher Bucht einhergehen.

Trotz des quasi-gleichzeitigen Eintreffens von Abflusssignalen an beiden Stationen, bestehen beträchtliche systematische Abweichungen in der Höhe des Salzgehalts. Die auf Basis von Tageswerten über den gesamten gemeinsamen Zeitbereich¹ berechnete mittlere Abweichung im Salzgehalt – DB minus Helgoland – beträgt 0.6 bei einer Standardabweichung von 1.0. Dass der Salzgehalt an der weiter westlichen Station DB nahezu grundsätzlich höher

¹ Es wurde die bereinigte (offizielle) Salzgehaltsreihe der Station DB benutzt, die auch der Abb. 3-17 zugrunde liegt. Vgl. dazu auch Abschnitt 3.5.2 und Abb. 3-13.

ausfällt, erscheint eingedenk der vorherrschend zyklonalen Zirkulation in der Deutschen Bucht plausibel (vgl. *Abschnitt 3.1.1*). Ebenso plausibel – insbesondere im Vergleich mit ähnlichen Ereignissen im Februar und März, als es bekanntlich zu extensiven zyklonalen Zirkulationsphasen kam (*Abb. 3-4*) – ist die markante Salzgehaltsdifferenz zwischen beiden Stationen am 4. September. Die Flutwelle des Auguthochwassers, die am 22. August Neu-Darchau passierte, erreichte demnach knapp zwei Wochen später definitiv Helgoland, und vermutlich etwa gleichzeitig, wenn auch in stark aber nicht unüblich abgeschwächter Form die Station DB (*Abb. 3-17*). Welchen Anteil dieser Effekt am Anstieg der Nährsalzkonzentrationen an der Station DB Anfang September hatte (*Abb. 3-13*), der bislang ausschließlich auf den Zusammenbruch der thermischen Schichtung zurückgeführt wurde (Nies et al. 2003), ist nicht bekannt. Der vertikale Durchmischungseffekt dürfte umgekehrt das Salzgehaltssignal vom 4. September zusätzlich reduziert haben.

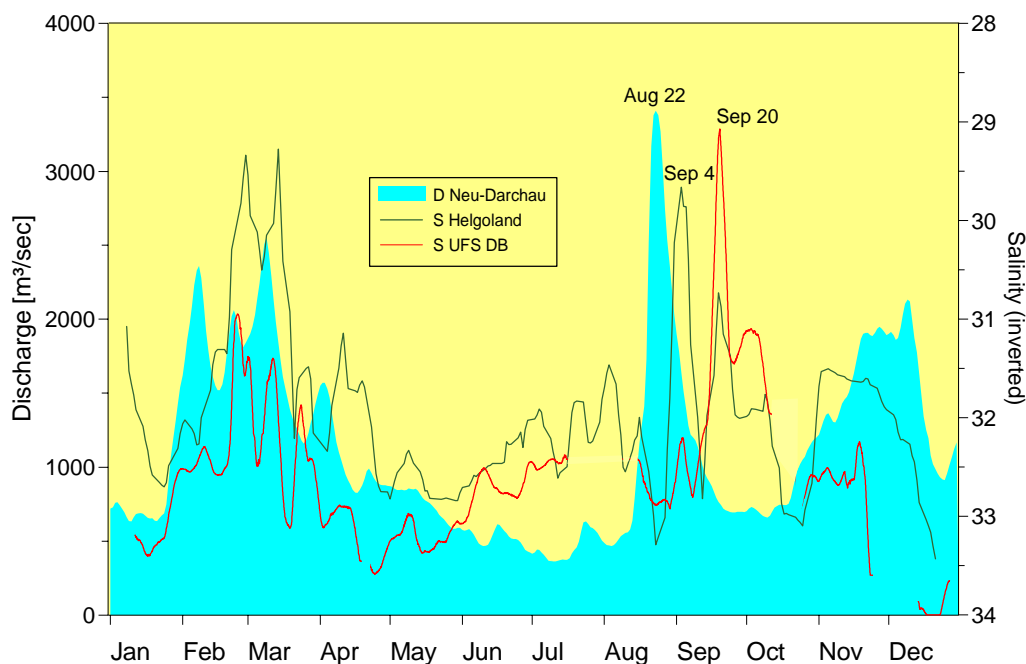


Abb. 3-17 Jahrgang 2002 der Abflussraten (m^3/s) der Elbe am Wehr Neu-Darchau und des Salzgehalts (invertiert) bei Helgoland-Reede sowie an der MARNET-Station Deutsche Bucht. 4-Tagemittel. (Quellen: WSA Lauenburg, BAH, BSH.)

Fig. 3-17 Annual cycle 2002 of daily runoff (m^3/s) of Elbe River at Neu-Darchau weir versus salinity (inverted) at Helgoland Roads and at MARNET Station Deutsche Bucht. 4-day means. (Sources: WSA Lauenburg, BAH, BSH).

Außergewöhnlich sind die etwa zwei Wochen später eintretenden Salzgehaltssignale vom 20. September, und zwar in dreifacher Hinsicht. Zum einen geht ihnen kein weiteres Hochwassersignal voraus, zum anderen tritt an der Station DB der mit Abstand geringste Salzgehalt im gesamten Jahrgang ein, und zum dritten unterbietet dieses Minimum dasjenige von Helgoland in beispielloser Weise.

Die Rückkehr des Hochwassersignals lässt sich zweifelsfrei aus der zeitlichen Entwicklung der atmosphärischen Zirkulation erklären. Die Hochwasserwelle vom 22. August (Neu-Darchau) dürfte etwa eine Woche später im Mündungsgebiet der Elbe eingetroffen sein (Nies et al. 2003a). Wie *Abb. 3-4* belegt, herrschte ab Ende August in der Deutschen Bucht eine zyklonale Zirkulation vor, die Mitte September durch persistente antizyklonale Strömungsverhältnisse abgelöst wurde. Die für die Station DB in *Abb. 3-18* veranschaulichten Windbedingungen untermauern diese Aussage. Das Elbewasser ist danach zunächst bis

etwa 10. September in NW-liche Richtungen verfrachtet worden und breitete sich anschließend mit Winden aus N-lichen Richtungen südwärts aus.

Die Frage nach der Realität des extremen Salzgehaltssignals an der Station DB lässt sich weniger eindeutig beantworten. Gerade im Hochsommer können erhebliche Verfälschungen der automatischen Salzgehaltsmessungen durch Bewuchs (Biofouling) vorkommen. Diese äußern sich in einer zunehmenden, aber unsystematischen Unterschätzung des Salzgehalts und waren Grund für die Bereinigung des Datensatzes in den mehrwöchigen Zeitabschnitten vor den Wartungsterminen am 14. August und 21. Oktober (vgl. *Abb. 3-13*). Weil ein wirksamer Biofouling-Effekt einseitig ist und keine Rückkehr zu realistischen Messwerten zulässt, wurde das Salzgehaltsextremum vom 20. September unverändert im Datensatz belassen (Machoczek, pers. Mitt.). Andererseits verläuft die zeitliche Entwicklung des Salzgehalts ab dem 20. September bis zum Wartungstermin 4 Wochen später oberhalb der Messwerte von Helgoland. Dies ist definitiv ungewöhnlich und wird zusätzlich durch die Vergleichsmessung des FS Gauß vom 20. September in Frage gestellt. Der Vergleichswert von ca. 30.8 (vgl. *Abb. 3-13*) befindet sich einerseits in guter Übereinstimmung mit dem entsprechenden Messwert 31.0 bei Helgoland, andererseits in krassem Widerspruch zu demjenigen an der Station DB von 28.8. Eine weitergehende Plausibilitätsbetrachtung unter Einbeziehung der Nährstoffmessungen an der Station DB ist nicht möglich, weil die automatischen Nährstoffanalysatoren bereits am 17. September für mehrere Wochen ausfielen.

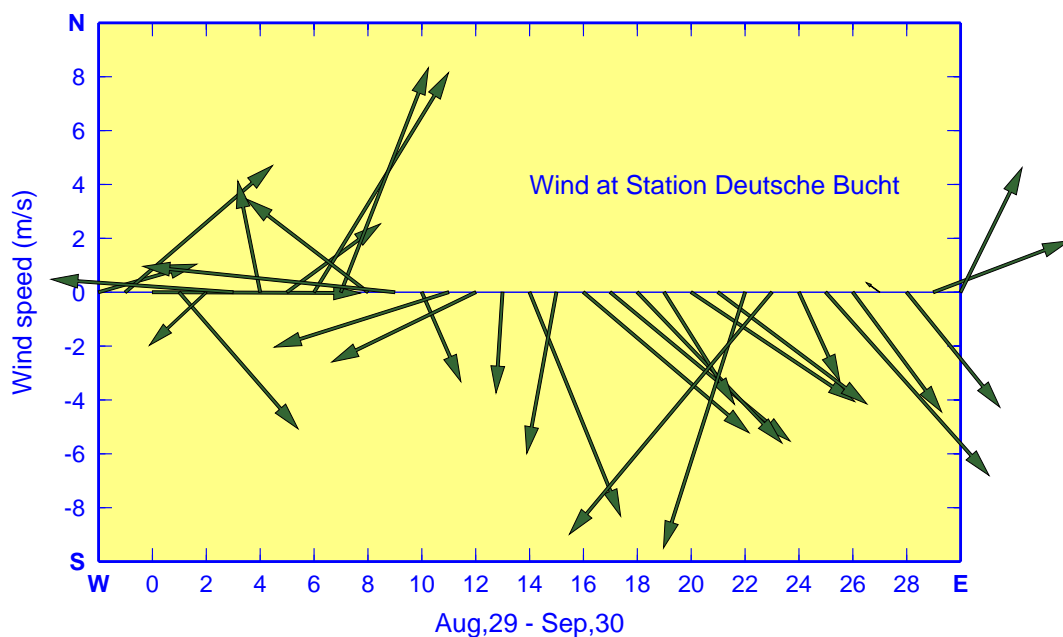


Abb. 3-18 Windvektoren (Tagesmittel) an der MARNET Station Deutsche Bucht. Das Aspektverhältnis der Abbildung wurde so gewählt, dass die Geschwindigkeitsskala für die meridionalen und zonalen Windkomponenten gleichermaßen gilt.

Fig. 3-18 Daily mean wind vectors at MARNET Station Deutsche Bucht. The aspect ratio is chosen such that the velocity scale applies to both meridional and zonal wind components.

Abschießend sei bemerkt, dass starke intramonatliche Schwankungen in der Salzgehaltsentwicklung insbesondere bei Helgoland anzeigen (*Abb. 3-17*), dass Helgoland nicht permanent im Bereich der Elbfahne liegt. Gezeiten und meteorologische Einflüsse bedingen Advektionsschwankungen der Flussfahne, die sich in der intramonatlichen Variabilität des Salzgehalts abbilden. Insgesamt spiegelt der zeitliche Verlauf des Salzgehalts an beiden Stationen die hohe Variabilität des gesamten ozeanographischen Systems der Deutschen Bucht und damit die ausgeprägte mesoskalige Dynamik dieses Meeresgebietes wider.

4 Ausblick

Wer hier angelangt sich bereits mit dem Inhalt des Zustandsberichts bekannt gemacht hat, wird den Autoren vermutlich ein redliches Bemühen bescheinigen, gleichzeitig aber festgestellt haben und vielleicht bemängeln, dass der Bericht auch – mindestens implizit – erhebliche Daten- und Kenntnislücken dokumentiert. Tatsache ist, die Voraussetzungen für einen umfassenden und vollständigen Zustandsbericht, geschweige denn eine Zustandsbewertung, sind nur fragmentarisch gegeben.

Verumtamen operae pretium erat¹. Denn ähnlich wie die unvollständig erhaltene bzw. rekonstruierte pompejanische Alexanderschlacht trotzdem ein wertvolles Beispiel für ein *narratives Mosaik aus der Gattung der Megalographie* (aus einer Dissertation) darstellt (Abb. 4-1) und obendrein einen Eindruck von kriegerischen Auseinandersetzungen in der Antike bietet, so hat der Bericht trotz seines fragmentarischen Zustands einen Eigenwert und ermöglicht gleichzeitig eine Vorstellung davon, was aus ihm werden kann. Um die Vollständigkeit, Aussagekraft und damit den Nutzen künftiger Berichte zu steigern, ist es sachdienlich und konstruktiv, die wichtigsten verbesserungsfähigen Randbedingungen beim Namen zu nennen und erforderliche Abhilfemaßnahmen vorzuschlagen oder anzudeuten.



Abb. 4-1 *La battaglia di Alessandro* (Museo Archeologico Nazionale Napoli). Bemerkenswert erscheint uns der großartige Entwurf dieses Werkes, der mit wenigen Figuren eine Menge darzustellen vermag und zur gleichen Zeit höchst interessante, spannende Episoden bringt (zitiert aus: A. de Franciscis, *Pompeji – Kultur und Kunst, Kina Italia, Mailand, 2001*).

Fig. 4-1 *La battaglia di Alessandro* (MANN). We think that a remarkable feature of this work is its generous framework requiring just a few figures to create a full scene and highly interesting and thrilling episodes (translated from A. de Franciscis, *Pompeji – Kultur und Kunst, Kina Italia, Mailand, 2001*).

Eine lückenlose Erfassung des 4-dimensionalen Meereszustands in Raum und Zeit durch konventionelle Überwachungsfahrten, automatische Messstationen und Satellitenbeobachtungen ist weder gegenwärtig, noch in vorstellbarer Zukunft realisierbar. Die einzig realistische Perspektive, diese ideale Voraussetzung für eine Zustandsbewertung dennoch annähernd zu schaffen, bieten numerische Modelle, die sowohl hydrodynamische, als auch ökologische bzw. biogeochemische Prozesse zuverlässig beschreiben können. Die Entwicklung ökologischer Modelle steht jedoch ebenso wie die rigorose Validierung von Zirkulations-

¹ Nichtsdestotrotz war es der Mühe wert.

modellen erst am Anfang; und auch die Adaption von für die numerische Wettervorhersage entwickelten Datenassimilationstechniken ist bislang wenig vorangeschritten.

Obgleich eine vollständige Zustandserfassung beobachtungstechnisch aussichtslos ist, bleibt eine umfangreiche und leicht zugängliche Datenbasis auch im Hinblick auf Modellvalidierung und Datenassimilation erstrebenswert. Bei der Zusammenstellung des Berichtes wurde erneut offenbar, wie unzureichend systematische und prozessorientierte Beobachtungsprogramme für die offene Nordsee sind. Deutliche Verbesserungen hinsichtlich Datengewinnung und Auswertung sind erzielbar durch eine optimierte nationale und internationale Koordination von Überwachungsfahrten und Messkampagnen, durch abgestimmte Messstrategien und optimierte Messnetze, sowie durch einen kostenfreien, schnellen Datenaustausch.

Ferner ist selbst eine optimale Datenbasis für ein einzelnes Jahr keine hinreichende Voraussetzung für eine profunde Zustandsbewertung. Ohne Kenntnis der Zustandsentwicklung in klimatologischen Zeiträumen (30 Jahre) ist lediglich eine Zustandsdokumentation ohne substantiierte Bewertung möglich. Die Anomalität eines beliebigen Zustandsparameters lässt sich nur dann feststellen und solide bewerten, wenn gleichzeitig Informationen zu Normalzustand und Variabilität vorliegen.

Schließlich ist eine solide Zustandsbewertung undenkbar, ohne die Fertigkeiten, die Erfahrung, den Sachverstand und nicht zuletzt das gern als Elfenbeinturmwissen belächelte oder kritisierte Fachwissen der Wissenschaftler, die sowohl die Datengewinnung sorgfältig planen, als auch die Rohdaten aufbereiten, analysieren und interpretieren und daraus Zusammenhänge herstellen und Prozesse erschließen. Der aufwendige, aber kaum sichtbare Prozess der Umwandlung von Rohdaten in nützliches Wissen wird ebenso notorisch unterschätzt, wie ihm adäquate Ressourcen zunehmend vorenthalten bleiben. Die in dieser Hinsicht inzwischen deutlich eingeschränkte Kapazität ist wesentlicher Grund für die vorläufige inhaltliche Beschränkung des Pilotberichts auf hydrographische Zustandsgrößen und Nährsalze sowie seine späte Herausgabe.

Aus der Notwendigkeit einer schnellen und umfassenden Zustandsbewertung, die auch durch internationale Verpflichtungen gefordert wird, erwächst ein akuter Handlungsbedarf, der durch die zunehmende Ressourcenverknappung weiter verschärft wird. Es ist deshalb vorgesehen, die jährliche Zustandseinschätzung sowohl durch Informationen aus weiteren Disziplinen, als auch durch internationale Befunde zu erweitern. Insbesondere die Ergebnisse der meereschemischen Überwachung des BSH werden in den Zustandsbericht für 2003 integriert werden. Um darüber hinaus vor allem den Nordseeanrainern die Möglichkeit einer Beteiligung zu bieten, wird eine zusätzliche Edition des Berichts in englischer Sprache erwogen, zumal die im Bericht dargestellten Befunde mindestens für den gesamten Nordseeraum Relevanz haben.

Der vorliegende Pilotbericht zeigt, dass dieses Projekt trotz mannigfacher Schwierigkeiten fachlich, technisch und organisatorisch realisierbar ist, und bietet darüber hinaus als handfeste Synthese solider Fakten Ansporn zur engagierten Fortsetzung der vielfältigen Arbeiten im BSH. An deren Anfang steht oft die sorgfältige Datengewinnung, die in ein breites Spektrum von Aktivitäten mündet, deren Sinn sich insbesondere von außen oft erst durch den integrierenden Effekt öffentlichkeitswirksamer Endprodukte erschließt. Selbstbild und Außenwirkung des BSH als maritimer Dienstleister gewinnen an Konturen, je stärker es seine Basis – Gewinnung, Archivierung und Verwaltung ozeanographischer Daten – zur Herstellung eigener sinnvoller Endprodukte nutzt.

Der *Ozeanographische Zustandsbericht* wird in Zukunft jährlich erscheinen. Wir sind deshalb gespannt auf die Resonanzen, Anregungen, Ideen und Kommentare zu Inhalt, Form oder Details des Pilotberichts, die sicher zur Verbesserung künftiger Ausgaben beitragen werden. In diesem Sinne sind Vorschläge zu eigenen – aber auch weiteren BSH-externen – ergänzenden Fachbeiträgen oder Kooperationsideen ebenfalls willkommen.

Literatur / References

- BfG, Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet. *Bundesanstalt für Gewässerkunde*, Koblenz, 48p., <http://elise.bafg.de/servlet/is/3967/>, 2002.
- BSH, Klima und Wetter der Nordsee. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, *Sonderdruck Nr. 2182*, 73-288, 1994.
- Becker, G.A., Beiträge zur Hydrographie und Wärmebilanz der Nordsee, *Dt. Hydrogr. Z.*, 34, H.5, 1981.
- Becker, G.A. und D. Kohnke, Long-term variations of temperature and salinity in the inner German Bight, *Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Expl. Mer.*, 172, 335-344, 1975.
- Becker, G.A., S. Dick, J.W. Dippner, Hydrography of the German Bight, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 91(1/3), 9-18, 1992.
- Becker, G.A., A. Frohse, P. Damm, The northwest European shelf temperature and salinity variability. *Dt. Hydrogr. Z.*, 49, No.2/3, 145-161, 1997.
- Becker, G.A., Physikalische Beschreibung der Nordsee. In: *Warnsignale aus Nordsee und Wattenmeer*, Lozan J., et al. (Hrsg.), GEO, 2002.
- Brockmann, U. und D. Topcu, Nutrient Atlas of the Central and Northern North Sea, *Research Rep. 200 25 211*, UBA-FB 000276, Federal Environmental Agency, 2002.
- Brockmann U. und G. Wegner, Hydrography, nutrient and chlorophyll distribution in the North Sea in February 1984, *Arch. Fisch. Wiss.*, 36, 27-45, 1985.
- Brockmann U., K. Viehweger, T. Raabe, Conversion of nutrients in the Elbe river plume during drift experiments in the German Bight during spring 1995 and summer 1994, *Dt. Hydrogr. Z.*, 51, 293-312, 1999.
- Dick S., E. Kleine, S.H. Müller-Navarra, H. Klein, H. Komo, The Operational Circulation Model of the BSH (BSHcmod). *Berichte des BSH*, Nr. 29, 49pp, 2001.
- Dickson, R. R., J. Meincke, S.-A. Malmberg, A.J. Lee, The "Great Salinity Anomaly" in the Northern North Atlantic 1968-1982. *Prog. Oceanog.*, 20, 103-151, 1988.
- Dippner, J.W., Mesoscale variability of the German Bight – an atlas of circulation, density distribution and sea surface height, Institut f. Meereskunde, *Tech. Rep.*, Nr. 2, 87p, Hamburg, 1992.
- Duffing, G., Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung, *Vieweg*, Braunschweig, 1918.
- Frey, H., Stratification during periods of oxygen deficiency in the German Bight during the summers from 1981 to 1983: a comparison with the long-term variation in stratification. *Meeresforschung*, 32, 306-328, 1990.
- Grieser, J. und C. Beck, Extremniederschläge in Deutschland. Zufall oder Zeichen? 142-151 in: *Klimastatusbericht 2002*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 221p., www.ksb.dwd.de, 2003.

Hurrell, J.W., Y. Kushnir, G. Ottersen, M. Visbeck (eds.), The North Atlantic Oscillation: Climate significance and environmental impact, *AGU Geophysical Monograph Series, 134*, 279pp., Washington DC, 2003.

ICES, Flushing Times of the North Sea, *Cooperative Research Report*, No.123, Kopenhagen, 1980.

ICES, The annual ICES ocean climate status summary 2002/2003, Hughes, S.L. and A. Lavín (Eds.), www.ices.dk/status/clim0203/IAOCSS2002.PDF, Kopenhagen, 2003.

Jakobeit J., R. Glaser, J. Luterbacher, H. Wanner, Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 21-1...4, 2003.

Janssen, F., Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee, *Dissertation*, Hamburg, 2002.

Klein, H., W. Lange, E. Mittelstaedt, Tidal and residual currents in the northern North Sea: Observations, *Dt. Hydrogr. Z.*, 46, 5-27, 1994.

Klein, H., P. König, A. Frohse, Currents and near-bottom suspended matter dynamics in the Central North Sea during stormy weather – Results of the PIPE'98 field experiment, *Dt. Hydrogr. Z.*, 51, 47-66, 1999.

König, P., A. Frohse, H. Klein, Measurements of suspended matter dynamics in the German Bight. 250-270 in: J. Sündermann (Hrsg.), Circulation and contaminant fluxes in the German Bight. Springer, Berlin Heidelberg, 1994.

Körner D. und G. Weichart, Nährstoffe in der Deutschen Bucht, Konzentrationsverteilung und Trends 1978 –1990, *Dt. Hydrogr. Z.*, 17, 1991.

Koslowski, G. und P. Loewe, The Western Baltic sea ice season in terms of a mass-related severity index 1879-1992. Part I: Temporal variability and association with the North Atlantic Oscillation, *Tellus*, 46A, 66-74, 1994.

Laane, R., Variability in fluxes of nutrients (N, P, Si) into the North Sea from the Atlantic Ocean and Skagerrak caused by variability in water flow. *Dt. Hydrogr. Z.*, 48, 1996.

Lefebvre, Ch., Das Klima in den deutschen Küstengebieten, 88-91 in: *Klimastatusbericht 2002*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 221p., www.ksb.dwd.de, 2003.

Loewe, P. und G. Koslowski, The Western Baltic sea ice season in terms of a mass-related severity index 1879-1992. (II). Spectral characteristics and associations with the NAO, QBO and solar cycle, *Tellus*, 50A, 219-241, 1998.

Loewe, P., Surface temperatures of the North Sea in 1996, *Dt. Hydrogr. Z.*, 48, 175-184, 1996.

Marshall J., Y. Kushnir, D. Battisti, P. Chang, A. Czaja, R. Dickson, J. Hurrell, M. McCartney, R. Saravanan, M. Visbeck, North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms, *Int. J. Climatol.*, 21, 1863-1898, 2001.

Münchener Rück, Jahresrückblick der Naturkatastrophen 2002, *Topics*, 10, 2003.

MURSYS, Nordsee Aktuell 2002,
www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MURSYS-Umweltreportsystem/index.jsp

Nies, H., H. Gaul, F. Oestereich, H. Albrecht, S. Schmolke, N. Theobald, G. Becker, A. Schulz, A. Frohse, S. Dick, S. Müller-Navarra, K. Herklotz, Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht, Abschlussbericht, *Berichte des BSH*, Nr. 32, 81pp, 2003a.

Nies, H., S. Schwarz, P. Hach, H. Gaul, C. Klein, K. Herklotz, N. Theobald, C. Möhlenkamp, Stationsgestütztes Automatisches Monitoring von Schad- und Nährstoffen in Ost- und Nordsee – SAMSON. *Abschlussbericht*, BMBF-Förderkennzeichen: 03F0289A. BSH, Hamburg & Rostock, 2003b.

OSPAR, Region II - The Greater North Sea. In: *Quality Status Report 2000*. OSPAR Commission, London, 136 + xiii pp., 2001

Otto, L., J.T.F. Zimmerman, G.K. Furnes, M. Mork, R. Saetre, G. Becker, Review of the physical oceanography of the North Sea, *Netherlands Journal of Sea Research*, 26(2-4), 161-238, 1990.

Pingree R.D. und D.K. Griffiths, Tidal fronts on the shelf seas around the British Isles, *JGR*, 83, C9, 4615-4622, 1978.

Reynolds, R.W., A real-time global sea surface temperature analysis, *J. Climate*, 1, 75-86, 1988.

Rudolf, B. und J. Rapp, Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. 173-188 in: *Klimastatusbericht 2002*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 221p., www.ksb.dwd.de, 2003.

Schrum C. und F. Siegmund, Modellkonfiguration des Nordsee/Ostseemodells, 40-Jahres NCEP Integration. *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg*, Reihe B, 44, 179p, 2002.

Slonosky, V.C., P.D. Jones, T.D. Davies, Atmospheric circulation and surface temperature in Europe from the 18th century to 1995, *Int. J. Climatol.*, 21, 63-75, 2001.

Smith, J.A., P. Damm, M.D. Skogen, R.A. Flather, J. Pätsch, An investigation into transports and the long-term residual circulation of the North-West European Shelf using three hydrodynamic models. *Dt. Hydrogr. Z.*, 48, 325-348, 1996

Steinacker, R., Synoptische Beschreibung der Hochwasserkatastrophe vom August 2002. www.univie.ac.at/IMG-Wien/vera/Hochwasser_2002.html, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien, 2002.

Tetzlaff, G., M. Börngen, A. Raabe, Das Jahrtausendhochwasser von 1342 und seine meteorologischen Ursachen. 5-22 in: ATV-DVWK Landesverband Bayern (Hrsg.): Hochwasser – Niedrigwasser – Risiken. Tagungsband *Nürnberger Wasserwirtschaftstage*, 2001.

Ullrich, R., Monatliche Temperaturabweichungen vom Referenzzeitraum 1961-1990. 134-138 in: *Klimastatusbericht 2001*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 290p., www.ksb.dwd.de, 2002.

Waple, A.M., J.H. Lawrimore, M.S. Halpert, G.D. Bell, W. Higgins, B. Lyon, M.J. Menne, K.L. Gleason, R.C. Schnell, J.R. Christy, W. Thiaw, W.J. Wright, M.J. Salinger, L. Alexander, R.S. Stone, S.J. Camargo, Climate assessment for 2001, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, S1-S62, 2002.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 Bathymetrie der Nordsee (mit MARNET Stationen). Auflösung 1/3 sm. Datenquelle: Dansk Hydraulik Institut.....	13
Abb. 2-2 Druck- und Windverteilung über dem Nordatlantik für positive (links) und negative NAO-Zustände im Winter. Quelle: www-avisos.csls.fr/html/applications/climat/nao_explanation_uk.html , M. Visbeck (Lamont-Doherty Earth Observatory).....	15
Abb. 2-3 Phasendiagramm der NAO als relative Häufigkeitsverteilung der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879. Die Konturen 0.5, 1, 1.5 und 2% sind Linien gleicher rel. Zustandsdichte (d.h. rel. Anzahl Zustände pro Klassenintervall, 0.6x0.6) und umhüllen 81, 64, 39 bzw. 17% aller Zustände. Die Sequenz der 15 gelben bzw. blauen Kreise (1,2,..., 8,9,O,N,D,J,F,M) zeigt die Entwicklung der rohen (gelb) bzw. über 6 Monate tiefpassgefilterten (blau) monatlichen dynamischen NAO-Zustände im Zeitraum Januar 2002 bis März 2003.....	16
Abb. 2-4 NAO-Index 2002. Erläuterungen in Tab. 2-1.....	18
Abb. 2-5 Oberflächenzirkulation der Nordsee im Winter (Dezember bis März) bei negativem und positivem NAO-Mode (nach Schrum und Siegismund 2002).	19
Abb. 2-6 Saisonale Oberflächenzirkulation in 2002 (JFM = Januar-Februar-März, AMJ ...). Die Vektormittel wurden aus wöchentlichen Strömungsfeldern des BSH-Modells berechnet. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.	21
Abb. 2-7 Jahresgang der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen in 2002 mit Ensemble der Jahresgänge seit 1968 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971-1993) und zwischenjährigen Standardabweichungen (Kreisradius).	23
Abb. 2-8 Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee in 2002 als Abweichungen von der 1971-1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K.....	24
Abb. 2-9 Monatsmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee (°C) mit Anomalien (K) und Perzentilen (%) und NAO-Index (Loewe und Koslowski 1998). Tiefpassfilterbreite 6 Monate. Farbstufen für Perzentile: 1,5,10,25,50,75,90,95,99%.	26
Abb. 2-10 Rangstatistik der Jahresmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee.	27
Abb. 2-11 Temperaturregimes: Nordsee (oben) und Helgoland (unten und Mitte). Standardisierte Anomalien, Tiefpassfilterbreite: 2 Jahre, Konturintervall: 0.25 Standardabweichungen.....	29

Abb. 2-12 Oberflächensalzgehalt der Nordsee im Winter (links, ICES International Bottom Trawl Survey, 18. Januar bis 28. Februar, und FS Gauß, Reise 377, 14. bis 23. Januar) und Sommer 2002 (FS Gauß, Reise 385, 16. bis 31. Juli).....	30
Abb. 2-13 Temperaturschichtung im Sommer (FS Gauß, Reise 385).....	32
Abb. 2-14 Salzgehaltsschichtung im Sommer (FS Gauß, Reise 385).....	33
Abb. 2-15 Sauerstoffsättigung im Sommer (FS Gauß, Reise 385).....	34
Abb. 2-16 Phosphat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Winter. Quellen: ICES IBTS (FS Walther Herwig 236, 19.1.-13.2.) und FS Gauß 377, 14.-23. Januar....	36
Abb. 2-17 Silikat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Winter. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Quellen: ICES IBTS (FS Walther Herwig 236, 19.1.-13.2.) und FS Gauß 377, 14.-23. Januar.	37
Abb. 2-18 Nitrat & Nitrit ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Winter. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Quellen: ICES IBTS (FS Walther Herwig 236, 19.1.-13.2.) und FS Gauß 377, 14.-23. Januar.....	37
Abb. 2-19 Phosphat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.	39
Abb. 2-20 Silikat ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.	39
Abb. 2-21 Nitrat & Nitrit ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.	40
Abb. 2-22 Chlorophyll ($\mu\text{g/l}$) Oberflächen- und Bodenverteilung im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.....	41
Abb. 2-23 Oberflächen- und Bodenverteilung der Sauerstoffsättigung (%) im Sommer. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.	42
Abb. 2-24 Wassertrübung (NTU) an Oberfläche und Boden im Sommer. Das Konturintervall ist nicht konstant, sondern bildet eine Folge von Intervallhalbierungen: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Quelle: FS Gauß 385, 16.-31. Juli.	42

Abb. 3-1 Schematik der Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht.	46
Abb. 3-2 Relative Häufigkeit der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in 2002 und im Mittel der Jahre 1997-2001.....	47
Abb. 3-3 Absolute Häufigkeit der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht im Zeitraum 1997-2002.	47
Abb. 3-4 Zeitliche Abfolge der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in 2002. (# = nw-se).	48
Abb. 3-5 Zeitserien der beobachteten Windgeschwindigkeit und -richtung am UFS-DB (oben), der signifikanten Wellenhöhe (swH) und Seegangsrichtung an der Gitterposition UFS-DB (Modelldaten, Mitte) und der swH bei Helgoland (Waverider-Messung, unten). Alle Zeitserien wurden mit einem Median-Filter über 5 Messzyklen geglättet.	49
Abb. 3-6 Jahresgang 2002 der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971- 2000) mit 95%-Band (± 1.96 zwischenjährige Standardabweichungen). 1 kJcm^{-2} ent- spricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm^{-2}	52
Abb. 3-7 Jahresgang 2002 der monatlich gemittelten Oberflächentemperatur bei Helgoland- Reede mit Klimatologie (1971-2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichun- gen). (Quelle: BAH, BSH.).....	53
Abb. 3-8 Pseudo-2D Zeitserie der monatlich gemittelten Oberflächentemperatur ($^{\circ}\text{C}$) bei Helgoland-Reede seit 1873. (Quelle: BAH, BSH.)	54
Abb. 3-9 Rollende Korrelationen zwischen NAO und Helgoland-Reede SST.	55
Abb. 3-10 Jahresgang 2002 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatli- che Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971-2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). (Quelle: BAH, BSH.).....	56
Abb. 3-11 Pseudo-2D Zeitserie des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts bei Helgo- land Reede seit 1873. Konturintervall: 1, Farbibintervall: 0.5. (Quelle: BAH, BSH.)	57
Abb. 3-12 Temperaturschichtung ($^{\circ}\text{C}$) im Jahr 2002 an den MARNET-Stationen Deutsche Bucht, Ems und NSB II. Sensortiefen: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.	59
Abb. 3-13 Nährsalzkonzentrationen (Phosphat, Silikat, Nitrat & Nitrit in $\mu\text{mol/l}$) und Salzgehalt (invertiert) an der MARNET Station Deutsche Bucht. Datumsangaben für Maxima (Nährstoffe) und Minima (Salgehalt), Sterne für Wartungstermine (schwarz) oder Salz- gehaltsvergleichsmessungen mit FS Gauß (rot).	61

Abb. 3-14 Niederschlagsanomalie [%] als Verhältnis der Niederschlagssumme im August 2002 zum Augustmittel des Zeitraums 1961-1990. (Quelle: http://gpcc.dwd.de).....	64
Abb. 3-15 Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau. mit Langzeitmittel (1971-2000) und 95%-Grenzen ($\mu \pm 1.96\sigma$). 1 km ³ /a entspricht 31.7 m ³ /s. Deutliche positive Abweichungen vom Langzeitmittel (21.64 km ³ /a) traten quasizyklisch alle 6-8 Jahre ein. (Quelle: WSA-Lauenburg.)	65
Abb. 3-16 Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe in 2002 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971-2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). 1000 m ³ /s entsprechen 2.592 km ³ /Monat. Im Februar/März und ab August kam es zu extremen Abweichungen von der Monatsklimatologie. (Quelle: WSA-Lauenburg.).....	66
Abb. 3-17 Jahresgang 2002 der Abflussraten (m ³ /s) der Elbe am Wehr Neu-Darchau und des Salzgehalts (invertiert) bei Helgoland sowie an der MARNET-Station Deutsche Bucht. 4-Tagemittel. (Quellen: WSA Lauenburg, BAH, BSH.).....	67
Abb. 3-18 Windvektoren (Tagesmittel) an der MARNET Station Deutsche Bucht. Das Aspektverhältnis der Abbildung wurde so gewählt, dass die Geschwindigkeitsskala für die meridionalen und zonalen Windkomponenten gleichermaßen gilt.....	68
Abb. 4-1 La battaglia di Alessandro (Museo Archeologico Nazionale Napoli). Bemerkenswert erscheint uns der großartige Entwurf dieses Werkes, der mit wenigen Figuren eine Menge darzustellen vermag und zur gleichen Zeit höchst interessante, spannende Episoden bringt (zitiert aus: A. de Franciscis, Pompeji – Kultur und Kunst, Kina Italia, Mailand, 2001).....	69

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 NAO-Index 2002. lk: Ponta Delgada & Akureyri (Loewe und Koslowski 1998), lpf6(lk): tiefpassgefiltert über 6 Monate. cruuea: Gibraltar & Südwest Island (www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm). hurrell: Ponta Delgada & Stykkisholmur (www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.other.html). cpcfdb: Amplitude des NAO-Musters aus rotierter Hauptkomponentenanalyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).	18
Tab. 3-1 Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für Windgeschwindigkeit und -richtung am UFS Deutsche Bucht.	50
Tab. 3-2 Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für die signifikante Wellenhöhe (swH) und Seegangsrichtung am UFS Deutsche Bucht (Modelldaten). Zustände swH=0 (15% der Zeit) blieben unberücksichtigt.	50
Tab. 3-3 Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (swH) bei Helgoland (Waverider-Daten, keine Seegangsrichtung).	51
Tab. 3-4 Nährsalzkonzentrationen in $\mu\text{mol/l}$ für charakteristische Wassermassen im Januar 2002.	60
Tab. 3-5 Nährstoff-Salzgehalts Korrelationen im Winter 2002 (10. Januar – 20. März) an der MARNET Station Deutsche Bucht.	62

Figure Index

Fig. 2-1 Bathymetry of the North Sea (including MARNET stations). Resolution 1/3 nm. Data courtesy of Dansk Hydraulik Institut.....	13
Fig. 2-2 SLP and wind distribution over the North Atlantic for positive (left) and negative NAO modes in winter. Source: www-avisos.cla.fr/html/applications/climat/nao_explication_uk.html , M. Visbeck (Lamont-Doherty Earth Observatory).....	15
Fig. 2-3 NAO phase portrait as percent frequency distribution of monthly dynamic NAO states since 1879. Contours 0.5, 1, 1.5 and 2% are lines of equal rel. state density (i.e. rel. # of states per square-bin, 0.6x0.6). The sequences of 15 yellow and 15 blue circles (1,2,...,8, 9,O,N,D,J,F,M) show the temporal evolution from January 2002 through March 2003 of raw (yellow) and low-pass filtered (6 month, blue) monthly mean states, respectively.	16
Fig. 2-4 NAO Index 2002. Cf. Table 2-1.	18
Fig. 2-5 North Sea surface circulation in winter (December through March) for negative and positive NAO mode (after Schrum and Siegmund 2002).....	19
Fig. 2-6 Seasonal surface circulation in 2002 (JFM = January-February-March, AMJ ...). Vector means from weekly currents fields (BSH-Model). Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	21
Fig. 2-7 Seasonal cycle of areal mean weekly SST of the North Sea from December 2001 through November 2002 and ensemble of corresponding cycles since 1968. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation.....	23
Fig. 2-8 Monthly SST anomalies in 2002 as departures from 1971-1993 climatology. Contour interval is 0.5 K.....	24
Fig. 2-9 Monthly mean North Sea SST (°C) with anomalies (K) and percentiles (%), and NAO-Index (Loewe and Koslowski 1998). Low-pass filter width 6 month. Color-steps for percentiles: 1,5,10,25,50,75,90,95,99%.....	26
Fig. 2-10 Ranked annual mean North Sea SST.....	27
Fig. 2-11 SST regimes: North Sea (top) and Helgoland (bottom and middle). Standardized anomalies, low-pass filter width: 2 years, contour interval: 0.25 standard deviations. ...	29
Fig. 2-12 North Sea surface salinity in winter (left, ICES IBTS, January 18 through February 28, and RV Gauß, Cruise 377, January 14-23) and summer 2002 (RV Gauß, Cruise 385, July 16-31).....	30

Fig. 2-13 Temperature stratification in summer (RV Gauß, Reise 385).	32
Fig. 2-14 Salinity stratification in summer (RV Gauß, Cruise 385).	33
Fig. 2-15 Oxygen saturation in summer (RV Gauß, Cruise 385).	34
Fig. 2-16 Phosphate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in winter. Data: ICES IBTS (RV Walther Herwig 236, Jan 19 - Feb 13) and RV Gauß 377, Jan 14-23.	36
Fig. 2-17 Silicate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in winter. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Data: ICES IBTS (RV Walther Herwig 236, Jan 19 - Feb 13) and RV Gauß 377, Jan 14-23.	37
Fig. 2-18 Nitrate & Nitrite ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in winter. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 7, 6, \dots, 0$. Data: ICES IBTS (RV Walther Herwig 236, Jan 19 - Feb 13) and RV Gauß 377, Jan 14-23.	37
Fig. 2-19 Phosphate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.	39
Fig. 2-20 Silicate ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.	39
Fig. 2-21 Nitrate & Nitrite ($\mu\text{M} \equiv \mu\text{mol/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.	40
Fig. 2-22 Chlorophyll ($\mu\text{g/l}$) surface and bottom distribution in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.	41
Fig. 2-23 Surface and bottom distribution of oxygen saturation (%) in summer. Data: RV Gauß 385, July 16-31.	42
Fig. 2-24 Surface and bottom turbidity (NTU) in summer. Contour spacing is not constant but forms a sequence of bisections: 0.5×2^k , $k = 4, 3, \dots, -4$. Data: RV Gauß 385, July 16-31.	42
Fig. 3-1 Classification scheme for daily residual currents in the German Bight.	46
Fig. 3-2 Percent frequency of circulation patterns in 2002 vs. 5-year mean (1997-2001).	47
Fig. 3-3 Absolute frequency of circulation patterns in the German Bight for 1997-2002.	47
Fig. 3-4 Chronology of circulation patterns in the German Bight in 2002. (# = nw-se).	48

Fig. 3-5 Time series of observed wind speed and direction at lightvessel Deutsche Bucht (top), significant wave height (swh) and wave direction at grid position lightvessel German Bight (model data, middle), and swh near Helgoland (Waverider data, bottom). All data smoothed over 5 measuring cycles applying a median filter.	49
Fig. 3-6 Seasonal cycle in 2002 of monthly averaged daily global radiation totals at Norderney together with intramonthly extremes, 1971-2000 base period monthly means, and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). 1 kJcm^{-2} is equivalent to a radiation flux density of 116 Wm^{-2}	52
Fig. 3-7 Seasonal cycle 2002 of monthly mean SST at Helgoland-Reede together with 1971-2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). (Source: BAH, BSH.)	53
Fig. 3-8 Pseudo-2D time series of monthly mean SST ($^{\circ}\text{C}$) since 1873 at Helgoland-Reede. (Source: BAH, BSH.).....	54
Fig. 3-9 Rolling correlations NAO versus Helgoland-Reede SST.	55
Fig. 3-10 Seasonal cycle 2002 of monthly mean SSS at Helgoland-Reede together with monthly extremes, 1971-2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). (Source: BAH, BSH.)	56
Fig. 3-11 Pseudo-2D time series of monthly mean SSS since 1973 at Helgoland-Reede. Contour interval: 1, color spacing 0.5. (Source: BAH, BSH.).....	57
Fig. 3-12 Temperature stratification ($^{\circ}\text{C}$) in 2002 at MARNET stations Deutsche Bucht, Ems and NSB II. Sensor depths: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.	59
Fig. 3-13 Nutrient concentrations (phosphate, silicate, nitrate & nitrite in $\mu\text{mol/l}$) and salinity (inverted) at MARNET Station Deutsche Bucht. Datings indicate maxima (nutrients) and minima (salinity), stars maintenance work (black) or reference measurements of RV Gauß (red).....	61
Fig. 3-14 Precipitation anomaly [%] as ratio of August 2002 precipitation total to 1961-1990 base period August mean. (Source: http://gpcc.dwd.de).....	64
Fig. 3-15 Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971-2000) and 95%-limits ($\mu \pm 1.96\sigma$). 1 km^3/yr is equivalent to $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Notable departures from long-term mean ($21.64 \text{ km}^3/\text{yr}$) recurred at a frequency of 6-8 years. (Data: WSA-Lauenburg.).....	65
Fig. 3-16 Monthly mean and maximum runoff of Elbe River in 2002 at Neu-Darchau weir together with 1971-2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). 1000 m^3/s are equivalent to $2.592 \text{ km}^3/\text{month}$. In February/March	

and since August extreme departures from climatology were recorded. (Data courtesy of WSA-Lauenburg.).....66

Fig. 3-17 Annual cycle 2002 of daily runoff (m^3/s) of Elbe River at Neu-Darchau weir versus salinity (inverted) near Helgoland and at MARNET Station Deutsche Bucht. 4-day means. (Sources: WSA Lauenburg, BAH, BSH).....67

Fig. 3-18 Daily mean wind vectors at MARNET Station Deutsche Bucht. The aspect ratio is chosen such that the velocity scale applies to both meridional and zonal wind components.68

Fig. 4-1 La battaglia di Alessandro (MANN). We think that a remarkable feature of this work is its generous framework requiring just a few figures to create a full scene and highly interesting and thrilling episodes (translated from A. de Franciscis, Pompeji – Kultur und Kunst, Kina Italia, Mailand, 2001).69

Table Index

Table 2-1 NAO Index 2002. lk: Ponta Delgada & Akureyri (Loewe und Koslowski 1998), lpf6(lk): low-pass filtered (6 month). cruuea: Gibraltar & Southwest Island (www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm). hurrell: Ponta Delgada & Stykkisholmur (www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.other.html). cpccdb: Amplitude of NAO pattern from rotated principal component analysis of 700 hPa height anomalies (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc.nao.html).	18
Table 3-1 Censored percent frequency distribution of wind speed and direction at UFS-DB.	50
Table 3-2 Censored percent frequency distribution of significant wave height (swh) and wave direction at UFS-DB (model data). States swh=0 (15% of the time) not included.....	50
Table 3-3 Percent frequency distribution of significant wave height (swh) near Helgoland (Waverider data, no wave direction sensor).....	51
Table 3-4 Nutrient concentrations ($\mu\text{mol/l}$) for characteristic water masses in January 2002.	60
Table 3-5 Nutrient-Salinity correlations in winter 2002 (January, 10 – March, 20) at MARNET Station Deutsche Bucht.	62

Abkürzungen / Acronyms

AWI	Alfred Wegener Institut für Polarforschung
CANVAS	Contaminants and Nutrients in Variable Sea Areas, BMBF-Projekt
BAH	Biologische Anstalt Helgoland
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DWD	Deutscher Wetterdienst
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
GSA	Great Salinity Anomaly
GTS	Global Telecommunication System der WMO
IBTS	International Bottom Trawl Survey
ICES	International Council for the Exploration of the Sea
IHO	International Hydrographic Organization
MARNET	Marines Umweltmessnetz in Nord- und Ostsee des BSH
MAWS	Marine Automatic Weather Station
MURSYS	Meeresumwelt Reportsystem des BSH
NAO	Nordatlantische Oszillation
NTU	Nephelometric Turbidity Units
OSPAR	Oslo/Paris Kommission
QBO	Quasi-Biennial Oscillation
QSR	Quality Status Report
UFS	Unbemanntes Feuerschiff
SAMSON	Stationsgestütztes Automatisches Monitoring von Schad- und Nährstoffen in Ostsee und Nordsee, BMBF-Projekt
SPM	Suspended Particulate Matter
SSS	Sea Surface Salinity
SST	Sea Surface Temperature
SWH	Signifikante Wellenhöhe
TUVAS	Transport, Umsatz und Variabilität von Schad- und Nährstoffen in der Deutschen Bucht 1990-1992, BMFT-Projekt
WMO	World Meteorological Organisation
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
YFS	Young Fish Survey

Autoren / Authors

Peter Loewe	+49-40-3190-3214	loewe@bsh.de
Gerd Becker	+49-40-3190-3200	gerd.becker@bsh.de
Uwe Brockmann*	+49-40-42838-3989	brockmann@uni-hamburg.de
Alexander Frohse	+49-40-3190-3212	frohse@bsh.de
Kai Herklotz	+49-40-3190-3280	herklotz@bsh.de
Holger Klein	+49-40-3190-3211	holger.klein@bsh.de
Achim Schulz	+49-40-3190-3213	achim.schulz@bsh.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Str. 78
20359 Hamburg

* Institut für Biogeochemie und Marine Chemie
Universität Hamburg
Martin-Luther-King-Platz 6
20146 Hamburg

Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Verzeichnis der veröffentlichten Arbeiten

-
- | | | | |
|----|--------|---|--|
| 1 | (1994) | Sy, A., Ulrich, J. | North Atlantic Ship-of-Opportunity XBT Programme 1990 - Data Report, 134 pp. |
| 2 | (1994) | Hagen, E.,
Mittelstaedt, E.,
Feistel, R., Klein, H. | Hydrographische Untersuchungen im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992, 49 pp. |
| 3 | (1994) | Oliczewski, J.,
Schmidt, D. | Entwicklung einer Bestrahlungsapparatur zum photochemischen Aufschluß von Meerwasserproben zur Bestimmung von Schwermetallen, 70 pp. |
| 4 | (1994) | BSH [Hrsg.] | Das UN-Seerechtsübereinkommen tritt in Kraft: Inhalte und Konsequenzen für die Bundesrepublik Deutschland, 71 pp. |
| 5 | (1995) | BSH [Hrsg.] | Nationale Folgerungen aus dem Inkrafttreten des UN-Seerechtsübereinkommens, 103 pp. |
| 6 | (1995) | Haffer, E., Schmidt, D. | Entwicklung eines Probenvorbereitungsverfahrens zur Bestimmung von Arsen im Meerwasser mit der Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse, 109 pp. |
| 7 | (1995) | BSH [Hrsg.] | Global Ocean Observing System - Statusbericht, 100 pp. |
| 8 | (1996) | Mittelstaedt, E.,
Meincke, J., Klein, H. | WOCE-Current measurements: The ACM8 array – Data Report, 150 pp. |
| 9 | (1996) | BSH [Hrsg.] | GOOS Workshop - Anforderungen an ein wissenschaftliches Konzept für den deutschen Beitrag, 60 pp. |
| 10 | (1997) | Sterzenbach, D. | Entwicklung eines Analyseverfahrens zur Bestimmung von chlorierten Kohlenwasserstoffen in marinen Sedimenten und Schwebstoffen unter besonderer Berücksichtigung der überkritischen Fluidextraktion, 233 pp. |
| 11 | (1997) | Jonas, M., Richter, R. | Stand und Entwicklungstendenzen nautischer Systeme, Anlagen und Geräte an Bord von Seeschiffen, 37 pp. |
| 12 | (1997) | Wedekind, C.,
Gabriel, H., Goroncy, I.,
Främke, G., Kautsky, H. | "Meteor"-Reise Nr. 71/1985, Norwegen-Grönlandsee – Datenbericht. 44 pp. |
| 13 | (1998) | BSH [Hrsg.] | HELCOM Scientific Workshop - The Effects of the 1997 Flood of the Odra and Vistula Rivers. 46 pp. |
| 14 | (1998) | Berger, R., Klein, H.,
Mittelstaedt, E.,
Ricklefs, K., Ross, J. | Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum-Tief – Datenreport. 260 pp. |
| 15 | (1998) | Röske, F. | Wasserstandsvorhersage mittels neuronaler Netze. 212 pp. |
| 16 | (1998) | Ross, J., Mittelstaedt, E.,
Klein, H., Berger, R.,
Ricklefs, K. | Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum-Tief – Abschlußbericht. 98 pp. |
| 17 | (1998) | Klein, H. | OPUS-Current Measurements: Mecklenburg Bight and Fehmarnbelt - Data Report, 150 pp. |
| 18 | (1999) | BSH [Hrsg.] | Deutscher Programmbeitrag zum Globalen Ozeanbeobachtungssystem (GOOS), 67 pp. |
| 19 | (1999) | BSH [Hrsg.] | German Programme Contribution to the Global Ocean Observing System (GOOS), 71 pp. |
| 20 | (1999) | Sztobryn, M.,
Stanislawczyk, I.,
Schmelzer, N. | Ice Conditions in the Szczecin and Pomeranian Bay During the Normal Period from 1961-1990, 36 pp. |
-

- 21 (1999) Nies, H., Karcher, M., Bahe, C., Backhaus, J., Harms, I. Transportmechanismen radioaktiver Substanzen im Arktischen Ozean - Numerische und experimentelle Studien am Beispiel der Barents- und Karasee, 134 pp.
- 22 (2000) Lorbacher, K. Niederfrequente Variabilität meridionaler Transporte in der Divergenzzone des nordatlantischen Subtropen- und Subpolarwirbels – Der WOCE-Schnitt A2, 156 pp.
- 23 (2000) Klein, H. The Subsurface Eastern Boundary Current of the North Atlantic between 32°N and 53°N – Data Report, 240 pp.
- 24 (2000) Klein, H. Strömungen und Seegangsverhältnisse westlich der Insel Hiddensee - Datenreport, 59 pp.
- 25 (2001) Goedecke, E. Der hydrographische Aufbau in der Deutschen Bucht vornehmlich dargestellt auf Grund der vorliegenden Unterlagen über Temperatur, Salzgehalt und Dichte, 202 pp.
- 26 (2001) Klein, H., Mittelstaedt, E. Strömungen und Seegangsverhältnisse vor Graal-Müritz und in der Tromper Wiek - Datenreport, 162 pp.
- 27 (2001) Klein, H., Mittelstaedt, E. Gezeitenströme und Tidekurven im Nahfeld von Helgoland, 24 pp. und Anhang.
- 28 (2001) Behnke, J., Berking, B., Herberg, J., Jonas, M., Mathes, S. Functional Scope and Model of Integrated Navigation Systems - A Toolbox for Identification and Testing. 181 pp.
- 29 (2001) Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S., Klein, H., Komo, H. The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. 49 pp.
- 30 (2002) Sy, A., Ulrich, J., Weichert, H.-J. Upper Ocean Climate Ship-of-Opportunity Programme of BSH – A Status Report. 45 pp.
- 31 (2003) Dahlmann, G. Characteristic Features of Different Oil Types in Oil Spill Identification. 48 pp.
- 32 (2003) Nies, H., Gaul, H., Oestereich, F., Albrecht, H., Schmolke, S., Theobald, N., Becker, G., Schulz, A., Frohse, A., Dick, S., Müller-Navarra, S., Herklotz, K. Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht. 81 pp.
- 33 (2003) Loewe, P., Becker, G., Brockmann, U., Frohse, A., Herklotz, K., Klein, H., Schulz, A. Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht. 89 pp.
-