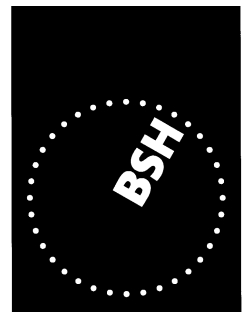




BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Nordseezustand 2003



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Nordseezustand 2003

Autoren:

Peter Loewe
Stefan Schmolke
Gerd Becker
Uwe Brockmann
Stephan Dick
Clemens Engelke
Alexander Frohse
Wilfried Horn

Holger Klein
Sylvin Müller-Navarra
Hartmut Nies
Natalija Schmelzer
Dieter Schrader
Achim Schulz
Norbert Theobald
Sieglinde Weigelt

**Berichte des
Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie
Nr. 38/2005**

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 *Nordseezustand 2003* im Internet:

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

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2005
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.

Inhalt

Vorwort	7
Zusammenfassung	9
Summary	15
1 Einführung	21
2 Atmosphärenphysik	23
2.1 Nordatlantische Oszillation.	24
2.2 Großwetterlagen	27
2.2.1 Klassifizierung	27
2.2.2 Wetterlagenkalender	30
2.3 Luftdruck und Wind	35
2.4 Lufttemperatur und Strahlung	40
2.5 Referenzen	43
3 Physikalische Ozeanographie	45
3.1 Strömungen.	46
3.1.1 Saisonale geographische Verteilungen	46
3.1.2 Einstrom.	48
3.1.3 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht.	49
3.2 Seegang	54
3.2.1 Saisonale geographische Seegangsverteilungen	54
3.2.2 Lokale Wind- und Windseeverteilungen	57
3.2.2.1 Innere Deutsche Bucht (>UFS DB<)	57
3.2.2.2 Äußere Deutsche Bucht (»Entenschnabel«)	62
3.3 Wasserstand	65
3.4 Temperatur	68
3.4.1 Oberflächentemperatur.	68
3.4.2 Mischmasch-Klima	71
3.4.2.1 Bi-stabile SST-Regimes	72
3.4.2.2 Hybrides Windklima	73
3.4.2.3 Schlussbemerkungen	77
3.4.3 Temperaturschichtung	77
3.4.4 Wärmeinhalt	80
3.4.4.1 Wärmeinhalt im Sommer 2003 (Beobachtungen)	80
3.4.4.2 Wärmeinhalt seit 1958 (Modell)	81
3.5 Salzgehalt	87
3.5.1 Saisonale geographische Verteilungen	87
3.5.2 Salzgehaltsschichtung	89
3.5.3 Abfluss Elbe	91
3.5.4 Salzgehalt bei Helgoland Reede	92
3.6 Meereis	93
3.6.1 Eisstatistik	93
3.6.1.1 Eisvolumen und Eiswintertyp	93

3.6.1.2 Eiswahrscheinlichkeit	94
3.6.2 Verlauf des Eiswinters 2002/3.	95
3.7 Referenzen	98
4 Meereschemie	101
4.1 Nährstoffe	102
4.1.1 Einführung	102
4.1.2 Winter 2003	104
4.1.2.1 Zentrale und nördliche Nordsee	104
4.1.2.2 Deutsche Bucht	105
4.1.3 Sommer 2003.	110
4.1.3.1 Phosphat.	111
4.1.3.2 Nitrat	111
4.1.3.3 Ammonium	112
4.1.3.4 Chlorophyll / Trübung	113
4.1.3.5 Sauerstoff	116
4.1.4 Nährstoffdynamik bei Helgoland	117
4.2 Organische Schadstoffe	121
4.2.1 Einführung	121
4.2.2 Hexachlorcyclohexan-Isomere (α -, β -, γ -HCH)	122
4.2.2.1 HCH-Gehalte des Meerwassers.	123
4.2.2.2 Zeitliche Entwicklung der Meerwasserbelastung	127
4.2.2.3 HCH-Gehalte des Sediments	128
4.2.3 Lipophile Chorkohlenwasserstoffe (HCB, PCB, DDT)	129
4.2.3.1 CKW-Gehalte des Meerwassers	130
4.2.3.2 CKW-Gehalte des Sediments	131
4.2.4 Kohlenwasserstoffe	135
4.2.4.1 Akute Ölverschmutzungen.	135
4.2.4.2 Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane	136
4.2.4.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	139
4.2.5 Zinnorganische Verbindungen	147
4.2.6 Polare Pestizide	149
4.2.6.1 Herbizidgehalte des Meerwassers	150
4.2.6.2 Zeitliche Variabilität der Herbizidgehalte	154
4.3 Metalle	157
4.3.1 Einführung	157
4.3.2 Zeitliche Entwicklung der Metalleinträge.	159
4.3.3 Bewertungskriterien.	160
4.3.3.1 Hintergrund-Referenzkonzentrationen (BRC)	160
4.3.3.2 Ökotoxikologische Bewertungskriterien (EAC)	161
4.3.4 Metallgehalte des Meerwassers	161
4.3.5 Metallgehalte des Sediments.	165
4.4 Radioaktive Stoffe	173
4.4.1 Einführung	173
4.4.2 Eintragsquellen künstlicher Radionuklide	174
4.4.3 Geographische Radioaktivitätsverteilungen.	175
4.4.4 ^{137}Cs und ^{90}Sr -Zeitserien in der Deutschen Bucht	178
4.4.5 Aktivitätskonzentrationen im Sediment	179
4.4.6 Zusammenfassung	180
4.5 Referenzen	182

Anhang A: Wetterlagenklassifizierung	185
A.1 Wind	185
A.2 Vorticity	187
A.3 Klassifizierungskriterien.	188
A.4 Referenzen	189
Anhang B: Windstatistik	191
B.1 Bivariate Normalverteilung	191
B.2 Hauptachsentransformation	192
B.3 Wahrscheinlichkeitsellipsen	193
B.4 Referenzen	194
Anhang C: Mishmash Climate	195
C.1 Bi-stable SST Regimes	195
C.2 Hybrid Wind Climate	196
C.3 Concluding Remarks	197
C.4 References	198
Abbildungsverzeichnis	199
Tabellenverzeichnis	205
Tafelverzeichnis	207
List of Figures	209
List of Tables	215
Autoren / Authors	217

Vorwort

Meereskundliche Untersuchungen und die Überwachung der Meeresumwelt gehören zu den wichtigen Aufgaben des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Sie sind eine wesentliche Grundlage für Maßnahmen zum Schutz der Meeresumwelt genauso wie für vorausschauende Planungen und Entscheidungen über die Nutzung der Meere. Die regelmäßige Überwachung, Interpretation und Bewertung des Zustands der Meere sind Voraussetzung für rationale politische und ökonomische Entscheidungen im Hinblick auf eine umweltverträgliche und nachhaltige Nutzung der Küstenregionen und der offenen See. Das gilt in besonderem Maße für die Nord- und Ostsee, die als Randmeere schon wegen ihrer natürlichen Gegebenheiten sehr empfindlich sind, so dass sich Belastungen besonders stark auswirken können. Regelmäßige Untersuchungen, wie sie das BSH seit langem durchführt, sind daher unverzichtbar. Die Untersuchungsergebnisse fließen in verschiedene Berichte über den Zustand der Meeresumwelt ein.

Angesichts der wachsenden Notwendigkeit, Nutzungs- und Schutzinteressen sorgfältig abzuwägen und zu diesem Zweck marine Raumordnungsstrategien zu entwickeln, erhöht sich auch der Informationsbedarf über den Zustand der Meere. Während das Leibniz-Institut für Ostseeforschung, Warnemünde, das im Auftrag des BSH regelmäßige Untersuchungen in der Ostsee durchführt, schon seit einigen Jahren entsprechende Berichte herausgibt, fehlte es bisher an einem vergleichbaren Nordseebericht. Erstmals für das Jahr 2003 legt das BSH nunmehr für die Nordsee eine interdisziplinäre Präsentation von atmosphärischen, ozeanographischen und chemischen Befunden vor. Beginnend mit diesem Bericht sollen jährlich die natürliche Veränderlichkeit und die anthropogenen Veränderungen der Nordsee nicht nur systematisch erfasst, sondern nachvollziehbar dokumentiert werden. Dadurch soll das ganzheitliche Verständnis des hochvariablen und besonders komplexen physikalischen, chemischen und biologischen Systems Nordsee gefördert werden.

Der Zustandsbericht gewährt nicht nur Einblick in die vielfältigen meereskundlichen Arbeiten des BSH im Jahr 2003, sondern stellt eine aktuelle Informationsquelle »aus erster Hand« dar, um planvolle steuernde und regulierende Systemeingriffe zur Erhaltung oder Wiederherstellung eines »guten« ökologischen Zustandes zu ermöglichen. Obwohl die Veröffentlichungen über die Nordsee und die Deutsche Bucht kaum zählbar sind, zeigen die wissenschaftlichen Erkenntnisse dieses Berichts aber auch, dass insbesondere interdisziplinäre wissenschaftliche Untersuchungen verstärkt gefördert werden müssen.

Der Zustandsbericht wendet sich gleichermaßen an Politik, Wissenschaft und interessierte Öffentlichkeit.



Prof. Dr. Peter Ehlers

Präsident des

Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Zusammenfassung

Der Zustandsbericht der Nordsee für das Jahr 2003 wurde gegenüber dem Pilotbericht (LOEWE ET AL. 2003), der auf den meeresphysikalischen Zustand fokussiert war, um eine umfassende meereschemische Zustandsanalyse erweitert. Mit der gemeinsamen Darstellung des meteorologischen, hydrographischen und chemischen Zustands der Nordsee wurde ein großer Schritt hin zur Integration der Ergebnisse aus den meereskundlichen Teildisziplinen unternommen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst.

Atmosphärenphysik

Die großräumige atmosphärische Zirkulation, deren grundsätzliche Form und Intensität sich durch einen Index der Nordatlantischen Oszillation (NAO) abschätzen lassen, ist eine wichtige Randbedingung für den ozeanographischen Zustand der Nordsee. Im Herbst und Winter 2003 überwogen schwache oder negative NAO-Zustände, welche eine abgeschwächte Zonalzirkulation indizieren.

Für eine differenziertere Analyse der atmosphärischen Zirkulation über der Nordsee wurden die täglichen Wetterlagen mit einem objektiven Verfahren klassifiziert. Gegenüber dem Vorjahr verdoppelte sich die Häufigkeit von Hochdruckwetterlagen auf knapp 30 % (100 Tage). Lange Hochdruckperioden von 16, 17 bzw. 12 Tagen ereigneten sich im Februar, März bzw. August. Diese standen in ursächlichem Zusammenhang mit anomal kalten Lufttemperaturen im Winter und den mediterranen Temperaturen während der Hundstage im August. Die Sturmaktivität reduzierte sich von 24 (2002) auf 16 Ereignisse und war wesentlich auf die Monate Dezember und Januar beschränkt. Die Windstärken waren besonders im Winter und Herbst gegenüber denjenigen des Vorjahres stark abgeschwächt. Die Hauptwindrichtungen waren wie im Jahr 2002 SW und W und traten mit einer unveränderten Häufigkeit von 18 % bzw. an 66 Tagen auf.

Physikalische Ozeanographie

Modellbasierte Abschätzungen der saisonalen Oberflächenzirkulation der Nordsee wiesen im Winter und Herbst 2003 eine erheblich geringere Strömungsintensität und Richtungsstabilität auf als im Vorjahr. Der atlantische Einstrom am NW-Rand der Nordsee war stark reduziert. Der Nettoeinstrom durch den Kanal fiel gegenüber dem Vorjahrestransport von 1 Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) auf 0.03 Sv ab. Der im Herbst 2002 mit ungewöhnlich starken SE-Winden verbundene kräftige Ausstrom aus der Ostsee über der Norwegischen Rinne trat im Jahr 2003 nicht auf.

Die Klassifizierung der täglichen Reststrommuster in der Deutschen Bucht belegte erneut die Dominanz zyklonaler Strömungsmuster (150 Tage) gegenüber antizyklonalen (50 Tage) sowie variablen Zirkulationsformen (109 Tage). Während sich die Jahreshäufigkeiten dieser Haupttypen von den Vorjahreswerten (143, 42, 131 Tage) wenig unterschieden, wurden starke inverse Änderungen im Anteil variabler Zirkulationsmuster, die teils durch mesoskalige Wirbelstrukturen geprägt sind, für die Jahreszeiten Winter und Herbst festgestellt. Einem Häufigkeitsanstieg von 13 (Winter 2002) auf 34 Tage im Winter 2003 stand ein Rückgang von 35 auf 14 Tage im Herbst gegenüber.

Modellbasierte saisonale Seegangsverteilungen in der Nordsee zeigen in allen Jahreszeiten – entsprechend der Vorzugsrichtung der atlantischen Dünung – nach NW hin zunehmende Wellenhöhen. Die Wellenaufrichtung der Windsee stimmt grundsätzlich etwa mit der Windrichtung überein. Starke Richtungsunterschiede im Windantrieb im Herbst der Jahre 2002 (SE) und 2003 (W) führten zu den markantesten Abweichungen in den entsprechenden jahreszeitlichen Seegangsverteilungen. Während mittlere signifikante Wellenhöhen > 2 m im stürmischen Winter 2002 bis 54° N auftraten, waren solche Wellenhöhen im ersten Quartal 2003 auf das Seegebiet nördlich 56° N beschränkt. Lokale Wind- und Windseeverteilungen aus der Deutschen Bucht zeigten wie im Vorjahr zwei Verteilungsgipfel in den Richtungssektoren NW-SW und E-SE. Diese bimodale Struktur war in Küstennähe sowie im Winterhalbjahr am stärksten ausgeprägt. Hohe und extreme Windgeschwindigkeiten traten mit NW- und SW-Winden auf, die größten Wellenhöhen von über 8 m entfielen hingegen aufgrund längerer Windstreichlängen auf den NW-Sektor.

Die monatlichen Hochwasserstände bei Cuxhaven zeigten keine nennenswerten Abweichungen vom klimatologischen Jahresgang. Die einzige Sturmflut trat am 21. Dezember 2003 in Verbindung mit dem stärksten Orkan (»Jan«) des Jahres ein.

Die aus den wöchentlichen Analysen der Oberflächentemperaturverteilung abgeleitete Nordseetemperatur lag im Jahresmittel nur 0.1°C unter der Rekordtemperatur von 11.0°C im Vorjahr. Signifikante positive Abweichungen vom klimatologischen Jahresgang traten von Juni bis September sowie im Dezember auf. Das Warmregime, das im Herbst 1987 ein 10-jähriges Kaltregime ablöste, dauerte weiter an. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur wird offenbar durch ein hybrides Windklima bedingt, dessen Eigenschaften einem monsunartigen jahreszeitlichen Wechsel unterliegen. Für das rezente Warmregime (Kaltregime) ist ein Alternieren zwischen maritimen Winden im Winter (Sommer) und kontinentalen Winden im Sommer (Winter) charakteristisch.

Der aus Modelldaten abgeschätzte Wärmeinhalt der Nordsee zeigte im Zeitraum 1969 – 1993 einen engen Zusammenhang ($r^2 = 0.87$) zur Oberflächentemperatur, der auch in parallelen Regimeandauern und -wechseln zum Ausdruck kam. Dieser starke Zusammenhang ist seit 1994 erheblich gestört. Gleichzeitig brach für beide Variablen der Zusammenhang zur Nordatlantischen Oszillation ein. Das Maximum im Jahresgang des Wärmeinhalts tritt gegenüber demjenigen der Oberflächentemperatur mit einer etwa einmonatigen Zeitverzögerung im September ein. Während der Wärmeinhalt im August 2003 denjenigen des Vorjahres übertraf, war im September das Gegenteil der Fall.

Für das Warmregime untypisch häufige Hochdruckwetterlagen und damit einhergehende kühle Lufttemperaturen bedingten an der deutschen Nordseeküste einen mäßigen Eiswinter. Infolge der etwa dreiwöchigen Unterbrechung der Kaltphase durch zahlreiche Sturmlagen ab Mitte Januar erreichte die flächenbezogene Eisvolumensumme lediglich 0.53 m.

Im Jahr 2003 waren weite Teile der nördlichen und zentralen Nordsee mit atlantischem Wasser gefüllt. Die relative Nordseefläche mit bodennahen Salzgehalten > 35 stieg seit dem Winter 2002 innerhalb eines Jahres von 23 auf 37 % und damit auf den höchsten Wert seit 1998. Diese starke Zunahme im Einstrom von Atlantikwasser scheint mit der extrem starken Zonalzirkulation und Sturmaktivität im Winter 2002 in Verbindung zu stehen. Die Abflussmengen der Elbe waren ab April 2003 unternormal. Ursache waren teilweise ungewöhnlich niedrige, aber vor allem dauerhaft unternor-

male Niederschlagsmengen im Trockenjahr 2003. Die jahreszeitliche Entwicklung des Salzgehalts bei Helgoland Reede vollzog sich nahezu ganzjährig oberhalb der Monatsklimatologie, ohne dass es zu statistisch signifikanten Abweichungen kam.

Meereschemie

Um den Zustand der Nordsee zu beurteilen, wurden im Laufe des Jahres 2003 im Rahmen des Routineüberwachungsprogramms mehrere Messkampagnen durchgeführt. Auf diesen Seereisen wurden Wasser-, Sediment- und Schwebstoffproben genommen und auf verschiedenste Stoffgruppen analysiert. Insgesamt wurde auf diese Weise ein guter räumlicher Überblick über den Zustand der unterschiedlichen Wasserkörper (Ästuare, Küstenwasser, Kanalwasser und zentrales Nordseewasser) in verschiedenen Jahreszeiten gewonnen. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst.

Nährstoffe

Sowohl im Winter als auch im Sommer 2003 wurden Nährstoffe in unterschiedlichen Tiefen der gesamten Nordsee analysiert.

Zur Untersuchung langfristiger Trends wurden nur Messungen aus den Wintermonaten herangezogen, denn in dieser Jahreszeit ist die biologische Aktivität am geringsten. Um Nährstoffproben aus unterschiedlichen Gebieten (Flussästuare, Küstengewässer, offene See) vergleichbar zu machen, wurden sie auf den gebietstypischen Salzgehalt bezogen (normiert). Die Phosphatgehalte lagen in der Deutschen Bucht auch im Winter 2003 fast auf dem Referenzniveau von 1936. Im Küstenbereich lagen sie noch darüber. Bei den Stickstoffverbindungen, für die es keine Vergleichszahlen von 1936 gibt, sieht das Bild weniger positiv aus, da die Einträge in die Nordsee nicht in gleicher Weise wie beim Phosphat abgenommen haben.

Im Sommer 2003 wies die zentrale Nordsee eine stabile thermohaline Schichtung mit einer nährstoffarmen Deckschicht auf, die bis ca. 20 m Tiefe reichte. Das Chlorophyllmaximum befand sich im Bereich der Dichtesprungschicht, da hier noch ausreichend Licht und Nährstoffe für das Algenwachstum zur Verfügung standen. Insgesamt lagen die Nährstoffkonzentrationen im Bereich der langjährigen Mittelwerte des Zeitraums 1986 – 2000.

Auch die Langzeitserien von Helgoland Reede zeigten insgesamt Tendenzen zu gleichbleibenden oder sinkenden Nährstoffkonzentrationen.

Als Folge der ungewöhnlich starken Temperaturschichtung im Sommer 2003 verringerten sich die Sauerstoffsättigungswerte im Bodenwasser bereits Anfang August im Gebiet der Weißen Bank auf 46 – 60 % und sanken bis Anfang September weiter auf 38 %. Mit den ersten Herbststürmen wurde die Schichtung schnell aufgebrochen und das Sauerstoffdefizit behoben.

Organische Schadstoffe

Im Routineüberwachungsprogramm für die Nordsee werden organische Schadstoffe überwiegend im Mai und Juli / August untersucht. Im Jahr 2003 wurden für Meerwasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben bis zu 120 verschiedene Verbindungen be-

stimmt. Die Konzentrationen der meisten Schadstoffe lagen auf dem Niveau der Vorjahre.

Bei der Stoffklasse der Hexachlorcyclohexane – das Gamma-Isomer ist das über viele Jahre eingesetzte Insektizid ›Lindan‹ – dauerte der rückläufige Trend der vergangenen Jahre an, so dass die niedrigsten Konzentrationen seit 1975 beobachtet wurden. Die Lindankonzentration ging gegenüber dem Vorjahr um ca. 18 % zurück. Seit 1998 hat sich die Lindan-Belastung um mehr als 90 % reduziert.

In der Gruppe der unpolaren und somit schlecht wasserlöslichen Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) wurden die Schadstoffklassen HCB, PCB und DDT untersucht. Alle drei Gruppen wiesen im Wasser der Deutschen Bucht vergleichbare räumliche Strukturen und erhöhte Konzentrationen im Küstenbereich auf. Ein zeitlicher Trend konnte wegen der starken Streuung der Messwerte und des relativ kurzen Beobachtungszeitraums weder im Wasser noch im Sediment nachgewiesen werden.

In der Nordsee war eine Grundbelastung durch aliphatische Kohlenwasserstoffe (Reste von Erdölkohlenwasserstoffen) nachweisbar. Leicht erhöhte Konzentrationen wurden in der Deutschen Bucht und in einem Förderungsplattformgebiet vor der schottischen Küste nachgewiesen. In weiten Teilen der Nordsee war jedoch die durch biogene Quellen verursachte natürliche Hintergrundkonzentration aliphatischer Kohlenwasserstoffe dominierend.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, z. B. Naphtalin, Anthracen, Benzo[a]pyren) sind Verbindungen die bei Verbrennungsprozessen entstehen, aber auch in Erdölprodukten vorhanden sind; sie sind meist karzinogen. Sie zeigten im Wasser, abhängig von der Molekülgröße, ebenfalls das typische Konzentrationsgefälle von den Küsten zur offenen See hin. Außer im durch die Elbe beeinflussten Seegebiet wurden erhöhte Naphtalinkonzentrationen vor der Themsemündung, der schottischen Küste und der norwegischen Küste nachgewiesen. Auf Basis der Verhältnisse der einzelnen PAK zueinander ließen sich gut erklärbare, regionale Belastungsschwerpunkte identifizieren. Im Sediment wurden, ähnlich wie für CKW, die höchsten PAK-Konzentrationen im Bereich der Elbemündung und der Weißen Bank gemessen.

Von den untersuchten 37 polaren Pflanzenbehandlungsstoffen (Insektizide und Herbizide) wurden in der Elbe 21 Stoffe nachgewiesen und in der Deutschen Bucht noch 20 Stoffe gefunden. Die untersuchten Verbindungen weisen oft einen ausgeprägten Jahresgang auf, der mit den Applikationszeiten von Pestiziden in der Landwirtschaft in Verbindung steht. Die Herbizide Atrazin und Simazin wurden weiterhin in relativ hohen Konzentrationen (1 bis 4 ng/L) in der Deutschen Bucht nachgewiesen, obwohl ihr Einsatz in Deutschland seit einigen Jahren nicht mehr zulässig ist. Auch die Herbizide Diuron und Isoproturon wurden in relativ hohen Gehalten (1 bis 7.5 ng/L) gefunden. Von großer ökologischer Relevanz ist nach wie vor das in Schiffsanstrichen verwendete und in kleinsten Mengen hormonell wirksame TBT. Die im Küstenwasser beobachteten Konzentrationen zwischen 1 und 2 ng/L lagen bereits im Bereich der toxikologischen Wirkschwelle.

Metalle

Die Konzentrationen einiger Metalle im küstennahen Wasser und regional begrenzt im Oberflächensediment lagen weiterhin z. T. deutlich über den natürlichen Hintergrundkonzentrationen. Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Blei und Zink zeigten in der gelösten

Phase, ebenso wie ein Großteil der organischen Schadstoffe, ein starkes Konzentrationsgefälle von küstennahen Gebieten zur offenen See hin. Die höchsten Konzentrationen wurden im Bereich der Elbemündung und entlang der Nordfriesischen Küste nachgewiesen. In Küstennähe wurden die Hintergrundkonzentrationen im Wasser durch alle genannten Elemente deutlich überschritten, in der offenen Nordsee lediglich durch Kupfer. Verglichen mit den vorangegangenen Jahren wurden im Wasser jedoch keine ungewöhnlich hohen Konzentrationen beobachtet.

Die Belastungsschwerpunkte durch Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensedimentes lagen in den durch hohe Feinkornanteile dominierten Gebieten südöstlich Helgoland und im Bereich der Weißen Bank. Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden überwiegend abnehmende bis stagnierende Konzentrationen der Metallgehalte beobachtet. Auch südöstlich Helgoland wurden im Jahr 2003, nach einer Phase deutlich erhöhter Quecksilbergehalte (1999 – 2002), wieder Werte gemessen, die mit den 1998 beobachteten Konzentrationen vergleichbar waren. Neue, in diesem Gebiet durchgeführte Sedimentkernuntersuchungen zeigten jedoch, dass die Sedimentschicht mit erhöhter Quecksilberbelastung lediglich durch eine 3 cm dicke Oberflächenschicht geringerer Gehalte abgedeckt war.

Radioaktive Stoffe

Die Konzentrationen der meisten künstlichen Radionuklide im Meerwasser überschritten die im offenen Atlantikoberflächenwasser nachgewiesenen Werte nur noch geringfügig. Trotz der niedrigen Konzentrationen waren die Emissionen aus den Wiederaufbereitungsanlagen Sellafield und La Hague sowohl im Konzentrationsniveau als auch in den für diese Emittenten typischen Aktivitätsverhältnissen der Transurane erkennbar. Aus dem Sediment der Irischen See resuspendiertes ^{137}Cs stellt, neben den direkten Emissionen aus den Wiederaufbereitungsanlagen, die zweitstärkste Quelle für die Nordsee dar. Die höchsten ^{137}Cs Aktivitätskonzentrationen in der Nordsee traten allerdings weiterhin als Folge des Tschernobylunfalls durch abfließendes Ostseeoberflächenwasser im Skagerrak auf.

Künstliche Radionuklide wiesen in der Nordsee jedoch eine so geringe Aktivitätskonzentration auf, dass eine relevante Strahlenexposition über die Anreicherung in der Nahrungskette weder für Biota, noch für den Menschen zu befürchten ist.

Summary

The 2003-report on the state of the North Sea has significantly expanded as compared to the pilot-issue (LOEWE ET AL. 2003) that focussed on physical oceanography. Apart from various extensions as to the analysis of relevant atmospheric and oceanographic state variables the single most important novelty consists in a comprehensive documentation of the chemical state of the North Sea. With the joint presentation of the meteorological, hydrodynamical and chemical state a big step has been taken towards an interdisciplinary holistic assessment of observational and modelling data from the North Sea system. The main results are summarized in subsequent sections.

Atmospheric Physics

The large-scale atmospheric circulation places an important boundary condition on the oceanographic state of the North Sea. Its general form and intensity may be estimated through an index of the North Atlantic Oscillation (NAO). In winter and fall 2003 weak or negative NAO-states indicative of a weakened zonal circulation prevailed.

A more comprehensive analysis of daily atmospheric circulation patterns over the North Sea was carried out using an objective weather-typing scheme. High-pressure weather at just under 30 %, or 100 days, was almost twice as frequent as in 2002. Long runs of 16, 17, and 12 days occurred in February, March, and August, respectively. These extensive high-pressure spells were associated with abnormally low air temperatures in winter and mediterranean temperatures during the dog days in August. Gale frequency was reduced from 24 (in 2002) to 16 events most of which occurred in January and December. Wind force was generally much lower than in the preceding year, especially in winter and autumn. As in 2002, dominant wind directions were SW and W, with an unchanged frequency of 18 %, or 66 days.

Physical Oceanography

Model-based estimates of seasonal North Sea surface circulation showed markedly lower current intensities and directional persistence than the year before. The Atlantic inflow at the NW boundary of the North Sea was also considerably lower. The net-inflow through the Channel dropped to 0.03 Sv from 1 Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) in 2002. The strong outflow from the Baltic Sea along the Norwegian trench, which in fall 2002 was caused by unusually strong SE winds, was not observed in the year under review.

Classification of daily residual current patterns in the German Bight again demonstrated the dominance of cyclonic patterns (150 days) over anticyclonic (50 days) and variable circulation types (109 days). Annual frequencies of these main types only showed little departures from those in 2002 (141, 42, 131 days). On a seasonal basis, however, the variable type, which at times is characterized by meso-scale eddies, experienced substantial inverse changes in frequency from 13 to 34 days in winter versus 35 to 14 days in fall 2003.

Model-based geographical wave height distributions in all seasons show wave heights increasing towards the NW from where the Atlantic swell is entering the North Sea. As being forced by the wind, the wind sea as to direction coincides with the wind's. Sub-

stantial differences in directional wind forcing in fall 2002 (SE) and 2003 (W) caused notable departures in corresponding seasonal wave height distributions. While mean significant wave heights > 2 m occurred as far south as 54° N in the stormy winter of 2002, such wave heights were restricted to sea areas north of 56° N during the winter season of 2003. As in 2002, local wind and windsea distributions from the German Bight showed 2 modes in the sectors NW-SW and E-SE. This bimodal structure was more pronounced closer to the coast and during the cold seasons of the year. High and extreme wind speeds were associated with NW and SW winds, while largest wave heights in excess of 8 m came from NW on account of the larger fetch.

Monthly high-water levels at Cuxhaven did not show notable deviations from the climatological annual cycle. The only storm surge occurred Dec, 21 2003 together with the year's most violent storm.

The annual mean SST (as derived from BSH's weekly North Sea SST-analyses) fell short of the record of 11.0 °C set in 2002 by 0.1 K. Significant positive departures from the climatological cycle occurred from June through September and in December. The warm regime, which in fall 1987 replaced a decade-long cold regime, has continued (cf. *Anhang C, S. 195*). The regime character of the North Sea SST apparently is maintained through a hybrid wind climate, the properties of which undergo monsoon-like seasonal shifts. An alternation between maritime winds in winter (summer) and continental winds in summer (winter) was found typical of the recent warm regime (preceding cold regime).

The heat content of the North Sea was estimated from model data. Annual means were strongly associated with observational North Sea SST ($r^2 = 0.87$) during the period 1969 – 1993. This association also showed in parallel regime lengths and shifts. Since about 1994, however, this relationship has been severely disturbed. At the same time, the statistical dependence of both variables on the North Atlantic Oscillation began to fade. The seasonal maximum in heat content occurs in September and thus lags maximum SST by about one month. While heat content in August 2003 exceeded that of the preceding year the converse was true for September.

The increased frequency of high-pressure weather in winter was untypical of the warm regime. Associated cool air temperatures produced a sea-ice winter of moderate strength along the coasts of the German Bight. A temporary disruption of the cold spell lasted about three weeks from mid-January and was associated with an enhanced storm frequency. As a consequence, the accumulated areal ice volume amounted to no more than 0.53 m.

In 2003 large parts of the northern and central North Sea were filled with Atlantic water. The fractional North Sea area with near-bottom salinities exceeding 35 increased since the winter 2002 within about one year's time from 23 to 37 % and thus to highest coverage since 1998. The strong inflow of Atlantic water during 2002 is consistent with strong westerly winds and enhanced storm activity in the North Sea region in that year's winter season. Runoff rates of Elbe river were below normal since April 2003. This was caused in part by unusually low precipitation rates but foremost by persistently below average precipitation during the dry-year 2003. The seasonal salinity cycle at Helgoland Roads showed positive but statistically insignificant departures from the climatological cycle almost throughout the year.

Marine Chemistry

During 2003 the routine chemical monitoring program was continued. Water, sediment and suspended particulate matter samples were taken on board a research vessel, and were analyzed afterwards for several groups of chemical compounds. Overall, a dataset with sufficient spatial and temporal resolution was obtained. Coastal, open sea, estuary and channel water bodies were investigated during all seasons. The results of these comprehensive chemical investigations will be addressed in separate chapters for nutrients, organic trace substances, metals and radioactive substances.

Nutrients

Both in the winter and summer seasons of 2003, nutrient monitoring was carried out in different areas of the North Sea.

Analyses of long-term trends were based exclusively on measurements made in the winter months because biological activity is at its minimum then. In order to achieve comparability of the nutrient samples taken in the different areas (river estuaries, coastal waters, open seas), the samples were normalized to the typical regional salinity. Also in the winter of 2003, phosphate levels in the German Bight were almost at their 1936 reference level. They still exceeded that level in the coastal waters. The situation of nitrogen compounds, for which 1936 reference values are not available, is less favorable because nitrogen inputs to the North Sea have not decreased in the same measure as phosphate levels.

In the summer of 2003, the central North Sea had a stable thermohaline stratification with a nutrient-poor surface layer extending to 20 m depth. The chlorophyll maximum was found at the level of the pycnocline, where sufficient light and nutrients for algal growth were still available. On the whole, nutrient levels were on the order of the long-term means of the period 1986 – 2000.

Also long time series from Helgoland Roads confirmed trends toward unchanged or decreasing nutrient concentrations.

Because of the unusually strong temperature stratification in the summer of 2003, oxygen saturation in the bottom water of the White Bank area had decreased to 46 – 60 % by the beginning of August, and was as low as 38 % by early September. The first autumn storms quickly dissolved the stratification, causing the oxygen deficit to disappear.

Organic Pollutants

In the routine monitoring programme for the North Sea, concentrations of organic pollutants are determined mainly in May and July / August. In 2003, up to 120 different compounds were determined in sea water, suspended particulate matter, and sediments. The levels of most contaminants monitored were on the order of the preceding years.

In the substance class of hexachlorocyclohexane – whose gamma isomer is the insecticide 'lindane', which has been used for many years – the downward trend observed in the preceding years continued, and concentrations were at their lowest lev-

els since 1975. The lindane concentration was found to be about 18 % below the prior-year level. Since 1998, lindane levels have decreased by over 90 %.

Out of the group of unpolar chlorinated hydrocarbons (CHC), the contaminant classes HCB, PCB, and DDT were investigated. All of the three groups had comparable spatial distribution patterns in German Bight water, with elevated levels near the coasts. Because of the high variability of measured values and the relatively short observation period, no temporal trend has been found either in water or in sediment.

In the North Sea, a background load of aliphatic hydrocarbons (residues of petroleum hydrocarbons) was identified. Slightly elevated concentrations were found in the German Bight and in the area of production platforms off the coast of Scotland. However, natural background levels of aliphatic hydrocarbons from biogenic sources are dominant in large parts of the North Sea.

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH, e. g. naphthalene, anthracene, benzo[a]pyrene) are compounds forming in combustion processes; they are also present in petroleum products. Most of them are carcinogenic. In water, they showed typical concentration gradients from the coasts to the open sea, depending on their molecular size. Elevated levels of naphthalene were found not only in the sea area influenced by discharges from the Elbe river but also off the Themse estuary, the coast of Scotland, and the Norwegian coast. Based on the ratios of the individual PAHs in water, it was possible to identify and explain local hot spots. The highest PAH levels in sediment were found in the Elbe estuary and in the White Bank area, which is comparable to the CHC pattern.

Of the 37 polar plant protection agents investigated (insecticides and herbicides), 21 substances were found in the Elbe, and 20 in the German Bight. Usually, these compounds show a marked annual cycle, which depends on the seasonal use of pesticides in farming. The herbicides atrazine and simazine were still present at relatively high concentrations (1 – 4 ng/L) in the German Bight although their use has been banned in Germany for several years. Also relatively high levels (1 – 7.5 ng/L) of the herbicides diuron and isoproturon were found. TBT, a compound used in ship paints which has hormone-disrupting properties even at extremely low concentrations, still is of high ecological relevance. The concentrations of 1 – 2 ng/L observed in coastal water have already reached the toxic threshold level.

Metals

The concentrations of some metals in coastal water, and locally in sediment, were still far above the natural background levels in some areas. Cadmium, copper, mercury, lead, and zinc in the dissolved phase showed a strong concentration gradient from the coast to the open sea, like most organic contaminants. The highest levels were measured in the area of the Elbe estuary and along the North Frisian coast. Near the coast, the background levels of all of the above elements were clearly exceeded; in the open North Sea, only the copper concentrations were elevated. Compared to the preceding years, however, the metal concentrations in water were not unusually high.

The highest metal concentrations were observed in fine-grained surface sediments southeast of Helgoland and in the area of the White Bank, where fine-grained sediments prevail. Metal concentrations in the study area were found to be mostly stagnant or to have a downward trend. In 2003, following the 1999 – 2002 phase of mark-

edly higher mercury levels in the area southeast of Helgoland, concentrations were again on the order of the 1998 levels. However, more recent analyses of sediment cores from the area showed that the sediment layer with elevated mercury levels was merely covered by a 3 cm surface layer with lower mercury concentrations.

Radioactive Substances

The concentrations of most artificial radio nuclides in sea water were hardly higher than those measured in the open Atlantic surface water. Despite the generally low levels, emissions from the nuclear reprocessing plants in Sellafield and La Hague were reflected both in the concentrations and activity ratios of the transuranic elements. Re-suspended ^{137}Cs from sediment of the Irish Sea is the second strongest source of radioactive substances in the North Sea, besides direct emissions from the nuclear reprocessing plants in Sellafield and La Hague. However, the highest ^{137}Cs activity levels in the North Sea are still attributable to the nuclear accident at Tchernobyl, due to Baltic Sea surface water flowing into the Skagerrak.

The observed concentrations of artificial radio nuclides were so low that a relevant radiation exposure through enrichment in the food chain is to be expected neither for biota nor the human population.

1 Einführung

Ein ganzheitliches Verständnis der Prozesse, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen im System Nordsee ist erforderlich, um das Ausmaß menschlicher Eingriffe effektiv zu kontrollieren, Schäden zu begrenzen und wirksame Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Ein in diesem Sinn nützlicher Zustandsbericht darf sich nicht auf Zustandsdokumentation beschränken, sondern muss Zustandsveränderungen und -anomalien identifizieren und weitestmöglich aus dem Zusammenwirken der Systemelemente bzw. der Funktionalität des Systems interpretieren und bewerten.

Der komplexe Systemzustand der Nordsee ist durch physikalische, chemische und biologische Zustandsgrößen beschreibbar. Den physikalischen Zustand bestimmen sieben Zustandsvariablen, die den Kern jedes hydrodynamischen Modells bilden: drei Strömungskomponenten, Druck, Temperatur, Salzgehalt und Dichte. Beispiele für chemische und biologische Zustandsvariablen sind Konzentrationen von Nährstoffen, Schadstoffen, Schwebstoffen und Plankton.

Eine integrale Zustandsbewertung erfordert Kenntnisse über das zeitliche Verhalten des Systems im Kontext von Prozessen, Wirkungsketten und Rückkopplungen. Systematische und langfristige Beobachtungen und deren Umwandlung in nützliche Information durch Datenkompression, Filterung, Integration, Klassifizierung etc. sind deshalb Grundvoraussetzung für belastbare Bewertungen. Beobachtungen sind jedoch nie flächendeckend oder zu jedem Zeitpunkt verfügbar. Für eine Vervollständigung der Zustandsanalyse werden deshalb auch numerische Modelle genutzt, die Beziehungen zwischen den diversen Zustandsvariablen realisieren.

Eine ganzheitliche Darstellung des vernetzten Zustands der Nordsee in einem linearen Text ist problematisch. Um die Notwendigkeit des Verweisens auf andere Berichtsteile zu begrenzen, ist der Aufbau so strukturiert, dass Vorwärtsverweise möglichst vermieden werden. Ursache für die Veränderlichkeit des physikalischen Nordseezustands ist der variable atmosphärische Antrieb. Eine Rückwirkung des Meeres auf die Atmosphäre wird vernachlässigt. Ebenso verhalten sich viele polare chemische Stoffe gegenüber dem physikalischen Zustand passiv: Sie verteilen sich in Abhängigkeit vom Strömungszustand, ohne selbst auf die Strömung Einfluss zu nehmen. Die Richtung der skizzierten Wirkungskette Atmosphärenphysik \Rightarrow Meeresphysik \Rightarrow Meereschemie spiegelt sich in der Abfolge der Kapitel.

Die vormalige Berichtszweiteilung in Nordsee und Deutsche Bucht wurde aufgegeben; in den thematischen Unterkapiteln bleibt sie erhalten. Die Deutsche Bucht als Subsystem der Nordsee wird jeweils im Anschluss an diese betrachtet, lokale Zeitserien werden gewöhnlich ans Ende gestellt.

Der Zustand der Atmosphäre hat erhebliche Bedeutung für den Zustand des Meeres und dessen Verständnis. Der Bericht wurde deshalb um eine Analyse der Großwetterlagen erweitert, die als Beiprodukt einen für die Nordseeregion repräsentativen sog. »Nordseewind« liefert.

Im Abschnitt Meeresphysik werden die wichtigsten ozeanographischen Zustandsgrößen diskutiert. Hinzugekommen sind Beiträge zu Wasserstand, saisonaler Eisbedeckung sowie zum Seegangsklima der gesamten Nordsee. Relevante integrale Größen wie Einstrom und Wärmehalt wurden ebenfalls analysiert. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur, dem auch hinsichtlich der Artenzusammensetzung besondere

Bedeutung zukommt, wird im Zusammenhang mit regimetypischen Windbedingungen diskutiert.

Die wichtigste Neuerung besteht in der vollständigen Integration der Meereschemie. Dieser Abschnitt enthält neben einem erheblich erweiterten Nährstoffteil, Beiträge zur Belastung der Nordsee mit organischen Schadstoffen, Spurenmetallen und radioaktiven Stoffen. Neben Hintergrundinformationen (Quellen, Umweltverhalten, Toxizität) zu den diversen Stoffgruppen und Stoffen werden schwerpunktmäßig Konzentrationsverteilungen von Schlüsselstoffen (mit stoffklassentypischem Verhalten) im Meerwasser und Sediment präsentiert und interpretiert. Besonderheiten bzw. Anomalien werden mit natürlichen Umweltveränderungen und / oder anthropogenen Einflüssen in Zusammenhang gebracht.

Die Ergebnisse der biologischen Überwachung werden im Bericht nicht behandelt, da sie bisher nicht Bestandteil der meereskundlichen Aufgaben des BSH sind.

2 Atmosphärenphysik

Die Atmosphäre ist der Motor, der die Entwicklung des ozeanographischen Zustands der Nordsee wesentlich antreibt und steuert. Besonderheiten und Anomalien der atmosphärischen Zirkulation stehen vielfach am Anfang einer Wirkungskette, die sich über hydrographische Zustandsvariablen, Verteilungsmuster von Schad- und Nährstoffen bis hin zu biologischen Phänomenen wie Planktonblüten oder Anomalien in der Artenzusammensetzung erstreckt.

Eine erklärende Interpretation ozeanographischer Zustandsanomalien setzt also Kenntnisse über den Zustand der Atmosphäre voraus. Ein vor allem in der kalten Jahreszeit wichtiger Zustandsindikator ist durch den Nordatlantischen Oszillationsindex gegeben, der bereits in der Erstausgabe dieses Berichts ausführlich erörtert wurde (LOEWE ET AL. 2003). Der Kern dieses Kapitels besteht hier in der angekündigten Klassifizierung der atmosphärischen Zirkulation über der Nordsee. Einen zweiten Schwerpunkt bildet die statistische Analyse des repräsentativen »Nordseewindes«. Abschließend wird der Jahresgang der Lufttemperatur auf Norderney interpretiert.

Weitere Beiträge zu den lokalen und regionalen Windbedingungen werden in *Abschnitt 3.2, S. 54* sowie in *Abschnitt 3.4, S. 68* angeboten, wo sie im Zusammenhang mit Seegang bzw. Meerestemperatur diskutiert werden.

Aufgrund der sehr unvollständigen Dokumentation des atmosphärischen Zustands im Berichtsjahr 2002 einerseits, sowie wegen der gravierenden Unterschiede zu den Verhältnissen im Jahr 2003 andererseits, werden viele der Zustandsvariablen für beide Jahre behandelt.

2.1 Nordatlantische Oszillation

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 Variablen 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.

Die NAO ist eine atmosphärische Massenschaukel zwischen Island und den Azoren. Der NAO-Index beschreibt die Auslenkung dieses Massependels als Differenz standardisierter Luftdruckanomalien 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-Index im Winter ist in Westeuropa mit Kälte und Trockenheit verbunden, ein positiver NAO-Index geht mit maritimen Wintern (warm und nass) einher.

Es gibt inzwischen eine Reihe von NAO-Indizes, die sich hinsichtlich Stationswahl, Standardisierungszeitraum (Basisperiode), Saisonlänge und demzufolge im Zahlenwert unterscheiden. Eine Auswahl solcher Indizes bietet *Abb. 2-1*. 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 Luftdruckanomalien bei Ponta Delgada (Azoren) und Akureyri (Island) im Zeitraum 1879 – 2003.

Aus *Abb. 2-1* ist ersichtlich, dass die qualitative Zustandsentwicklung der NAO von allen Indizes richtig wiedergegeben wird. Danach vollführte der NAO-Index im Jahr 2003 eine hochfrequente Oszillation um das 0-Niveau. Im Winter und Herbst überwogen negative Zustände, die eine abgeschwächte Zonalzirkulation kennzeichnen. Die Zustände im Sommerhalbjahr üben keine herausragende Fernwirkung auf die Nordsee aus.

Der dynamische Zustand der NAO lässt sich durch den NAO-Index und dessen Änderungsgeschwindigkeit beschreiben und in einem sog. Phasendiagramm darstellen (*Abb. 2-2*). Die dreigipflige Wahrscheinlichkeitsverteilung wurde in LOEWE ET AL. (2003) ausführlich diskutiert. Diese Attraktorregionen wurden als Ausdruck dekadenlanger und dann spontan wechselnder Präferenzen der NAO für ihre negative bzw. positive Phase gedeutet, welche vermutlich ursächlich mit den Temperaturregimes der Nordsee im Zusammenhang stehen (vgl. *Abschnitt 3.4.2, S. 71*).

Neben der relativen Häufigkeit der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879 zeigt *Abb. 2-2* (gelbe Kreise) die dynamische Zustandsentwicklung der NAO von

Januar bis Dezember 2003. Die Abfolge der ungefilterten Zustände ist scheinbar durch eine chaotische Sprunghaftigkeit um das 0-Niveau gekennzeichnet. Die Hälfte der 12 Zustände entfällt auf die Attraktorregionen (rel. H. > 2 %), bildet jedoch keine konsekutive Sequenz. Erst nach Filterung des hochfrequenten Lärms werden für 2003 zwei geschlossene elliptische Zyklen sichtbar (Abb. 2-2, blaue Kreise), die in der Doppelwelle 'lpf6' in Abb. 2-1 eine Entsprechung haben.

Verglichen mit dem Verhalten im Jahr 2002 (Loewe et al. 2003) vollführte die NAO abgeschwächte Schwingungen um das flachere 0-Niveau. Der Winter NAO-Index nach LOEWE UND KOSLOWSKI (1998) lag für das DJF-Quartal 2002/3 bei 0.08.

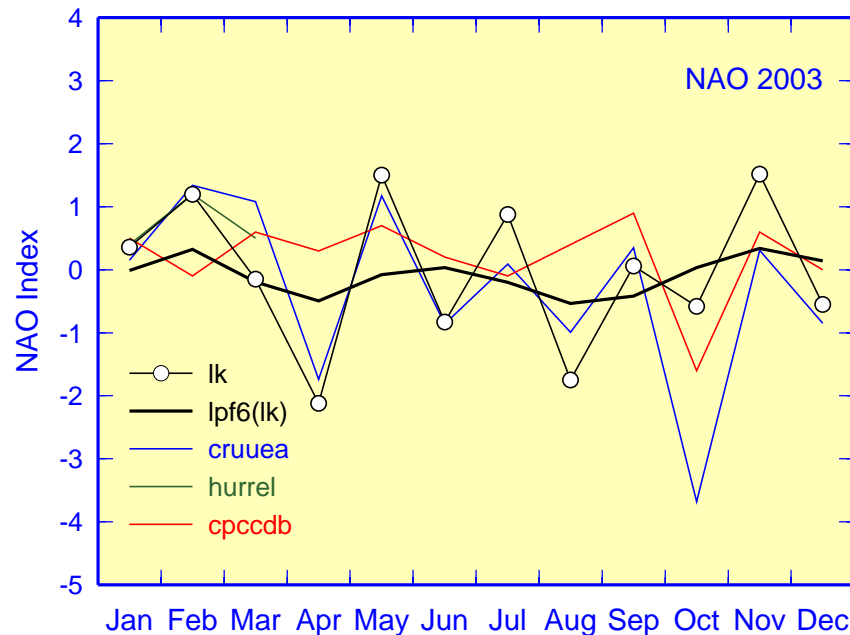


Abb. 2-1: NAO-Index 2003. lk: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998), lpf6(lk): tiefpassgefiltert über 6 Monate. cruuea: Gibraltar & Südwest Island (www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm). hurrel: Ponta Delgada & Stykkisholmur (www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatmon). cpccdb: Amplitude des NAO-Musters aus rotierter Hauptkomponentenanalyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).

Fig. 2-1: NAO Index 2003. lk: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE AND KOSLOWSKI 1998), lpf6(lk): low-pass filtered (6 month). cruuea: Gibraltar & Southwest Island (www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm). hurrel: Ponta Delgada & Stykkisholmur (www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatmon). cpccdb: Amplitude of NAO pattern from rotated principal component analysis of 700 hPa height anomalies (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).

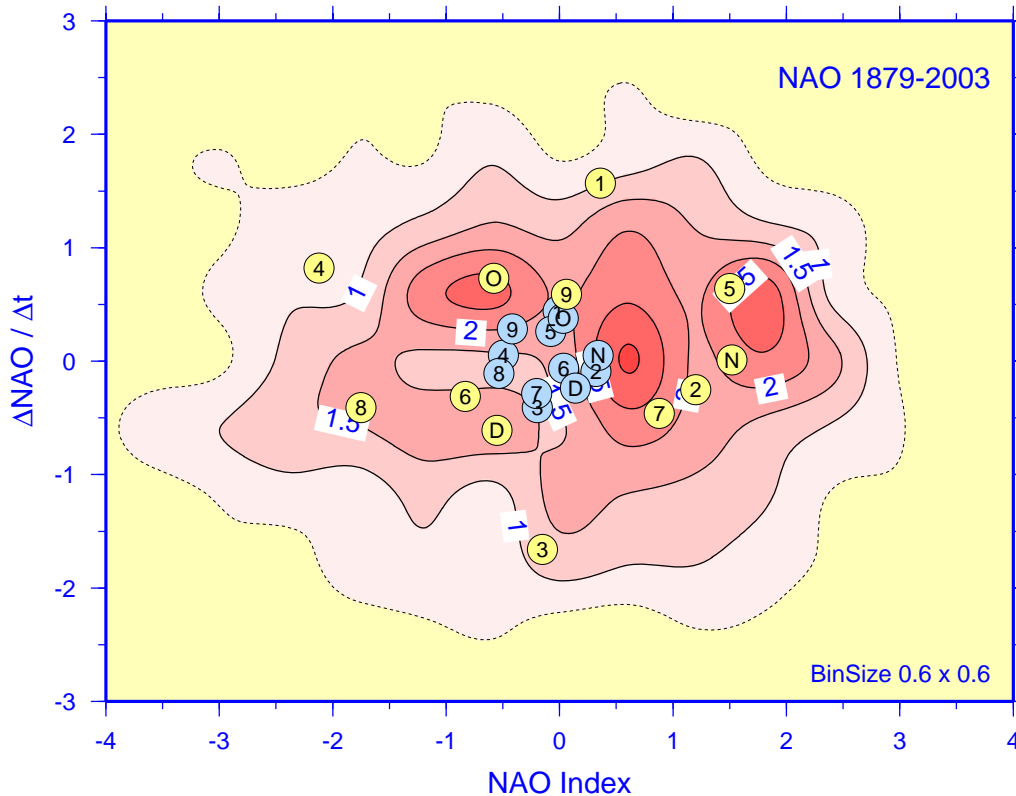


Abb. 2-2: Phasendiagramm der NAO als relative Häufigkeitsverteilung der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879. Die Konturen 0.5, 1, 1.5 und 2 % sind Linien gleicher rel. Zustandsdichte (d. h. rel. Anzahl Zustände pro Klassenintervall, 0.6×0.6) und umhüllen 81, 64, 39 bzw. 17 % aller Zustände. Die Sequenz der 12 gelben bzw. blauen Kreise (1, 2, ..., 8, 9, O, N, D) zeigt die Entwicklung der rohen (gelb) bzw. über 6 Monate tiefpassgefilterten (blau) monatlichen dynamischen NAO-Zustände im Jahr 2003.

Fig. 2-2: 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 relative state density (i. e. rel. # of states per square-bin, 0.6×0.6). The sequences of 12 yellow and 12 blue circles (1, 2, ..., 8, 9, O, N, D) show the temporal evolution in 2003 of raw (yellow) and low-pass filtered (6 month, blue) monthly mean states, respectively.

2.2 Großwetterlagen

Zirkulationsindizes wie der NAO-Index liefern eine kompakte Information zur Charakterisierung der großräumigen atmosphärischen Zirkulation, welche die maßgeblichen Antriebsbedingungen für ozeanographische Zustandsänderungen definiert.

Eine differenziertere, ebenfalls seit langem gebräuchliche Methode zur integralen Beschreibung der regionalen atmosphärischen Zirkulation besteht in der Definition von Zirkulationsmustern oder ›Großwetterlagen‹ (BAUR ET AL. 1944, LAMB 1950).

Für diesen Bericht wurde ein automatisches Verfahren implementiert, das von JENKINSON UND COLLINSON (1977) zur Objektivierung der ›Lamb Weather Types‹ entwickelt worden war und eine Klassifizierung der täglichen Großwetterlage ausschließlich auf Basis von Luftdruckdaten im Meeresniveau erlaubt. Durch seine bestechende Einfachheit ist dieses Verfahren zu einem vielgenutzten Werkzeug z. B. bei der Analyse von regionalen Klimaänderungen avanciert (JONES ET AL. 1999, OMSTEDT ET AL. 2004).

Das Verfahren wurde auf einen Nordsee-Teildatensatz der täglichen nordhemisphärischen Luftdruckfelder im Meeresniveau des UK MET OFFICE angewendet. Dieser Datensatz wurde freundlicherweise vom BRITISH ATMOSPHERIC DATA CENTRE zur Verfügung gestellt (badc.nerc.ac.uk/data/mslp).

2.2.1 Klassifizierung

Aus der täglichen Luftdruckverteilung im mittleren Meeresniveau werden zwei für die Nordseeregion repräsentative Indizes für Wind und Vorticity (Wirbelstärke) abgeleitet. Empirische Relationen zwischen beiden Größen legen anschließend nicht nur den Zirkulationstyp fest (Zyklonal, Nordwest etc.), sondern erlauben darüber hinaus die Identifizierung von Sturmereignissen. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik findet man in *Anhang A*, S. 185.

Abb. 2-3 zeigt die Luftdruckverteilung des Orkantiefs vom 21. Dezember 2003. Dieser stärkste Sturm des Jahres ist ein Beispiel für den zyklonalen Rotationstyp ›C‹, den das Verfahren durch Auswertung des Luftdrucks an den gekennzeichneten 16 Gitterpositionen automatisch zuordnet. Weitere Klassifizierungsbeispiele findet man in *Abschnitt 2.3*, S. 35.

Die bivariate Verteilung der täglichen Windgeschwindigkeits- und Vorticity-Indizes ist in Abb. 2-4 für den Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt. Während das Vorzeichen des Vorticity-Index eine zyklonale (+) bzw. antizyklonale (–) Krümmung der Isobaren anzeigt, hätte die Einführung eines Vorzeichens für den Geschwindigkeitsbetrag unterbleiben können. Das Vorzeichen dient hier zur Unterscheidung von Winden aus der westlichen (+) bzw. östlichen (–) Hemisphäre. Die Asymmetrie der »Schmetterlingsflügel« macht deutlich, dass die Nordsee in der geographischen Zone ostwärts wandernder Wellen und Wirbel liegt, welche eine Vorherrschaft von Winden aus NW- bis SW-lichen Richtungen bedingen.

Ein vielleicht zunächst erstaunlicher Befund besteht darin, dass der Verteilungsgipfel im negativen Vorticitybereich auftritt und demzufolge antizyklonale Rotationsformen am häufigsten vorkommen. In seiner Studie zur Zirkulationsklimatologie in Schweden, in der das gleiche Klassifikationsverfahren – jedoch für die zentrale geographische Breite 60° N – angewendet wurde, findet CHEN (2000) eine größere Häufigkeit zyklon-

naler Rotationsformen (für Schweden). Beide Ergebnisse zeigen an, dass die polare Frontalzone gewöhnlich in der nördlichen Nordsee verläuft.

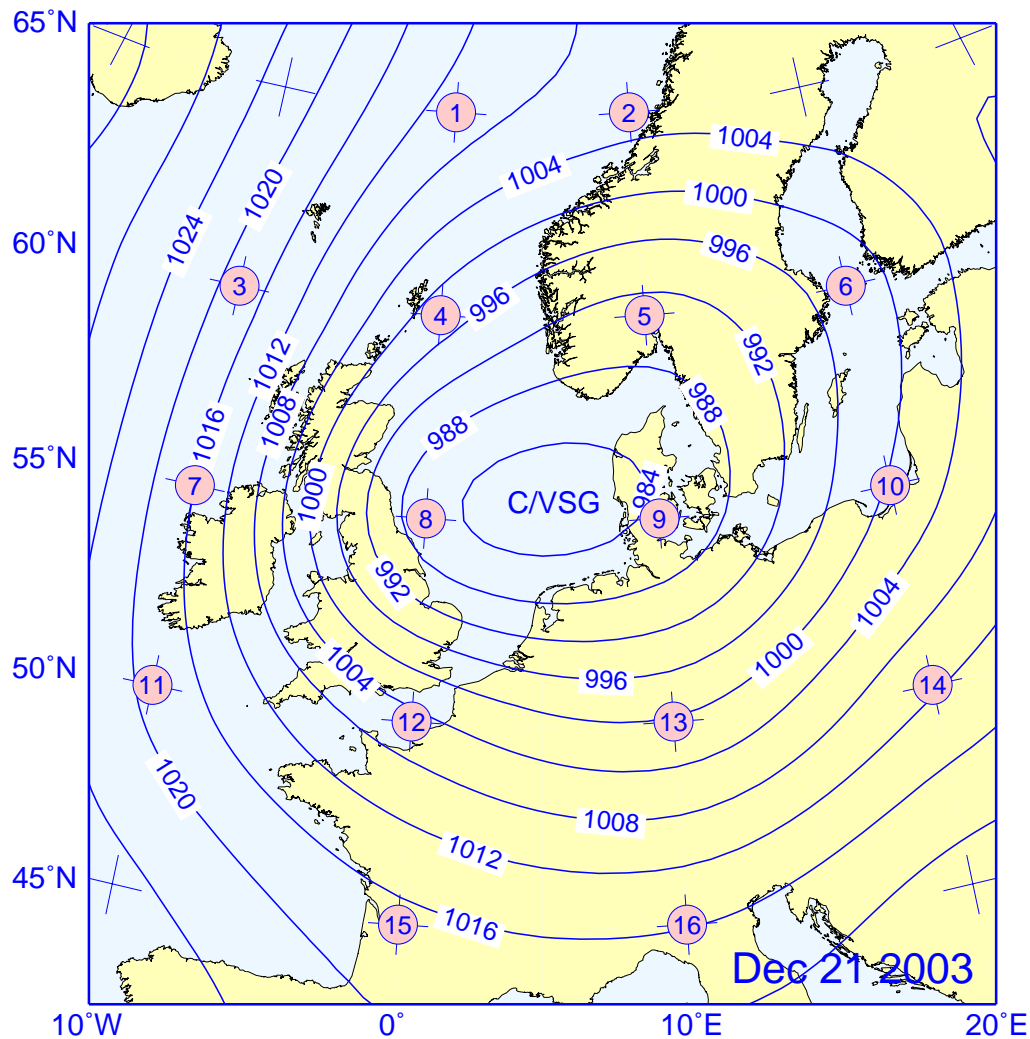


Abb. 2-3: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 21. Dez. 2003 (Orkantief »Jan«) mit Gitternetz (1 – 16) für Wetterlagenklassifizierung (s. Anhang A, S. 185).

Fig. 2-3: Sea level pressure (hPa) for Dec, 21 2003 (Hurricane »Jan«) and grid (1 – 16) for weather typing scheme (cf. Anhang A, S. 185).

Die blauen Ellipsenschalen in Abb. 2-4 dienen der Klassifizierung von Sturmereignissen. Indexpaare innerhalb dieser drei Schalen stehen für ›Sturm‹ (gale), ›starker Sturm‹ (severe gale) und ›sehr starker Sturm‹ (VSG). Der Verteilung der blauen Kreuze, welche Tagesereignisse jenseits der 0.1 % Kontur kennzeichnen, ist zu entnehmen, dass die häufigsten und stärksten Sturmlagen an zyklonale Rotationsformen und Winde aus der westlichen Hemisphäre gebunden sind. Das in Abb. 2-3 dargestellte Orkantief »Jan« wurde als ›sehr starker Sturm‹ identifiziert. Während der Wind-Index sich aufgrund der zentralen Lage des Tiefs mit 10.6 hPa (bzw. 6.6 m/s) klein ausnimmt, erreicht der Vorticity-Index den extremen Wert von 109.3 hPa, was einer Wirbelstärke von 298° / Tag entspricht.

Die eigentliche Klassifizierung der täglichen Wetterlagen ergibt sich aus einfachen Relationen zwischen Wind- und Vorticity-Index (vgl. Anhang A.3, S. 188), welche durch

das grüne Liniennetz in Abb. 2-4, das sich unterhalb der Verteilung zum Koordinatenursprung hin fortsetzt, veranschaulicht sind. Anhand der durch dieses Netz definierten Sektoren wird unterschieden zwischen zwei reinen Rotationstypen ›A‹ (antizyklonal) und ›C‹ (zyklonal), den reinen Richtungstypen ›DIR‹ eines 8-Punkte Kompasses (N, NE, E ...), deren Spezifizierung mittels der Komponenten des geostrophischen Windvektors erfolgt, sowie den 16 hybriden Zirkulationsformen ›ADIR‹ und ›CDIR‹. Der durch ›U‹ gekennzeichnete quadratische Ausschnitt im Zentrum von Abb. 2-4 enthält Zirkulationsformen, die wegen ihrer schwachen Ausprägung ›unklassifizierbar‹ sind.

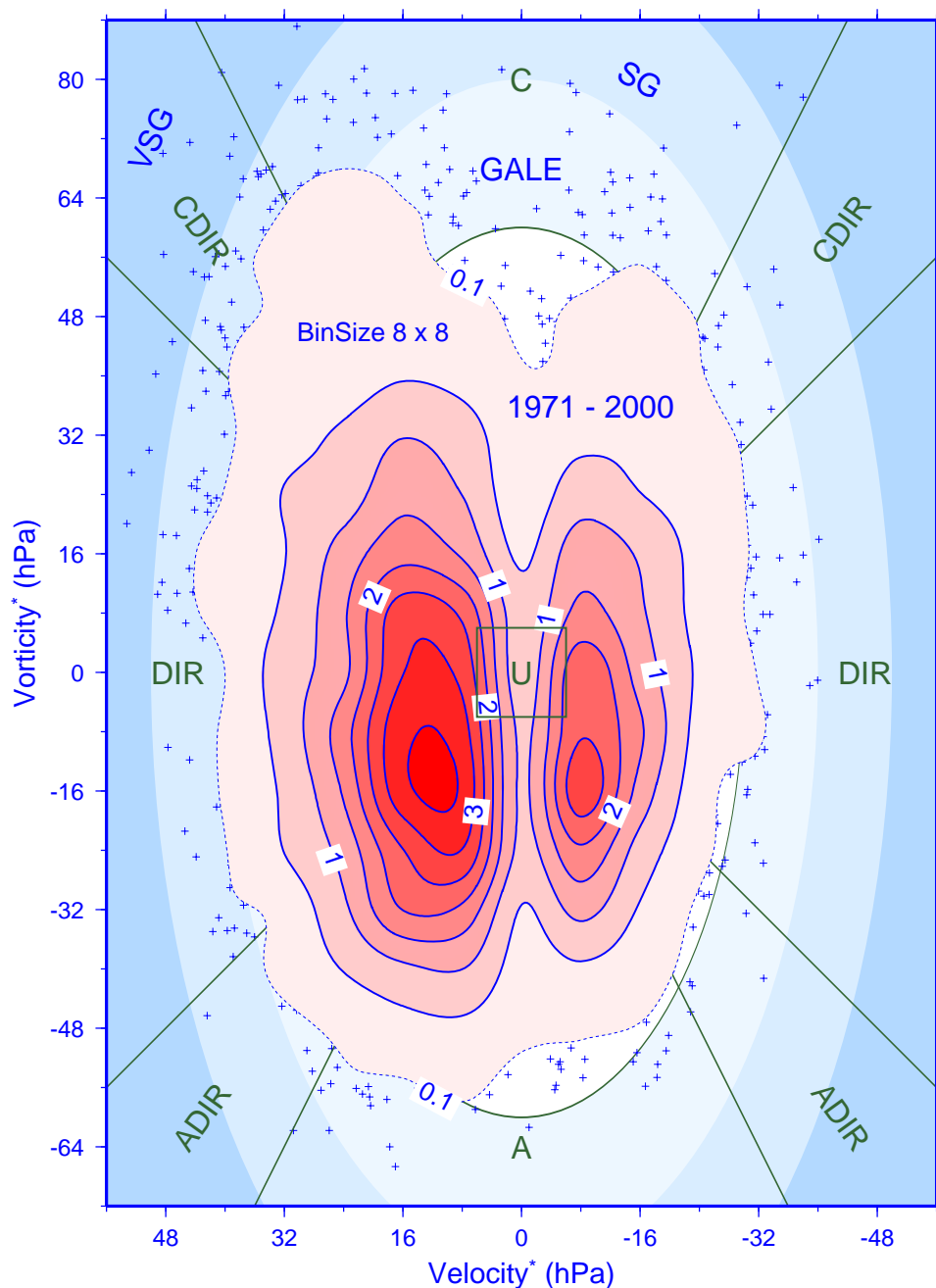


Abb. 2-4: Relative Häufigkeitsverteilung der täglichen Zirkulationszustände im Zeitraum 1971 – 2000 mit Klassifizierungskriterien (s. Anhang A.3, S. 188).

Fig. 2-4: Percent frequency distribution of daily circulation states for the period 1971 – 2000 together with classification criteria (cf. Anhang A.3, S. 188).

2.2.2 Wetterlagenkalender

Dieser Abschnitt dokumentiert die Wetterentwicklung über der Nordsee im Jahr 2003 durch einen Jahreskalender der klassifizierten täglichen Wetterlage (Tab. 2-1). Als Ergänzung zum Erstbericht sowie zur Verdeutlichung der erheblichen zwischenjährigen Variabilität wird ein Vergleich mit der entsprechenden Entwicklung im Jahr 2002 durchgeführt. Eine erste rudimentäre statistische Auswertung beschränkt sich auf Kontingenztafeln für beide Jahre.

Die zeitliche Abfolge der täglichen Luftdruckfelder wird mit etwas Übung filmhaft nachvollziehbar, wenn man sich den Rotationssinn von Hoch- und Tiefdruckzellen (Abb. 2-5) und die von der Lage solcher Druckgebilde relativ zum »Beobachter« (bei 55° N, 5° E, vgl. Abb. 2-3) abhängigen Windrichtungen vergegenwärtigt.

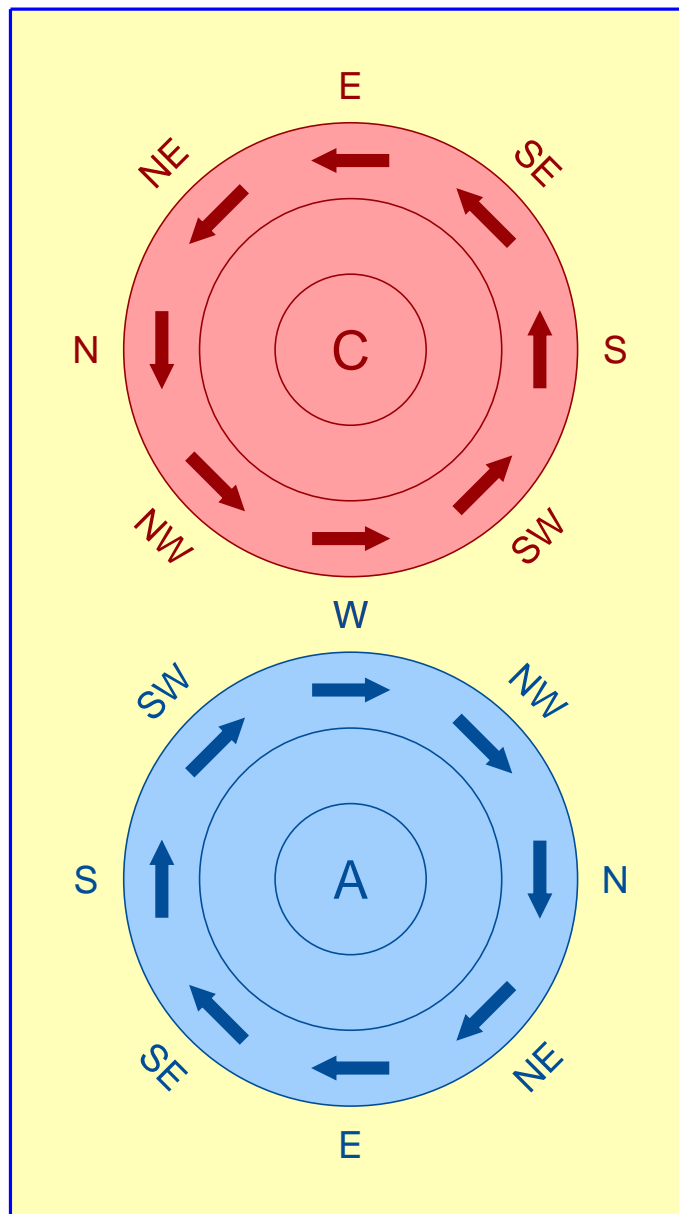


Abb. 2-5: Luftströmung um Hoch (A) und Tief (C).

Fig. 2-5: Air circulation around high (A) and low pressure systems (C).

Ein Tiefdruckgebiet, das ostwärts über die zentrale Nordsee hinwegzieht, könnte beispielsweise bei geeigneter Geschwindigkeit als Sequenz S-CS-C-CN-N im Kalender registriert werden.

Antizyklonale Wettertypen (A & ADIR) traten im Jahr 2003 am häufigsten auf und zeigten eine erhebliche Persistenz (*Tab. 2-1*). Lange ›Runs‹ von 16, 17, und 12 Tagen ereigneten sich im Februar, März bzw. August. Die gehäuften Hochdrucklagen im Februar führten zu anomal kalten Lufttemperaturen (vgl. *Abschnitt 2.4, S. 40*), während das in das Zentrum der aus Bauernregeln bekannten Hundstage (Schönwetterperiode vom 23. Juli – 24. August) fallende lange andauernde Hochdruckwetter mit extrem hohen Temperaturen im August einherging. Sturmweatherlagen traten fast ausschließlich im Januar und Dezember ein und erreichten in nur zwei von insgesamt 16 Fällen außergewöhnliche Stärke.

Die Sturmaktivität war im Jahr 2002 mit 24 Ereignissen, die sich über den gesamten Winter und Herbst verteilten, deutlich erhöht (+ 50 %), während stärkere Stürme (5) mehr als doppelt so häufig auftraten (*Tab. 2-3*). Allein im Februar ereigneten sich 11 Stürme, welche die starke positive Temperaturanomalie erklären, die in deutlichem Kontrast zur Kaltanomalie dieses Wintermonats im Jahr 2003 steht (vgl. *Abb. 2-10*).

Die relativen Häufigkeiten aller Wetterlagentypen im Jahr 2003 sind in *Tab. 2-2* als Kontingenztafel zusammengestellt.

Die ersten beiden Datenzeilen bis zur Spalte NW enthalten die 16 hybriden Zirkulationsformen (ADIR und CDIR), von denen im Durchschnitt (1.4 %) jede nur an fünf Tagen des Jahres auftrat. Die Felder AU bzw. CU enthalten die Anteile der reinen Rotationstypen A bzw. C, die Felder UDIR diejenigen der reinen Richtungstypen DIR (= N, NE, E, etc.), UU den Prozentsatz der nicht klassifizierbaren Wetterlagen.

Reine Richtungs- und Rotationstypen erreichten etwa gleiche Häufigkeiten von 41 % und 36 %. Die häufigste Zirkulationsform war der Typ A (27 %), der zum zyklonalen Rotationstyp C im Verhältnis 3:1 stand. Von den reinen Richtungswetterlagen traten NE-Lagen am seltensten (1.1 %), die entgegengesetzten SW-Lagen am häufigsten auf (9.6 %). Hauptrichtungslagen (S bis NW) zu Nebenrichtungslagen (N bis SE) standen im Verhältnis 4:1, welches sich unter Einbezug der hybriden Typen auf 3.2 reduziert. Verglichen mit den Wetterlagenverteilung im Jahr 2002 (*Tab. 2-4*) trat der antizyklonale Rotationstyp A um 50 % häufiger auf. Gleichzeitig reduzierte sich der Anteil von CDIR-Lagen um 45 %, während die Häufigkeit reiner C-Lagen praktisch unverändert blieb.

Sowohl das Verhältnis A:C als auch dasjenige der Hauptrichtungslagen zu den Nebenrichtungslagen – und zwar exklusive wie inklusive der hybriden Lagen – betrug im Jahr 2002 lediglich 2.2. Der deutliche Anstieg der Richtungsverhältnisse auf 4 (exkl.) bzw. 3.2 (inkl.) im Jahr 2003 ergab sich fast ausschließlich aus der Abnahme der Nebenrichtungstypen um 40 bzw. 30 %.

2003	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	SW	SW	S	SW	W	A			N	AS	C	CSE
2		SW	SE	C	SW		C		A	UNC	SW	
3	C	C	ASE	N	C	S			ANW	SW	CSW	SE
4	NE		AS	NW	ASW				A	CNW	ANW	A
5	UNC		S	N	SW	W	CNW			NW	A	ANW
6	ANE	A			W	A	NW	A	S	SW	AS	AN
7		ASW	ASW	A	A	ASW	A			C	A	
8	A		SW		SW	UNC	AW		CSE			A
9		S		NE	A	W	ANW		C	NW	SE	
10	AE	A	W	C	AW	ASW	A			W		ASW
11	A	AS			ASW	W	AW		NE	NW	AS	W
12	AW		N	SW	SW	AW	NW	UNC	NW		S	A
13	W			A	C	ANW	A	CNW			SW	CSW
14					W				A		S	CNW
15	W		A	ASE	NW	A	E	NW		A	CSW	NW
16	NW			A	A	AN	SE	ANW	NW		C	A
17	ASW		AN	A	S	AS	C	A	A		NW	W
18	W		A	AE		ASW	SW	CS		UNC		AW
19	S		AN	E	SW	W	A	W	W		W	W
20		ASE			CW		AS		S	CE	SW	SW
21	SW			SE	W	NW	UNC	AW	W		CSW	C++
22	C		A	UNC		A	W	W	SW	SE	SW	N
23	CN	AS		NE	SW	C	A	NW	NW	AE	C	SW
24	A		AW	ASE	CS	NW		N	A	NW	A	
25	SW	ASE		SE	C	AN	SW	A	ASW	CNW	SW	W
26	W		A	CS		A		N	CSW	UNC	S	SW
27	NW	SE		CW		AE	C	NW	NW	A	C	SW+
28	NW	A		SW		UNC	AW	UNC		W	A	C
29			ASW	CSW		CE	A	C	UNC	CSW		CW
30	C	./.	NW	SW		E	S	CN	ASW	C	S	
31	ANE		A	./.		./.	A	NW	./.	CS	./.	A

Tab. 2-1: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2003. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-1: Calendar of daily weather types in 2003. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2003	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	1.4	0.5	1.1	1.9	3.0	3.6	2.7	1.6	27.1	43.0
C	0.5	0.0	1.1	0.5	1.1	1.9	0.8	1.4	8.8	16.2
U	1.9	1.1	0.8	3.6	4.7	9.6	8.5	7.4	3.3	40.8
Σ	3.8	1.6	3.0	6.0	8.8	15.1	12.1	10.4	39.2	100

Tab. 2-2: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2003 (%).

Table 2-2: Contingency table of weather types in 2003 (%).

2002	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	ANW	SW	C	ASW	C	A	CW	C	A	ASW	A	S
2	A	SW+	ANW	AS	SW		C	C	A	AS	CS	CS
3	A	SW			UNC	S	CSW	CSE		SW	S	CS
4		SW	AW	SE	N		CNW	CE	CE	NW	S	S
5		SW				SE	W	UNC	CSW	W	A	CSE
6		CSW	W		E	CSE	UNC	NE		CN	SW	AE
7	A	NW			AE	CE	W		SW		CW	E
8		W	ANW	A	E	CSE		UNC	C	A	NW	
9		SW	W			ASE	SW	CS	SE	ASE	C	SE
10			NW		CE	S	C	C	CSE		A	E
11	ASW	W	SW		C		CW	UNC			CS	ASE
12	AW	W	SW	CNE	CNW	SW	ASW	C	A	SE	SW	
13	ASW	NW	N	N	A	CW	UNC	ANW			CSW	
14			AE		S	AW	ANE		N	CSE	CSE	SE
15	SW	A	SE	UNC	SW	SW	A	A	ANE	CE	CS	
16	W			A	AW	AW	AN		A			CSE
17	SW	AW	S		A	ASW			N	C	C	NE
18	W	W	SW	S	AE		N	AS	AN		AW	
19	SW		C	UNC	SW	AW		S	A	CN	A	A
20		CSW		A	AS	A	CNW	CS	NW	ANW		
21	W	N	NW			ANW	C	C	ANW	SE		UNC
22	SW	SW+		ASW	S	SW			CN	C	SE	AS
23	W	W+		W		W	NW	UNC	NE	C+		ASE
24	C	NW		A	ASW	NW	CNW		A	W	S	S
25	NW	W		SW	SW		NW	C	N	SW	SE	
26	SW	C	A	AW	S	AW	W		C	C	UNC	S
27	C	CW		CW	CS	CW	AW	NE		ASW	A	CS
28	SW	CW		SW	S	CNW	ASW	N	A	NW	S	
29	W+			C		NW	UNC	A		A	CS	C
30	W	./.	S	CW	SW	W	CE	AW		UNC	SE	
31	CW		SW	./.		./.	C	W	./.	A	./.	E

Tab. 2-3: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2002. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-3: Calendar of daily weather types in 2002. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2002	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	0.5	0.5	1.1	1.4	1.4	3.3	3.8	2.2	18.4	32.6
C	0.8	0.3	1.6	2.2	3.0	1.4	2.7	1.4	8.5	21.9
U	3.6	1.4	1.6	6.0	6.3	10.1	7.4	4.7	4.4	45.5
Σ	4.9	2.2	4.4	9.6	10.7	14.8	14.0	8.2	31.2	100

Tab. 2-4: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2002 (%).

Table 2-4: Contingency table of weather types in 2002 (%).

Abschließend sei bemerkt, dass die Anzahl der hybriden Wetterlagenklassen (16 von insgesamt 27) in einem Missverhältnis zu den Realisierungen dieser Typen übers Jahr steht: Sie treten insgesamt an nur ca. 90 Tagen und individuell durchschnittlich nur 5–6 mal im Jahr ein. Für eine robuste Statistik, auch auf kürzeren, monatlichen oder saisonalen Zeitskalen, erscheint eine Reklassifizierung notwendig. Diese könnte darin bestehen, die hybriden Sektoren (vgl. *Abb. 2-4, S. 29*) den Richtungs- und Rotationssektoren zuzuschlagen. Weiters kommt eine Beschränkung auf vier Windrichtungen in Betracht, so dass sich die Anzahl der Klassen von 27 auf 7 reduziert, nämlich A, C, NE, SE, SW, NW und U. Die natürlich ebenfalls möglichen Richtungsklassen N, E, S, W erscheinen gegenwärtig weniger geeignet, wenn an einer leidlichen Differenzierung kontinentaler und maritimer Luftmassentransporte gelegen ist (vgl. *Abschnitt 3.4.2, S. 71*).

2.3 Luftdruck und Wind

Aus den täglichen Luftdruckfeldern im Meeresniveau wurden für das Jahr 2003 saisonale Luftdruckverteilungen im Nordseeraum bestimmt (Abb. 2-6), die gleichzeitig Aufschluss über die mittleren Windverhältnisse geben, welche sich wiederum in der Oberflächenzirkulation der Nordsee (Abb. 3-1, S. 47) oder der Wellenhöhenverteilung abbilden (Abb. 3-7, S. 55).

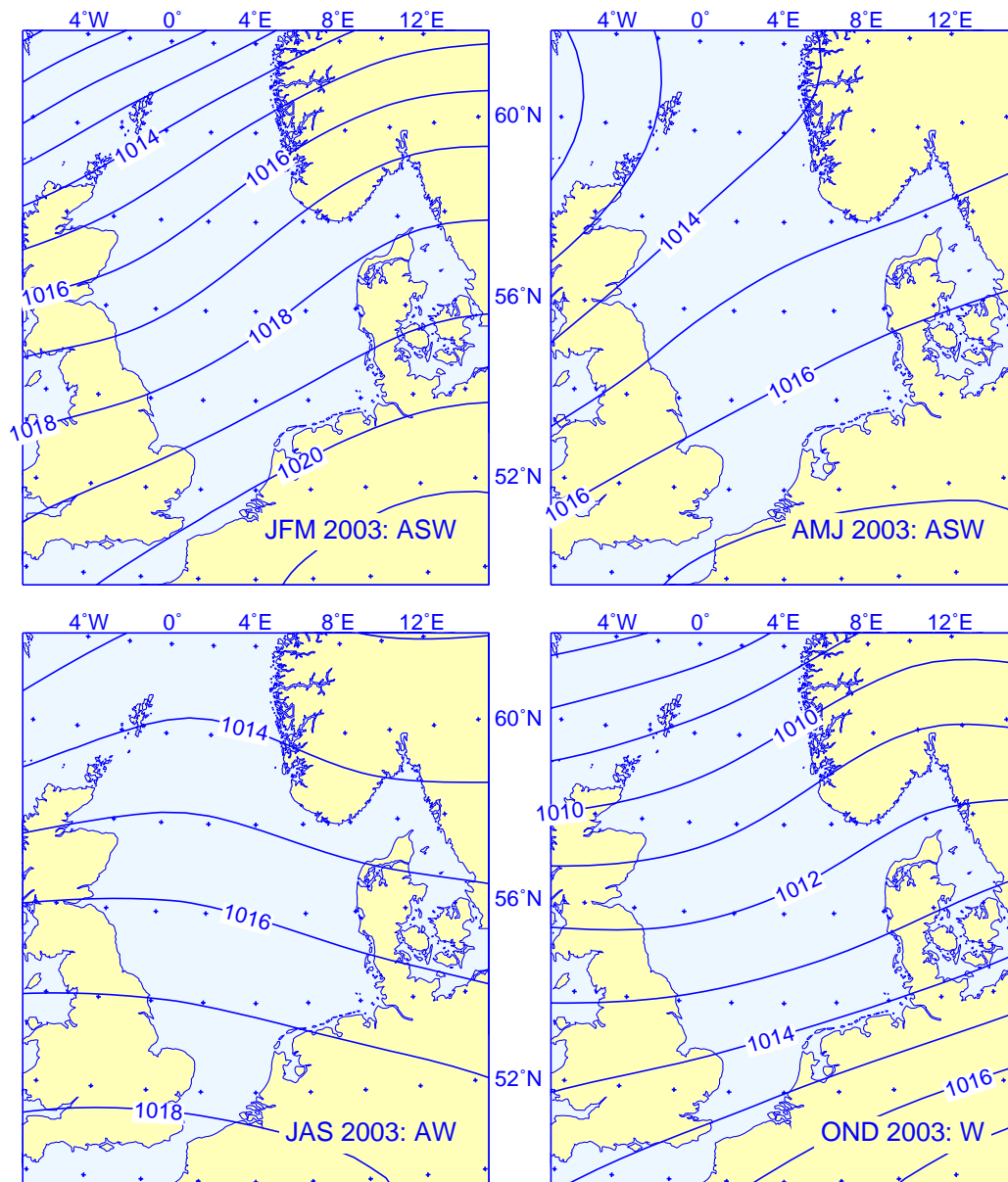


Abb. 2-6: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung; JFM = Januar, Februar, März etc.

Fig. 2-6: Seasonal sea level pressure distributions (hPa); JFM = January, February, March etc.

Alle jahreszeitlichen Verteilungen zeichnen sich durch hohen Druck über Kontinentaleuropa aus, der nach NW oder N hin abnimmt. Aufgrund der Seefahrtsregel »Den Wind im Rücken, befindet sich der hohe Druck rechter Hand« ist klar, dass in allen Jahreszeiten W-liche oder SW-liche Winde vorherrschten. Dieses Ergebnis liefert

auch das früher beschriebene Klassifizierungsverfahren (vgl. *Abschnitt 2.2.1, S. 27*), welches zusätzlich die antizyklonale Krümmung der Isobaren in drei Jahreszeiten konstatiert. Die Drängung der Isobaren im Herbst und Winter macht deutlich, dass in diesen Jahreszeiten stärkere Winde vorherrschen als im Frühjahr-Sommer-Halbjahr.

Eine zur Bestimmung von Anomalien erforderliche Klimatologie der Luftdruck- oder Windverteilung lag bei Redaktionsschluss nicht vor. Um dennoch einen Eindruck von der zwischenjährigen Variabilität der Windverhältnisse zu geben, wird hier ein Vergleich des repräsentativen »Nordseewindes« für die Jahre 2002 und 2003 geboten. Dieser Nordseewind ist nichts Anderes als der im Rahmen der Klassifizierung der täglichen Wetterlagen berechnete geostrophische Wind an der Position 5° E, 55° N, der für das durch die Punkte 4–5–9–13–12–8 begrenzte Gebiet repräsentativ ist (vgl. *Abb. 2-3, S. 28*).

Abb. 2-7 zeigt saisonale Wahrscheinlichkeitsellipsen des täglichen vektoriellen Nordseewindes für beide Jahre. Im Zentrum der Ellipsen und in Hauptachsenrichtung ist die jeweilige Saison (1 = JFM = Winter, 2 = AMJ = Frühling, etc.) angegeben. Der (nicht eingezeichnete) Vektor vom Ellipsenzentrum zum Ursprung (0,0) ist der aus täglichen u- und v-Komponenten bestimmte mittlere Vektorwind. Die Größe der Ellipsen wurde so gewählt, dass theoretisch 50 % der täglichen Winde aus dem Ellipsengebiet heraus zum Ursprung wehen. Die Länge der Ellipsenhalbachsen beträgt 1.1774 Standardabweichungen in Hauptachsenrichtung. Winde außerhalb der Ellipsen sind durch Kreuze gekennzeichnet und lassen sich über die Farbe den Jahreszeiten zuordnen. Für eine Beschreibung des statistischen Verfahrens wird auf *Anhang B, S. 191* verwiesen.

Das Jahr 2003 war gegenüber 2002 ein schwachwindiges Jahr, was insbesondere den deutlich verschiedenen Windbedingungen im Winter und Herbst zuzuschreiben ist. Wie die fast deckungsgleichen Ellipsen anzeigen, unterscheiden sich diese Jahreszeiten im Berichtsjahr kaum voneinander, während im Vorjahreszeitraum erheblich höhere Windstärken und saisonal verschiedene Vorzugsrichtungen auftraten. Die weit geringere Windvariabilität im Jahr 2003 befindet sich im Einklang mit den oben beschriebenen selbstähnlichen saisonalen Luftdruckverteilungen sowie den geringen Schwankungen des NAO-Index auf flachem Niveau (vgl. *Abschnitt 2.1, S. 24*).

Eine geeignete Möglichkeit, die zeitliche Entwicklung des Nordseewindes zu veranschaulichen, bieten die in *Abb. 2-8* präsentierten progressiven Vektordiagramme. Diese entstehen durch sequentielle Vektoraddition der täglichen Windvektoren übers Jahr, wobei der Endpunkt eines Windvektors am Tag *i* den Anfangspunkt für denjenigen am Folgetag *i* + 1 bildet. Dieses kumulative Verfahren entspricht einer sukzessiven Integration des Vektorwindes über die Zeit, so dass die Achsen in *Abb. 2-8* tatsächlich die Dimension einer Länge haben. Die Kurven lassen sich deshalb als virtuelle Trajektorie oder scheinbare Versetzung auffassen, wobei eine Einheit von 1 m/s x Tag einer Distanz von 86.4 km entspricht. Die Zeitmarken 1, 2, 3, ..., O, N, D benennen die Monatsanfänge (Januar, Februar, etc.) und sind oberhalb bzw. unterhalb der Kreuze angeordnet, welche diese Termine im Kurvenverlauf identifizieren. Der Abstand zwischen zwei konsekutiven Zeitmarken liefert den monatlichen Vektorwind nach Division durch die Monatslänge in Tagen. Für Januar 2003 ergibt sich z. B. ein Westwind der Stärke 6.5 m/s bzw. eine scheinbare Versetzung von etwa 17 000 km.

Trotz der größeren Weglänge der Trajektorie im Jahr 2002 ergibt sich für beide Jahre eine kaum verschiedene Nettoversetzung von etwa 100 000 km nach NE (2002) bzw. ENE (2003). Entsprechend erhält man für die übers Jahr gemittelte Vektorwindge-

schwindigkeit ca. 3.2 m/s, während das Betragsmittel der Windgeschwindigkeiten in 2002 dasjenige in 2003 deutlich übersteigt.

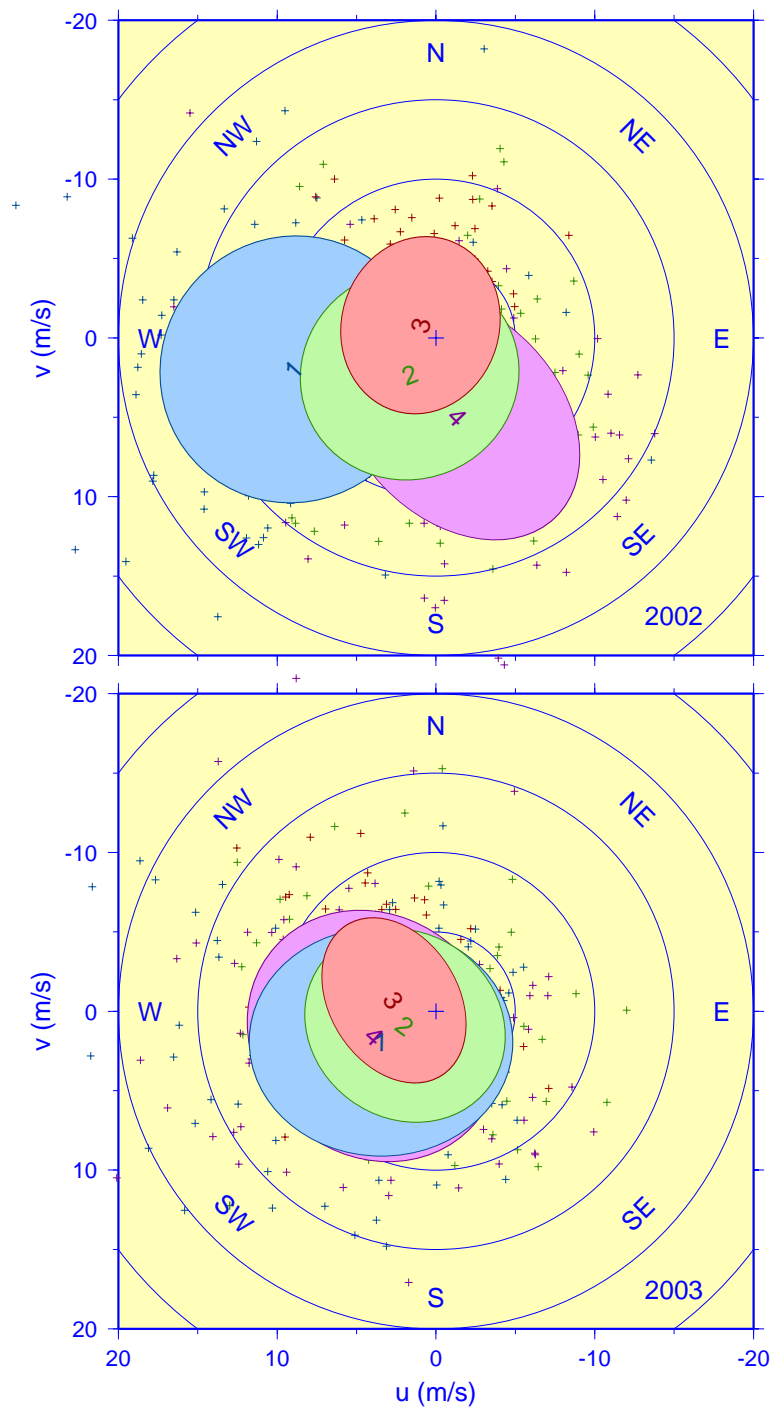


Abb. 2-7: Saisonale 50%-Wahrscheinlichkeitsellipsen des »Nordseewindes« (1=Winter=JFM, 2=Frühling, etc.).

Fig. 2-7: Seasonal 50%-probability ellipses for the »North Sea Wind« (1=winter=JFM, 2=spring, etc.).

Im Jahr 2003 wurde bis Ende Oktober eine Distanz von 800 m days/s in Richtung E zurückgelegt. Die gleiche scheinbare Versetzung wurde im Vorjahr bereits Ende März erzielt. Im Winter 2003, insbesondere wenn man den Dezember 2002 hinzurechnet,

herrschaften hingegen schwache Winde aus südlichen Richtungen vor. Ohne die Unterbrechung der Meridionalzirkulation im Januar 2003 hätte sich an der deutschen Küste ein strenger, kontinentaler Eiswinter entwickeln können (vgl. Abschnitt 3.6.2, S. 95).

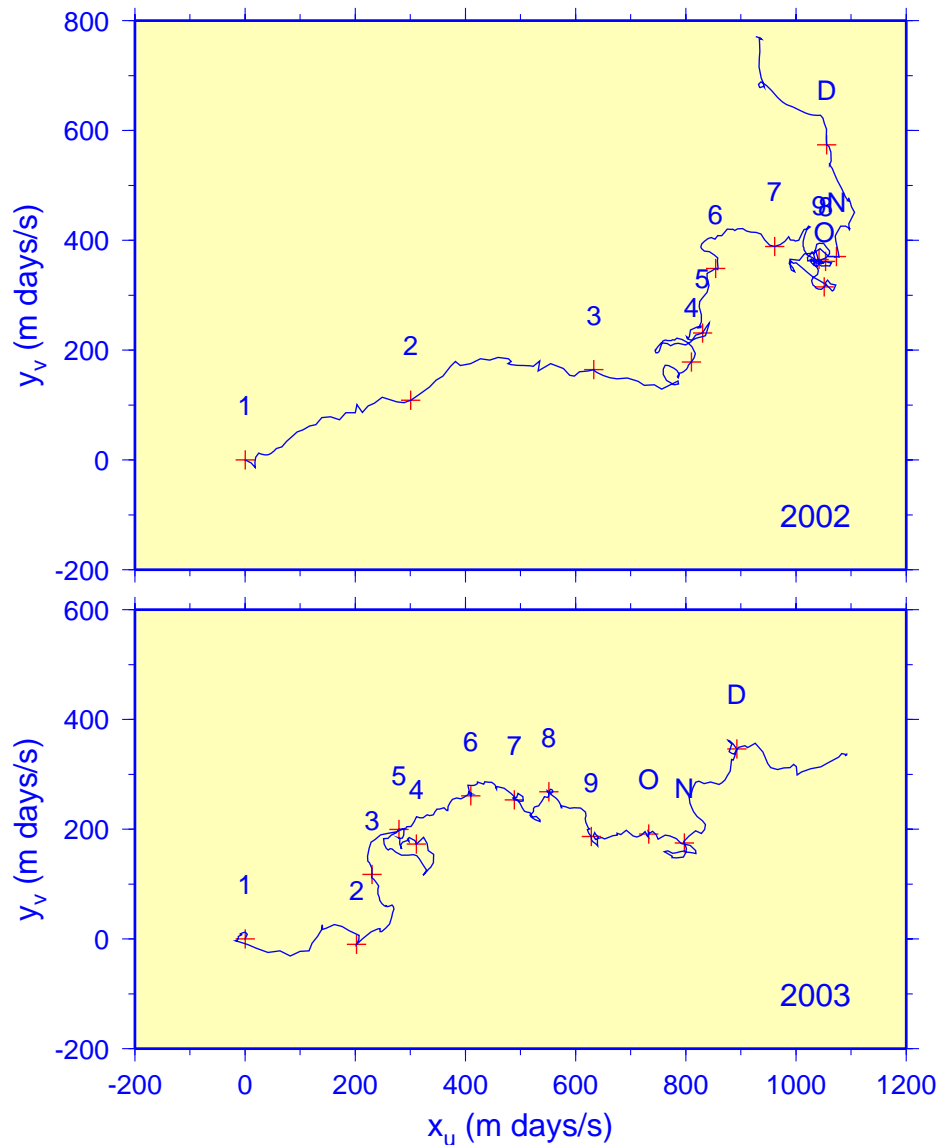


Abb. 2-8: Kumulierte tägliche Vektoren des »Nordseewindes«. Zeitmarken bezeichnen die Monatsanfänge. Die Distanz zwischen 2 beliebigen Zeitmarken dividiert durch das Zeitintervall in Tagen liefert den mittleren Vektorwind (z. B. ca. 6.5 m/s im Januar 2003).

Fig. 2-8: Progressive daily vectors of the »North Sea Wind«. Markers indicate the first day in a month. The distance between two arbitrary markers divided by the time interval in days yields the mean vector wind (e. g. about 6.5 m/s in January 2003).

Während die im Mai 2003 einsetzenden westlichen Winde sich bis Ende Oktober durch eine hohe Stabilität hinsichtlich Richtung und Stärke auszeichneten, traf das Gegenteil auf die entsprechenden Windverhältnisse im Vorjahr zu. Ein besonders markanter Unterschied zwischen den Trajektorien beider Jahre besteht in den Sommermonaten August und September. Im Jahr 2002 war in dieser Zeit kein »Fortschritt« zu beobachten, was sicher eine Folge weit weniger häufig auftretender reiner

Richtungswetterlagen sowie vermehrt vorkommender unbeständiger zyklonaler Wetterlagen war (vgl. *Tab. 2-3, S. 33*).

2.4 Lufttemperatur und Strahlung

Die Eigenschaften des atmosphärischen Zustands unterliegen den Änderungen der großräumigen Zirkulation, aber auch der lokalen Wechselwirkung mit der Meeresoberfläche. Im Hinblick auf ein Verständnis ozeanographischer Zustandsänderungen sind neben Kenntnissen des Windantriebs solche der Energieflüsse an der Grenzfläche Atmosphäre – Meer von Bedeutung. Die lokale Wassertemperatur ergibt sich beispielsweise aus der Strahlungsbilanz und den fühlbaren und latenten Wärme fluxen (wenn advective Prozesse vernachlässigbar sind). Letztere sind in hohem Maße von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur abhängig.

Eine wichtige Komponente der Oberflächenenergiebilanz ist die Globalstrahlung, d. h. die Summe der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung. Messungen der Globalstrahlung und der Lufttemperatur werden vom Deutschen Wetterdienst auf Norderney durchgeführt und freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Während die Globalstrahlung im Jahr 2002 bereits dokumentiert wurde (LOEWE ET AL. 2003), wird hier erstmals auch die Lufttemperatur diskutiert. In Ergänzung des Erstberichts werden die Temperaturbedingungen im Jahr 2002 ebenfalls angesprochen.

Der Jahresgang der Globalstrahlung auf Norderney ist in Abb. 2-9 für das Berichtsjahr dargestellt.

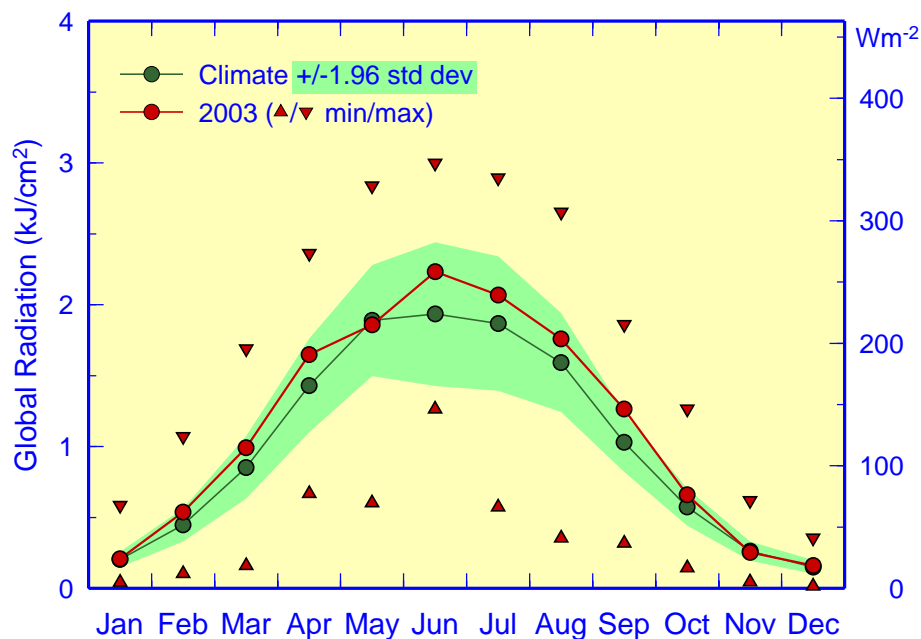


Abb. 2-9: Jahresgang 2003 der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971 – 2000) mit 95%-Band (± 1.96 zwischenjährige Standardabweichungen). 1 kJcm^{-2} entspricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm^{-2} .

Fig. 2-9: Seasonal cycle in 2003 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} .

Außer im Monat Mai überschritten die Energieflussdichten das ganze Jahr über die klimatologischen Mittelwerte des Zeitraums 1971 – 2000. Diese Abweichungen wa-

ren jedoch – wie bereits im Vorjahr – nur im September signifikant. Eine Erklärung für die im Gegensatz zu den Verhältnissen des Jahres 2002 fast durchweg positiven Anomalien wird in der starken Zunahme von Hochdruckwetterlagen im Berichtsjahr gesehen (vgl. Tab. 2-2).

Anhand der Abb. 2-10 ist ein Vergleich der Lufttemperaturentwicklung für die Jahre 2002/3 möglich. In beiden Jahren überwogen persistente positive Abweichungen von den Klimanormalwerten deutlich und erreichten in den Sommermonaten signifikante Höhen.

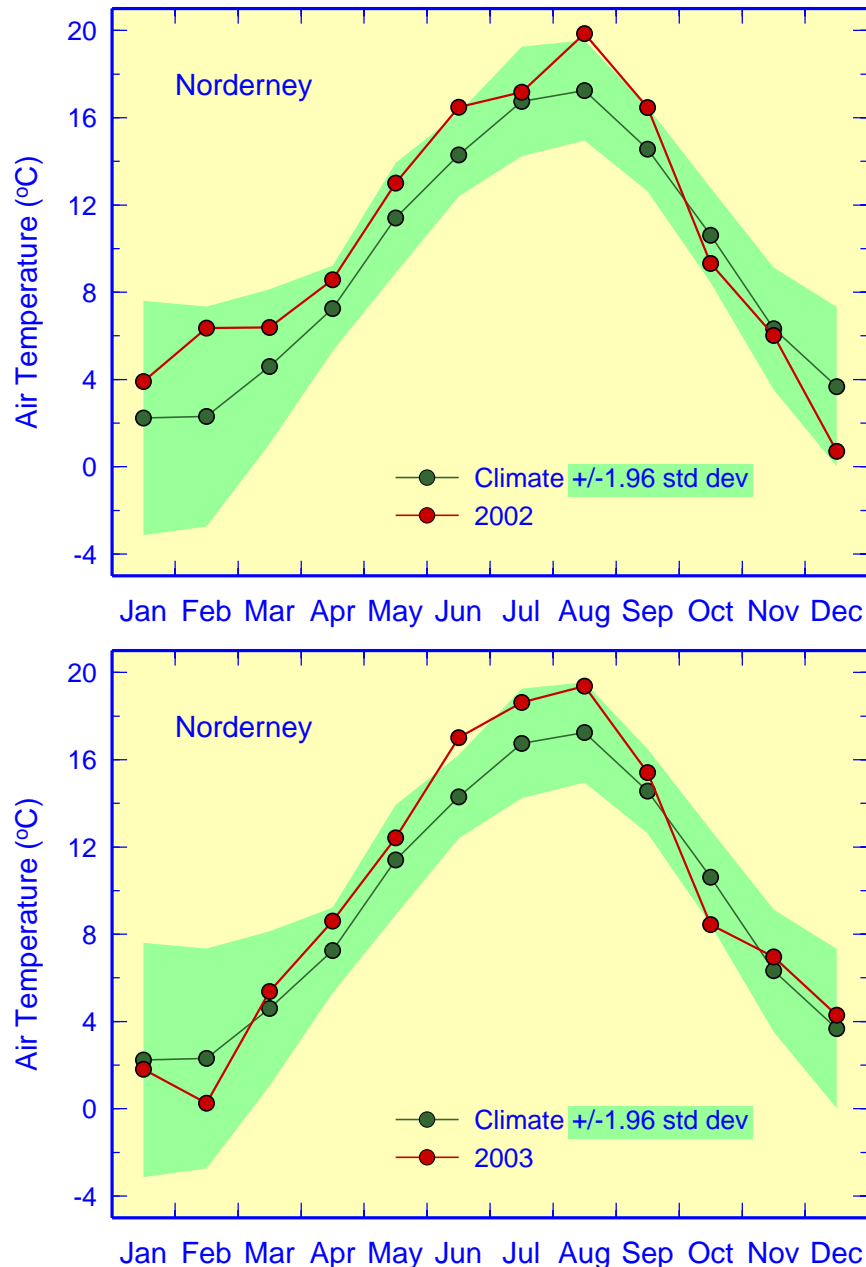


Abb. 2-10: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney für 2002 und 2003 mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 zwischenjährige Standardabweichungen).

Fig. 2-10: Monthly air surface temperatures at Norderney for 2002 and 2003 together with 1971 – 2000 base period means, and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).

Ein auffälliges Merkmal beider Jahresgänge ist der schroffe Wechsel von Warm- zu Kaltanomalie von September auf Oktober. Möglicherweise besteht hier ein Zusammenhang zur gleichzeitigen starken negativen Auslenkung der Nordatlantischen Oszillation (vgl. *Abb. 2-1*, S. 25), die sich im Jahr 2002 ebenfalls in dieser Zeit ereignete.

Ein wichtiger Unterschied zwischen beiden Jahren besteht in den maritimen (2002) bzw. überwiegend kontinentalen (2003) Temperaturbedingungen im Winter (vgl. auch *Abschnitt 3.4.2*, S. 71), wenn der Wintermonat Dezember dem Folgejahr zugerechnet wird. Ohne die stürmische Unterbrechung ab der zweiten Januardekade (s. *Tab. 2-1*, S. 32) wäre der Temperaturkontrast zwischen beiden Wintern wesentlich stärker ausgefallen. Aus heutiger Sicht (2005) erscheint der Winter 2003 als veränderter strenger Winter, welche seit Kriegsende regelmäßig in Abständen von 7 – 9 Jahren eintreten. Der bislang letzte sehr strenge kontinentale Winter ereignete sich in Norddeutschland 1996.

2.5 Referenzen

Baur, F., P. Hess, H. Nagel, Kalender der Großwetterlagen Europas 1881-1939, Bad Homburg v. d. H., 1944.

Chen, D., A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study, *Int. J. Climatol.*, 20, 1067-1076, 2000.

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.

Jenkinson, A. und F. Collison, An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, No. 62, 18pp, UK Met Office, Bracknell, 1977.

Jones, P. D., E. B. Horton, C. K. Folland, M. Hulme, D. E. Parker, T. A. Basnett, The use of indices to identify changes in climate extremes, *Climatic Change*, 42, 131-149, 1999.

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.

Lamb, H. H., Types and spells of weather around the year in the British Isles, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 76, 393-438, 1950.

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., G. Becker, U. Brockmann, A. Frohse, K. Herklotz, H. Klein, A. Schulz, Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht, *Berichte des BSH*, Nr. 33, 89pp, 2003.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht33/index.jsp

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.

Omstedt, A., C. Pettersen, J. Rodhe, P. Winsor, Baltic Sea climate: 200 yr of data on air temperature, sea level variation, ice cover, and atmospheric circulation, *Clim. Res.*, 25, 205-216, 2004.

3 Physikalische Ozeanographie

Die Nordsee ist ein relativ flaches Schelfmeer, das über die enge Straße von Dover im Südwesten und eine weite Öffnung im Norden mit dem Nordatlantik verbunden ist. Die komplexen hydrographischen Verhältnisse sind einerseits durch den nördlichen Einstrom atlantischen Wassers mit Salzgehalten > 35 , andererseits durch erhebliche Süßwassereinträge über die Flüsse und den Ausstrom von salzarmem Ostseewasser über das Kattegat / Skagerrak bedingt. In der geographischen Salzgehaltsverteilung, die relativ geringen jahreszeitlichen Änderungen unterliegt, bildet sich die mittlere zyklonale Nordseezirkulation ab.

Während die gesamte Nordsee in der kalten Jahreszeit vertikal durchmischt ist, bildet sich im Sommerhalbjahr in weiten Seegebieten, in denen sich die am Meeresboden erzeugte Gezeitenstromturbulenz nicht bis in die winddurchmischte (Windsee und Dünnung) Oberflächenschicht auswirkt, eine thermische Schichtung aus. Im Übergangsbereich zwischen Oberflächen- und Bodenschicht, der sog. saisonalen Temperatursprungschicht, werden starke vertikale Temperaturgradienten beobachtet. Die Tiefe und Ausprägung dieser Temperatursprungschicht bildet in der »Vegetationsperiode« eine wichtige Randbedingung für biogeochemische Prozesse, die oberhalb (Produktion von Biomasse) und unterhalb der sperrenden Sprungschicht (Abbau) komplexer Natur sind.

Das BSH erfasst über sein marines Umweltmessnetz »MARNET« mit vier Messstationen in der Deutschen Bucht, eine Vielzahl von Küsten- und Hochseepegeln und Eisbeobachtungsstationen, aber auch durch Nutzung der Fernerkundung für den Nordseezustand relevante Messdaten. Besondere Bedeutung kommt der schiffsgebundenen räumlichen Umweltüberwachung zu, bei der viele physikalische und chemische (auch biologische) Variablen gleichzeitig sowie an identischen Positionen bestimmt werden, so dass eine interdisziplinäre Interpretation und Bewertung möglich wird. Insbesondere die seit 1998 in den Sommermonaten zum Zeitpunkt maximaler Schichtung mit dem Forschungsschiff »Gauss« durchgeführten Gesamtaufnahmen der Nordsee bilden eine wichtige Voraussetzung für die Einschätzung des Nordseezustands. Durch solche quasi-synoptischen und systematischen Beobachtungen wird eine Datenbasis geschaffen, die nicht nur die räumlichen und zeitlichen Veränderungen des Nordseezustands dokumentiert und interpretierbar macht, sondern auch für die Validierung hydrodynamischer und ökologischer Modelle Relevanz hat.

In den anschließenden Unterkapiteln werden die Besonderheiten der wesentlichen ozeanographischen Zustandsvariablen – nämlich Strömungen, Temperatur und Salzgehalt – im Jahr 2003 dokumentiert und eingeordnet. Ferner werden Seegangs- und Meereisverhältnisse, aber auch integrale Zustandsgrößen wie Zirkulationsstatistik, Volumentransporte durch die Nordseeeingänge und Wärmeinhalt behandelt. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur, dem auch hinsichtlich der Artenzusammensetzung besondere Bedeutung zukommt, wird im Abschnitt Mischmasch-Klima im Zusammenhang mit regimetypischen Windbedingungen diskutiert.

3.1 Strömungen

Die vorherrschenden Strömungen in der Nordsee bilden ein großräumiges zyklonales Zirkulationsmuster. Das am NW-lichen Rand mit dem Fair-Isle Strom eintretende atlantische Wasser durchströmt dabei das Nordseebecken im Gegenuhrzeigersinn, um es als Norwegischer Strom über der Norwegischen Rinne wieder zu verlassen (KLEIN ET AL. 1994, OTTO ET AL. 1990, MÜLLER-NAVARRA UND MITTELSTAEDT 1987).

Die Intensität der Nordseezirkulation wird von der großräumigen atmosphärischen Zirkulation über dem Nordatlantik und der Nordsee selbst gesteuert. Sie unterliegt darum ebenfalls erheblichen saisonalen Schwankungen (s. u.), die sich auch in jahreszeitlichen Veränderungen des Volumentransports von Atlantik- und Ostseewasser in die Nordsee zeigen (*Abschnitt 3.1.2, S. 48*). Schließlich wird im *Abschnitt 3.1.3, S. 49* eine Klassifizierung der täglichen Reststrommuster in der Deutschen Bucht für das Jahr 2003 präsentiert, die in engem Zusammenhang zu den Wetterlagen über der Nordsee steht (*Abschnitt 2.2.2, S. 30*). Die Datenbasis für alle Beiträge bilden mit dem operationellen Modell des BSH (BSHcmod) simulierte Strömungsfelder.

3.1.1 Saisonale geographische Verteilungen

Die Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2003 ist in *Abb. 3-1* für die vier Jahreszeiten dargestellt. Durch die saisonale vektorielle Mittelung der mit dem BSHcmod simulierten Strömungsfelder wurden periodische Gezeitenströme weitgehend eliminiert, so dass die Verteilungsmuster die durch den Windantrieb generierten Restströme zeigen. Da eine Strömungsklimatologie für das BSH-Modell nicht vorliegt, wird ein Vergleich mit entsprechenden saisonalen Verteilungen des Jahres 2002 durchgeführt (LOEWE ET AL. 2003).

Im Winter (JFM) 2003 war sowohl die Intensität der Zirkulation als auch die Richtungsstabilität der Strömungen deutlich schwächer ausgeprägt als im Vorjahr. Dies gilt insbesondere für den atlantischen Einstrom im Nordwesten und den Einstrom durch den Kanal. Der Einstrom von Ostseewasser durch das Skagerrak und der Ausstrom in den Atlantik über der Norwegischen Rinne waren hingegen kräftiger ausgebildet als im Vorjahreswinter.

Die Strömungsmuster im Frühjahr (AMJ) 2003 und 2002 zeigten verglichen mit den übrigen Quartalen die geringsten Unterschiede. Stromstärken und Stabilität waren jedoch auch in dieser Jahreszeit klar schwächer als im Jahr 2002. Auch in den Sommermonaten Juli bis September (JAS) wies die Oberflächenzirkulation kein großräumiges Muster auf; bei hoher Richtungsvariabilität blieben die ohnehin im Sommer geringen Strömungsgeschwindigkeiten hinter denjenigen des Vorjahressommers zurück. Dies trifft insbesondere auf den stark abgeschwächten Einstrom von Ostseewasser, aber auch auf den Ausstrom über der Norwegischen Rinne zu.

Die stärksten Unterschiede gegenüber den Vorjahresverhältnissen traten im Herbst auf und sind durch erhebliche Unterschiede im Windantrieb erklärbar (vgl. *Abb. 2-7, S. 37*). Im Herbst 2002 war der zyklonale östliche Zirkulationsast vom Kanal bis zur Norwegischen Rinne einschließlich des baltischen Ausstroms extrem stark ausgeprägt. Der ebenfalls intensive Ausstrom aus der Nordsee erstreckte sich über den gesamten nördlichen Rand bis hin zur schottischen Küste. Im Herbst 2003 kam nur ein mäßiger Ausstrom über der Norwegischen Rinne zustande, dem ein ähnlich starker

Einstrom durch den Fair-Isle-Kanal und Strömungen vergleichbarer Stärke in der nordwestlichen Nordsee gegenüberstanden.

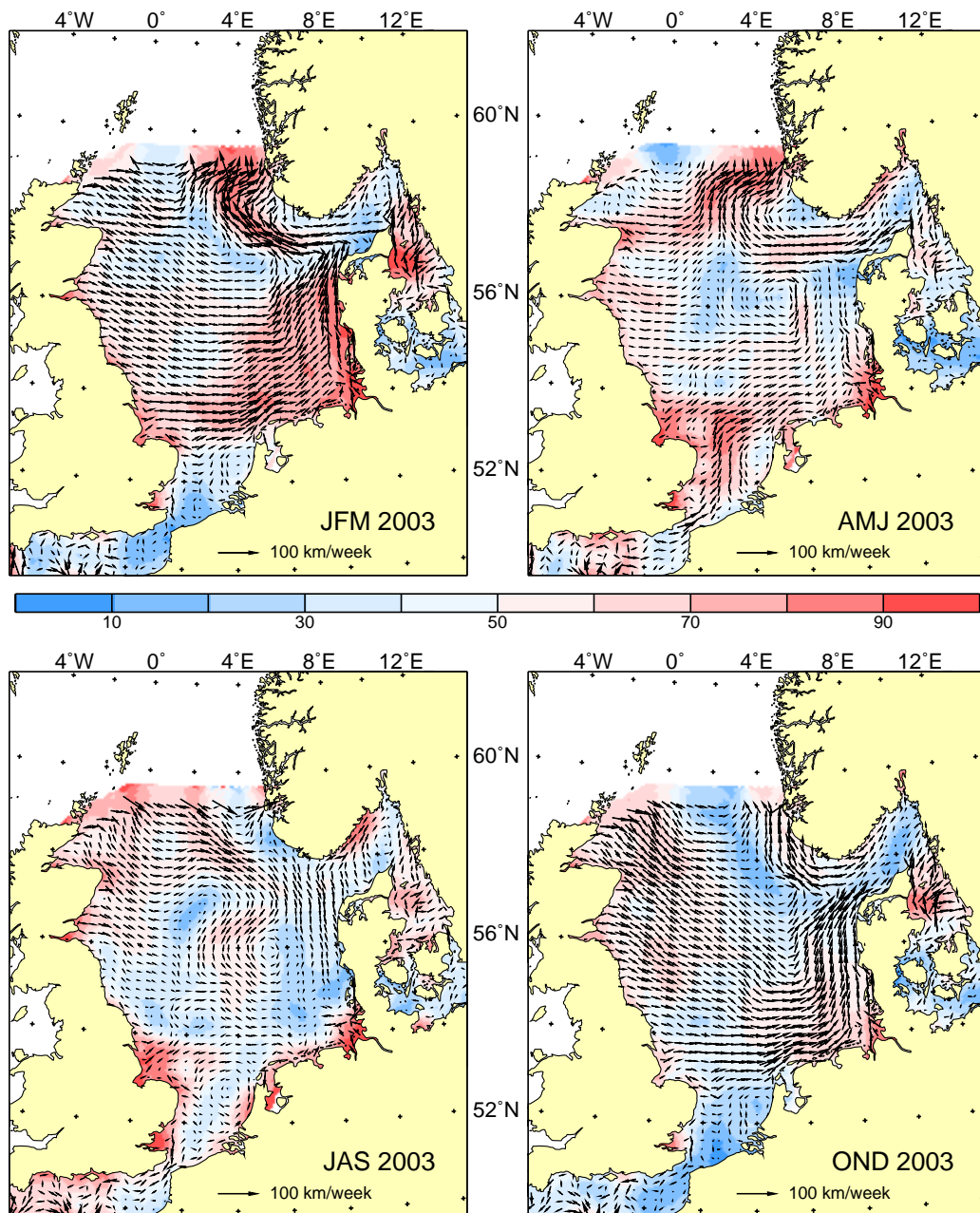


Abb. 3-1: Saisonale Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2003 (JFM = Januar-Februar-März, AMJ ...). Vektormittel aus Strömungsfeldern des ›BSHcmod‹. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.

Fig. 3-1: Seasonal surface circulation of the North Sea in 2003 (JFM = January-February-March, AMJ ...). Vector mean currents from ›BSHcmod‹. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

Ogleich die Nordseezirkulation infolge vorherrschender Winde aus SW – NW im Langzeitmittel durch großräumiges zyklonales Muster charakterisiert ist, zeigen die hier präsentierten Strömungsfelder, dass erhebliche zwischenjährige, saisonale, aber auch kurzfristigere Abweichungen davon auftreten. Für die Interpretation von

Konzentrationsverteilungen chemischer Stoffeinträge oder deren Ausbreitung im Meer sind deshalb Kenntnisse der gleichzeitigen Strömungsbedingungen relevant.

3.1.2 Einstrom

Die hier diskutierten Wassertransporte durch die Straße von Dover und das Kattegat basieren auf mit dem operationellen Zirkulationsmodell des BSH simulierten Daten, die zunächst über zwei Tideperioden von etwa 24,8 Stunden gemittelt wurden, um Gezeiteneffekte zu eliminieren. Die Volumentransporte durch beide Querschnitte sind als Tagesmittel und übergreifende Monats- und Jahresmittel für das Jahr 2003 in *Abb. 3-2* und *Abb. 3-3* dargestellt, wobei in die Nordsee gerichtete Transporte positives Vorzeichen haben.

Im Jahr 2003 waren sowohl die Wassertransporte durch den englischen Kanal als auch durch das Kattegat / Skagerrak deutlich geringer als im langjährigen Mittel. Der Jahresnettotransport durch die Straße von Dover unterschritt diesen Mittelwert mit 0,03 Sv um etwa 50 %. Der Einstrom atlantischen Wassers in die südliche Nordsee hat sich auch gegenüber dem immensen Volumentransport von 1 Sv im Jahr 2002 drastisch reduziert. In den Monaten Mai, Juni und November wurde bei vorherrschend südwestlichem Windantrieb (vgl. *Abb. 2-8*, S. 38) Atlantikwasser durch den Kanal in die Nordsee transportiert. Etwa ab der zweiten Augushälfte bis Ende Oktober kam es vor allem in Verbindung mit N- und NW-Wetterlagen (vgl. *Tab. 2-1*, S. 32) zu kurzfristigen, jedoch relativ kräftigen Ausstromereignissen von Nordseewasser (Tagesdaten), die sich in den übergreifenden Monatsmitteln zu einem moderaten Ausstrom glätten.

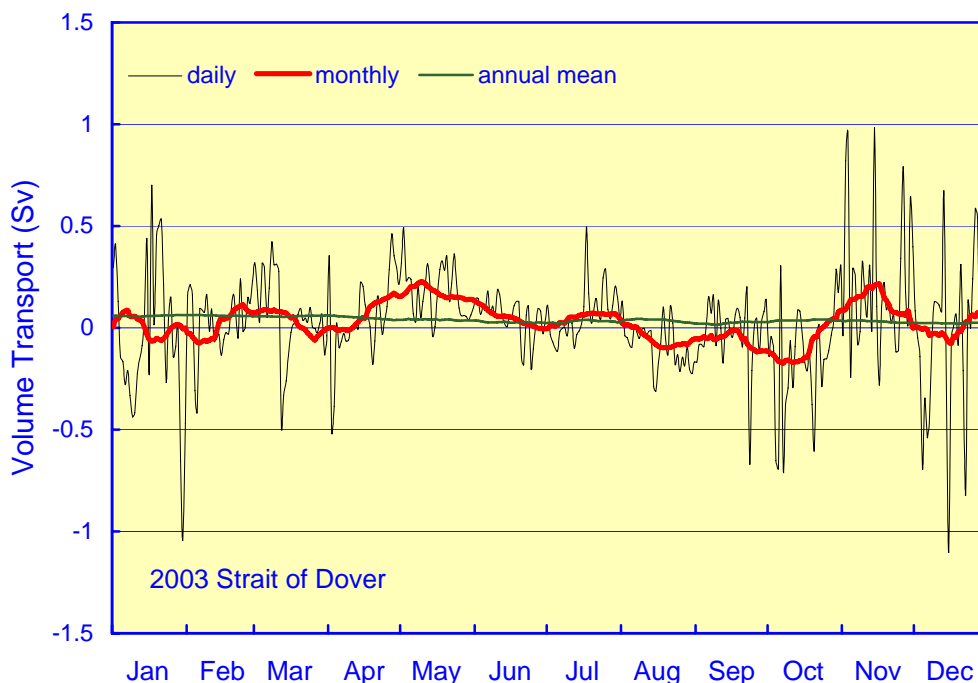


Abb. 3-2: Wassertransport durch die Straße von Dover in 2003 (BSHcmod); 1 Sv = 10⁶ m³/s.

Fig. 3-2: Volume transport through the Strait of Dover in 2003 (BSHcmod); 1 Sv = 10⁶ m³/s.

Im Übergangsgebiet Nordsee / Ostsee wechselten sich Ein- und Ausstromphasen ab. Im Februar, Juli, Oktober und November überwog der Ausstrom von Ostseewasser in

die Nordsee. Phasen mit entgegengerichteten Transporten traten vor allem im Januar, Mai, Juni und Dezember auf.

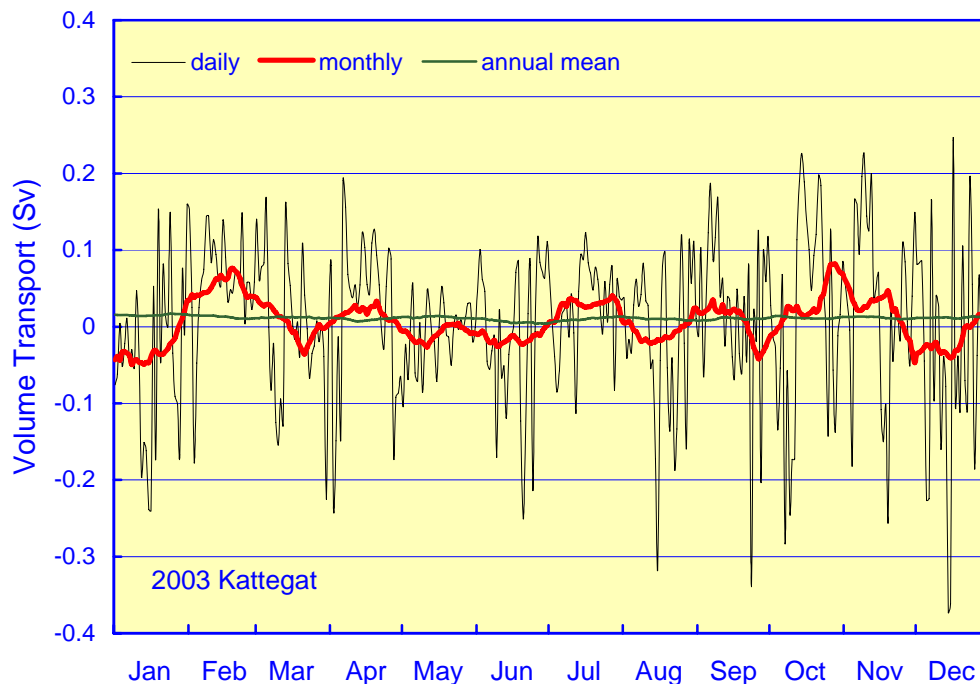


Abb. 3-3: Wassertransport durch das Kattegat in 2003 (BSHcmod); $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 3-3: Volume transport through the Kattegat in 2003 (BSHcmod); $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.1.3 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Klassifizierung der Oberflächenzirkulation in der Deutschen Bucht für das Jahr 2003 präsentiert. Die Klassifizierung der Strömungsverhältnisse ist ähnlich motiviert wie diejenige der Wetterlagen über der Nordsee (vgl. *Abschnitt 2.2, S. 27*): Sie soll in kompakter Form die täglichen Strömungszustände und deren zeitliche Entwicklung im Berichtsjahr dokumentieren. Gemeinsam können Wetterlagen- und Strömungskalender (s. u. *Tab. 3-1*) bei der Interpretation besonderer Ereignisse in der Meeresumwelt von Nutzen sein (vgl. z. B. *Abschnitt 4.1.4, S. 117*).

Die Datenbasis für die Klassifizierung bilden die mit dem operationellen Strömungsmodell ›BSHcmod‹ simulierten Strömungsfelder, die auch zur Charakterisierung der saisonalen Nordseezirkulation herangezogen wurden (vgl. *Abschnitt 3.1.1, S. 46*) und hier als kartierte geographische Verteilungen der täglichen Restströme in der obersten Modellschicht (0 – 8 m) zur Verfügung standen. Diese Karten wurden im Gebiet zwischen $53^\circ 15' - 55^\circ 30' \text{ N}$ und $6^\circ 30' - 9^\circ \text{ E}$ analysiert, indem das tägliche Reststrommuster einem von neun charakteristischen Zirkulationstypen zugeordnet wurde.

Neben den Typen C (zyklonal, deutlicher Einstrom am SW-Rand, Ausstrom am N- und NW-Rand) und A (antizyklonal, Einstrom am N- und NW-Rand, Ausstrom am W-Rand) wurden sechs Kategorien (N, S, W, E, NW, SE) für vorherrschende Strömungsrichtungen definiert (*Abb. 3-4*). (SW- und NE-Strömungen sind in dieser Klassifizierung nicht enthalten, denn aufgrund der geographischen Orientierung der Deutschen Bucht treten solche – bei geeignetem Windantrieb ansonsten zu erwartenden – gerichteten

Strömungen als A- bzw. C-Typ in Erscheinung.) Dabei ist wichtig, sich zu vergegenwärtigen, dass Strömungsrichtungen (im Gegensatz zu Windrichtungen) stets angegeben, wohin der Strom setzt (und nicht woher er kommt). Strömungsmuster, die z. T. Wirbelstrukturen enthielten, aber keinem der genannten Muster zugeordnet werden konnten, wurden in der Sonderkategorie V (variabel) zusammengefasst.

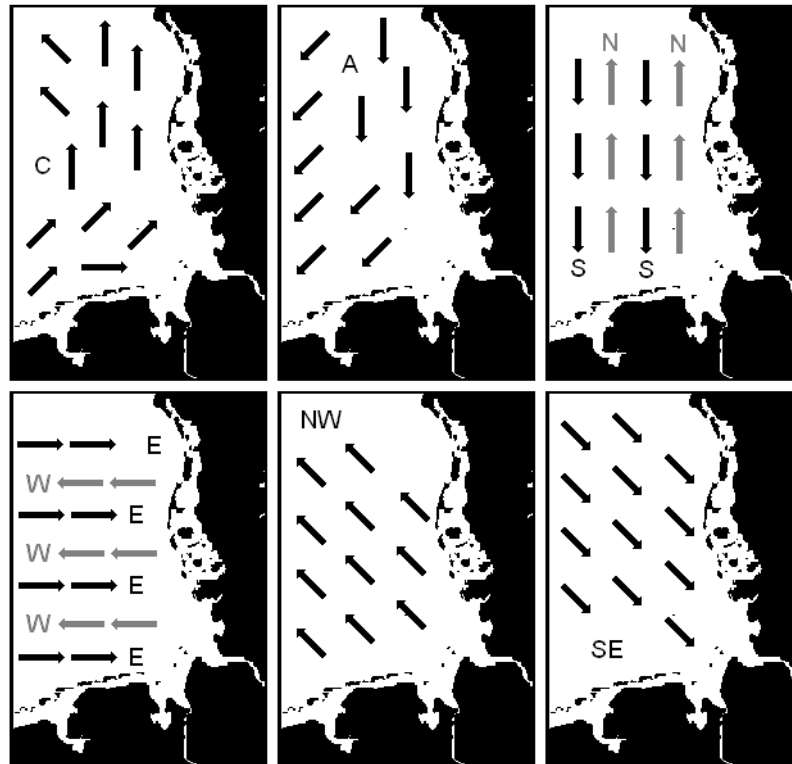


Abb. 3-4: Schematik der Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht.

Fig. 3-4: Classification scheme for daily residual currents in the German Bight.

Die zeitliche Abfolge der verschiedenen Zirkulationsmuster ist in Tab. 3-1 in Kalenderform wiedergegeben. Im Jahr 2003 wurden an 150 Tagen zyklonale, an 50 Tagen antizyklonale und an 109 Tagen variable Zirkulationsmuster beobachtet. Diese Zahlen belegen klar die Dominanz zyklonaler Strömungsverhältnisse in der Deutschen Bucht (s. a. Abb. 3-1, S. 47). Im »Durchschnittsmonat« traten demnach an 12 Tagen zyklonale, an 4 Tagen antizyklonale und an 9 Tagen variable Zirkulationsmuster auf. Das gehäufte Auftreten des C-Typs im November (20 Tage), Dezember (18), aber auch von Mitte Januar bis Mitte Februar (19), sowie im Mai (17) und Juli (18), macht jedoch deutlich, dass ein derartiger Durchschnittsmonat eher die Ausnahme bzw. nicht der üblicherweise mit einem Mittelwert assoziierte »Normalfall« ist; die durchschnittliche Abweichung vom Mittel beträgt für die genannten Zeiten über 50 %.

Ähnliches gilt für Typ A, der im Februar (0), Mai (1), Juni (0) und November (1) praktisch nicht vorkam, aber von August bis Oktober an 8, 8 und 11 Tagen und damit mehr als doppelt so häufig wie im Mittel (4 Tage) auftrat. Im Zeitraum von Mitte August bis Mitte September wurde diese Zirkulationsform sogar an 13 Tagen beobachtet. Im März (13) und Mai (16) dominierte eine variable Zirkulation, die im November (4) und Dezember (2) eine Seltenheit darstellte.

2003	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	V			C		V	C					N
2	C	C	C	V		C		V	A	V	C	NW
3				A	C		V					C
4	W		N	S		N	S					A
5	V	V	C				A	W	V		V	S
6	A	C	V	A		V	V			C	N	A
7					V		C	V	C		NW	
8	V	V		V		E	A			V	W	V
9	C		C	W		V	V			SE	C	
10		C		NW		E	C	C	V		N	C
11	V			C		V	A	W	S			N
12				V	C	S		SE	A			C
13	E			NW			V			A	C	SE
14	C		V	N	A	V		A	V			A
15	E	V		V	N						V	
16				W		C		V	C			
17			A	A				SE		V		C
18	C		V	A		SE		S	V	A	C	
19		C	N	N		C		C				
20		N	V	C	C	V	C	E	C	N		V
21	V	C	C	V		C			V	A		
22						S			A	C	A	
23		V	N			C			V	V	C	
24	C		V					A	C	W	N	
25	SE	C	C	C		V			A	SE	C	
26	E		V		V		V				V	
27	C		C			NW	C	W	V	C		
28		./.	S					C	N		C	
29	A		A	./.		./.		S	./.	NW	./.	W
30												
31												

Tab. 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht im Jahr 2003.

Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2003.

Eine Auswertung von Häufigkeit und Andauer der Hauptzirkulationsformen C, V und A im Jahr 2003 bietet Abb. 3-5. Darin gibt die Säulenhöhe – als Produkt von Häufigkeit und Andauer – die Gesamtanzahl der Tage im Jahr an, die sich aus der Summe ununterbrochener Sequenzen o. a. »Runs« gleicher Länge der drei Zirkulationsformen ergibt. Die längsten C-Runs mit einer Dauer von jeweils 11 Tagen wurden von Ende April bis Anfang Mai und in der zweiten Julihälfte beobachtet (Tab. 3-1). 17 Runs dauerten länger als 4 Tage an und deckten insgesamt 117 Tage (32 %) des Jahres ab. Unter insgesamt 71 »Eintagsfliegen« erweist sich der V-Typ mit 33 Ereignissen als typische Übergangsform. Andererseits ist durchaus bemerkenswert, dass dieser Zirkulationstyp ein sekundäres Maximum bei Run-Längen von 4 Tagen erreichte, während die beiden Rotationsformen mit zunehmender Run-Länge kürzere oder gleichbleibende Gesamtzeiten erzielten. Dies gilt im übrigen auch für die Häufigkeit der Run-Ereignisse.

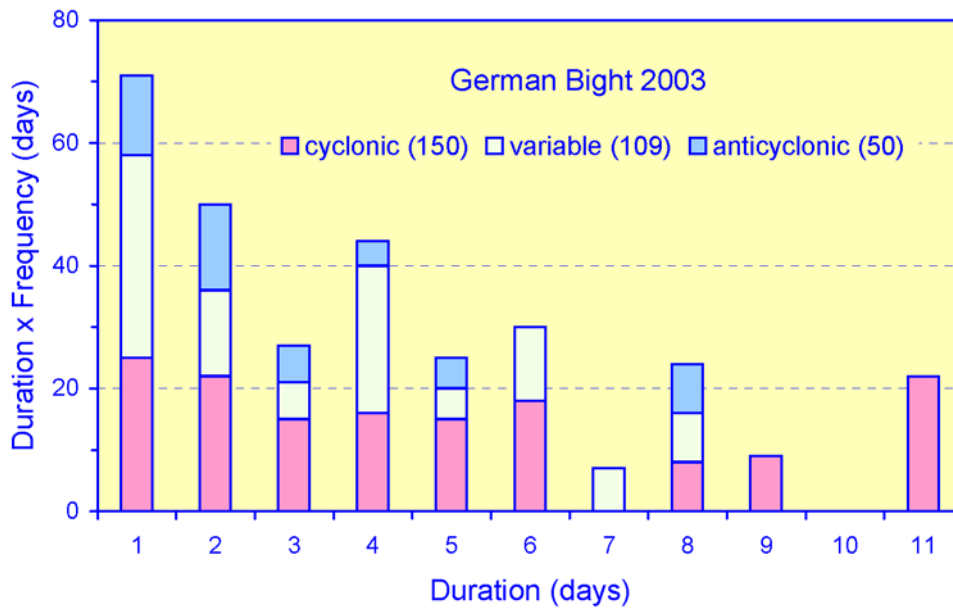


Abb. 3-5: Häufigkeit und Andauer der drei wichtigsten Zirkulationstypen.

Fig. 3-5: Frequency and duration of main circulation types.

Während der Vergleich der Jahresbilanzen 2003 versus 2002 für die Zirkulationsformen C, A, V und DIR keine gravierenden Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit ihres Auftretens ergibt (2003: 150, 50, 109, 56; 2002: 143, 42, 131, 49 Tage), trifft dies für einen saisonalen Vergleich – mit Ausnahme des Frühjahrs – nicht zu (Abb. 3-6).

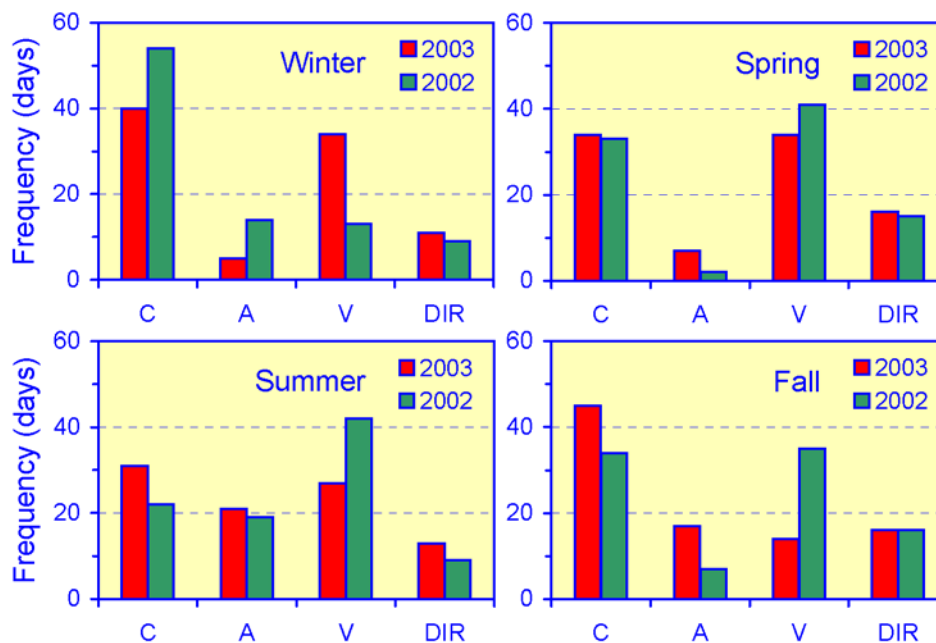


Abb. 3-6: Saisonale Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2002 und 2003.

Fig. 3-6: Seasonal frequencies of circulation patterns in the German Bight for 2002 and 2003.

Die Summenhäufigkeit der als DIR zusammengefassten sechs Richtungstypen zeigt, nicht unerwartet, sowohl intersaisonal als auch im Vergleich der beiden Jahre die ge-

ringsten, eher zufälligen Veränderungen. Im Sommer und Herbst des Jahres 2003 trat die variable Zirkulationsform V erheblich seltener auf als in den entsprechenden Jahreszeiten des Vorjahres, im Winter traf das Gegenteil zu. Die erhöhte bzw. verminderte Präsenz des V-Typs wurde im Winter und Herbst durch etwa gleich große inverse Änderungen der Häufigkeiten der beiden Rotationsformen kompensiert.

In welcher Weise und in welchem Umfang sich die atmosphärischen Zirkulationstypen (*Tab. 2-1, S. 32*) in den Strömungsmustern (*Tab. 3-1, S. 51*) abbilden, wurde bislang nicht systematisch untersucht. Ein qualitativer Vergleich des Strömungskalenders mit dem Wetterlagenkalender für das Jahr 2003 legt jedoch die nachfolgenden physikalisch plausiblen Korrespondenzen nahe. Die variable Strömungsform V tritt bevorzugt gemeinsam mit antizyklonalen, häufig schwachwindigen Wetterlagen auf. Stärker ausgeprägte Hochdrucklagen und sowohl hybride ADIR- als auch CDIR-Lagen mit Vorzugswindrichtungen aus der östlichen Hemisphäre (N – SE) scheinen sich in den eher seltenen antizyklonalen Strömungsmustern abzubilden. Reine Tiefdrucklagen und solche mit W – SW Richtungsanteilen produzieren vorzugsweise zyklonale Strömungsmuster. Die sehr seltenen, gerichteten Strömungsmuster scheinen mit kurzlebigen Sturmereignissen oder Starkwindlagen der entgegengesetzten Richtung zu korrespondieren.

3.2 Seegang

Seegang ist der durch Windenergie erzeugte Schwingungszustand der Meeresoberfläche. Er setzt sich aus Windsee und Dünung zusammen.

Die Wellenhöhen der Windsee sind abhängig von der Windstärke, der Wirkdauer des Windes und der Windstreichlänge (Strecke, über die der Wind auf die Meeresoberfläche wirkt; engl. »Fetch«). Dünung ist »alter« Seegang aus entfernten Sturmgebieten, der sich über große Distanzen unabhängig vom lokalen Wind ausbreitet. Dünungswellen sind im Gegensatz zur Windsee abgerundet und können im Atlantik Wellenlängen von mehr als 200 m erreichen. Als Maß für die Stärke des Seegangs wird die signifikante oder auch kennzeichnende Wellenhöhe (SWH) verwendet, die als mittlere Wellenhöhe des oberen Drittels der Wellenhöhenverteilung definiert ist.

Die Hauptdatenbasis für die in diesem Abschnitt präsentierten Ergebnisse bilden simulierte Seegangsdaten, die mit dem operationellen Wellenvorhersagemodell »WAM« (WAMDI GROUP 1988) des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (DWD) generiert wurden.

3.2.1 Saisonale geographische Seegangsverteilungen

Das saisonale Seegangsklima in den Jahren 2003 und 2002 wurde durch die mittlere signifikante Wellenhöhe und die Hauptrichtung von Windsee und Dünung charakterisiert (*Abb. 3-7* und *Abb. 3-8*). Beide Verteilungen beruhen auf Auswertungen der Seegangsvorhersagen des DWD.

Die grundsätzlichen saisonalen Unterschiede mit maximalen Wellenhöhen im Winter und geringsten Wellenhöhen im Sommer erklären sich aus entsprechenden Windverhältnissen (vgl. *Abschnitt 2.3, S. 35*). Die Wellenhöhen nehmen stets von Norden, wo die Verhältnisse stark vom Atlantikseegang geprägt sind, zur flacheren südlichen Nordsee ab. Die großräumigen Verteilungen der mittleren Wellenhöhe waren in beiden Jahren – jedoch insbesondere im Frühjahr – ähnlich. Insgesamt traten im Herbst und Winter des Jahres 2003 geringere Wellenhöhen als im Vorjahr ein, während für das Sommerquartal das Gegenteil zutrifft.

Die Dünung kam fast immer aus dem Atlantik von Nordwesten. Eine Ausnahme bildet das Herbstquartal 2002 mit vorwiegend nordöstlicher Dünung. Die Richtung der Windsee stimmt meist mit der Windrichtung überein; die saisonalen Unterschiede zwischen beiden Jahren waren hier stärker ausgeprägt und traten ebenfalls im Herbst am deutlichsten hervor. Im südlichen Teil der Nordsee kam die Windsee im Herbst 2003 aus W bis NW, im entsprechenden Quartal des Vorjahres aus fast entgegengesetzter Richtung (SE). Dieser markante Unterschied steht in ursächlichem Zusammenhang mit gegensätzlichen Windrichtungen im Herbst beider Jahre (vgl. *Abb. 2-7, S. 37*).

Jahresstatistiken für 2002 und 2003 werden an drei Positionen in *Tab. 3-2* der WASA-Langzeitstatistik gegenübergestellt (GÜNTHER ET AL. 1997). Zur geographischen Lage der ausgewählten Stationen in der südlichen, zentralen und nördlichen Nordsee vgl. *Abb. 3-7, JFM-Quartal*. Sowohl die mittleren signifikanten Wellenhöhen als auch die 90%-Perzentile blieben in beiden Jahren und an allen drei Stationen unterhalb der langjährigen Mittelwerte. Allerdings wurden die maximalen Wellenhöhen des Zeitraums 1955 – 1994 bei der Euro- und Ekofisk-Plattform im Jahr 2002 um mehr als 2 m übertroffen. Die extreme Wellenhöhe von 13.2 m bei Ekofisk war Folge des Sturmtiefs »Jennifer«, das Ende Januar 2002 über der Nordsee lag (s. *Tab. 2-3, S. 33*). In Verbin-

derung mit dem stärksten Sturm des Jahres 2003, dem Orkan ›Jan‹ vom 21. Dez. (s. Abb. 2-3, S. 28), wurden Wellenhöhen von 8.1 m (Ekofisk), 5.4 m (Euro) und 4.6 m (Brent) simuliert; die höchsten Wellen von 10.1 m traten bei etwa 55° N / 4° E auf. Da die WASA-Klimatologie und die aktuellen WAM-Daten mit verschiedenen Seegangsmodellen generiert wurden, ist unklar, in welchem Umfang die konstatierten Unterschiede modellbedingt sind.

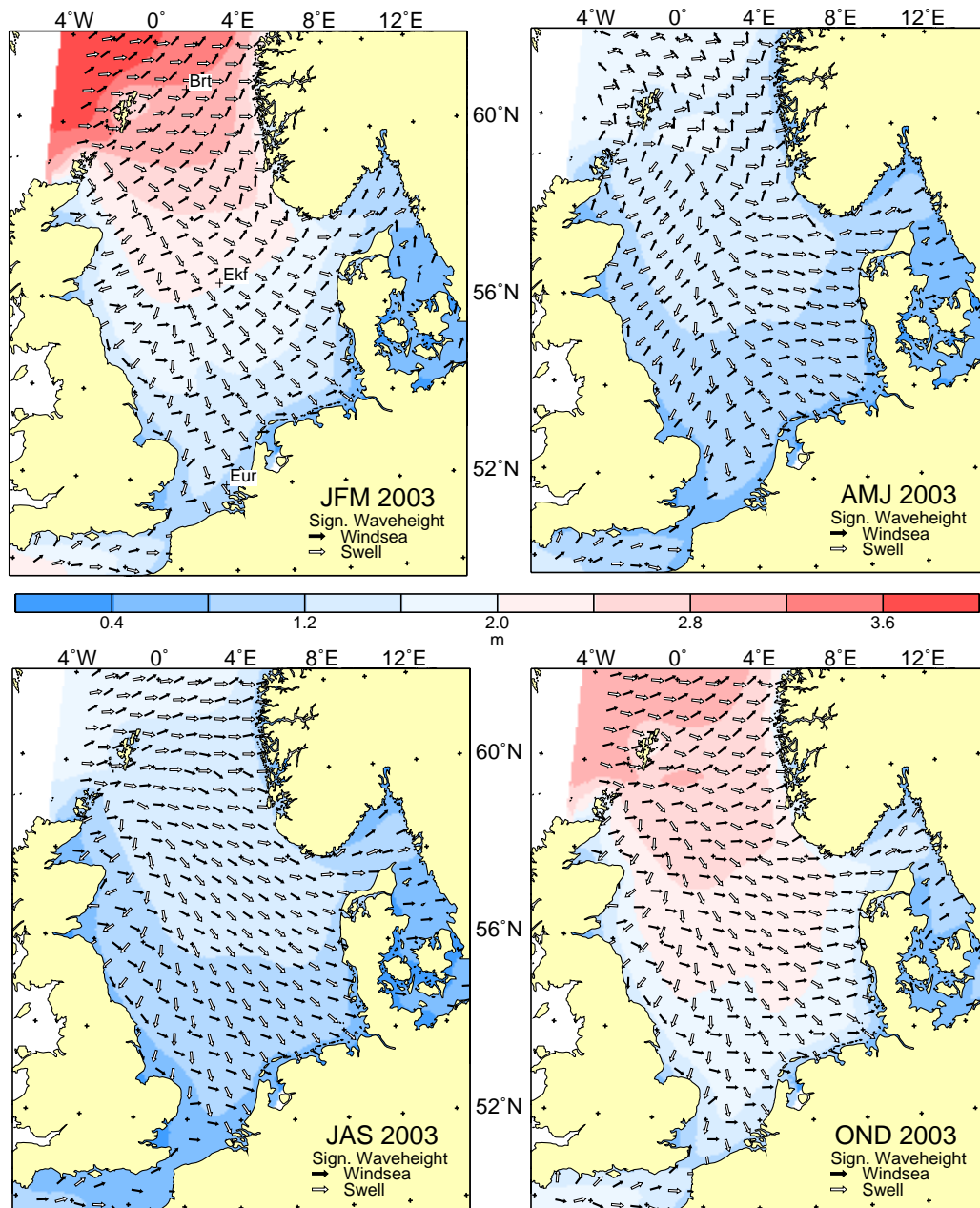


Abb. 3-7: Saisonale geographische Verteilungen von Windsee und Dünung im Jahr 2003; JFM = Januar, Februar, März etc.

Fig. 3-7: Seasonal geographical distributions of windsea and swell in 2003; JFM = January, February, March etc.

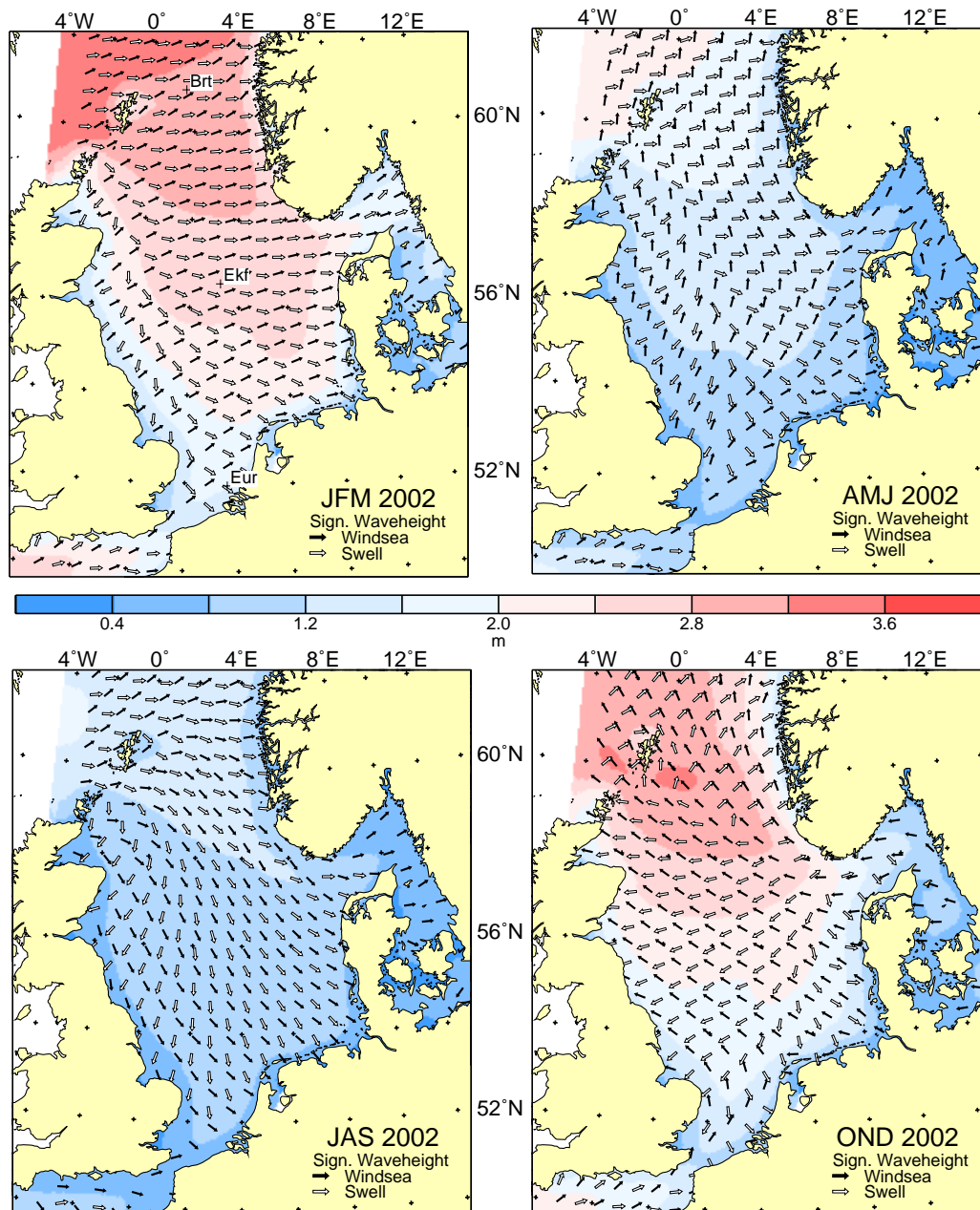


Abb. 3-8: Wie Abb. 3-7, jedoch für das Jahr 2002.

Fig. 3-8: As Fig. 3-7, but for 2002.

STATION	WASA (1954-1994)			WAM 2002			WAM 2003		
	MEAN	90% <	MAX	MEAN	90% <	MAX	MEAN	90% <	MAX
EURO 51.0 °N, 3.5 °E	1.23	2.35	6.46	1.16	2.35	8.55	1.02	2.08	5.85
EKOFISK 56.5 °N, 3.2 °E	2.32	4.11	10.45	1.88	3.60	13.15	1.72	3.27	8.85
BRENT 61.0 °N, 1.5 °E	3.24	5.59	12.87	2.27	3.89	11.15	2.29	4.03	8.45

Tab. 3-2: Wellenhöhenstatistik (Modelldaten, alle Angaben in m).

Table 3-2: Wave height statistics (model data, all entries in m).

3.2.2 Lokale Wind- und Windseeeverteilungen

Die Wind- und Windseebedingungen werden in der inneren Deutschen Bucht für das Jahr 2003 anhand von Windbeobachtungen des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (DWD) auf dem ›Unbemannten Feuerschiff Deutsche Bucht‹ (UFS DB, 54°10' N, 7° 27' E), durch Modelldaten des vom DWD betriebenen Seegangmodells ›WAM‹ für die Position des UFS DB sowie durch BSH-Waverider-Messungen bei Helgoland dokumentiert. Entsprechende Verhältnisse in der äußeren Deutschen Bucht werden für die Position ›Entenschnabel‹ (55° 40' N, 4° 00' E) im Nordwesten der deutschen AWZ diskutiert.

3.2.2.1 Innere Deutsche Bucht (>UFS DB<)

Für Wind- und Windsee an der Position UFS DB wurden Jahresstatistiken in Form von relativen zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen für Windgeschwindigkeit und -richtung bzw. Wellenhöhe und -richtung produziert (*Tab. 3-3 bis Tab. 3-5*). In den zensierten 2D-Verteilungen wurden nur Windgeschwindigkeiten bzw. Wellenhöhen > 0 berücksichtigt, denen sich auch eine Richtung zuordnen lässt. Im Unterschied zu Strömungsrichtungen bezeichnen Richtungsangaben für Wind und Seegang deren Herkunft.

Die am UFS DB im Jahr 2003 beobachtete / simulierte Windverteilung ist in *Tab. 3-3 / Tab. 3-4* wiedergegeben, die Windseeeverteilung in *Tab. 3-5*. Die Randverteilungen für Wind- und Seegangsrichtung (Zeilensummen) sind bimodal und ähnlich. Alle drei Verteilungen zeigen ein breites Maximum in den Sektoren SW – NW und ein Nebenmaximum in den Sektoren E – SE. Die Nebenmaxima stehen scheinbar im Widerspruch zur Alltagserfahrung. Klimatologische Windverteilungen für den Zeitraum 1981 – 2000 zeigen aber durchaus ähnliche bimodale Strukturen (LEFEBVRE 2004), die auch für die Wind- und Seegangsverteilungen im Jahr 2002 charakteristisch waren (LOEWE ET AL. 2003).

Höhere und extreme Windgeschwindigkeiten gingen mit SW-, NW- und N-lichen Richtungen einher. Die größten Wellenhöhen traten jedoch mit bis zu 8 m klar im NW-Sektor auf, denn die Windstreichlänge ist für Winde aus dieser Richtung in der Deutschen Bucht erheblich länger als für Winde aus S- oder E-lichen Richtungen. Erwähnenswert ist weiter, dass sich die Randverteilungen für Windgeschwindigkeit und Wellenhöhen (Spaltensummen) deutlich unterscheiden. Erstere wird üblicherweise vom DWD durch eine Weibull-Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung beschrieben, während letztere sich durch eine Rayleigh-Verteilung mit Maximum im Wellenhöhenintervall 0 – 1 m charakterisieren lässt.

Die modell- und beobachtungsbasierten Windverteilungen am UFS DB weisen keine nennenswerten Unterschiede auf. Ein Vergleich der Monatsmittelwinde bestätigt die Qualität der Modellwinde des DWD. Das DWD-Modell unterschätzte die mittlere Windgeschwindigkeit um bis zu 0.8 m/s (Februar), im Jahresmittel jedoch lediglich um 0.4 m/s. Unsystematische Richtungsabweichungen erreichten Beträge von etwa 20° im April, August und September, waren übers Jahr gesehen jedoch < 14°. Eingedenk der Tatsache, dass Windrichtungen nur mit einer Genauigkeit von 10° registriert werden, sind solche Abweichungen unerheblich.

WIND DIRECTION	WIND SPEED [M/S], OBS @UFS DB									Row TOTALS
	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	
N	0.0	2.8	2.2	1.5	0.7	0.2	0.2	<0.1		8.5
NE	0.5	3.7	2.7	1.1	0.5	0.1				8.6
E	0.6	4.9	6.2	2.7	0.8	0.1				15.4
SE	0.5	2.2	3.9	3.3	0.9	<0.1				10.8
S	0.7	3.3	3.6	2.5	1.4	0.3	<0.1			11.8
SW	0.7	2.3	4.2	5.0	3.0	0.7	0.1	<0.1	<0.1	16.3
W	0.8	4.0	4.6	4.3	2.0	0.7				16.4
NW	0.6	2.3	3.3	3.4	1.8	0.5	0.3	<0.1		12.1
COLTOTALS	5.2	25.5	30.8	23.8	11.2	2.7	0.7	0.1	<0.1	100

Tab. 3-3: Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für die beobachtete Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Feuerschiff ›Deutsche Bucht‹ im Jahr 2003.

Table 3-3: Censored percent frequency distribution of observed wind speed and direction at light vessel ›Deutsche Bucht‹ in 2003.

WIND DIRECTION	WIND SPEED [M/S], MOD @UFS DB									Row TOTALS
	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	
N	1.9	2.2	1.2	0.8	0.5	0.4	<0.1	<0.1		7.0
NE	2.0	3.4	1.6	1.0	0.5	0.1				8.7
E	2.1	5.0	2.9	1.4	0.5					11.9
SE	1.7	3.6	5.2	2.1	0.4					13.0
S	1.5	3.3	3.9	2.0	1.0	0.3	<0.1	<0.1		12.0
SW	1.5	4.6	4.3	5.3	2.0	0.6	<0.1			18.4
W	2.0	4.0	4.3	3.4	1.5	0.5	<0.1			15.6
NW	1.0	2.9	3.5	3.4	1.3	0.4	0.4	<0.1		13.4
COLTOTALS	14.2	29.1	26.9	19.4	7.6	2.3	0.4	<0.1		100

Tab. 3-4: Wie Tab. 3-3, jedoch für Modelldaten des DWD (WAM-Antrieb).

Table 3-4: As Table 3-3, but for DWD model data (WAM-Forcing).

WAVE DIRECTION	SIGNIFICANT WAVE HEIGHT [M], WAM @UFS DB									Row TOTALS
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
N	3.8	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1				6.3
NE	6.3	1.6	0.3							8.1
E	9.9	2.0	0.2							12.1
SE	10.2	2.3								12.6
S	5.9	1.7	0.2							7.8
SW	10.7	7.6	2.2	0.2	0.1					20.8
W	8.6	5.1	3.0	1.0	0.3					18.1
NW	6.1	4.8	1.7	0.8	0.3	0.3	0.3	<0.1		14.4
COLTOTALS	61.4	26.0	8.3	2.5	1.0	0.4	0.3	<0.1		100

Tab. 3-5: Wie Tab. 3-3, jedoch für Windsee (WAM-Modell, DWD).

Table 3-5: As Table 3-3, but for windsea (WAM-Model, DWD).

Eine saisonale Differenzierung der beobachteten Windverteilung am UFS DB für das Jahr 2003 (Tab. 3-3) bietet Abb. 3-9. Die in der Jahresstatistik ausgewiesenen hohen Windgeschwindigkeiten jenseits von 18 m/s traten ausnahmslos im Herbst (OND) auf und gingen mit N- bis NW-lichen Richtungen einher. Auch im Frühjahr (AMJ) erreichten NW-Winde die höchsten Geschwindigkeiten, während im Winter (JFM) maximale Geschwindigkeiten für SW-liche Winde beobachtet wurden. Die gegenüber dem Herbstquartal geringen Windstärken im Winter sind offenbar Folge der Häufung schwachwindiger Hochdrucklagen im Februar und März (vgl. Tab. 2-1, S. 32).

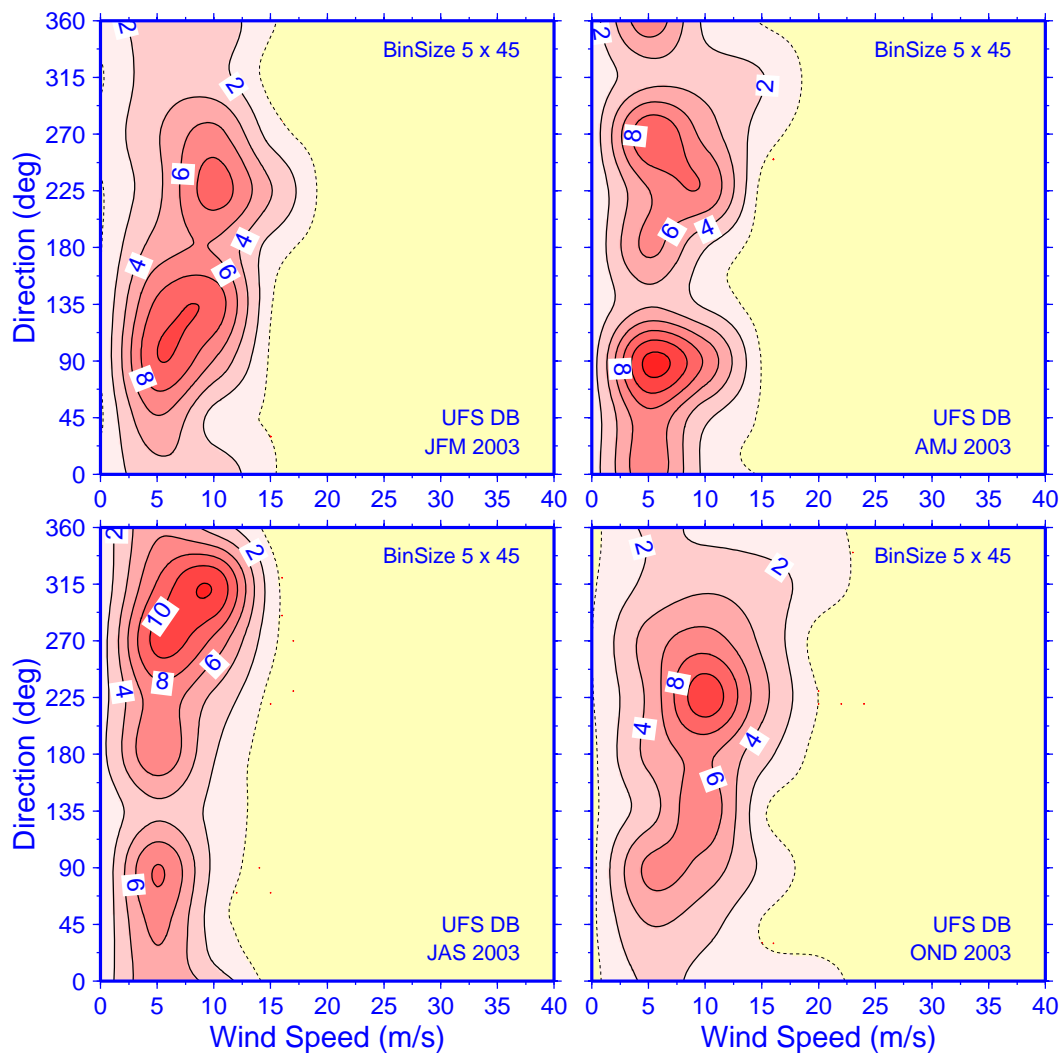


Abb. 3-9: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für beobachtete Windgeschwindigkeit und -richtung am ›UFS DB‹ im Jahr 2003.

Fig. 3-9: Seasonal percent frequency distributions of observed wind speed and direction at ›UFS DB‹ in 2003.

Die vielleicht bemerkenswerteste Eigenschaft der saisonalen Verteilungen am UFS DB besteht in ihrer bimodalen Struktur, die bereits im Rahmen der Diskussion der Jahresstatistik angesprochen wurde (Tab. 3-3). Das Doppelmaximum in der Richtungsverteilung war in allen Jahreszeiten präsent. Dabei dominierten im Winter und Frühjahr E – SE-liche Winde über solchen aus W – SW, während im Sommer und Herbst NW-liche bzw. W-liche Winde eine deutliche Prävalenz gegenüber E-Winden aufwiesen.

Die beschriebene bimodale Struktur der Windverteilung bildet sich in den saisonalen Verteilungsgipfeln der Windsee am UFS DB ab (Abb. 3-10). Im Winter unterscheiden sich die mit diesen Moden assoziierten Wellenhöhen von 0.5 m (2^{-1} m) bzw. 2 m (2^1 m) besonders deutlich. Die geringen Wellenhöhen aus E-lichen Richtungen waren dabei weniger das Resultat vergleichsweise schwacher E-Winde als vielmehr Folge der für diesen Sektor geringen Windstreichlängen. Die Windsee in den übrigen Jahreszeiten wies eine stärkere Variabilität auf als im Winter, wie an den von den 2%-Iso-plethen eingeschlossenen Flächen oder den diffuser verteilten Einzelzuständen (Kreuz-chen) erkennbar ist. Die höchsten Wellen kamen im Frühjahr (5.5 m), Sommer (3.2 m) und Herbst (7.8 m) aus NW. Im Winter wurden Wellenhöhen von 4 m aus W nicht überschritten.

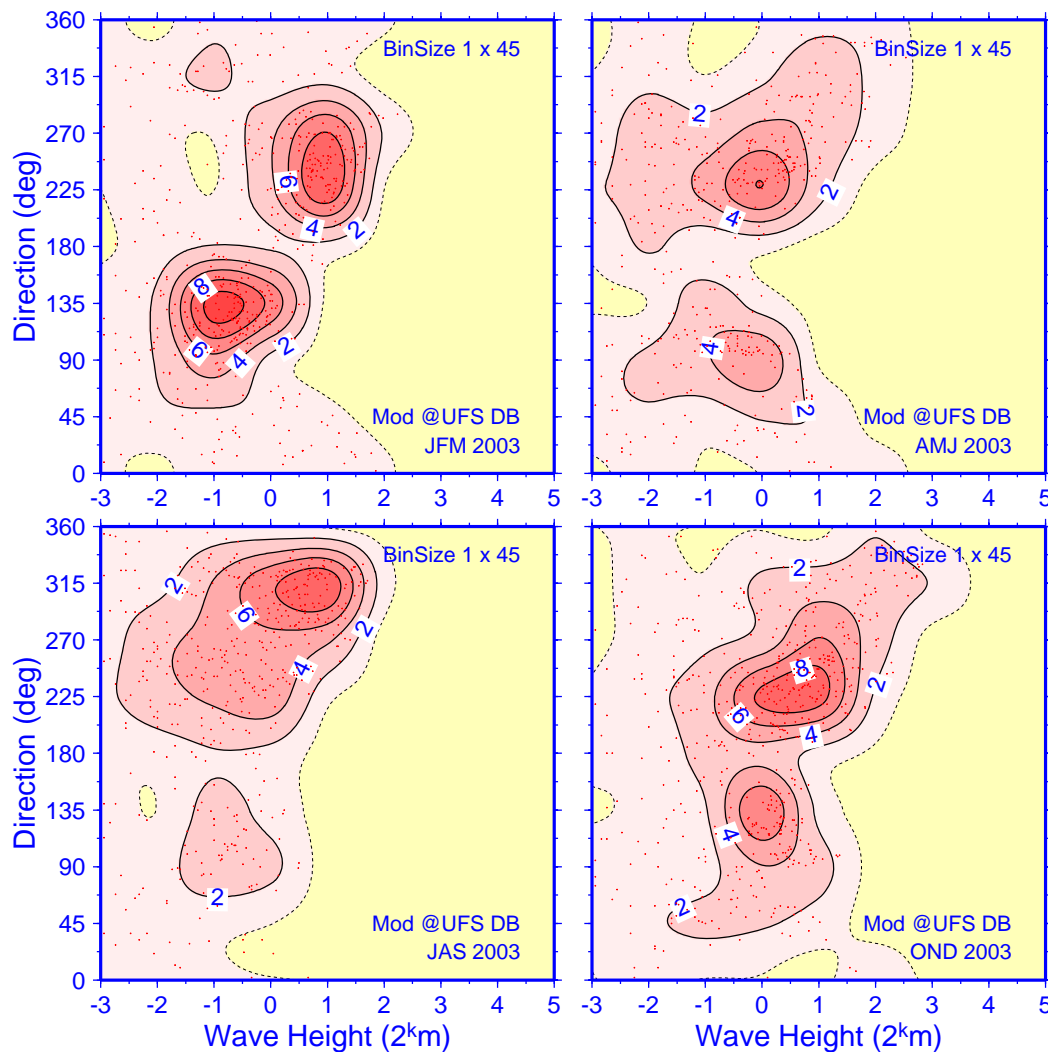


Abb. 3-10: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für Wellenhöhe und -richtung an der Position ›UFS DB‹ im Jahr 2003 (WAM-Modell, DWD). Die Horizontalachsen (k) sind \log_2 -skaliert.

Fig. 3-10: Seasonal percent frequency distributions of wave height and direction at position ›UFS DB‹ in 2003 (WAM-Model, DWD). Note \log_2 -scaling of horizontal axis (k).

Der Waverider des BSH vor Helgoland misst nur die Wellenhöhe, nicht die Seegangsrichtung. Verglichen mit der Wellenhöhenverteilung an der Position UFS DB für das

Jahr 2003 (Tab. 3-5, Spaltensummen) war der Anteil höherer Wellen im Bereich 2 – 5 m bei Helgoland klar reduziert und Intervalle ab 5 m wurden gar nicht besetzt (Tab. 3-6). Diese Abweichungen resultieren vor allem aus dem Umstand, dass die südlich der Insel liegende Boje insbesondere bei nördlichen Winden durch Insel und Düne geschützt wird. Ferner kommt es durch die starken topographischen Gradienten im Bereich des Helgoländer Lochs und des Helgoländer Riffs zu Beugungs- und Brechungsvorgängen. Andere Vergleichsmessungen, die in den letzten Jahren an verschiedenen Positionen in der Deutschen Bucht durchgeführt wurden, zeigten stets eine gute Übereinstimmung zwischen Seegangsmodell und Beobachtung (KLEIN ET AL. 1999).

Die gegenüber der Jahresstatistik 2002 ebenfalls geringere Häufigkeit hohen Seegangs bei Helgoland (Tab. 3-6) ist hingegen Ausdruck der grundsätzlich schwächeren Windverhältnisse im Berichtsjahr (vgl. Abschnitt 2.3, S. 35).

YEAR	SIGNIFICANT WAVE HEIGHT [M], OBS @HELGOLAND							
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
2003	63.0	29.9	5.8	1.2	0.1			
2002	58.5	31.1	8.0	1.9	0.4	0.1	<0.1	

Tab. 3-6: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (SWH) bei Helgoland (Waverider-Daten, keine Seegangsrichtung).

Table 3-6: Percent frequency distribution of significant wave height (SWH) near Helgoland (waverider data, no wave direction).

Ungeachtet der beschriebenen Problematik im oberen Bereich des Wellenhöhenspektrums erscheint eine monatliche Vergleichsstatistik von Waveridermessungen und simulierten Seegangsdaten des WAM-Modells nützlich (Tab. 3-7).

2003	WAVERIDER @HELGO			WAM MODEL @UFS DB				MOD MIN OBS	
	SWH [M]			SWH [M]			Dir	SWH [M]	
	MEAN	STD	MAX	MEAN	STD	MAX	MEAN	MEAN	MAX
JAN	1.3	0.7	4.0	1.3	1.0	4.7	WSW	0.0	0.7
FEB	0.8	0.5	2.7	0.6	0.6	3.2	SE	-0.2	0.5
MAR	0.7	0.5	2.2	0.5	0.6	3.3	S	-0.2	1.1
APR	0.7	0.5	3.1	0.9	1.0	5.8	E	0.2	2.7
MAY	0.7	0.5	3.1	0.4	0.6	3.8	SSW	-0.3	0.7
JUN	0.9	0.8	4.3	0.5	0.8	3.7	SW	-0.5	-0.6
JUL	0.8	0.4	2.4	0.6	0.5	1.9	SW	-0.2	-0.5
AUG	0.8	0.5	2.6	0.9	0.8	3.3	W	0.1	0.7
SEP	0.7	0.3	2.2	0.7	0.6	2.8	SW	0.0	0.6
OCT	0.9	0.5	2.5	1.3	1.2	6.6	S	0.3	4.1
NOV	1.2	0.5	3.4	1.3	0.8	4.1	S	0.1	0.7
DEC	1.5	0.9	4.4	1.8	1.6	7.1	WSW	0.3	0.3

Tab. 3-7: Monatsstatistik 2003: Waverider bei Helgoland (ohne Richtung) vs. WAM-Modell an Position ›UFS DB‹. SWH = signifikante Wellenhöhe.

Table 3-7: Monthly wave statistics 2003: Waverider at Helgoland vs. WAM-Model at position ›UFS DB‹. SWH = significant wave height.

Durch Ausfälle der Waverider-Boje und Übertragungsprobleme kam es in den Monaten Juli, September und Oktober zu Datenverlusten von 26 (J) bis maximal 48 % (S & O). Im Jahresmittel lag die Differenz zwischen simulierter und beobachteter signifikanter Wellenhöhe bei nur –3 cm. In Anbetracht der räumlichen Distanz von ca. 15 km zwischen Helgoland und UFS DB ist die Übereinstimmung bemerkenswert.

Außer im Juli und August übertrafen die maximalen signifikanten Wellenhöhen des WAM-Modells die entsprechenden Beobachtungen. Diese positiven Abweichungen variierten zwischen 0.3 – 4.1 m. Im Jahresmittel lagen die Maximalwerte auf der Position UFS DB um 0.92 m höher als bei Helgoland. Abgesehen von der beschriebenen Problematik hinsichtlich der inselnahen Bojenposition ist im freien Seegebiet generell ein ausgeprägter Seegang zu erwarten. Besonders deutlich wirkte sich diese Tatsache im Monat April bei vorherrschenden NE-Winden und Wellenaufrichtungen aus E aus. Bei diesen Windverhältnissen liegt der Waverider bei Helgoland vollkommen im Schatten von Insel und Düne. Unter Ausschluss der extremen Abweichungen im Oktober (Datenverluste, s. o.) und April (2.7 m) reduziert sich die mittlere Diskrepanz zwischen Modell und Beobachtung hinsichtlich der maximalen signifikanten Wellenhöhen von 0.92 m auf 0.42 m.

3.2.2.2 Äußere Deutsche Bucht (»Entenschnabel«)

Im vorigen Abschnitt wurde nicht nur die Qualität der Seegangsdaten des vom DWD betriebenen WAM-Modells, sondern auch eine gute Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten Winden festgestellt. Die Wind- und Seegangsverhältnisse in der äußeren Deutschen Bucht im Jahr 2003 sollen deshalb (sowie in Ermangelung von Beobachtungen) anhand von Modelldaten an der Position »Entenschnabel« zunächst in Form einer Monatsstatistik charakterisiert werden (Tab. 3-8).

MODEL @ENTENSCHNABEL (55°40'N, 4°E)									
2003	WIND SPEED [M/S]			DIR	SF[%]	SWH [M]			DIR
	MEAN	STD	MAX	MEAN	MEAN	MEAN	STD	MAX	MEAN
JAN	9.9	3.9	19.6	W	31	1.8	1.3	6.1	W
FEB	7.7	3.1	16.6	SSE	53	1.0	0.8	4.0	SSE
MAR	6.1	3.8	16.3	SSW	41	1.0	1.0	4.4	SSW
APR	7.2	3.7	19.5	ENE	15	1.1	1.2	6.6	SE
MAY	5.8	3.0	16.6	SSW	67	0.6	0.6	2.6	SSW
JUN	6.0	3.2	16.5	SW	36	0.7	0.8	4.1	SSW
JUL	6.1	2.6	14.1	SW	25	0.6	0.6	2.7	SSW
AUG	6.5	3.4	14.7	NW	53	1.0	0.9	3.6	W
SEP	6.7	3.3	14.7	WSW	44	0.9	0.8	4.1	SW
OCT	8.0	3.8	19.9	NW	23	1.3	1.3	6.5	WSW
NOV	9.0	3.5	18.0	S	51	1.4	1.0	4.6	S
DEC	9.2	5.1	28.0	W	38	1.8	2.0	9.3	WSW
YEAR	7.3	3.8	17.9	SW	24	1.1	1.2	4.9	SSW

Tab. 3-8: Monatsstatistik 2003: Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe (SWH) für die Position »Entenschnabel« (WAM-Modell). SF = Stabilitätsfaktor.

Table 3-8: Monthly statistics 2003: Windspeed and significant wave height (SWH) at position »Entenschnabel« (WAM-Model). SF = stability factor.

Die monatlichen Windgeschwindigkeiten sind Betragsmittel, die Windrichtungen sind diejenigen des mittleren Vektorwindes, der Stabilitätsfaktor ist als Verhältnis von mittlerer Vektorwindgeschwindigkeit zu mittlerem Windbetrag ein Maß für die Richtungsvariabilität des Windes. Die mittleren Windgeschwindigkeiten unterschieden sich von denen an der Position UFS DB nur marginal und nicht systematisch, so dass die Jahresmittel übereinstimmten. Die maximalen Windgeschwindigkeiten an der Position Entenschnabel übertrafen hingegen diejenigen am UFS DB in fast allen Monaten, wobei die stärksten Abweichungen von 3.5 bzw. 5.3 m/s im Januar und Dezember auftraten – den Monaten, in denen sich 12 von insgesamt 16 Stürmen ereigneten (vgl. Tab. 2-1, S. 32). Im Jahresmittel lag die maximale Windgeschwindigkeit um 1.2 m/s oberhalb derjenigen am UFS DB.

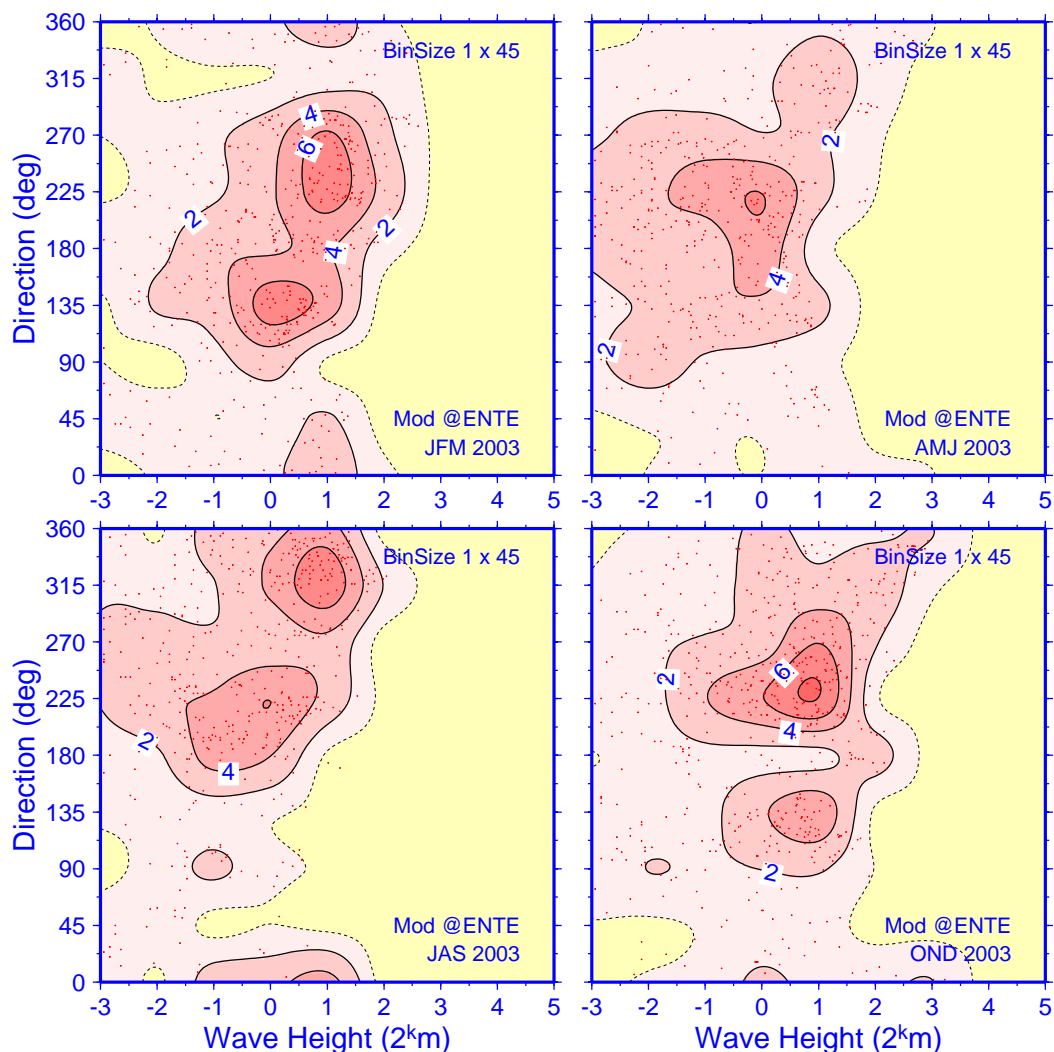


Abb. 3-11: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für Wellenhöhe und -richtung an der Position »Entenschnabel« im Jahr 2003 (WAM-Modell, DWD). Die Horizontalachsen (k) sind \log_2 -skaliert.

Fig. 3-11: Seasonal percent frequency distributions of wave height and direction at position »Entenschnabel« in 2003 (WAM-Model, DWD). Note \log_2 -scaling of horizontal axis (k).

Die monatlichen signifikanten Wellenhöhen übertrafen diejenigen am UFS DB im Winter (JFM) um 0.4 – 0.5 m, in den anderen Monaten um höchstens 0.2 m und im

Jahresmittel um eben diesen Betrag. Wie für die maximalen Windgeschwindigkeiten ergaben sich die stärksten positiven Abweichungen von den maximalen Wellenhöhen am UFS DB mit 1.4 und 2.2 m im Januar und Dezember. Im Jahresmittel übertrafen die höchsten Wellen an der Position Entenschnabel diejenigen am UFS DB um 0.7 m. Die sehr gute Übereinstimmung zwischen Windrichtung und Wellenlaufrichtung entspricht den theoretischen Erwartungen.

Insgesamt waren die Unterschiede hinsichtlich der Wind- und Seegangsverhältnisse in der inneren und äußeren Deutschen Bucht im Jahr 2003 wenig spektakulär. Dies bestätigt auch der Vergleich der saisonalen Wellenhöhen und -Richtungsverteilungen am Entschnabel (*Abb. 3-11, S. 63*) mit denjenigen am UFS DB (*Abb. 3-10, S. 60*). Die Verteilungsgipfel waren in allen Jahreszeiten weniger prägnant; darüber hinaus war die Bimodalität der Verteilungen nur noch im Herbst und Winter klar erkennbar. Der bimodale Charakter der Verteilungen am UFS DB erscheint als räumlich eng begrenztes Phänomen.

3.3 Wasserstand

Wasserstandsdaten der englischen, niederländischen und deutschen Pegelnetze sind unabdingbar für den operationellen Betrieb des Wasserstands- und Sturmflutwarndienstes des BSH. Sie bilden die Basis der Vorhersagen für die Küste der Deutschen Bucht sowie des Ems-, Weser- und Elbegebiets. Die Wasserstandsmessungen von 185 deutschen Pegelstationen werden darüber hinaus in Internetprodukten des BSH verwertet (»Baden & Meer« und das kostenpflichtige »Schifffahrt & Meer«), stellen aber auch bei hydrographisch-klimatologischen und nautischen Fragestellungen eine relevante Information dar.

Die Zeitskalen in der Analyse reichen von Echtzeit (Minuten) im operationellen Betrieb der Vorhersage und der numerischen hydrodynamischen Modellierung des Wasserstandes bis zu Jahren und Jahrzehnten. Von besonderer Bedeutung für die Gezeitenvorausberechnungen sind wegen der Nodal-Tide Zeitreihen mit einer Länge von 19 Jahren. Weiterhin ermöglichen die über 100 Jahre langen Messreihen einzelner Pegelorte Untersuchungen langfristiger Änderungen des Wasserstandes an der deutschen Nordseeküste z. B. in Abhängigkeit von externen Kräften. Referenzpegel für die Wasserstandsvorhersage am BSH ist der Pegel Cuxhaven-Steubenhöft. Er wird hier – unabhängig von möglichen Einflüssen topographischer Veränderungen – zur Dokumentation und statistischen Einordnung der Hochwasserstände im Jahr 2003 herangezogen.

Die monatliche Klimatologie der Hochwasserstände bei Cuxhaven für den Zeitraum 1971 – 2000 ist in *Abb. 3-12* zusammen mit einem Variabilitätsband (grün) darstellt, innerhalb dessen 95 % der individuellen Monatsmittelwerte anzutreffen sein sollten. Die Klimatologie zeigt einen schwachen Jahresgang um den als »Mittleres Hochwasser« bezeichneten Referenzwert von 150 cm. Die Variabilität der Hochwasserstände in den Herbst und Wintermonaten übertrifft diejenige im Frühjahr und Sommer erheblich. Diese ausgeprägte »Bandbreite« der Hochwasserstände im Winterhalbjahr dokumentiert die Stärke meteorologischer »Störfaktoren«, unter denen der Wind eine herausragende Rolle spielt. Bei im Sommer grundsätzlich schwächeren Luftdruckgegensätzen über der Nordsee und demzufolge häufig schwachwindigen Wetterlagen (vgl. *Abschnitt 2.3, S. 35*) sind die Gezeitenkräfte wesentlich »ungestörter am Werk«.

Im Jahr 2003 wurden keine signifikanten Abweichungen von der Klimatologie beobachtet (»alles im grünen Bereich«). (Die intramonatliche Variabilität im Jahr 2003, die als 90%-Quantil durch rote Triangeln kenntlich gemacht ist, ist lediglich eine Zusatzinformation, die für die hier analysierte zwischenjährliche Variabilität der Monatsmittel keine Bedeutung hat.) Nennenswerte Anomalien traten sturmbedingt im Januar sowie aufgrund gehäufte Süd-Wetterlagen im November auf (vgl. *Tab. 2-1, S. 32*). Die numerisch kleinen aber statistisch bedeutenderen positiven Abweichungen vom Langzeitmittel von jeweils 11 cm im Mai und Juni sind kaum durch thermische Expansion erklärbar; auch die Abflussraten der Elbe waren im Trockenjahr 2003 unternormal (vgl. *Abschnitt 3.5.3, S. 91*). Verantwortlich dürften vielmehr einige unüblich hohe Hochwasser sein, die wie diejenigen vom 19./20. Juni mit für die Jahreszeit ungewöhnlich starken NW-Winden einhergingen (vgl. *Abb. 3-13, S. 66*).

Aufgrund der geographischen Lage von Cuxhaven am nach Nordwesten geöffneten Mündungstrichter der Elbe treten hier (und stromauf bis Hamburg) die höchsten Hochwasserstände und stärksten Sturmfluten in Verbindung mit NW-Winden und entsprechend niedrige Wasserstände bei entgegengesetztem Windstau auf (SE). Dieser Zu-

sammenhang wird durch Abb. 3-13 für das Jahr 2003 illustriert. Neben den täglichen Hochwasserständen, die durch rote Kreuzchen kenntlich gemacht sind, dem mittleren Hochwasserstand (MHW = 150 cm) und dem Sturmflutgrenzniveau (300 cm) ist der (zur Unterdrückung von Spring- und Nippfluten) über 14 Tage geglättete zeitliche Verlauf der Hochwasserstände dargestellt.

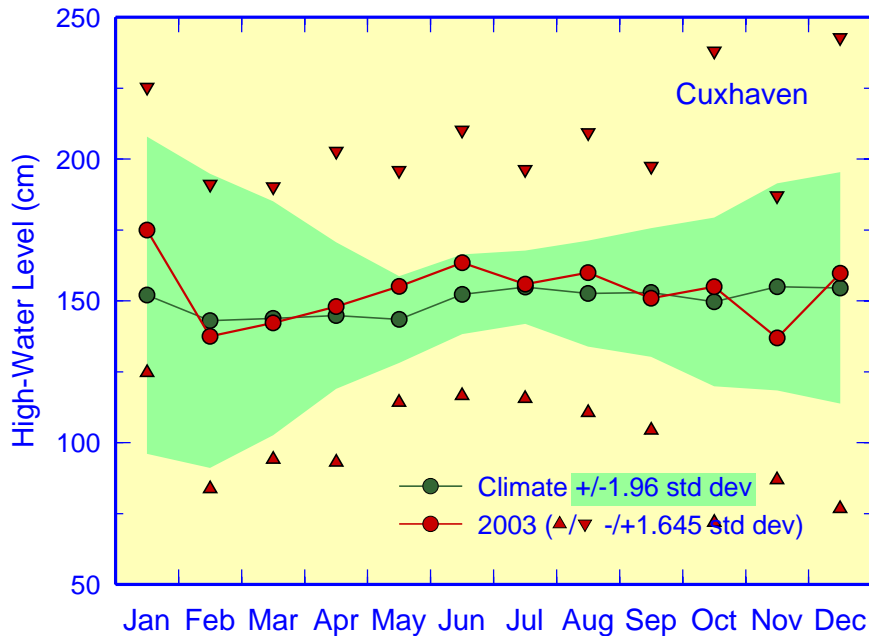


Abb. 3-12: Hochwasserstände bei Cuxhaven im Jahr 2003 (bezogen auf NN) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band sowie intramontatlichen 90%-Grenzen.

Fig. 3-12: High-water levels at Cuxhaven in 2003 (rel. to ordnance datum) together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band as well as intramonthly 90%-limits.

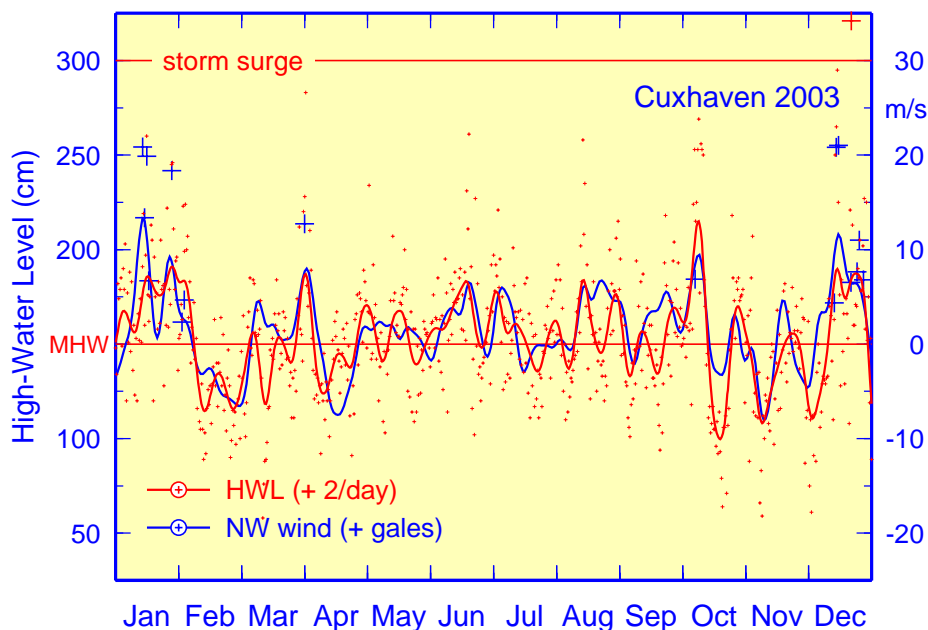


Abb. 3-13: Hochwasserstände bei Cuxhaven und NW-Komponente des »Nordseewinds« (2003).

Fig. 3-13: High-water levels at Cuxhaven and NW-component of the »North Sea Wind« (2003).

Darüber hinaus zeigt *Abb. 3-13* die in gleicher Weise gefilterte Entwicklung der NW-Vektorkomponente des in *Abschnitt 2.3, S. 35* analysierten »Nordseewindes«, welche sich aus den zonalen (u) und meridionalen (v) Windgeschwindigkeiten für ein um 45° linksrotiertes Koordinatensystem ergibt. Positive Geschwindigkeiten sind hier mit NW-Winden, negative mit entgegengesetzten SE-Winden assoziiert. Blaue Kreuze kennzeichnen die NW-Windgeschwindigkeiten an solchen Tagen, an denen aufgrund der Wetterlagenklassifizierung eine Sturmlage herrschte (vgl. *Tab. 2-1, S. 32*).

Der gute Zusammenhang zwischen anomalen Hochwasserständen und der Stärke der NW- bzw. SE-Windkomponente ist aus dem weitgehend parallelen Verlauf beider Zeitserien klar ersichtlich und bedarf keiner weiteren Erläuterung. Besonders hohe Wasserstände um 250 cm traten Mitte Januar und Dezember als Folge von NW-Stürmen auf, während unternormale Hochwasserstände im Februar durch eine Häufung antizyklonaler SE-Wetterlagen hervorgerufen wurden (vgl. *Tab. 2-1, S. 32*). Das einzige Sturmflutereignis (321 cm) trat am 21. Dezember zeitgleich mit dem stärksten Orkan des Jahres auf (vgl. *Abb. 2-3, S. 28*).

3.4 Temperatur

Zunächst werden die Oberflächentemperaturen der Nordsee im Jahr 2003 dokumentiert und statistisch eingeordnet. Im *Abschnitt 3.4.2, S. 71* wird der Regimecharakter der Oberflächentemperaturen im Kontext atmosphärischer Zirkulationsänderungen diskutiert. Im Anschluss werden Temperaturschichtung und Wärmeinhalt der Nordsee anhand von Beobachtungen analysiert, die während der Gesamtaufnahme der Nordsee mit FS Gauss im August 2003 angestellt wurden. Der Abschnitt wird beschlossen mit einer Untersuchung der langfristigen Entwicklung des Wärmeinhalts (Modelldaten), bei der das Regimephänomen erneut aufgegriffen und Beziehungen zu Oberflächentemperatur und Nordatlantischer Oszillation betrachtet werden.

3.4.1 Oberflächentemperatur

Die Oberflächentemperaturen der Nordsee werden im BSH seit September 1968 wöchentlich analysiert. Eine Beschreibung der Analysetechnik findet man in LOEWE ET AL. 2003. Inzwischen umfasst das Archiv etwa 1800 digitale Temperaturfelder, die auf einem flächentreuen 20 sm-Gitter vorliegen. Der Datensatz dokumentiert nicht nur die raum-zeitliche 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.

Einen regional differenzierten Einblick in die monatlichen Abweichungen der Oberflächentemperaturen der Nordsee von den klimatologischen Verteilungen des Zeitraums 1971 – 1993 bietet *Abb. 3-14*. Die moderate Kaltanomalie in der östlichen Nordsee hatte bereits im Dezember 2002 ihren Höhepunkt erreicht und war im März 2003 nahezu vollständig abgebaut. Im Winterquartal (JFM) trat lediglich in der zentralen Nordsee ein kleinräumiges deutlich zu warmes Gebiet (> 1 K) auf. Von April auf Mai wurde zunächst die nordwestliche, dann die westliche und südliche Nordsee von einer signifikanten Warmanomalie erfasst, die sich im Juni weiter verstärkte (> 2 K). Die Intensivierung der Warmanomalie setzte sich erst im August fort, als nahezu überall die lokalen 95 %-Perzentile überschritten wurden. Die Abkühlungsraten waren im September und besonders im Oktober überdurchschnittlich hoch, führten aber erst im November zu einer räumlichen Beschränkung der Warmanomalie auf die westliche zentrale Nordsee (> 1 K). Im Dezember geriet die saisonale Abkühlung ins Stocken, was diesen Monat zum wärmsten Dezember seit 1968 machte.

Aus den digitalen Analysen des Oberflächentemperaturfeldes wurde die Zeitserie der Nordsee SST abgeleitet, die heute einen Beobachtungszeitraum von 36 Jahren abdeckt. Das Jahr 2003 war mit $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ nach 2002 das zweitwärmste seit 1968. Nach einem normalen Winter lagen die Monatsmitteltemperaturen seit Juni signifikant über den Klimanormalwerten (*Abb. 3-15*). Im August betrug die Abweichung 2.5 K . Die Monate Juni bis September waren jeweils die zweitwärmsten in der Rangstatistik, der Dezember der wärmste seit Beginn der Beobachtungen. Aus den geographischen Verteilungen der monatlichen Anomalien in *Abb. 3-14* ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperaturen nicht nur ganzjährig, sondern auch nahezu im gesamten Seegebiet über der Klimanorm lagen. Seit 1988 waren 78 %, seit 1997 sogar 90 % aller Monate wärmer als normal. Die bislang längste ununterbrochene Folge positiver Abweichungen setzte im Juli 2001 ein und dauert immer noch an (April 2005).

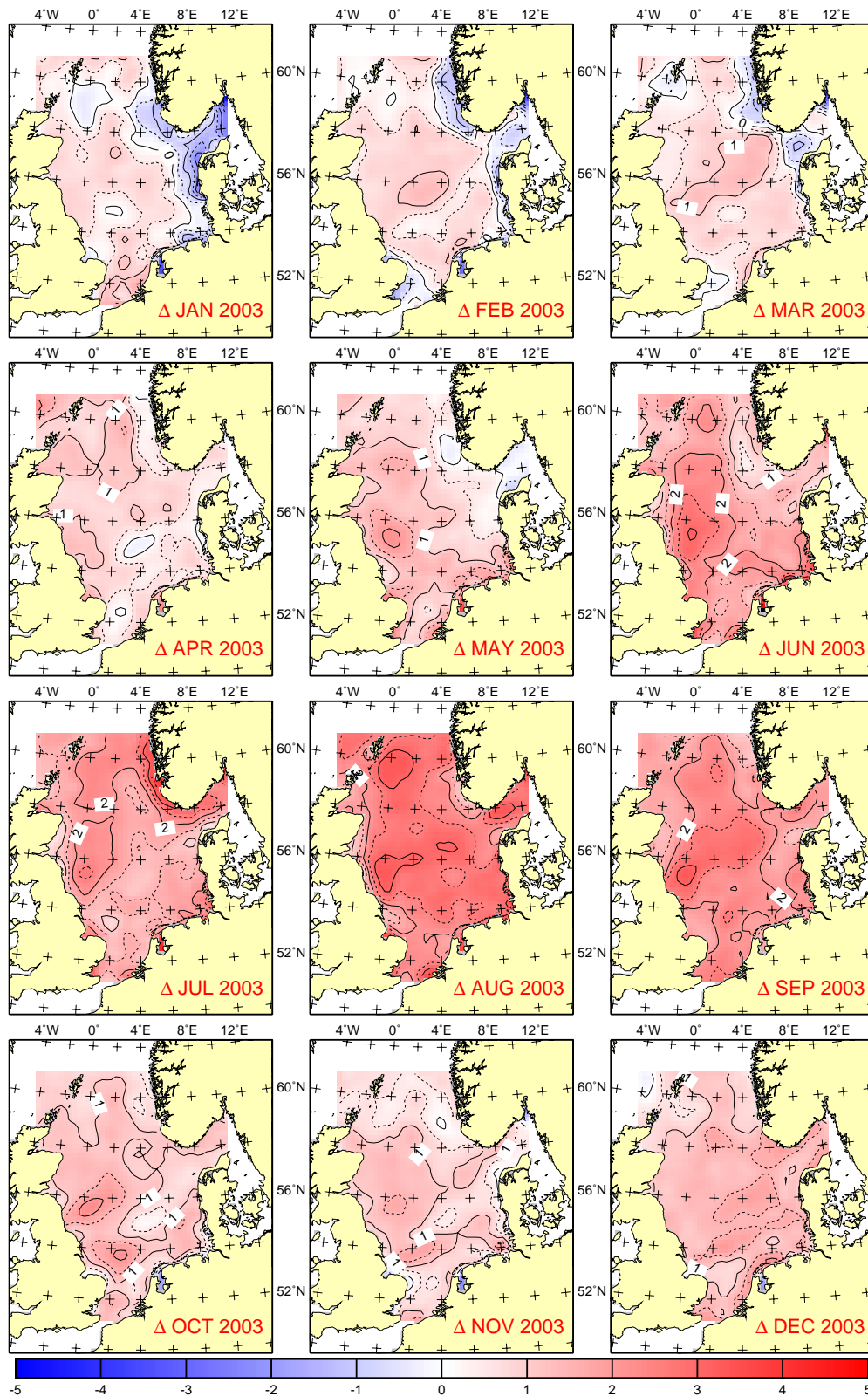


Abb. 3-14: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2003 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K.

Fig. 3-14: Monthly SST anomalies in 2003 as departures from 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K.

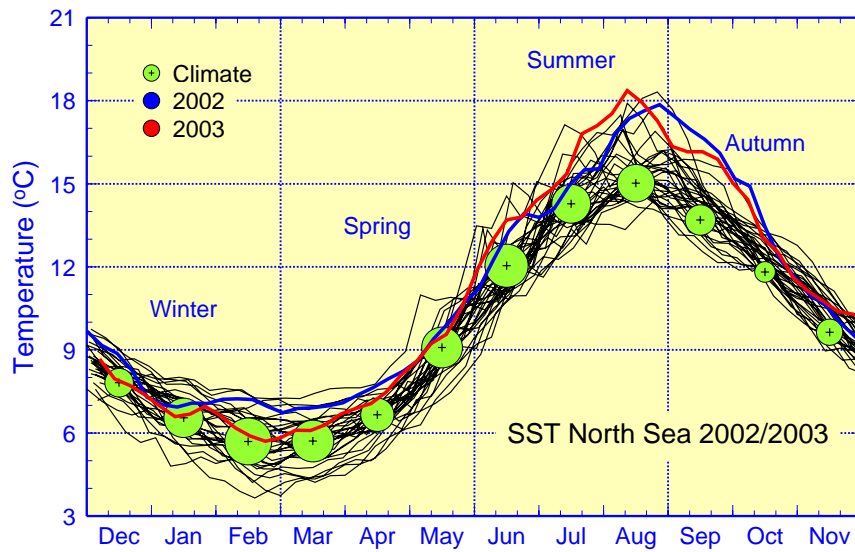


Abb. 3-15: Jahresgang der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen im Jahr 2003 mit Ensemble der Jahresgänge seit 1968 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971 – 1993) und zwischenjährigen Standardabweichungen (Kreisradius).

Fig. 3-15: Seasonal cycle of areal mean weekly SST of the North Sea from December 2002 through November 2003 and ensemble of corresponding cycles since 1968. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971 – 1993.

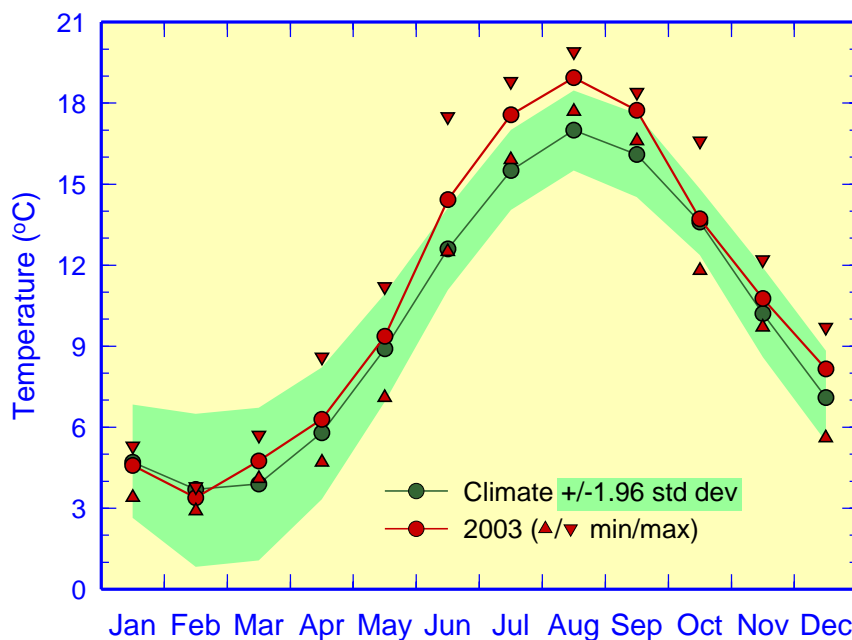


Abb. 3-16: Jahresgang 2003 der monatlich gemittelten Oberflächentemperatur bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).

Fig. 3-16: Seasonal cycle 2003 of monthly mean SST at Helgoland Reede together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).

Neben der flächengemittelten Nordsee-SST 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). Letztere dokumentiert die Temperaturentwicklung in der südöstlichen Nordsee über mehr als 130 Jahre (BECKER ET AL. 1997, LOEWE ET AL. 2003).

Der Jahresgang der Oberflächentemperatur von Helgoland-Reede im Jahr 2003 ist in Abb. 3-16, S. 70 dargestellt. Die Temperatur lag vom Juni bis September signifikant über den klimatologischen Mittelwerten. Erst im Oktober trat eine Normalisierung ein. Der jahreszeitliche Verlauf unterscheidet sich kaum vom Jahresgang der Mitteltemperatur für die gesamte Nordsee. Die Jahresmitteltemperatur bei Helgoland stimmt mit 10.8 °C fast mit derjenigen für die Nordsee (10.9 °C) überein. Das Jahr 2003 war damit für Helgoland das sechstwärmste Jahr seit Beginn der Messungen vor 131 Jahren.

3.4.2 Mischmasch-Klima

Der Regimecharakter der Oberflächentemperaturen der Nordsee (LOEWE ET AL. 2003) wird hier im Kontext atmosphärischer Zirkulationsänderungen diskutiert.

Das Temperaturklima der Nordsee zeichnet sich durch langlebige quasi-stabile Kalt- und Warmregimes aus, die durch scharfe Übergänge voneinander getrennt sind. Die SST-Regimes sind offenbar Manifestationen von saisonalen, monsunartigen Änderungen im Windklima, während die spontanen Regimewechsel mit einer halbjährigen Phasenverschiebung in den saisonalen Windcharakteristika einhergehen. So wurde das letzte Kaltregime (1978 – 1988) durch ein Windklima aufrecht erhalten, das zwischen kontinentalen Eigenschaften im Winter und maritimen Eigenschaften im Sommer alternierte. Das rezente Warmregime hingegen wird bedingt durch maritime Winde im Winter und kontinentale Winde im Sommer.

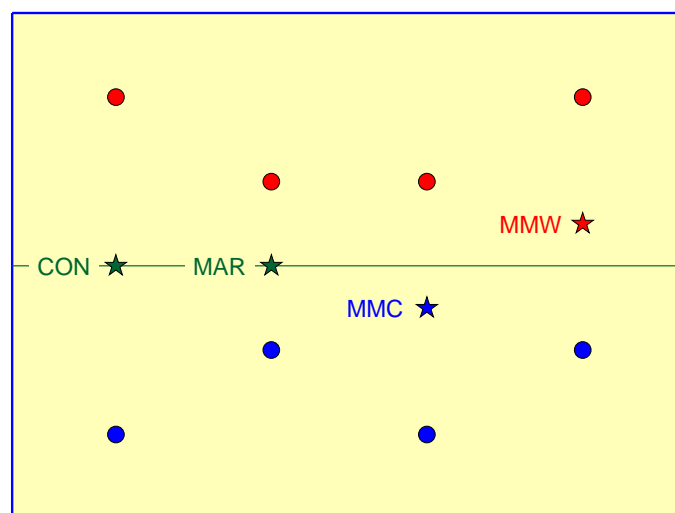


Abb. 3-17: Schematik des jährlichen Temperaturgangs (Mittel und saisonale Extrema) für kontinentales und maritimes Klima (CON & MAR) sowie kühles und warmes Mischmasch-Klima (MMC / Kaltregime & MMW / Warmregime).

Fig. 3-17: Sketch of annual temperature swing (mean and seasonal extremes) in continental and maritime climates (CON & MAR) as well as in cool and warm mishmash-climates (MMC / cold-regime & MMW / warm-regime).

Diese bi-stabilen und hybriden klimatischen Verhältnisse bezeichnen wir als »Misch-masch-Klima«. Eine schematische Illustration der Temperaturverhältnisse in solchen Klimata bietet Abb. 3-17, S. 71.

3.4.2.1 Bi-stabile SST-Regimes

Seit Juni 2001 dauert die bislang längste ununterbrochene Folge (»Run«) positiver SST-Anomalien an. Dieser extrem lange Run gibt Anlass, die aus den wöchentlichen SST-Analysen des BSH (www.bsh.de, Menü: Meeresdaten – Beobachtungen – Meeresoberflächentemperatur) abgeleitete monatliche Nordsee-SST-Zeitserie genauer zu untersuchen. Die seriellen monatlichen SST-Anomalien sind in Abb. 3-18 als Abweichungen von den Mittelwerten der Basisperiode 1971 – 1993 für zwei aneinander grenzende 16-jährige Zeitabschnitte dargestellt.

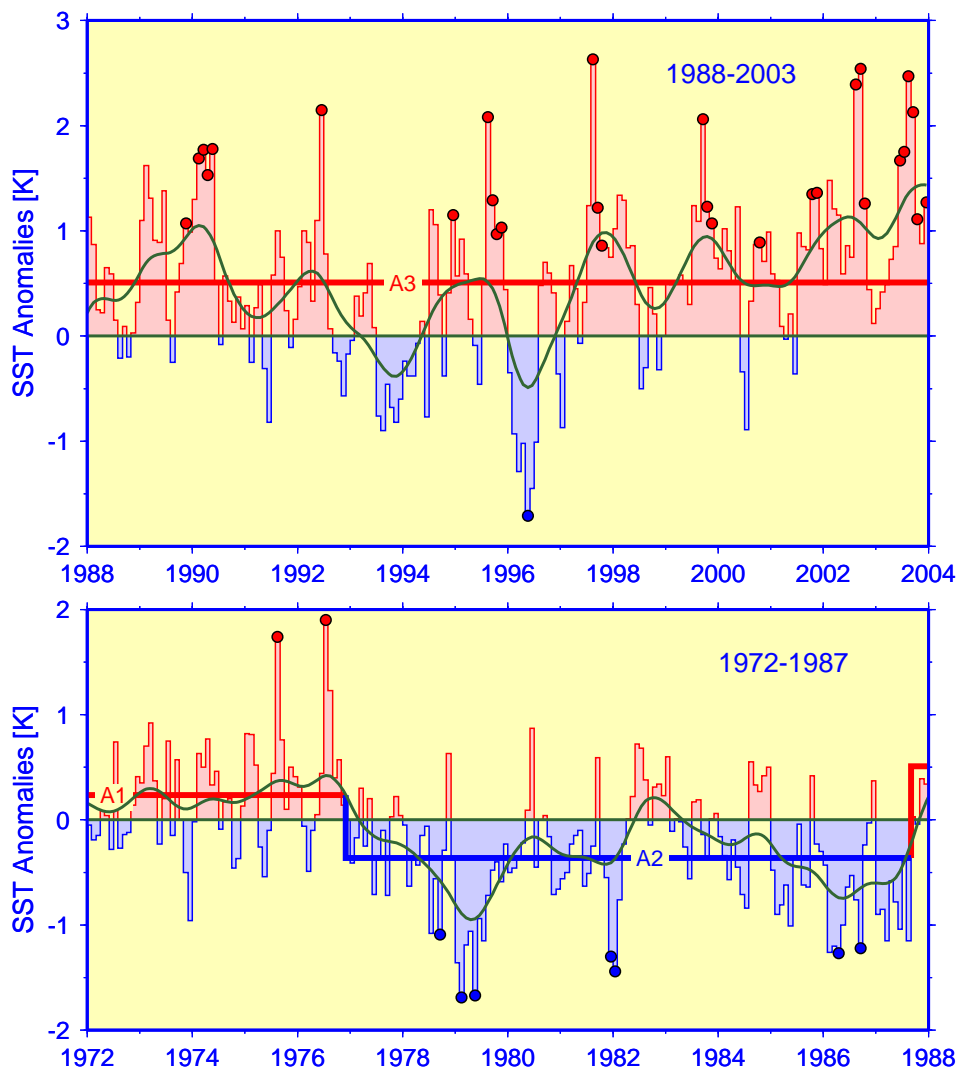


Abb. 3-18: Serielle monatliche Anomalien der Nordseetemperatur für zwei 16-jährige Zeitabschnitte. Kreise indizieren statistisch signifikante Anomalien ($\pm 1.96 s$). Die Kurve gibt den über zwei Jahre geglätteten Verlauf wieder. Regimelängen und -grenzen sind durch eine Step-Funktion bestimmt (vgl. Text).

Fig. 3-18: Serial monthly North Sea SST anomalies (base period 1971-1993). Filled circles indicate anomalies beyond $\pm 1.96 s$, green curve is a low-pass smoother of width 24 month. Regime lengths and boundaries are given through a step function (cf. text).

Das auffälligste und vielleicht wichtigste Merkmal der SST-Anomalien ist ihr Regimecharakter, d. h. die Persistenz positiver aber auch negativer Abweichungen von den Normalwerten über ausgedehnte Zeiträume. Dem gegenwärtigen Warmregime im oberen Teil der Abb. 3-18 ging ein Kaltregime voraus, das vergleichbar dauerhaft war und wiederum ein moderates Warmregime Mitte der 1970er Jahre ablöste.

Unter der offensichtlich vernünftigen Annahme, dass im Beobachtungszeitraum drei Regimes auftraten, lässt sich deren jeweilige Andauer durch Maximierung von $\sum |A(R_i)|$ bestimmen. Mit $A(R_i)$ als mittlerer Anomalie im Regime i liefert das Verfahren

$$\max \sum_i |A(R_i)| = 0.24 + 0.36 + 0.51 = 1.11 \text{ K}$$

und für die Andauer des Kaltregimes: Dezember 1976 – August 1987.

Das augenblickliche Abbrechen und Anbrechen benachbarter Regimes erscheint im Vergleich mit den tatsächlichen, kurzfristigen Regimeübergängen nicht als unerträgliche Idealisierung. Jedenfalls ist keine graduelle oder sogar lineare Entwicklung der SST bzw. der SST-Anomalien erkennbar. Stattdessen beobachtet man irreguläre Fluktuationen um unterscheidbare quasi-stabile Zustände oder Niveaus – nämlich $A(R_1)$, $A(R_2)$ und $A(R_3)$ – und spontane Sprünge zwischen diesen unterschiedlichen Anregungszuständen.

Anhand der SST-Zeitreihe von Helgoland Reede ist nachvollziehbar, dass sich das geschilderte Abwechseln von Kalt- und Warmregimes seit mindestens 130 Jahren vollzieht. Das rezente Warmregime ist danach das intensivste und langlebigste seit den 1870er Jahren. Die Jahre 2002 und 2003 sind vorläufig das wärmste bzw. zweitwärmste seit Beginn der Nordsee-SST-Analysen 1968.

3.4.2.2 Hybrides Windklima

Die besondere geographische Lage der Nordsee auf dem nordwesteuropäischen Schelf – und damit im Grenzgebiet des weiten Atlantischen Ozeans und der größten Landmasse der Erde – macht sie zu einer Region, in der alle wichtigeren Luftmassen mit den jeweiligen Oberflächeneigenschaften ihrer maritimen oder kontinentalen Präzessionsgebiete um Einfluss konkurrieren. Eines der wichtigsten Charakteristika dieser Luftmassen ist ihre Temperatur, die sich aufgrund der extrem hohen Wärmekapazität von Wasser im Vergleich zu Fels oder Erdboden sehr verschieden einstellt. Maritime Klimata zeichnen sich dabei durch milde Winter, kühle Sommer und einen flachen saisonalen Temperaturgang aus, während Kontinentalklimata durch kalte Winter, heiße Sommer und eine hohe Amplitude des Jahresgangs gekennzeichnet sind (vgl. Abb. 3-17, S. 71).

Hätte sich WLADIMIR KÖPPEN auch mit der klimatischen Klassifizierung von Meeresgebieten befasst, dann hätte er der Nordsee vermutlich den Typ ›Cfb‹ zugeordnet, der für ein mäßig warmes (maritim), dauernd feuchtes Klima steht. Dieser Typ würde die Tatsache reflektieren, dass die Umverteilung von Wärme in mittleren Breiten durch ostwärts wandernde Wellen und Wirbel bewerkstelligt wird, welche eine Vorherrschaft von Winden aus NW- bis SW-lichen Richtungen bedingen. Wenngleich dies grundsätzlich sicher zutreffend ist, darf man nicht außer Acht lassen, dass die atmosphärische Zirkulation in mittleren Breiten auf allen Zeitskalen hochvariabel ist, so dass starke Abweichungen von den mittleren meteorologischen Zustandsvariablen (Wind, Temperatur etc.) keine Seltenheit sind.

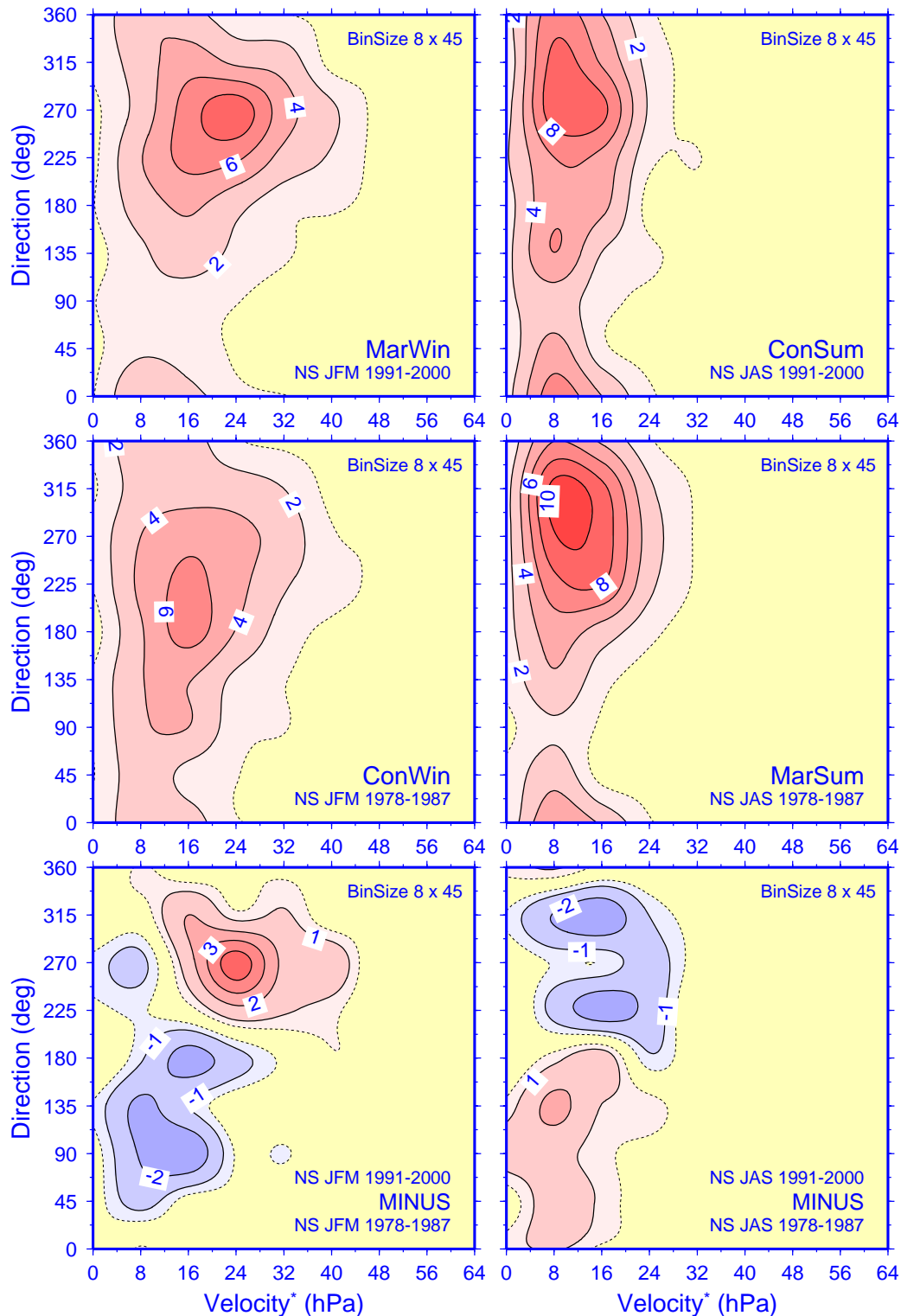


Abb. 3-19: Saisonale relative Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes über der Nordsee für das SST-Warmregime (1991 – 2000, oben) und das SST-Kaltregime (1978 – 1987, mitte); links Winterverteilungen (JFM = Januar – März), rechts Sommerverteilungen (JAS = Juli – September), unten Regimedifferenzen. Die 0.5 % Konturlinie (gestrichelt) umhüllt 98 % aller Windzustände (900 für JFM, 920 für JAS). Die kumulativen Differenzen innerhalb der ± 0.5 % Enveloppen (unten) erreichen ± 18 % für JFM und ± 15 % für JAS. Die Geschwindigkeit ist in hPa pro 10° Breite bei 55° N angegeben, wobei eine Einheit 1.2 Kt oder 0.62 m/s entspricht.

Fig. 3-19: Seasonal percent frequency distributions of geostrophic wind speed and direction across the North Sea for warm (1991 – 2000, top) and cold SST regime (1978 – 1987, middle). Left panel is for winter (JFM = January – March), right panel for summer (JAS = July – September), bottom panel shows seasonal regime difference. The 0.5 % contour (stippled) encloses about 98 % of all samples (900 for JFM, 920 for JAS). Cumulative differences within ± 0.5 % envelopes (bottom) amount to ± 18 % for JFM and ± 15 % for JAS. Velocity is expressed in units of hPa per 10° latitude at 55° N, 1 unit being equivalent to 1.2 Kt or 0.62 m/s.

Es ist eine weit verbreitete Vorstellung, dass die primäre Ursache für klimatische Schwankungen in Änderungen der Häufigkeit atmosphärischer Zirkulationsmuster zu suchen ist. Um einen tieferen Einblick in das Bi-Stabilitätsphänomen der Nordsee-SST zu gewinnen, wurde ein automatisches Verfahren zur Klassifizierung der täglichen Großwetterlage (JENKINSON UND COLLINSON 1977) implementiert und auf einen Nordsee-Teildatensatz der täglichen nordhemisphärischen Luftdruckfelder im Meeressniveau des UK MET OFFICE angewendet. Der Datensatz wurde freundlicherweise kostenlos vom BRITISH ATMOSPHERIC DATA CENTRE zur Verfügung gestellt (badc.nerc.ac.uk/data/mslp).

Ein Zwischenschritt dieser Klassifizierungsmethode besteht in der Berechnung des für das Nordseegebiet am jeweiligen Tag repräsentativen geostrophischen Windvektors. Insofern als der Wind als Motor der Luftmassenadvektion betrachtet werden kann, erscheint es natürlich, zunächst die saisonalen Windverteilungen im Hinblick auf Unterschiede während der durch die SST-Anomalien definierten Kalt- und Warmregimes zu analysieren. Die Ergebnisse dieser vorläufigen Untersuchung sind in Abb. 3-19 dargestellt.

Aus offensichtlichen geographischen Gründen werden hier Winde aus nordöstlichen bis südlichen Richtungen (NE – S bzw. 22.5° – 202.5°) als »kontinental« qualifiziert, solche mit Richtungen aus der komplementären Hemisphäre als »maritim« bezeichnet. Da die Verteilungsgipfel (»Moden«) der vier saisonalen Windverteilungen im maritimen Richtungssektor auftreten, hat das grundsätzliche Windklima tatsächlich maritimen Charakter (»Cfb«, s. o.). Dennoch bestehen erhebliche Unterschiede zwischen diesen Moden hinsichtlich Intensität und Lage in der Geschwindigkeits-/Richtungs-Ebene; und zwar nicht nur in den verschiedenen Jahreszeiten des gleichen SST-Regimes, sondern auch in den gleichen Jahreszeiten verschiedener Regimes. Hätte man andererseits aus dem Satz der vier Verteilungen jeweils zwei Paare auszuwählen, deren »Partner« einander am stärksten ähneln, dann würde man die Winterverteilung des Warmregimes (Kaltregimes) mit der Sommerverteilung des Kaltregimes (Warmregimes) »verheiraten«, und hätte so eine »reinrassige« maritime (kontinentale) Konstellation generiert. Das maritime Paar zeichnet sich durch ausgeprägte Moden im W-Sektor und reduzierte Dichten im E-Sektor aus. Demgegenüber bestehen die hervorstechenden Attribute des kontinentalen Paares in abgeschwächten und E-verlagerten Hauptmoden sowie erhöhten Dichten im E-Sektor. Anstelle von Paarbildungen unter dem Motto »Gleich und Gleich gesellt sich gern« bevorzugt die Natur jedoch Verbindungen nach dem konträren Prinzip (»Gegensätze ziehen sich an«), indem sie maritime und kontinentale Windcharakteristika zu hybriden Windklimata koppelt.

Während die Intra-Regimedifferenzen der saisonalen Windverteilungen sich zweifellos signifikant unterscheiden, erscheint eine statistische Bestätigung der Inter-Regimedifferenzen der Sommer- und Winterverteilungen (Abb. 3-19, unten) angebracht. Dazu wurde ein 2-dimensionaler Kolmogorov-Smirnov Test auf die ungruppierten

Stichprobenverteilungen angewendet (PRESS ET AL. 1992). Die K-S Teststatistik D ist die maximale Differenz zwischen den Datendichten in einem von vier natürlichen Quadranten um den maximierenden Punkt in der Geschwindigkeits-/Richtungs-Ebene. D wird durch systematisches »Ausprobieren« aller Datenpunkte und zugehöriger Quadranten bestimmt. Für die beiden Winterverteilungen erreicht D im Quadranten NE-lich ca. Punkt (8 hPa, 200°) maximal 19 %. Ein ähnliches Resultat ergibt sich für die Sommerverteilungen, nämlich $D = 17$ % im Quadranten NE-lich ca. Punkt (5 hPa, 190°). Beide, die winterlichen und die sommerlichen Verteilungen, erweisen sich als signifikant verschieden, und zwar auf p-Niveaus, die mit $< 5 \times 10^{-8}$ bzw. $< 7 \times 10^{-6}$ % an Sicherheit grenzen. Die D -Werte befinden sich in guter Übereinstimmung mit den kumulativen Differenzen innerhalb der durch die ± 0.5 % Konturen begrenzten Gebiete (Abb. 3-19, unten), die im Winter (JFM) ± 18 % und im Sommer (JAS) ± 15 % erreichen. Nebenbei sei bemerkt, dass das komplementäre Differenzenmuster der Abb. 3-19 impliziert, dass jährliche Windstatistiken keine nennenswerten Inter-Regimeunterschiede aufweisen können, weil sich die festgestellten saisonalen Differenzen im Jahresverlauf wechselseitig annullieren.

Eine quantitative Zusammenfassung der Abb. 3-19 bietet Tab. 3-9. Sichtlich verschiedene dekadenlange SST-Regimes ($-A(R_2) + A(R_3) \approx 1$ K) werden durch hybride Windklimata getragen. Das Kaltregime ist konsistent mit einem saisonalen Wechsel von kontinentalen Winden im Winter (kalt) zu maritimen Windverhältnissen im Sommer (kalt). Ein Regimewechsel in der SST ist verbunden mit einer konsistenten Umkehrung des saisonalen Windklimas.

JFM 91-00	0-20	20-60	ROWΣ	JAS 91-00	0-12	12-60	ROWΣ
SW – N	36	37	73	SW – N	36	29	65
NE – S	19	8	27	NE – S	25	10	35
COLΣ	55	45	MAR	COLΣ	61	39	CON

JFM 78-87	0-20	20-60	ROWΣ	JAS 78-87	0-12	12-60	ROWΣ
SW – N	35	23	58	SW – N	39	39	78
NE – S	32	10	42	NE – S	17	5	22
COLΣ	67	33	CON	COLΣ	56	44	MAR

Δ JFM	0-20	20-60	ROWΣ	Δ JAS	0-12	12-60	ROWΣ
SW – N	1	14	15	SW – N	–3	–10	–13
NE – S	–13	–2	–15	NE – S	8	5	13
COLΣ	–12	12	0	COLΣ	5	–5	0

Tab. 3-9: Kontingenztafeln zur Zusammenfassung von Abb. 3-19. NE – S entspricht 22.5° – 202.5°. Wegen der unterschiedlichen Intervallschachtelung der geostrophischen Windgeschwindigkeit ist beim Vergleich der Intra-Regimetabellen Vorsicht geboten.

Table 3-9: Contingency tables summarizing Fig. 3-19. NE – S covers sector 22.5° – 202.5°. On account of different bin sizes for geostrophic wind velocity care should be used when comparing intra-regime tables.

Der letzte kalt \Rightarrow warm Regimewechsel Ende der 1980er Jahre ging im Winter mit einem Anstieg starker maritimer Winde um 61 % einher; gleichzeitig verringerte sich die Häufigkeit moderater kontinentaler Winde um 40 % (»ConWin« \Rightarrow »MarWin«). Im Gegensatz dazu nahmen die starken maritimen Winde im Sommer um 26 % ab, während

bei den kontinentalen Winden ein Anstieg um 59 % beobachtet wurde (»MarSum« \Rightarrow »ConSum«). Änderungen in Geschwindigkeit und Richtung waren im Winter in etwa ausgeglichen; im Sommer hingegen fielen Richtungsänderungen deutlich höher als Geschwindigkeitsänderungen aus.

3.4.2.3 Schlussbemerkungen

Das bi-stabile Verhalten der Nordsee-SST wirft Zweifel am Nutzen üblicher »Climatological Normals« o. a. »CliNo-Klimatologien« auf, denn in MischMasch-Regionen wie der Nordsee ist die solchen Klimatologien zugrunde liegende Annahme klimatischer Stationarität verletzt. Der »Signifikante-Abweichung-vom-Normalzustand-Alarm« wird nahezu ständig ausgelöst (cf. Abb. 3-18), weil die Alarmvorrichtung von einer signifikanten Änderung des Normalzustands nichts »ahnt«. Eine Lösung könnte darin bestehen, die Signifikanz von Anomalien aus einer gemischten (bimodalen) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu schätzen, welche dem Bistabilitätsphänomen Rechnung trägt.

Die Ergebnisse hinsichtlich der hybriden und gegensätzlichen Windverteilungen in den verschiedenen SST-Regimes wurden für das Kaltregime 1978 – 1987 und die rezente Warm-Episode gefunden. Die Robustheit dieser Resultate sollte überprüft werden, z. B. indem die Analyse auf die lange SST-Zeitserie von Helgoland Reede ausgedehnt wird.

Schließlich erscheint es nützlich, die veränderlichen Windcharakteristika über der Nordsee im Zusammenhang mit den großräumigen (anormalen) Eigenschaften der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation zu untersuchen. Die winterlichen Windverhältnisse über der Nordsee korrelieren mit den Präferenzen der Nordatlantischen Oszillation für ihre negative Phase während des Kaltregimes – bzw. für ihre positive Phase im gegenwärtigen Warmregime (LOEWE ET AL. 2003). Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen der Nordatlantischen Oszillation und dem Alternieren der sommerlichen Windverhältnisse erscheint hingegen unwahrscheinlich, obgleich dem Azorenhoch eine Schlüsselfunktion zukommen dürfte.

3.4.3 Temperaturschichtung

Weite Gebiete der Nordsee sind im Sommerhalbjahr thermisch geschichtet. Diese vertikale Temperaturschichtung bildet sich in tieferen Seegebieten aus, in denen sich die am Meeresboden erzeugte Gezeitenstromturbulenz nicht bis in die winddurchmischte Oberflächenschicht auswirkt. Hier werden in der Übergangszone teilweise extreme Temperaturgradienten von mehr als 10 °C innerhalb weniger m gemessen. Diese saisonale Temperatursprungschicht wird als Thermokline bezeichnet und stellt für den Energie- und Stofftransport eine Barriere dar, die im Extremfall vertikale Transporte verhindert. Überlappen sich hingegen beide Vermischungszonen, tritt allenfalls kurzzeitig ein thermischer Gradient in Oberflächennähe auf, der entweder durch den Seegang, oder aber durch nächtliche Abkühlung und Konvektion schnell wieder abgebaut wird.

Abhängig vom Wechselspiel zwischen thermischem Energieeintrag (Solarstrahlung, fühlbarer Wärmestrom) und kinetischer Energiezufuhr (Windsee, auch Dünung) bilden sich eine oder auch mehrere thermische Sprungschichten aus, deren Tiefen von Jahr zu Jahr variieren. Gegenwärtig liegt für die Nordsee noch keine Klimatologie der Sprungschichttiefe vor, da die »alten« hydrographischen Datensätze mit diskreten

Thermometern an den Nansen-Flaschen keine ausreichende Datenbasis bieten. Die seit Sommer 1998 im Rahmen der jährlichen ozeanographischen Gesamtaufnahmen der Nordsee mit dem geschleppten Dolphin-System gewonnenen Messdaten erlauben inzwischen jedoch eine grobe Klassifizierung der Nordsee zu einer Jahreszeit, in der die stärksten vertikalen Temperaturgradienten auftreten.

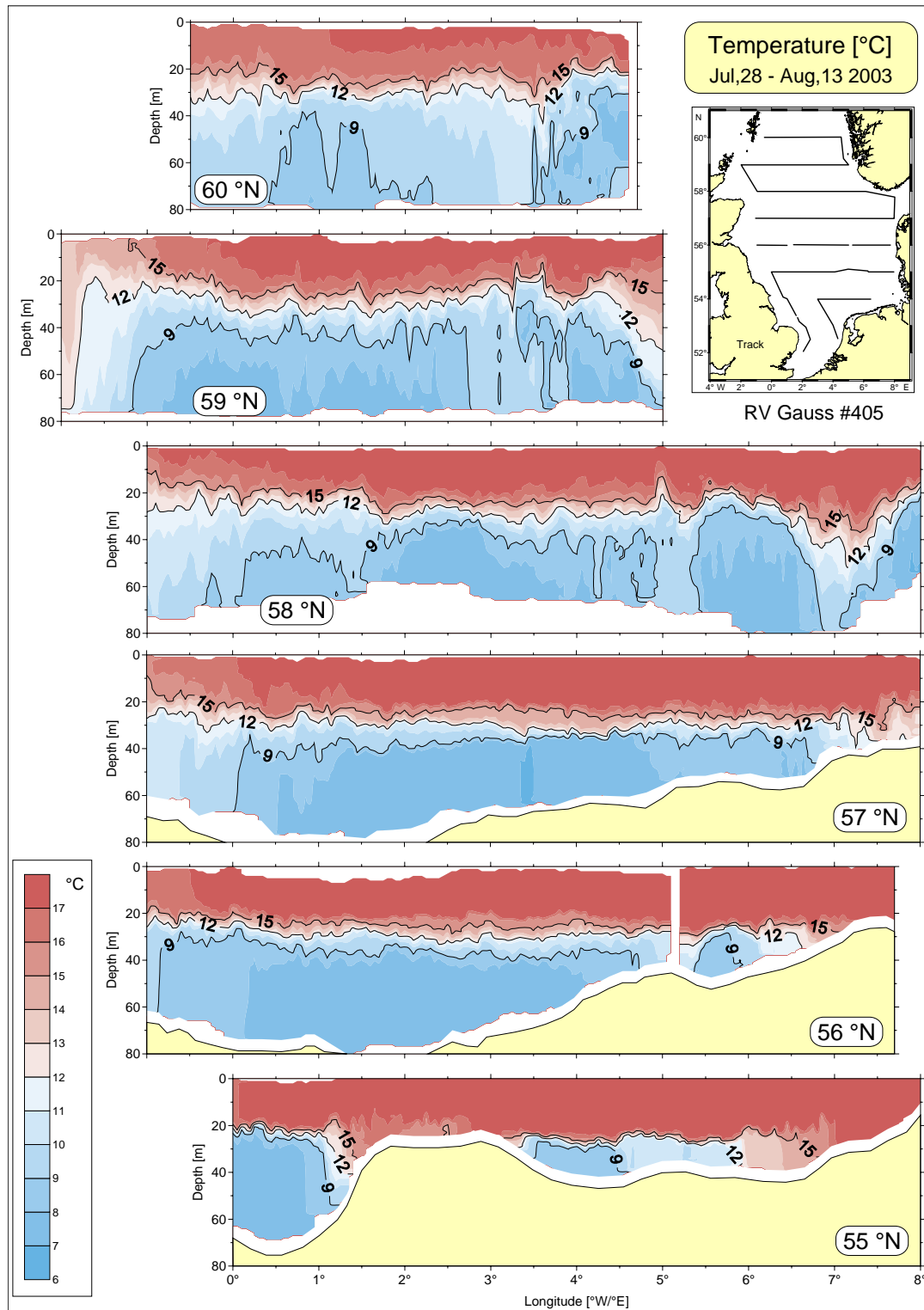


Abb. 3-20: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2003 (FS Gauss, Reise #405).

Fig. 3-20: Temperature stratification (°C) in summer 2003 (RV Gauss, Reise #405).

Im Sommer 2003 war die gut durchmischte Deckschicht (Abb. 3-20) erheblich wärmer als im langjährigen Mittel (vgl. Abb. 3-14, S. 69). Sie erstreckte sich entlang 57° N über die gesamte Breite der Nordsee von der schottischen bis zur dänischen Küste. Die Thermokline lag hier mit 20 – 30 m in vergleichsweise großer Tiefe und wies einen kräftigen vertikalen Gradienten auf. Die Thermokline trennte das teilweise über 17 °C warme Deckschichtwasser vom winterlich kalten Bodenwasser, dessen Temperatur aber auch über dem langjährigen Mittel lag (TOMCZAK UND GOEDECKE 1962).

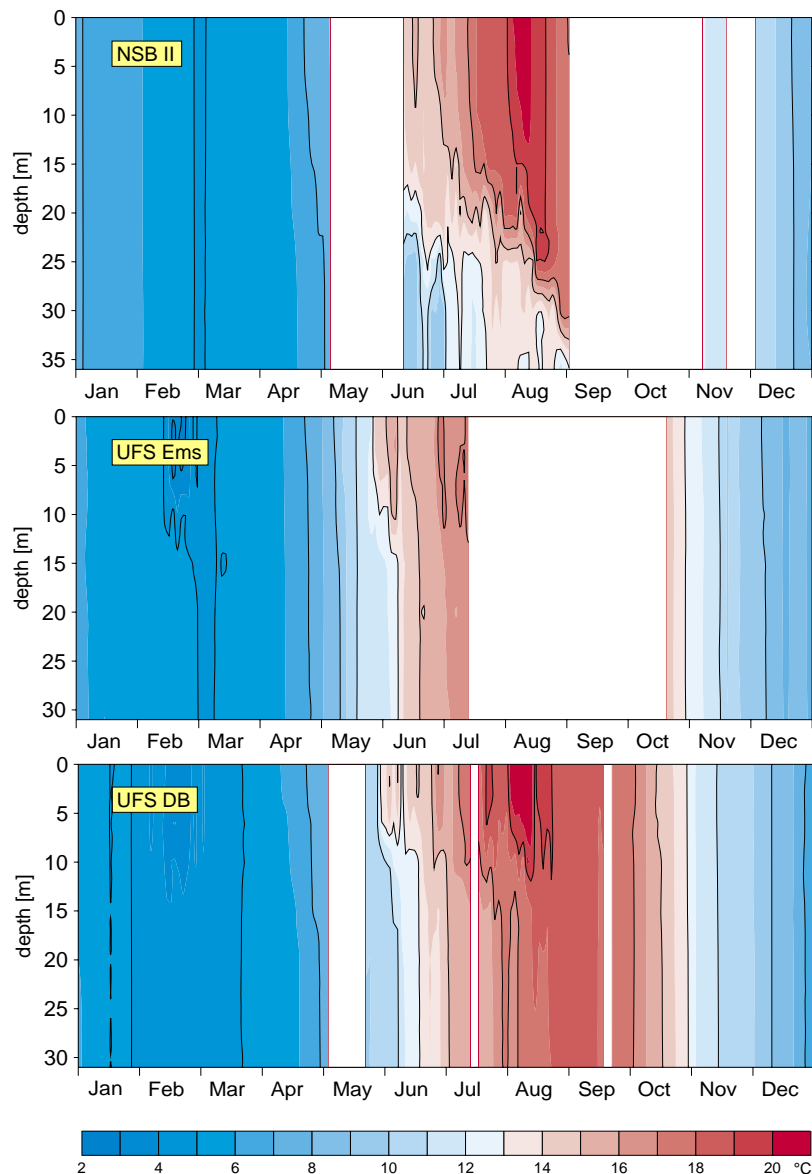


Abb. 3-21: Temperaturschichtung (°C) im Jahr 2003 an den MARNET-Stationen ›Deutsche Bucht‹, ›Ems‹ und ›NSB II‹. Sensortiefen: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.

Fig. 3-21: Temperature stratification (°C) in 2003 at MARNET stations ›Deutsche Bucht‹, ›Ems‹ and ›NSB II‹. Sensor depths: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.

Auf dem Schnitt entlang 55° N ist westlich der Doggerbank der ›cold pool‹ erkennbar, der jedoch durch eine warme Deckschicht gedeckelt wurde, so dass dort die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Nebel gering war. Über der Doggerbank selbst hatten sich trotz der geringen Wassertiefe schwache thermische Gradienten ausge-

bildet. Die häufig geäußerte Ansicht, »über der Doggerbank tritt nie Schichtung auf«, ist unzutreffend.

Einen Einblick in die jahreszeitliche Entwicklung der Temperaturschichtung in der Deutschen Bucht bieten die Messdaten der MARNET-Stationen (Abb. 3-21). Trotz der Ausfallzeiten und Datenverluste infolge technischer Probleme bleibt der Jahresgang der Schichtung durch Kombination der Datensätze erkennbar. Infolge des im April noch relativ hohen, durchmischend wirkenden kinetischen Energieeintrags, setzte erst in der dritten Mai-Dekade 2003 der Aufbau vertikaler Schichtung ein. Die Sprungschicht vertiefte sich an der Station »NSB II« in der nördlichen Deutschen Bucht beständig, bis Anfang September die gesamte Wassersäule von der sommerlichen Erwärmung erfasst war und eine verspätete Abkühlung einsetzte.

3.4.4 Wärmeinhalt

Seit 1998 führt das BSH jeweils in den Sommermonaten Juli oder August eine hydrographische Gesamtaufnahme der Nordsee durch. Die auf diesen Reisen gewonnenen Daten bilden die Hauptinformationsquelle für den Nordseezustand in dieser Jahreszeit. Eine u. a. im Hinblick auf die Klimaerwärmungsdiskussion wichtige integrale Zustandsvariable ist der Wärmeinhalt der Nordsee, der sich aus diesen Daten abschätzen lässt.

3.4.4.1 Wärmeinhalt im Sommer 2003 (Beobachtungen)

Grundlage für die Abschätzung des Wärmeinhalts im Sommer 2003 waren aus den Messdaten des Schleppsystems »Delphin« abgeleitete Temperaturen, Salzgehalte und Dichten, die auf breitenparallelen Schnitten mit einer vertikalen Auflösung von 1 dbar (ca. 1 m) vorliegen. Diese Variablen wurden über Distanzen von 10 km gemittelt. Die aufgrund der begrenzten Tauchtiefe (120 m) und der notwendigen Sicherheitsabstände des oszillierenden Delphins zu Meeresboden und -oberfläche entstandenen Datenlücken wurden mit den Werten an den Umkehrpunkten aufgefüllt.

Für die in Abb. 3-22 dargestellte geographische Verteilung des Wärmeinhalts im Einheitsvolumen $\langle H \rangle$ (J/m^3) wurden die lokalen, über die Einheitswassersäule integrierten Wärmeinhalte H (J/m^2) durch die – aus der digitalen Bathymetrie des DANSK HYDRAULIK INSTITUT bestimmten – Wassertiefen dividiert

$$\langle H \rangle = \sum_k c_{pk} \rho_k h_k T_k / \sum_k h_k.$$

Darin bezeichnet k den Laufindex über die vertikalen Schichten der Dicke h , ρ und T die zugehörige Dichte und Temperatur. Die spezifische Wärme c_p wurde als Funktion von Salzgehalt, Temperatur und Druck bestimmt (MORGAN 2003, FOFONOFF UND MILLARD 1983). Der über die Wassersäule gemittelte Wärmeinhalt $\langle H \rangle$ ist demnach eine Energiedichte, die hier relativ zu $\langle H \rangle = 0$ für $T = 0^\circ\text{C}$ angegeben wird.

In den auf das Einheitsvolumen bezogenen Wärmeinhalten im August 2003 spiegelt sich einerseits die vertikal gemittelte Temperaturverteilung, andererseits auch die Temperaturschichtung (Abb. 3-22). In den flachen, durchmischten Gebieten der südlichen Nordsee wurden die höchsten Wärmeinhalte pro m^3 beobachtet, in den saisonbedingt geschichteten Regionen der zentralen und nördlichen Nordsee sowie der Norwegischen Rinne die niedrigsten.

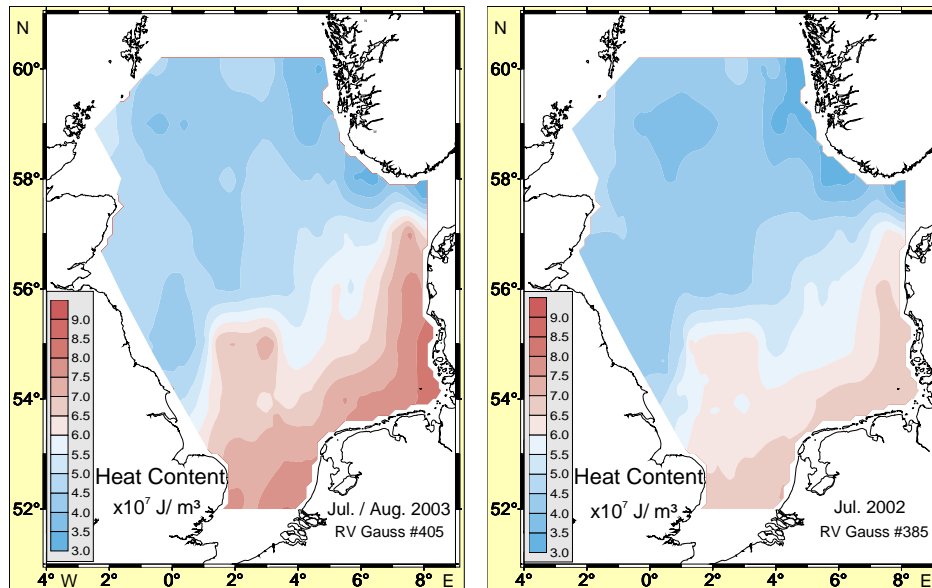


Abb. 3-22: Geographische Verteilung des Wärmeinhalts pro Volumeneinheit im August 2003 und Juli 2002.

Fig. 3-22: Geographical distribution of heat content per unit volume in August 2003 and July 2002.

Ein Vergleich mit der ebenfalls in Abb. 3-22 dargestellten $\langle H \rangle$ -Verteilung für Juli 2002 scheint eindeutig zu zeigen, dass die Nordsee im Sommer des Berichtsjahrs mehr Wärme enthielt als im Vorjahr. Vor einer diesbezüglich entschiedenen Aussage steht jedoch zu bedenken, dass die zugrunde liegenden Daten im Sommer 2003 etwa zwei Wochen später in der Saison erhoben wurden als im Jahr 2002 (vgl. dazu »Obs« in Abb. 3-24, S. 83). Dass dieser Zeitversatz in dieser Jahreszeit durchaus kritisch sein kann, zeigen auch die Anomalien der Nordseeoberflächentemperatur. Während die mittlere SST-Anomalie im Juli 2002 lediglich 0.7 K gegenüber 1.7 K im Juli 2003 betrug, waren die entsprechenden Anomalien im August mit 2.4 K (2002) bzw. 2.5 K für beide Jahre fast identisch.

3.4.4.2 Wärmeinhalt seit 1958 (Modell)

In diesem Abschnitt wird nicht nur die jahreszeitliche Entwicklung des Wärmeinhalts der Nordsee im Jahr 2003, sondern auch seine langfristige Entwicklung in den vergangenen Dekaden anhand von Modelldaten diskutiert. Auf die Stärke des Zusammenhangs zwischen Wärmeinhalt und Oberflächentemperatur sowie Nordatlantischer Oszillation wird ebenfalls eingegangen.

Monatliche Wärmeinhalte der Nordsee wurden freundlicherweise von C. SCHRUM für den Zeitraum 1958 – 2003 zur Verfügung gestellt. Diese Daten basieren auf einer Simulation des hochauflösenden Ozeanmodells »HAMSOM« des IfM-Hamburg, welches mit meteorologischen NCEP-Reanalysen angetrieben wurde (SCHRUM ET AL. 2002, SCHRUM UND SIEGISMUND 2002). Zunächst wird eine grobe, punktuelle Abschätzung der Qualität der simulierten Wärmeinhalte vorgenommen, indem sie mit beobachteten Wärmeinhalten der Einheitswassersäulen entlang 58° N im August 2003 verglichen werden (Abb. 3-23). Aufgrund von Unterschieden hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung von Beobachtungs- und Modellgebiet, der groben Messdichte in meridionaler

Richtung ($\Delta\varphi = 1^\circ$) gegenüber der horizontalen Modellauflösung (10×10 km) sowie der Asynchronität zwischen quasisynoptischer Momentaufnahme und Monatsmitteln (Modell) erscheint ein aufwendigerer Vergleich nicht sinnvoll.

Sowohl in den simulierten als auch in den beobachteten Wärmegehalten spiegelt sich die Bathymetrie entlang 58° N; östlich 4° E nimmt der Wärmeinhalt mit zunehmender Nähe zur tiefen Norwegischen Rinne stark zu (Abb. 3-23). Die mittlere relative Abweichung $(\text{Mod} - \text{Obs}) / \text{Obs}$ beträgt -3.8% , d. h. der beobachtete Wärmeinhalt wird vom Modell geringfügig unterschätzt. Eine stichprobenartige visuelle Inspektion der simulierten geographischen $\langle H \rangle$ -Verteilungen lässt die Modelldaten plausibel und von hinreichender Qualität erscheinen, um die oben angekündigten Untersuchungen durchzuführen.

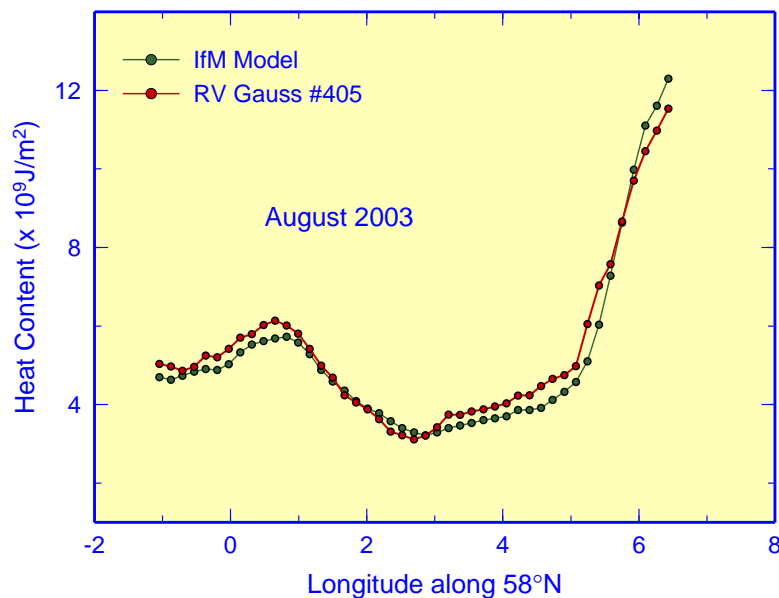


Abb. 3-23: Wärmeinhalt pro Einheitswassersäule entlang 58° N im August 2003, Modell- versus Beobachtungsdaten.

Fig. 3-23: Heat content per unit water column along 58° N in August 2003, model vs. observations.

Die saisonale Entwicklung des Gesamtwärmeinhalts der Nordsee ist in Abb. 3-24 für die Jahre 2002 und 2003 zusammen mit der Klimatologie für den Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt. Während bis August 2002 keine signifikanten Abweichungen von den klimatologischen Mittelwerten auftraten, kam es ab September zur stärksten Warmanomalie im gesamten Simulationszeitraum 1958 – 2003; die Abweichungen von den Klimanormalen variierten zwischen 3.2 und 4.3 Standardabweichungen. Die extreme Anstiegsrate des Wärmeinhalts von August nach September, welche für die Vormonate durchaus typisch ist, erscheint zu dieser Jahreszeit erstaunlich.

Die Oberflächentemperatur der Nordsee ging ab Ende August zurück (Abb. 3-15, S. 70), während sich die Thermokline offenbar im September großräumig weiter vertiefte; für die MARNET-Stationen ist dies durch Beobachtungen belegt (LOEWE ET AL. 2003, ABB. 3-12 A.A.O.). Die Oberflächenschicht nahm demnach immer noch Wärme aus der Atmosphäre auf, gab jedoch eine dieses Surplus übersteigende Wärmemenge an untere Schichten weiter, so dass der Gesamtwärmeinhalt bei abnehmenden Oberflächentemperaturen weiter anstieg. Aus dem klimatologischen Jahresgang des Wärme-

inhalts ist ersichtlich (Abb. 3-24), dass das saisonale Extremum gegenüber denjenigen der Oberflächentemperatur (Abb. 3-15, S. 70) grundsätzlich mit einer Zeitverzögerung von etwa einem Monat eintritt.

Der Abbau der Warmanomalie war erst im relativ kalten Winter des Folgejahrs annähernd abgeschlossen. Während die Oberflächentemperaturen bis einschließlich Mai 2003 geringer ausfielen als im Vorjahreszeitraum (Abb. 3-15, S. 70), traf deshalb auf den Wärmeinhalt das Gegenteil zu. Die positive Anomalie des Wärmeinhalts verstärkte sich anschließend bis einschließlich August und fiel schon im Oktober auf normale Werte zurück.

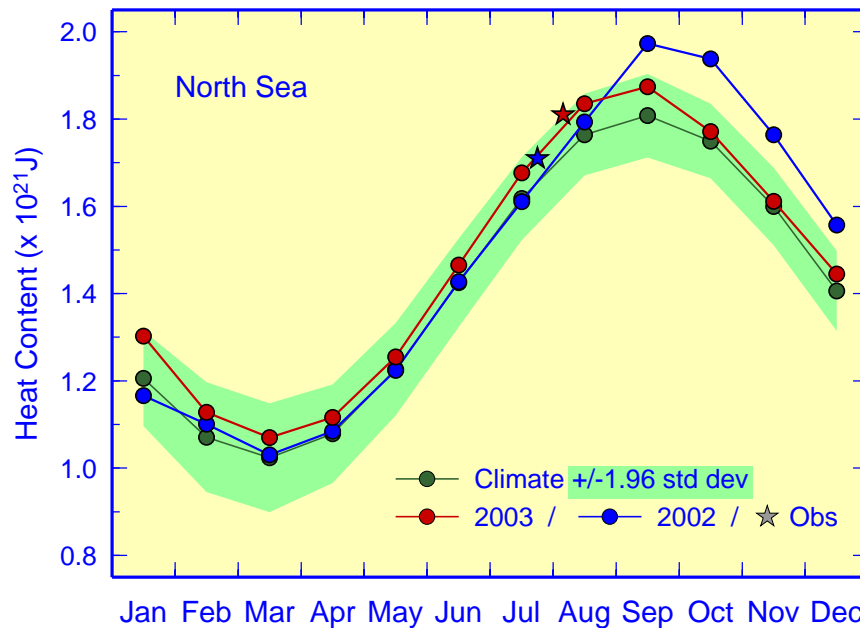


Abb. 3-24: Saisonale Entwicklung des Wärmeinhalts der Nordsee in 2002 und 2003 (Modelldaten) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). Obs = Gauss #385 (Jul 2002), Gauss #405 (Aug 2003).

Fig. 3-24: Seasonal evolution of North Sea heat content in 2002 and 2003 (model data) together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). Obs = Gauss #385 (Jul 2002), Gauss #405 (Aug 2003).

Abb. 3-25 bietet eine 2D-Darstellung der Zeitserie des monatlichen Wärmeinhalts (HC) für den gesamten Simulationszeitraum 1958 – 2003. In gleicher Weise sind dort die monatlichen Abweichungen von den Mittelwerten des Zeitraums 1971 – 2000 (ΔHC), deren statistische Signifikanz (Perzentile) und die Zeitserie des monatlichen NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998, s. a. Abschnitt 2.1, S. 24) dargestellt. Eine äquivalente Darstellung für die Nordseeoberflächentemperatur findet man bei LOEWE ET AL. (2003, ABB. 2-9 A.A.O.).

Anhand der Anomalien des Wärmeinhalts (ΔHC) wird dessen Regimecharakter besonders deutlich. Das moderate Warmregime Anfang der 1970er Jahre, das anschließende etwa dekadenlange Kaltregime und der erneute Regimewechsel Ende der 1980er Jahre befinden sich in bemerkenswerter Übereinstimmung mit dem analogen Verhalten der Nordseeoberflächentemperatur (vgl. Abb. 3-18, S. 72). Allerdings bricht diese synchrone und gleichartige Entwicklung 1994 ab. Während das Warmregime

der Oberflächentemperatur weiter andauert, zeigt der Wärmeinhalt seither Kaltregimecharakter.

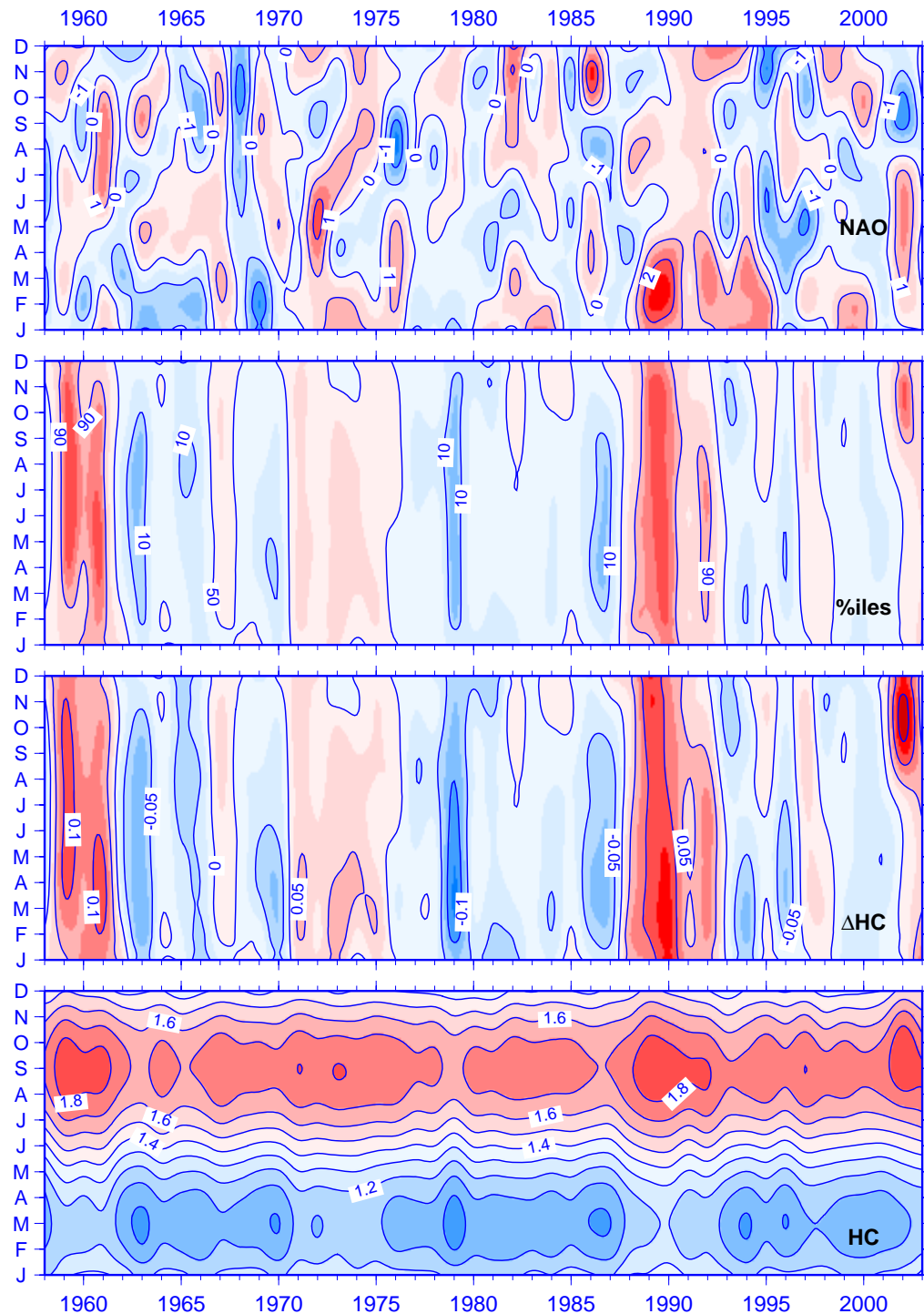


Abb. 3-25: Monatsmittel des Wärmeinhalts ($\times 10^{21}$ J) der Nordsee mit Anomalien und Perzentilen (%) und NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). Tiefpassfilterbreite 6 Monate. Farbstufen für Perzentile: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %.

Fig. 3-25: Monthly mean North Sea heat content ($\times 10^{21}$ J) with anomalies and percentiles (%), and NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). Low-pass filter width 6 month. Color-steps for percentiles: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %.

Der beschriebene Sachverhalt tritt besonders klar in Abb. 3-26 hervor, in welcher der Zusammenhang zwischen Wärmeinhalt und Oberflächentemperatur anhand von Jahresmittelwerten im gemeinsamen Zeitraum 1969 – 2003 illustriert ist. Im Zeitraum 1969 – 1993 beträgt die lineare Korrelation (r) zwischen beiden Variablen 0.93, was einer erklärten Varianz (r^2) von 87 % entspricht. Als Konsequenz des antiparallelen Verhaltens in den letzten 10 Jahren reduzieren sich diese Werte für den Gesamtzeitraum auf 0.75 und 56 %.

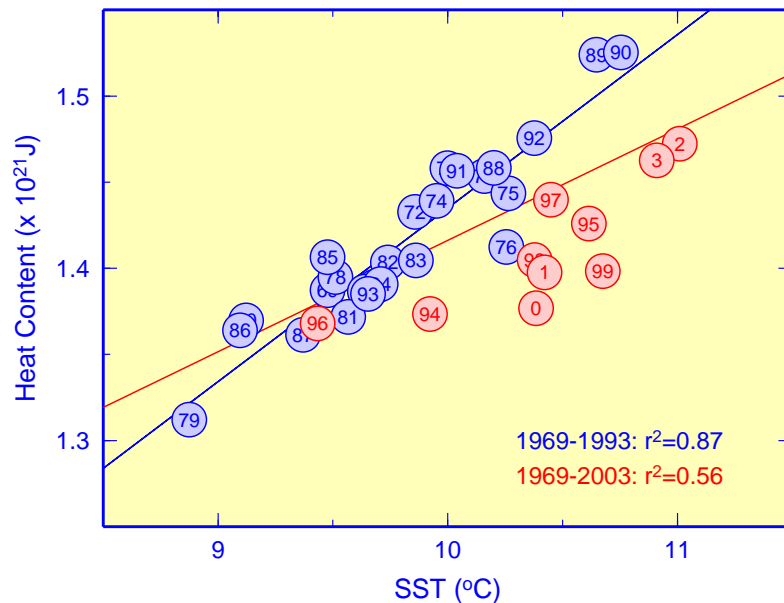


Abb. 3-26: Wärmeinhalt versus Oberflächentemperatur der Nordsee (Jahresmittel).

Fig. 3-26: North Sea heat content versus SST (annual means).

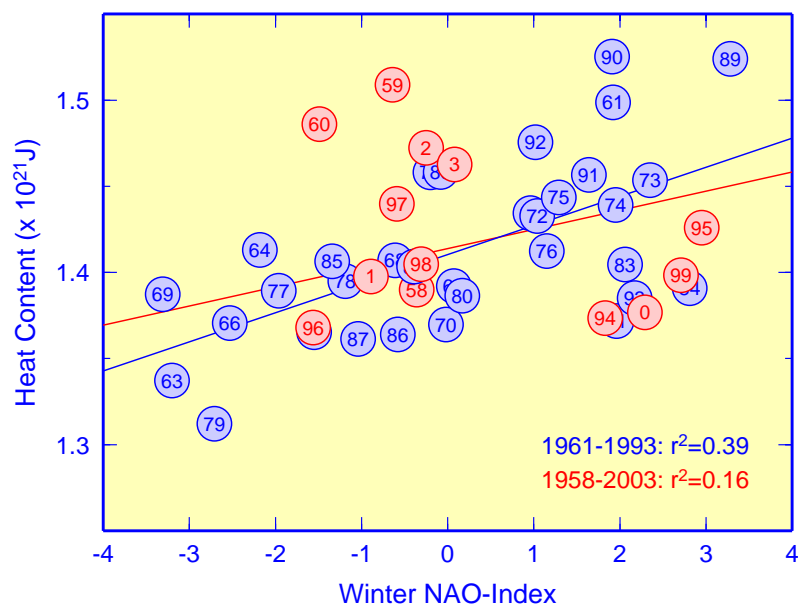


Abb. 3-27: Wärmeinhalt der Nordsee (Jahresmittel) versus Winter NAO-Index (Dez-Jan-Feb, LOEWE UND KOSLOWSKI 1998).

Fig. 3-27: North Sea heat content (annual means) versus winter NAO-Index (Dec-Jan-Feb, LOEWE AND KOSLOWSKI 1998).

Die Regimelängen und -wechsel des Wärmeinhalts zeigen eine auffällige Korrespondenz mit den bevorzugten Zuständen der Nordatlantischen Oszillation im Winter (Abb. 3-25). Eine verstärkte atmosphärische Zonalzirkulation (NAO-Index > 0) scheint Warmregimes aufrecht zu erhalten oder sogar zu initiieren (1989/90). In Kaltregimes werden hingegen auffällige Häufungen negativer NAO-Zustände beobachtet. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 3-27, S. 85 kompakter veranschaulicht und quantifiziert. Im Zeitraum 1961 – 1993 ergibt sich eine Korrelation (r) von 0.62 zwischen Jahresmittelwärmeinhalt und Winter NAO-Index, die jedoch für den Gesamtzeitraum auf 0.4 abfällt. Die erklärte Varianz ist für das beschränkte Zeitintervall durchaus beachtlich (39 %), für den vollen Zeitraum hingegen marginal (16%).

Geographischen Korrelationskarten, in denen der Zusammenhang zwischen monatlichen Oberflächentemperaturverteilungen der Nordsee und dem Winter NAO-Index für den Zeitraum 1971 – 1996 quantifiziert wurde, ist zu entnehmen, dass signifikante Korrelationen auf das dem Kontinent vorgelagerte Seegebiet östlich 2° E und südlich 58° N und die Monate Januar bis April, in denen die Temperaturfelder stark autokorreliert sind, beschränkt waren (LOEWE 1996). Insbesondere traten minimale Korrelationen im nördlichen Einstromgebiet auf. Neuberechnungen für den Zeitraum 1971 – 2003 ergaben eine ähnlich klare Abschwächung des Zusammenhangs mit dem NAO-Index, wie er für den Wärmeinhalt demonstriert wurde.

3.5 Salzgehalt

Der Salzgehalt der Nordsee hängt einerseits vom Einstrom salzreichen atlantischen Wassers mit Salzgehalten über 35 (Practical Salinity Units) und andererseits von erheblichen Süßwassereinträgen der Flüsse ab. Die nordöstlichen Seegebiete im Bereich des Skagerrak und der Norwegischen Rinne sind innerhalb einer relativ dünnen Oberflächenschicht vom niedrigen Salzgehalt des Baltischen Ausstroms geprägt. Der Süßwassereintrag durch Niederschlag über der Nordsee wird weitgehend durch Verdunstung kompensiert.

Zunächst werden die beobachteten saisonalen geographischen Salzgehaltsverteilungen für das Jahr 2003 dokumentiert und die Verstärkung des atlantischen Einflusses im Kontext der atmosphärischen Zirkulation diskutiert. Die Besonderheiten der sommerlichen Salzgehaltschichtung der Nordsee werden im anschließenden Unterkapitel dargelegt. Schließlich werden die ungewöhnlich geringe Wasserführung der Elbe (als Konsequenz des Trockenjahrs 2003) und der Jahresgang des Salzgehalts bei Helgoland Reede untersucht.

3.5.1 Saisonale geographische Verteilungen

In seiner Untersuchung des Einflusses der Nordatlantischen Oszillation (NAO) auf die Salzgehaltsverteilung in der Nordsee zeigte JANSSEN (2002), dass der Flächenanteil atlantischen Wassers in der Nordsee in starkem Maße – und mit einer Zeitverzögerung von einem Jahr – vom Winter NAO-Index abhängt. Ein hoher Winterindex kennzeichnet eine verstärkte atmosphärische Zonalzirkulation, welche wiederum eine verstärkte Nordseezirkulation zur Folge hat und damit auch einen stärkeren Einstrom atlantischen Wassers in die Nordsee. Der Winter NAO-Index für 2002/2003 war jedoch mit einem Wert von 0.08 schwach (vgl. *Abschnitt 2.1, S. 24*), derjenige im Winter 2001/2002 sogar negativ (– 0.25), so dass keine verstärkte Zufuhr atlantischen Wassers in die Nordsee zu erwarten war.

Für die Analyse der Salzgehaltsbedingungen der Nordsee im Jahr 2003 lagen Daten aus dem Winter (ICES / INTERNATIONAL BOTTOM TRAWL SURVEY, FS Gauss / Reise #395) und aus dem Sommer vor (FS Gauss / Reise #405). Die geographischen Verteilungen des Salzgehaltes in Oberflächen- und in Bodennähe sind für beide Jahreszeiten in *Abb. 3-28* dargestellt. Sowohl im Winter als auch im Sommer 2003 war die nördliche und zentrale Nordsee großräumig mit atlantischem Wasser gefüllt (Salzgehalte > 35). Der auf das Nordseegebiet bezogene prozentuale Flächenanteil von Atlantikwasser in Bodennähe ist in *Tab. 3-10* für den Zeitraum 1998 – 2003 gemeinsam mit dem Winter NAO-Index zusammengestellt. Danach hat sich der Einfluss des Atlantik nach einem Minimum im Winter 2002 erheblich verstärkt.

Eine indirekte Bestätigung dieses Befundes liefert die Zeitreihe britischer Salzgehaltsbeobachtungen im Faroe-Shetland Kanal, die einen zunehmenden Einfluss des ›Modified North Atlantic Water‹ (MNA) mit steigendem Salzgehalt zeigt (ICES 2004, *Fig. 26 A.A.O.*). Auch im ›Fair-Isle‹ Strom wurden nach einem absoluten Salzgehaltsminimum im Jahr 2001 wieder zunehmende Salzgehalte gemessen (*Fig. 27 A.A.O.*), die den erstarkten Einfluss des Atlantik auf die Nordsee bestätigen. Auch der in den Jahren 2001 und 2002 stark abgeschwächte atlantische Einstrom durch den Englischen Kanal, der sich in Salzgehaltsanomalien von etwa –1.5 spiegelte, normalisierte sich im Jahr 2003 (ICES 2004, *Fig. 29 a.a.O.*).

Der Einfluss der NAO auf die Stärke des atlantischen Einstroms scheint nach der Datenlage für das Jahr 2003 nicht so klar, wie von JANSSEN (2002) formuliert. Die Korrelationen mit dem Winter NAO-Index haben sich sowohl für die Meeresoberflächentemperatur als auch für den Wärmeinhalt der Nordsee seit 1994 drastisch reduziert (vgl. Abschnitt 3.4.4.2, S. 81), so dass gerade zu erstaunlich wäre, wenn für andere geophysikalische Variablen aus der gleichen Region weiterhin ein starker Zusammenhang gefunden würde.

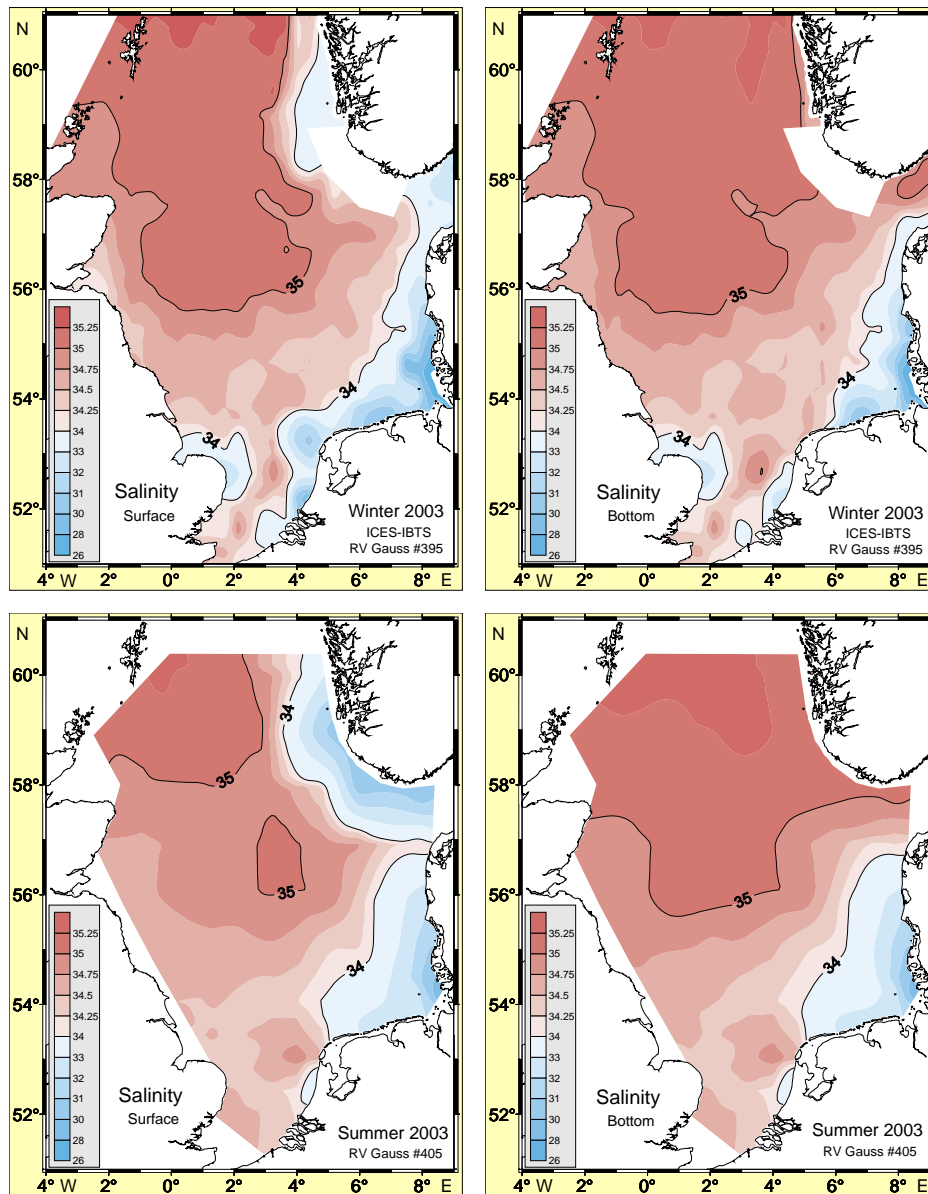


Abb. 3-28: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2003.

Fig. 3-28: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2003.

Andererseits ist der NAO-Index ein äußerst rudimentäres Maß für die atmosphärische Zonalzirkulation über dem Nordatlantik, für welches eine Vielzahl von Definitionen im Gebrauch sind (vgl. Abb. 2-1, S. 25). So reflektiert offenbar der monatliche NAO-Index des CRUUEA (CLIMATE RESEARCH UNIT UNIVERSITY OF EAST-ANGLIA), bei dem die Stärke des Azorenhochs über den Stationsdruck von Gibraltar eingeht, mit Werten von 2.31 und 3.01 im Januar bzw. Februar 2002 (LOEWE ET AL. 2003, TAB. 2.1 A.A.O.) die

damalige atmosphärische Zirkulation über der Nordsee besser als der hier benutzte NAO-Index nach LOEWE UND KOSLOWSKI (1998), die als südliche Station das etwa 2000 km westliche Ponta Delgada (Azoren) verwenden.

Eine differenziertere Beschreibung der regionalen atmosphärischen Zirkulation über der Nordsee, als sie irgendein NAO-Index bieten kann, ist durch den Wetterlagenkalendar (Tab. 2-3, S. 33) oder Analysen des »Nordseewindes« möglich. So ist aus Abb. 2-8, S. 38 klar ersichtlich, dass im Januar / Februar 2002 westliche Winde vorherrschten, die in insgesamt 15 Stürmen beträchtliche Windstärken erreichten. Die in Tab. 3-10 dokumentierte anschließende Verstärkung des Atlantischen Einstroms, die bis in den Folgewinter zunahm, erscheint demnach durchaus plausibel.

YEARS	FRACTIONAL AREA ($S > 35$) AND WINTER NAO-INDEX					
	1998	1999	2000	2001	2002	2003
WINTER	./.	34	39	31	23	37
NAO _{DJF}	-0.31	2.71	2.29	-0.89	-0.25	0.08

Tab. 3-10: Relative Nordseefläche (%) mit bodennahen Salzgehalten über 35 (Atlantikwasser) mit Winter NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998).

Table 3-10: Fractional North Sea area (%) with near-bottom salinity exceeding 35 (Atlantic water) mit Winter NAO-Index (LOEWE AND KOSLOWSKI 1998).

Leider liefern die internationalen Überwachungsprogramme kaum zeitnahe Informationen, die detaillierte Aussagen zu den Auswirkungen des wechselnden Atlantikeinflusses auf Primärproduktion oder Artenzusammensetzung zuließen. Mit dem beobachteten verstärkten atlantischen Einstrom dürften jedoch mehr Nährstoffe in die Nordsee transportiert worden sein, so dass in der nördlichen und zentralen Nordsee eine intensivere Primärproduktion möglich gewesen sein sollte.

3.5.2 Salzgehaltsschichtung

Außer in den durch Süß- oder Brackwassereinträge beeinflussten Seegebieten – also vor den Mündungen großer Flüsse sowie über der Norwegischen Rinne infolge des Baltischen Ausstroms – bilden sich ausgeprägte Salzgehaltsschichtungen in der Nordsee kaum aus. In den in Abb. 3-28, S. 88 dargestellten geographischen Salzgehaltsverteilungen sind diese Gebiete klar erkennbar. Darüber hinaus sind im Sommer vertikale Salzgehaltsunterschiede von etwa 0.2 in der nördlichen und zentralen Nordsee offensichtlich. Die Bodenwasserschicht ist hier durch die saisonale Thermokline von der Deckschicht entkoppelt, so dass sowohl die winterlichen Bodenwassertemperaturen als auch die bodennahen Salzgehaltsbedingungen bis in den Sommer nur geringen Änderungen unterworfen sind.

Die mit dem oszillierenden Schleppsystem »Delphin« gemessenen Salzgehaltsprofile zeigen vor allem auf den Schnitten entlang 58°–60° N deutliche vertikale Salzgehaltsunterschiede, die durch den Baltischen Ausstrom (58° N) bzw. dessen Fortsetzung im Norwegischen Küstenstrom hervorgerufen wurden (Abb. 3-29). Auffällig sind die relative Mächtigkeit (59° N) und die geringe Westausdehnung (bis 5° E entlang 58° N) der salzärmeren Wasserschicht. Im Sommer 2002 erstreckte sich der Norwegische Küstenstrom entlang 58° N bis etwa 3° E. Als Ursachen für diese geringe Ausdehnung

kommen atmosphärisches ›Blocking‹ und / oder geringere Ostseeabflüsse in Betracht. Die Mächtigkeit des Norwegischen Küstenstroms auf 59° N deutet auf einen ›Blocking-Effekt‹ hin. Die schwachen vertikalen Salzgehaltsgradienten in der zentralen und nördlichen Nordsee scheinen ein Übersichten von atlantischem Winterwasser anzuzeigen.

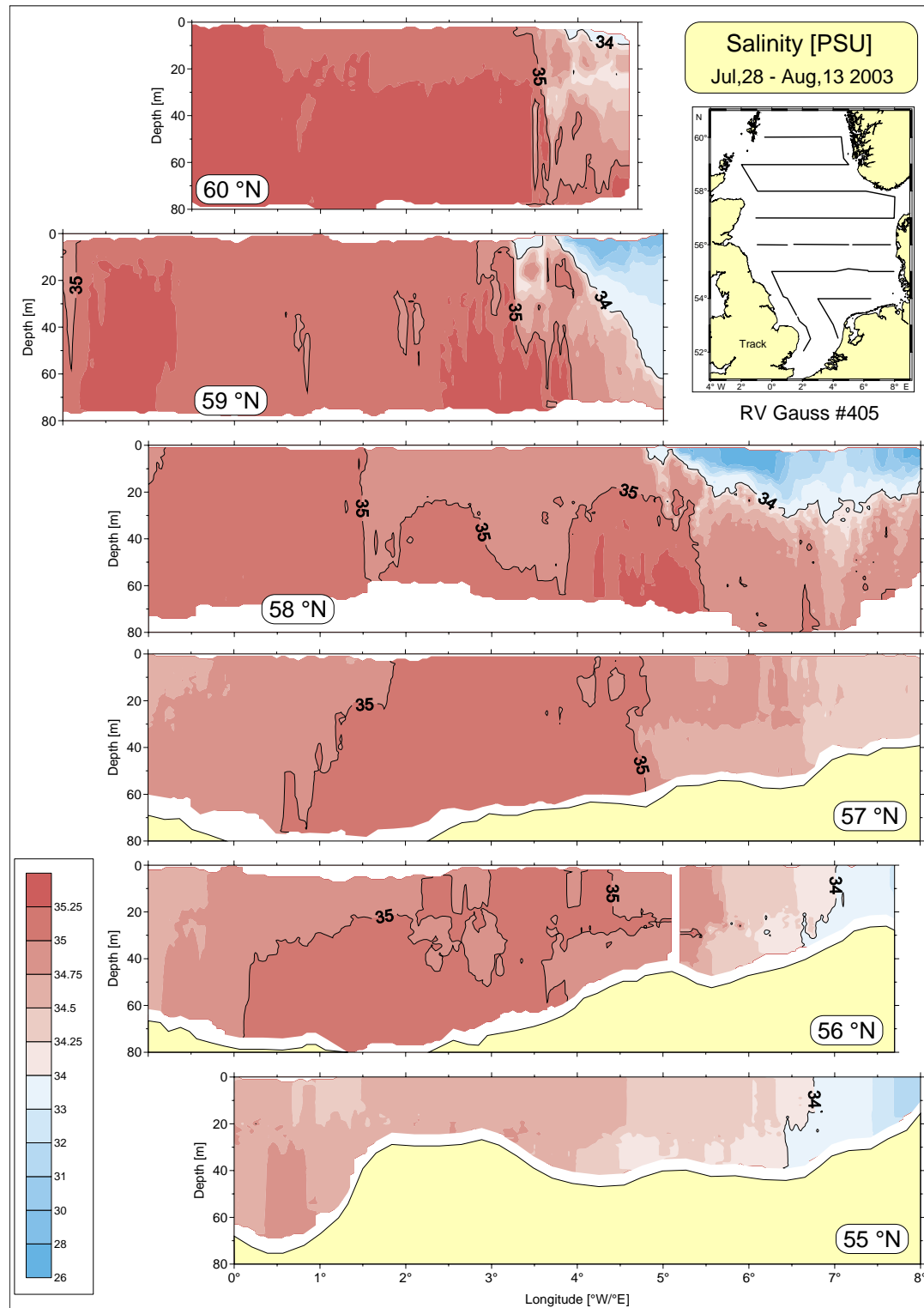


Abb. 3-29: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2003 (FS Gauss, Reise #405).

Fig. 3-29: Salinity stratification in summer 2003 (RV Gauss, Cruise #405).

3.5.3 Abfluss Elbe

Der Abfluss der Elbe wird vom WSA Lauenburg weit oberhalb der Flussmündung am Wehr Neu-Darchau gemessen. Im langjährigen Jahresmittel (1971 – 2000) fließen dort $22 \text{ km}^3/\text{a}$ oder $685 \text{ m}^3/\text{s}$ Elbewasser in Richtung Nordsee. Auf dem Weg von Neu-Darchau bis zur Mündung bei Cuxhaven erhöht sich die Abflussrate durch kleinere Nebenflüsse um $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abweichungen der Elbeabflussraten von den klimatologischen Mittelwerten werden als repräsentativ für andere in die Nordsee entwässernde kontinentale Flusssysteme angesehen.

Die Gesamtabflussmenge von $20 \text{ km}^3/\text{a}$ scheint 2003 als normales Jahr zu charakterisieren, denn das langjährige Jahresmittel wurde nur um ca. 10 % unterschritten (vgl. LOEWE ET AL. 2003, ABB. 3-15 A.A.O.). Anhand des in Abb. 3-30 illustrierten Jahresgangs der Abflussraten ist jedoch ersichtlich, dass diese ab April nahezu gleichförmig und erheblich unterhalb der Monatsklimatologie lagen; selbst für die in diesen Monaten gemessenen maximalen Wassertransporte trifft dies zu. Durch den signifikant erhöhten Abfluss im Januar und den moderat verstärkten Abfluss im Februar wurden diese unternormalen Transporte weitgehend kompensiert und damit der Jahresabfluss »normalisiert«.

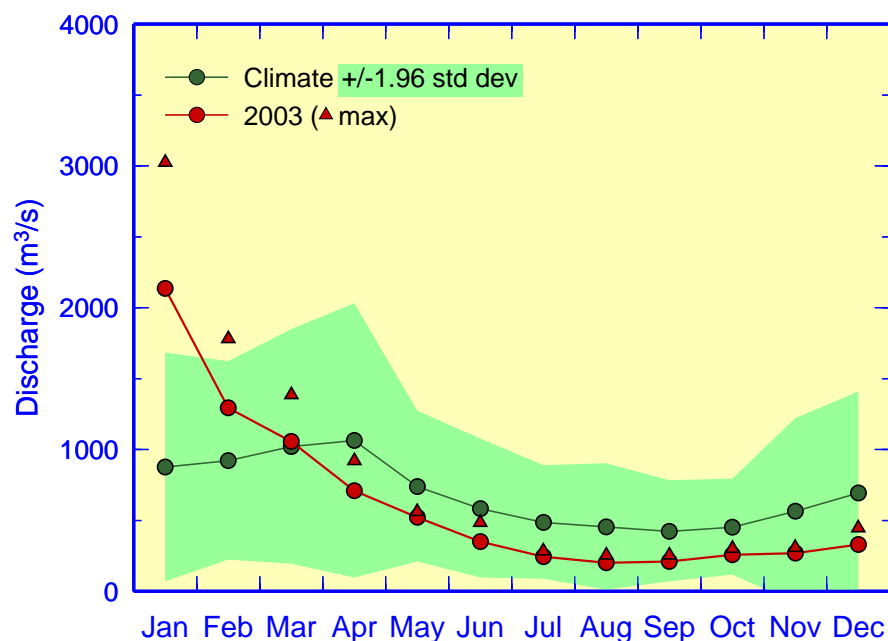


Abb. 3-30: Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe in Jahr 2003 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechen $2.592 \text{ km}^3/\text{Monat}$. (Quelle: WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-30: Monthly mean and maximum runoff of Elbe River in 2003 at Neu-Darchau weir together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ are equivalent to $2.592 \text{ km}^3/\text{month}$. (Data courtesy of WSA-Lauenburg.)

Ursache für die geringe Wasserführung der Elbe waren unternormale Niederschläge. Obgleich die monatlichen Niederschlagssummen (Deutschlandmittel) ab Februar 2003 nur teilweise außergewöhnlich niedrig waren (Feb, Jun, Aug), wurde eine noch markantere Trockenperiode im vergangenen Jahrhundert nur 1976 beobachtet (BECK

ET AL. 2004). Die lang andauernde Trockenheit führte zu historischen Minima der Flusspegelstände in verschiedenen deutschen Flussgebieten (z. B. wurde am Pegel Emmerich mit 50 cm im September der niedrigste Wasserstand des Rheins seit Beginn der Pegelmessungen im Jahr 1804 registriert). Die ungewöhnliche Trockenheit dürfte mit der für das Nordseegebiet festgestellten Zunahme antizyklonaler Wetterlagen um 50 % gegenüber dem Vorjahreszeitraum in Verbindung stehen (Tab. 2-2, S. 32).

3.5.4 Salzgehalt bei Helgoland Reede

Der Salzgehalt bei Helgoland Reede wird einerseits durch den Elbeabfluss und die Lage der Frontalzone der Elbzunge, andererseits durch advective Transporte salzreicheren Wassers von Westen her bestimmt. Die saisonale Entwicklung des Oberflächensalzgehalts im Jahr 2003 ist in Abb. 3-31 gemeinsam mit der Monatsklimatologie für den Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt. Signifikante Anomalien traten im Berichtsjahr nicht auf. In der ersten Jahreshälfte wurde eine höhere intramonatliche Variabilität beobachtet als im zweiten Halbjahr, wie aus den unterschiedlichen Spannweiten der monatlichen Extrema ersichtlich ist.

Die Ursachen für das auffällige Salzgehaltsminimum von 29 im April werden im Rahmen der Diskussion der Nährstoffdynamik bei Helgoland Reede erläutert (vgl. Abb. 4-13, S. 119).

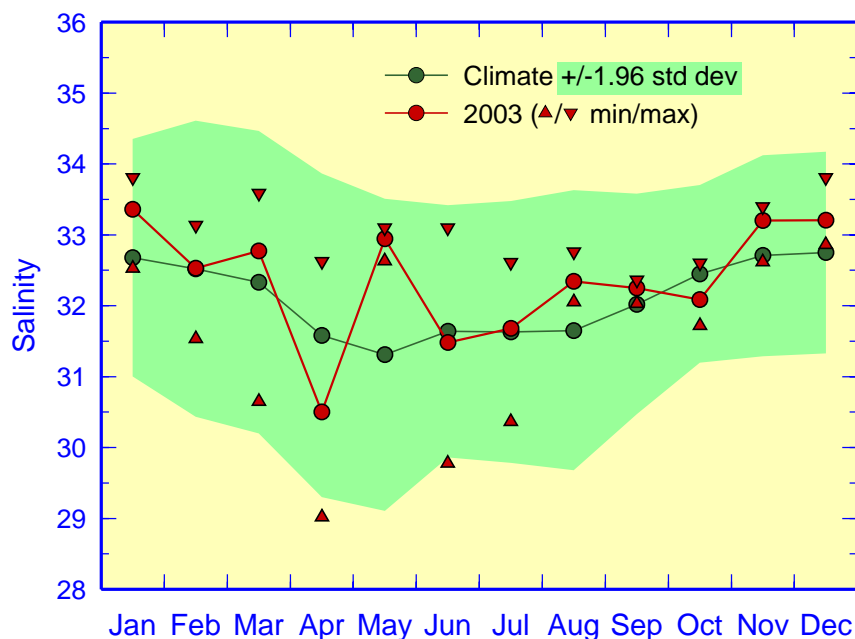


Abb. 3-31: Jahresgang 2003 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).

Fig. 3-31: Seasonal cycle 2003 of monthly mean SSS at Helgoland Roads together with monthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).

3.6 Meereis

Der Winter 2002/3 war in Hinblick auf die gebildete Eismenge, die Dauer der Eisbedeckung und die eisbedingten Schifffahrtsbehinderungen im deutschen Küstengebiet ein ›mäßiger‹ Eiswinter. Derartige mäßige Eiswinter kommen in der Nordsee mit einer Häufigkeit von 37 % vor (Bezugszeitraum 1897 – 2003). Der letzte Winter dieses Typs wurde vor sechs Jahren (1996/97) registriert. Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters (KOSLOWSKI 1989), betrug im Winter 2002/3 für die Nordseeküste 0.53 m.

3.6.1 Eisstatistik

Die Bewertung der Eiswinter basiert auf Beobachtungen an 13 Eis-Klimastationen, die seit 1897 unterhalten werden und eine repräsentative Auswahl des Eisstationsnetzes darstellen. Ihre geographische Lage ist aus Abb. 3-32 ersichtlich.



Abb. 3-32: Eis-Klimastationen (blau) an der deutschen Nordseeküste.

Fig. 3-32: Ice-climate stations (blue) at the German North Sea coast.

3.6.1.1 Eisvolumen und Eiswintertyp

Mit der flächenbezogenen Eisvolumensumme

$$V_{A\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (Ah)_{ij}$$

führte KOSLOWSKI (1989) ein neues Maß zur Bewertung der Eiswinter ein. Darin sind A der Eisbedeckungsgrad in Zehntel, h die Eisdicke, m die Anzahl der Tage mit Eis

und n die Anzahl der Eis-Klimastationen (13). Zusätzlich zur Dauer der Vereisung werden tägliche Beobachtungen des Bedeckungsgrads und der Eisdicke einbezogen, um den häufig unterbrochenen Vereisungsperioden in den einzelnen Wintern besser gerecht zu werden.

Die von Jahr zu Jahr sehr verschieden ausgeprägten Eiswinter werden für die deutschen Küsten nach fünf Eiswintertypen klassifiziert. Diese Eiswintertypen wurden aus der Häufigkeitsverteilung der flächenbezogenen Eisvolumensumme bestimmt und sind für die deutsche Ostseeküste wie folgt definiert (KOSLOWSKI 1989; KOSLOWSKI UND GLASER 1995):

schwach $\leq 0.5 \text{ m}$ < *mäßig* $\leq 4 \text{ m}$ < *stark* $\leq 9 \text{ m}$ < *sehr stark* $\leq 20 \text{ m}$ < *extrem stark*.

Legt man diese Klassifikation auch für die Nordsee zugrunde, dann fällt der Eiswinter 2002/3 mit $V_{A\Sigma} = 0.53 \text{ m}$ gerade noch in die Klasse ›mäßig‹.

Die historische Entwicklung der Stärke der Eiswinter seit 1897 ist in Abb. 3-33 wiedergegeben. Starke oder sehr starke Eiswinter traten seit 1947 in quasiperiodischen Abständen von 7 – 9 Jahren auf. Die von LOEWE UND KOSLOWSKI (1998) diskutierten Zusammenhänge zwischen der Stärke der Eiswinter in der westlichen Ostsee und atmosphärischen Oszillationen wie NAO und QBO gelten für die Eiswinter an der deutschen Nordseeküste gleichermaßen.

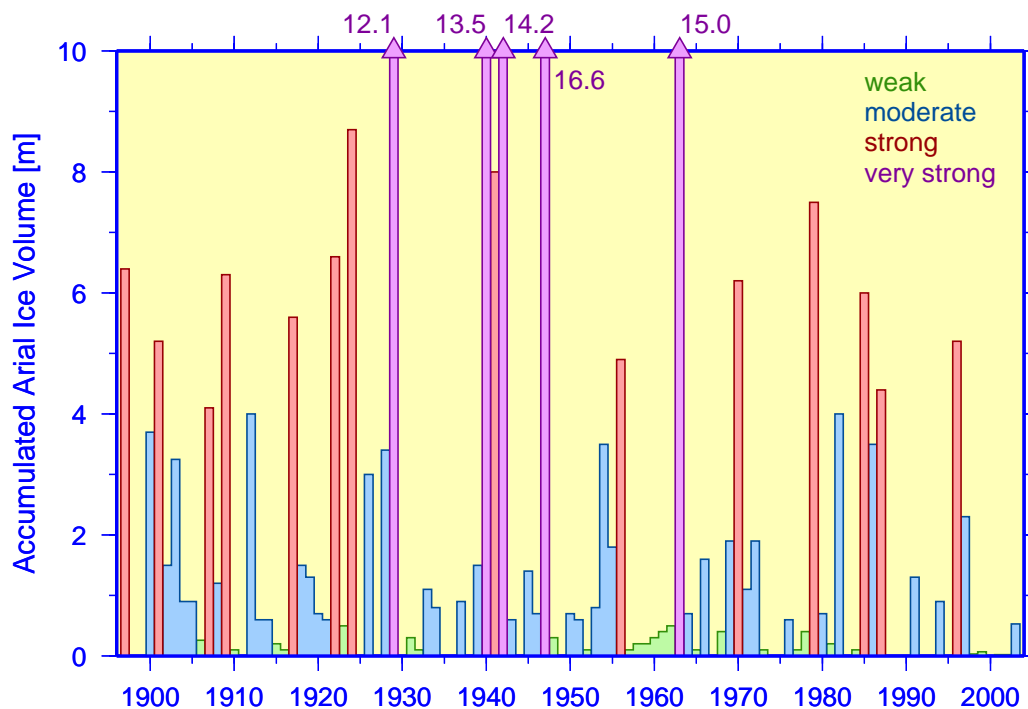


Abb. 3-33: Flächenbezogene Eisvolumensumme für die deutsche Nordseeküste im Zeitraum 1897 – 2003.

Fig. 3-33: Accumulated areal ice volume for the German North Sea coast during 1897 – 2003.

3.6.1.2 Eiswahrscheinlichkeit

Der Vereisung der Nordsee sind im Normalfall relativ enge Grenzen gesetzt. Die Eisbildung seewärts der ost- und nordfriesischen Inseln wird durch die Gezeitenströme, den hohen Warmwasservorrat und Salzgehalt der mit dem Atlantischen Ozean verbundenen Nordsee sowie die größere Wassertiefe verhindert (BLÜTHGEN 1948). Die

Eiswahrscheinlichkeit beträgt hier lediglich 2 – 5 %, was der Häufigkeit starker bis sehr starker Eiswinter im deutschen Küstengebiet entspricht. Seewärts der ost- und nordfriesischen Inselkette tritt auch in sehr kalten Wintern fast ausschließlich Treibeis wechselnder Intensität und Ausdehnung auf. In solchen Wintern ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Treibeis in den Gewässern um Helgoland in der zweiten Februar- oder ersten Märzhälfte am höchsten.

In leichten und mäßigen Wintern ist die Vereisung auf kleinere Häfen und innere Fahrwasser beschränkt. Im Wattengebiet tritt das Eis am häufigsten in der ersten und zweiten Januardekade sowie in der zweiten Februarhälfte auf. In den inneren Bereichen bildet sich vorwiegend Festeis, in Außenbereichen des Wattenmeeres wird hauptsächlich Treibeis mit Eisdicken bis zu 30 cm und Eisbrei beobachtet. Die maximalen Dicken des ebenen Eises erreichen in sehr starken Eiswintern Werte zwischen 30 und 50 cm.

3.6.2 Verlauf des Eiswinters 2002/3

Die Entwicklung des Eisvorkommens im Winter 2002/3 ist in Abb. 3-34 gemeinsam mit der Zeitserie der Lufttemperatur auf Norderney dargestellt. Die »Eiskurve« entsteht durch sukzessive Summierung des täglichen mittleren Produkts von Eisdicke und Bedeckungsgrad $h \times A$ an den 13 Eis-Klimastationen; ihr Endpunkt gibt die flächenbezogene Eisvolumensumme an (0.53 m). Ein zur Zeitachse paralleler Kurvenverlauf stellt eisfreie Zeiten dar. Zeiträume, in denen das kumulierte flächenbezogene Eisvolumen zunimmt, gehen mit Phasen negativer Lufttemperatur einher. Sie beinhalten gleichzeitig Zeitabschnitte der Eisbildung und – üblicherweise zum Ende hin – des Eisrückgangs.

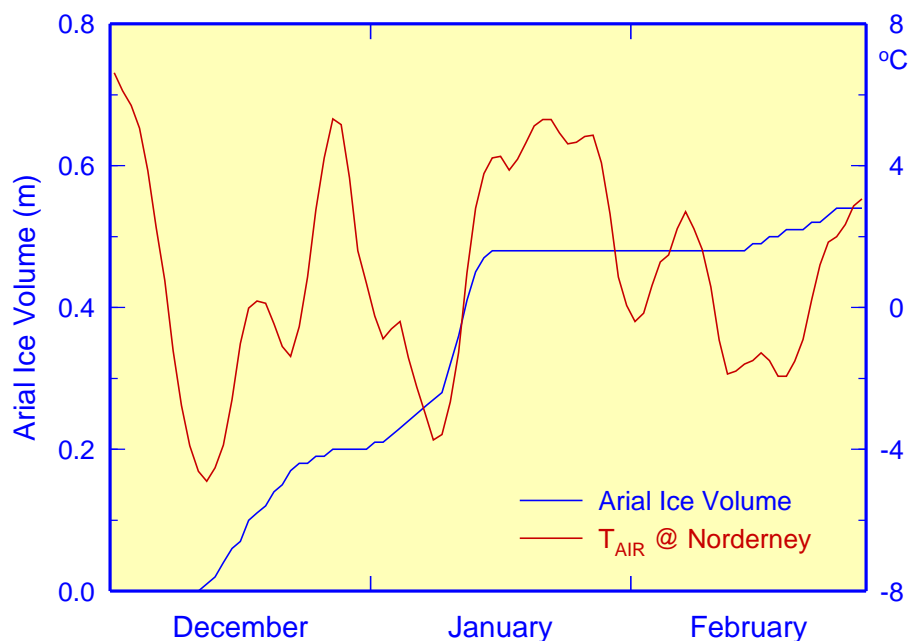


Abb. 3-34: Akkumuliertes flächenbezogenes Eisvolumen mit Pentadenmitteln der Lufttemperatur von Norderney im Winter 2002/3.

Fig. 3-34: Accumulated areal ice volume and air temperature (5-day running means) during the ice season 2002/3.

Im Verlauf des Eiswinters 2002/3 traten drei Eisperioden auf. Die intensivste Eisbildung wurde in der ersten Januarhälfte beobachtet (steiler Gradient in Abb. 3-34, Abb. 3-35).

Das erste Eis bildete sich auf der Elbe oberhalb von Glückstadt, in kleineren Häfen an der Küste und in den inneren Wattenbereichen ab 11. Dezember bei häufigen Ost- und Südostwetterlagen (vgl. Tab. 2-3, S. 33). Die Eisbildung erfasste eine Woche später die Bereiche der unteren Ems und Weser. Infolge der knapp zweiwöchigen Tauwetterperiode ab Weihnachten schmolz das zumeist lockere und dünne Eis sehr schnell, so dass zum Jahresende alle Bereiche der Nordseeküste wieder eisfrei waren (Abb. 3-35).

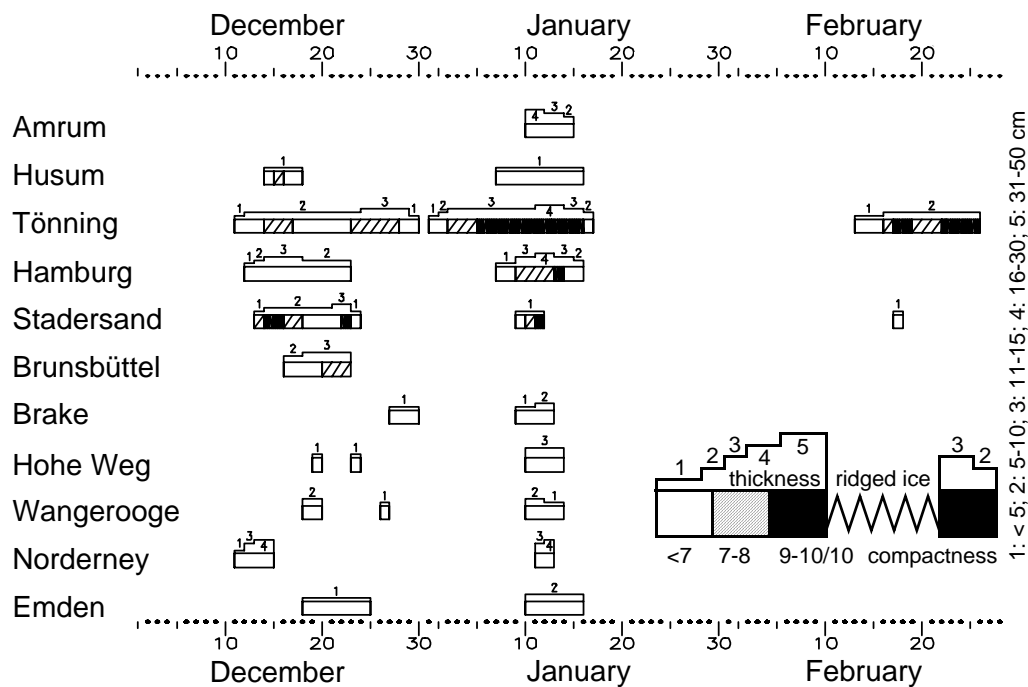


Abb. 3-35: Bedeckungsgrad und Dicke des Eises an den Eis-Klimastationen der deutschen Nordseeküste im Winter 2002/3.

Fig. 3-35: Ice concentration and thickness at the ice-climate stations along the German North Sea coast during the 2002/3 sea-ice season.

Unter Hochdruckeinfluss (vgl. Tab. 2-1, S. 32) setzte in der zweiten Januarwoche erneut Eisbildung zuerst im Hafen Tönning und in den inneren Nordfriesischen Watten, später in allen anderen Bereichen der Küste ein. In dieser Kaltphase erreichte die Vereisung der deutschen Nordseeküste ihren maximalen Stand: Die Dicken des meist lockeren Eises variierten von 5 bis 20 cm an der ostfriesischen Küste, von 5 bis 15 cm auf der Elbe unterhalb von Glückstadt und von 10 bis 30 cm oberhalb davon. An der nordfriesischen Küste war das dichte bis sehr dichte Eis 15 bis 30 cm dick. Im Nord-Ostsee-Kanal kam sehr lockeres bis lockeres 5 bis 10 cm dickes Treibeis vor. Schiffs-fahrtsbehinderungen traten vor allem im nordfriesischen Wattengebiet auf. Der Hafen Tönning war vom 6. bis 15. Januar geschlossen.

Die zur Februarmitte eingetretene dritte Kälteperiode mit gehäuften Hochdrucklagen führte für ca. 10 Tage nur an der nordfriesischen Küste zum Auftreten von dünnem Eis. Am 26. Februar war die Eissaison 2002/3 an der Nordseeküste beendet. Die läng-

ste Vereisungsdauer wiesen der Hafen Tönning und der Seebereich Eiderdamm mit 49 bzw. 56 Tagen auf. Ansonsten variierte die Anzahl der Tage mit Eis von einigen Tagen auf den Unterläufen von Elbe, Ems und Weser bis zu fünf Wochen an der nordfriesischen Küste.

Für eine umfassende Beschreibung der Eisverhältnisse im Winter 2002/3 an der deutschen Nordseeküste wird auf SCHMELZER UND STRÜBING (2004) verwiesen.

3.7 Referenzen

Beck, Ch., J. Grieser und S. Trömel, Die Trockenperiode des Jahres 2003 in Deutschland im Kontext langzeitlicher Niederschlagsvariabilität, 142-151 in: *Klimastatusbericht 2003*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 190p., 2004.

www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html

Blüthgen, J., Der Eiswinter 1946/47 in den deutschen Gewässern der Nord- und Ostsee, *Zeitschrift für Meteorologie*, Jahrgang 2, Heft 12, 1948.

Fofonoff, N. P. und R. C. Millard, Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 44, UNESCO, 53pp., 1983.

Günther, H., W. Rosenthal, M. Stawarz, J. C. Carretero, M. Gomez, I. Lozano, O. Serano, M. Reistad: The wave climate of the Northeast Atlantic over the period 1955-1994: The WASA wave hindcast, *GKSS-Forschungszentrum*, Geesthacht, 1997.

ICES, The Annual ICES Ocean Climate Status Summary 2003/2004, *ICES Cooperative Research Report*, No. 269, 32pp, 2004.

www.soc.soton.ac.uk/JRD/ICES_WGOH/reports.php

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

Jenkinson, A. und F. Collison, An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, No. 62, 18pp, UK Met Office, Bracknell, 1977.

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.

Koslowski, G., Die flächenbezogene Eisvolumensumme, eine neue Maßzahl für die Bewertung des Eiswinters an der Ostseeküste Schleswig-Holsteins und ihr Zusammenhang mit dem Charakter des meteorologischen Winters, *Dt. Hydrogr. Z.* 42, 61-80, 1989.

Koslowski, G. und R. Glaser, Reconstruction of the Ice Winter Severity since 1701 in the Western Baltic, *Clim. Change*, 31, 79-98, 1995.

Lefebvre, C., *pers. Mitt.*, 2004.

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

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., G. Becker, U. Brockmann, A. Frohse, K. Herklotz, H. Klein, A. Schulz, Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht, *Berichte des BSH*, Nr. 33, 89pp, 2003.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht33/index.jsp

- Morgan, P. P., CSIRO MatLAB Seawater Library, 2003.
www.marine.csiro.au/datacentre/processing.htm
- Müller-Navarra, S. H. und E. Mittelstaedt, Schadstoffausbreitung und Schadstoffbelastung in der Nordsee – Eine Modellstudie. *Dt. hydrogr. Z. Erg.*, B. 18, 51pp, 1987.
- 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.
- Press, W., S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, Numerical Recipes in Fortran, 2nd ed., 963pp, *Cambridge University Press*, 1992.
- Schmelzer, N. und K. Strübing, Die Eiswinter 1999/2000 bis 2003/04 an der deutschen Nord- und Ostseeküste, in: *Berichte des BSH*, Nr. 37, Hamburg und Rostock 2004.
www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht37/index.jsp
- Schrum, C., B. Martinez-Lopez, F. Siegismund, Modellierte Klimatologie von Wärmeinhalt und Salzgehalt in Nordsee und Ostsee, *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung*, Nr. 45, Hamburg, 2002.
- Schrum, C. und F. Siegismund, Modellkonfiguration des Nordsee/Ostseemodells – 40-Jahres NCEP Integration, *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung*, Nr. 44, Hamburg, 2002.
- Tomczak, G. und E. Goedecke, Monatskarten der Temperatur der Nordsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte, *Dt. hydrogr. Z. Erg.*, B. 7, 1962.
- WAMDI Group, The WAM Model – A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810, 1988.

4 Meereschemie

Der Stoffhaushalt der Nordsee wird einerseits durch natürliche Prozesse und Gleichgewichte bestimmt, wird aber auch durch menschliche Aktivitäten belastet. Über Atmosphäre und Flüsse werden Schadstoffe aus Landwirtschaft, Industrieproduktion und Verkehr in die See transportiert. Abwässer aus Kläranlagen und der direkte Abfluss von durch Dünger und Pflanzenschutzmittel verunreinigten Oberflächenwässern führt zu einem erhöhten Eintrag von Nährstoffen, Schwermetallen und naturfremden organischen Chemikalien. Hinzu kommt die zunehmende Nutzung des Meeres als Transportweg, als Erholungsraum und zur Energiegewinnung (Windenergie, Öl/Gasförderung).

Viele der freigesetzten und in die Nordsee gelangenden Verbindungen und Elemente haben lange Verweilzeiten in der marinen Umwelt. Sie werden nur schwer abgebaut und langsam aus der Umwelt entfernt. So haben sie – potenziert durch ihre Akkumulation in der Nahrungskette – hohes Potential, sich in Meereslebewesen anzureichern und negativ auf Immunsystem, Reproduktionsfähigkeit und Stoffwechsel zu wirken.

Neben den toxikologischen Aspekten der chemischen Belastung des marinen Ökosystems, kommt dem Nährstoffhaushalt des Meeres besondere Aufmerksamkeit zu. Nitrat, Nitrit, Phosphat und Silikat sind wesentliche Komponenten des natürlichen Stoffhaushaltes im Meer, ohne die biologisches Wachstum unmöglich ist. Einträge aus Landwirtschaft, Haushaltsabwässern, Verkehr und Verbrennungsprozessen führen jedoch zu einer erhöhten Primärproduktion und in Folge dessen, im ungünstigen Fall, zu Sauerstoffmangel und Veränderungen im Artenspektrum.

Voraussetzung für die Beurteilung des ökologischen Zustandes der Nordsee ist eine möglichst genaue Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der chemischen Parameter. In den folgenden Abschnitten über Nährstoffe, organische Schadstoffe, Spurenmetalle und radioaktive Stoffe wird der chemische Zustand der Nordsee im Jahr 2003 charakterisiert und die Entwicklung der chemischen Parameter durch die Untersuchung von Zeitreihen dargestellt.

4.1 Nährstoffe

4.1.1 Einführung

Die küstennahe Nordsee und speziell die Deutsche Bucht gelten neben dem nördlichen Golf von Mexiko, dem nordwestlichen Schwarzen Meer, dem östlichen Chinesischen Meer und der Ostsee als am stärksten durch Eutrophierung betroffenen Meeresgebiete der Welt (LADWIG ET AL. 2001). Änderungen in der Meeresumwelt, die in den 1970er und 1980er Jahren beobachtet wurden, sind mit angestiegenen Nährstoffkonzentrationen in Verbindung gebracht worden. Zu diesen Veränderungen zählen u. a. das Auftreten von starkem Algenwachstum (Planktonblüten) und von Sauerstoffdefiziten. Überschüssige Nährstoffe begünstigen möglicherweise auch das Wachstum toxischer Phytoplanktonarten. Deren Toxine können zum Absterben anderer auch höherer Arten führen, und beispielsweise erhebliche Schäden in Fischfarmen verursachen. Große Phytoplanktonblüten führten u. a. in den 1980er Jahren zu zwar unigiffigen, aber ausgedehnten Schaumteppichen (›Phaeocystisblüten‹) an den Stränden, deren Freizeitwert durch solche Verunreinigungen für einige Zeit vermindert war.

Der Eintrag von Nährstoffen in das Meer ist zunächst ein natürlicher Vorgang. Die Intensivierung von Landwirtschaft, Industrie und Verkehr hat jedoch seit den 1950er Jahren über mit Stickstoff- und Phosphorverbindungen erheblich verunreinigte Abwässer und atmosphärische Deposition zu einem deutlichen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen im Meer geführt.

Zur Bekämpfung der ›Eutrophierung‹ haben sich internationale Organisationen (OSPAR, HELCOM, EU) darauf verständigt, den Nährstoffeintrag auf die Hälfte desjenigen von 1985 zu reduzieren. Die europäischen Vorschriften zur Behandlung von Abwässern und zur Verwendung von phosphatfreien Waschmitteln führten zu einer Reduktion des Eintrags von Phosphor in Flüsse und Seen. Die Nutzung Nitrat-basierter Dünger hat sich in Europa seit 1980 verringert. Der Eintrag aus landwirtschaftlichen Quellen in die Flüsse ist jedoch weiterhin hoch.

Für die Primärproduktion von Phytoplankton, auf der die gesamte marine Nahrungskette basiert, sind Nährstoffe notwendig. Das Ausmaß der Biomasseproduktion wird durch die Verfügbarkeit von Nährstoffen begrenzt oder erhöht und kann im zweiten Fall zu einer Verschiebung des ›Redfield-Verhältnisses‹ führen, was wiederum Algenblüten und Toxizität nach sich ziehen kann. Die Beschreibung der Nährstoffsituation ist daher ein wichtiger Bestandteil aller Überwachungsprogramme.

Die räumliche Verteilung der Nährstoffe in der Nordsee ist keineswegs gleichförmig. Starke Konzentrationsgradienten, die sich beim Zusammenspiel von Lage und Eintragsstärke der Quellen, der Vermischung und der Strömung einstellen, treten beispielsweise im Bereich der Frontalzone der Deutschen Bucht auf. Die Nährstoffkonzentrationen des Nordseewassers unterliegen darüber hinaus einem ausgeprägten jahreszeitlichen Gang. Die höchsten Konzentrationen treten zum Ende des Winters auf, wenn der Verbrauch durch das Plankton aufgrund Lichtmangels und niedriger Temperaturen minimal und die ›Remineralisierung‹ der Biomasse des vorausgegangenen Sommers fortgeschritten ist.

Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar

Nährsalze wie **Phosphat** und anorganische **Stickstoffverbindungen** (Nitrat, Nitrit, Ammonium) sowie **Silikat** sind für das Leben im Meer von grundlegender Bedeutung. Sie sind lebensnotwendige Substanzen für den Aufbau des Phytoplanktons (der im Meer treibenden mikroskopisch kleinen einzelligen Algen), auf dessen Biomasseproduktion die gesamte marine Nahrungskette basiert. Eiweißstoffe enthalten gebundenen Stickstoff, Nukleinsäuren enthalten zusätzlich gebundenen Phosphor und Kieselalgen benötigen Silikat als Gerüstsubstanz. Da diese Spurenstoffe das Wachstum fördern, werden sie als **Nährstoffe** bezeichnet.

Kohlenstoff wird in Form von CO_2 , HCO_3^- oder (ausnahmsweise) CO_3^{2-} benötigt. Da CO_2 im Oberflächenwasser in hoher Konzentration vorliegt, wirkt Kohlenstoff kaum begrenzend. Das Carbonatsystem liefert stets die jeweils benötigte Form.

Stickstoff wird für die Synthese von Aminosäuren und Nukleinsäuren in der Form von Nitrat (NO_3^-), Nitrit (NO_2^-), Ammonium (NH_4^+) oder organischer Verbindungen aufgenommen. So lassen sich Harnstoff und Aminosäuren als bevorzugte Stickstoffquelle nutzen. Viele Bakterien können molekularen Stickstoff fixieren. Ammonium wird wegen seiner reduzierten Form zumeist bevorzugt aufgenommen, während Nitrat energetisch aufwendig durch das Enzym Nitratreduktase reduziert werden muss. Stickstoff wird gegenüber dem Kohlenstoff bei der Bildung organischer Substanzen durchschnittlich im Verhältnis 1:6.6 (Kohlenstoff) aufgenommen. In den Ozeanen ist Stickstoff das wichtigste die Produktion begrenzende Element. Nur in Küstennähe und abgeschlossenen Meeresteilen kann es zeitweilig zu einer Limitierung voll funktionsfähiger Biomasse durch Phosphor kommen, der gegenüber dem Kohlenstoff im Verhältnis 1:106 (Kohlenstoff) für die Biosynthese benötigt wird. Bei Stickstoff- oder Phosphormangel endet die Primärproduktion für einige Zeit in der Synthese von (überwiegend) Kohlenhydraten und wird schließlich stark eingeschränkt (OTT 1996).

Phosphor wird meistens als Orthophosphat (PO_4^{3-}) aufgenommen. Viele Algen können bei ausreichender Stickstoffversorgung auch Polyphosphate oder organische Phosphorverbindungen verwenden, die mit Hilfe von Phosphatasen an der Zelloberfläche hydrolysiert werden (OTT 1996).

Silikat ist eine Verbindung von Silizium und Sauerstoff (Si_xO_y), einem oder mehreren Metallen und eventuell auch Hydroxid-Ionen. Mit Silikat bezeichnet man auch die Salze des Siliziums und der Kieselsäuren. Ein Mangel an Silikat im Meerwasser verhindert das Wachstum bestimmter Phytoplanktonarten, nämlich Kieselalgen bzw. Diatomeen, die Silikate zur Ausbildung ihrer Schalen benötigen. Wenn Stickstoff oder Phosphor knapp werden, stellt Phytoplankton generell das Wachstum ein. Wird Silikat knapp, so setzt sich das Wachstum des Phytoplanktons fort, aber andere Arten treten hervor, wie nackte oder mit Zelluloseplatten beschaltete Flagellaten, zu denen auch giftige Arten gehören können.

Phytoplankton enthält die Elemente C, N und P in einem mittleren Atomverhältnis von 106:16:1. Dies wird als **Redfield-Verhältnis** bezeichnet (REDFIELD 1934). Abweichungen im N:P Verhältnis deuten auf Produktionsbegrenzung durch das jeweils im Minimum befindliche Element hin (Nährstofflimitierung). Andererseits können veränderte N:P-Verhältnisse zu Verschiebungen in der Phytoplanktonpopulation und eventuell auch zu erhöhter Toxizität bei einigen Algen führen.

Das Phytoplankton wird i. d. R. vom Zooplankton gefressen. Stirbt das Phytoplankton ab, kann es als Schwebstoff auch noch vom Zooplankton aufgenommen werden oder wird von Bakterien und benthischen Organismen verwertet. Auf diese Weise wird das organische Material unter Sauerstoffverbrauch wieder in Kohlendioxid umgewandelt und die Nährstoffe werden wieder freigesetzt. Diese Prozesse werden als **Remineralisierung** bezeichnet.

Eutrophierung bedeutet eine Anreicherung des Gewässers mit Nährstoffen, die zu einem erhöhten Pflanzenwachstum führt, welches wiederum eine unerwünschte Störung des Gleichgewichtes zwischen den Organismen und eine Beeinträchtigung der Wasserqualität zur Folge hat. Eutrophierung bezieht sich daher auf unerwünschte Effekte, die auf eine anthropogene Anreicherung mit Nährstoffen zurückzuführen sind (Eutrophierungsdefinition, im Rahmen von OSPAR abgestimmt (www.ospar.org)).

Mit zunehmender Sonneneinstrahlung im Frühjahr werden die im Wasser gelösten Nährstoffe im Rahmen der einsetzenden Primärproduktion aufgenommen. Sobald einer der Nährstoffe aufgezehrt ist, begrenzt dieser Stoff das weitere Wachstum: Er wird zum ›limitierenden Faktor‹. Die Biomasse bleibt dann auf dem bestehenden Niveau im dynamischen Gleichgewicht von Aufbau und Zerfall. Während die Nährstoffverteilungen im Winter von hydrographischen Einflüssen dominiert werden, treten in der Vegetationsperiode biogeochemische Faktoren hinzu, die oft diese beherrschende Stellung übernehmen.

4.1.2 Winter 2003

4.1.2.1 Zentrale und nördliche Nordsee

Die meisten Nährstoff-Messungen im Rahmen des ICES/YFS (Young Fish Survey) im Winter 2003 wurden von deutscher Seite (Walther Herwig) in der zentralen und nördlichen Nordsee durchgeführt.

Im Winter erreichten die Konzentrationen von Phosphat bis $0.7 \mu\text{mol/L}$ im nordatlantischen Einstrom und kontinentalen Küstenwasser, diejenigen von Silikat 3 bis $4 \mu\text{mol/L}$. Im Atlantikwasser, das mit Temperaturen um 9°C über den nördlichen Rand einströmte und mit Salzgehalten > 35 bis etwa 56°N vordrang (vgl. Abb. 3-28, S. 88), lagen die Nitratkonzentrationen zwischen 12 und $13.5 \mu\text{mol/L}$ (Abb. 4-1). Im Bereich, der von der flachen Doggerbank mit ihrer durchgehenden Netto-Primärproduktion beeinflusst wird, gingen die Nitratwerte auf 6 bis $7 \mu\text{mol/L}$ zurück, denn dort werden die Nährsalze auch im Winter verbraucht. Nitrit als Zwischenprodukt des Stickstoffkreislaufes erreichte selten Werte oberhalb $0.1 \mu\text{mol/L}$. In der flacheren südlichen Nordsee wurden jedoch als Folge des starken Austausches mit dem Sediment und seiner spezifischen Umsetzungsprozesse – u. a. der Nitrifizierung hoher Ammoniumkonzentrationen und der Denitrifikationsprozesse – deutlich höhere Konzentrationen bis zu $0.5 \mu\text{mol/L}$ angetroffen. In der Wassersäule war Ammonium bereits weitgehend nitrifiziert und erreichte generell nur Konzentrationen unter $1 \mu\text{mol/L}$ (Abb. 4-1). Allerdings traten im Bodenwasser des Fladengrundes erhöhte Werte (bis $2 \mu\text{mol/L}$) auf, die möglicherweise durch die dort noch anhaltende Remineralisierung saisonal sedimentierter Biomasse gebildet wurden.

Die Silikatkonzentrationen haben, außer im Gebiet der Doggerbank, um ca. 20 % gegenüber den im Nährsalzatlas von BROCKMANN UND TOPCU (2001) publizierten langjährigen Mittelwerten für den Zeitraum 1980 – 2000 abgenommen. Auch Phosphat und Nitrat gingen in der nördlichen Nordsee zurück, allerdings nur in der Größenordnung von wenigen Prozenten, während sie im Bereich der Doggerbank um ca. 10 % zunahmen. Die Nettoproduktion über der Doggerbank fiel demnach im Winter 2003 geringer als im Mittel aus, während die saisonale Remineralisierung von Silikat vermutlich noch nicht abgeschlossen war. Diese These wird gestützt durch unternormale Silikatkonzentrationen im Oberflächen- und Bodenwasser der südöstlichen Nordsee im Spätsommer des Vorjahres.

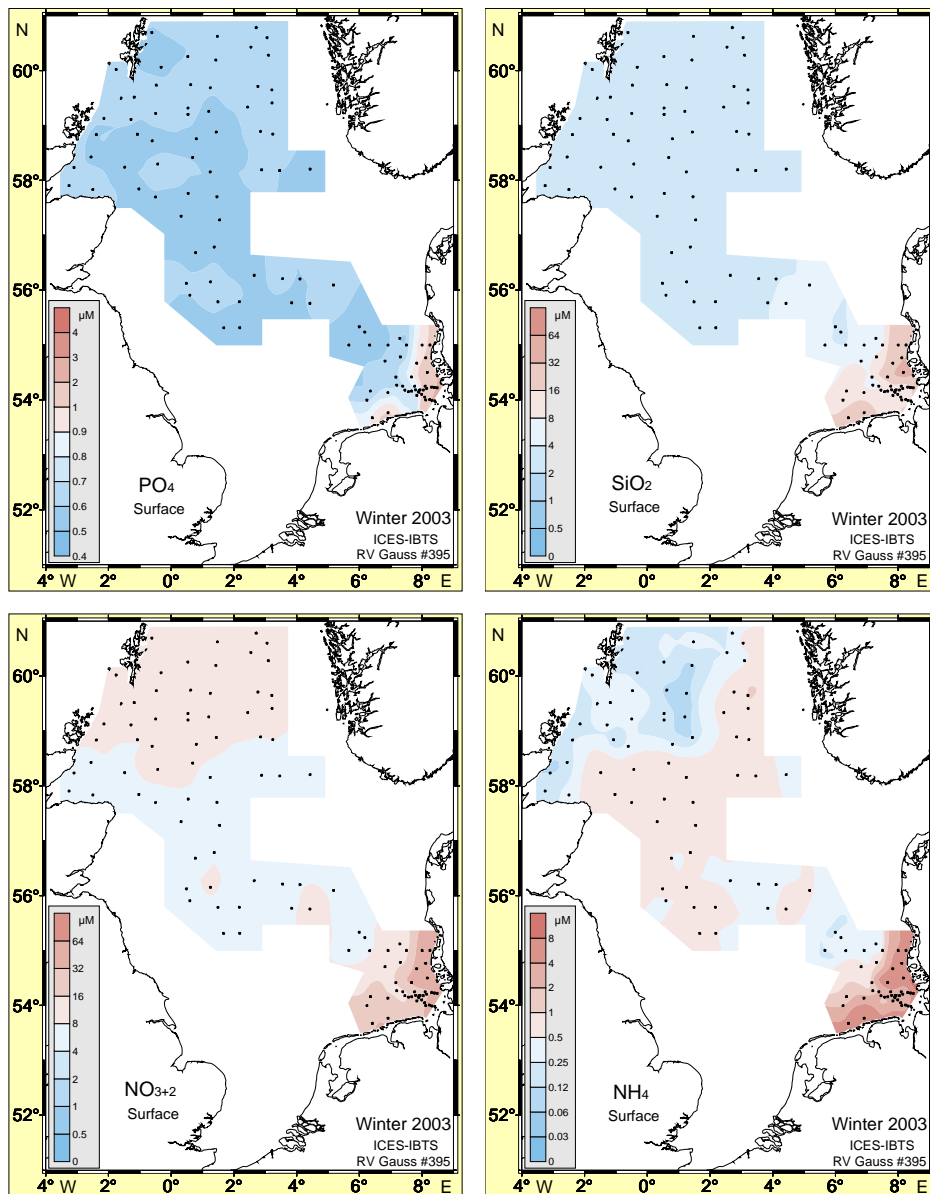


Abb. 4-1: Phosphat, Silikat, Nitrat & Nitrit und Ammonium Verteilungen ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächenwasser im Winter 2003; \log_2 -Farbskala beachten (außer für PO_4).

Fig. 4-1: Phosphate, Silicate, Nitrate & Nitrite, and Ammonium distributions ($\mu\text{mol/L}$) in surface water in winter 2003. Note \log_2 color scale (except for PO_4).

4.1.2.2 Deutsche Bucht

Die jährliche winterliche Nährstoffüberwachung der Deutschen Bucht wurde vom BSH mit FS Gauss (Reise #395) vom 23. Januar bis zum 3. Februar durchgeführt. Die Beprobung erfolgte im oberflächennahen, mittleren und bodennahen Bereich der Wassersäule. Da das Wasser generell durchmischt war, ergaben sich keine relevanten Unterschiede zwischen den Messergebnissen der verschiedenen Tiefenniveaus.

Die räumlichen Verteilungen der Nährstoffkonzentrationen sind in Abb. 4-2 wiedergegeben. Auf Grund der Konzentrationsgradienten beim SiO_2 und NO_{2+3} im Bereich der Frontalzone wurden in der Isoplethendarstellung irreguläre Farbindervalle benutzt; die Skalierung wechselt beim Übergang von blau nach rot ($20 \mu\text{mol/L}$) und ab $100 \mu\text{mol/L}$.

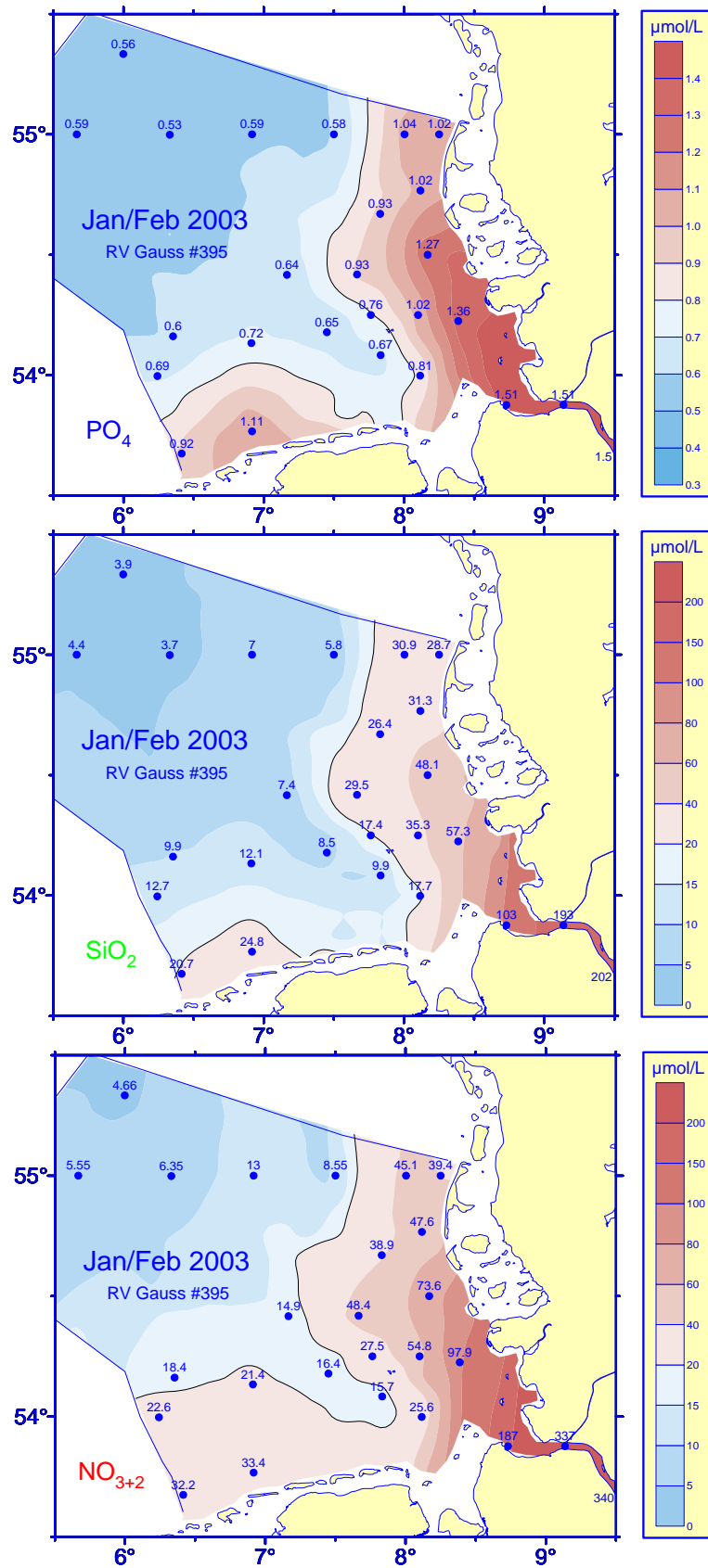


Abb. 4-2: Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit in der Deutschen Bucht im Januar 2003.

Fig. 4-2: Phosphate, silicate, nitrate and nitrite in the German Bight in January 2003.

Im Küstenbereich lagen die Nährstoffkonzentrationen auch im Winter 2003 deutlich höher als in der zentralen Nordsee. Besonders Weser und Elbe brachten erhebliche Schweb- und Nährstofffrachten in das Wattenmeer und das vorgelagerte flache Küstenwasser. Bei auflandigen Winden breiteten sich die nährstoffreichen Flussfahnen über weite Strecken direkt ins Wattenmeer aus.

Die Nährstoffverteilungen von Phosphat, Silikat und Stickstoff (*Abb. 4-2*) ergeben sich aus dem Zusammenspiel der Eintragsstärke der Flüsse, der Richtung des Nettotransports und der fortschreitenden Verdünnung. Diese hochvariablen Einflussgrößen integrieren sich in der Salzgehaltsverteilung (*Abb. 3-28, S. 88*), welche deshalb in mittelbarem engen Zusammenhang zu den Nährstoffverteilungen steht. Der Zusammenhang kommt in einer starken inversen linearen Korrelation zum Ausdruck und lässt sich für zwischenjährige Vergleiche und Trendschätzungen nutzen (KÖRNER UND WEICHART 1991).

Dazu werden die auf den winterlichen Überwachungsfahrten bestimmten Nährstoffkonzentrationen auf den Salzgehalt regressiert. Für durch den Salzgehalt S charakterisierte Wassermassen lassen sich dann typische Nährstoffkonzentrationen aus den jeweiligen Regressionsgeraden als Ordinatenwerte zu S abschätzen. Gleichzeitig wird als Maß für die Streuung der jeweiligen Nährstoffkonzentrationen (Phosphat, Silikat etc.) um die Ausgleichsgerade ein Standardschätzfehler (SSF) angegeben, der analoge Eigenschaften wie die Standardabweichung besitzt. Demzufolge bedeutet die im Folgenden verwendete Fehlerangabe von ± 2 SSF, dass 95 % der gemessenen Konzentrationen (unabhängig von S) in das durch die beiden (zur Regressionsgeraden parallelen) Geraden $aS + b \pm 2$ SSF definierte Gebiet fallen.

Mit Hilfe der beschriebenen Methode wurden die im Winter 2003 gemessenen Nährstoffkonzentrationen für Salzgehalte von 30 und 33 geschätzt, welche charakteristisch für das bis eben vor die friesischen Inseln sich ausbreitende Küstenwasser ($S = 30$) und die Wassermasse der eigentlichen Deutschen Bucht sind (vgl. *Abb. 4-3*). Für das Küstenwasser ($S = 30$) ergab sich eine Phosphatkonzentration von $0.94 \mu\text{mol/L}$ mit einem Schätzfehler (95 %) von $\pm 0.10 \mu\text{mol/L}$. Die entsprechende Silikatkonzentration betrug $26.9 \pm 4.0 \mu\text{mol/L}$, während die Summenkonzentration der löslichen Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit und Ammonium) $47.3 \pm 4.9 \mu\text{mol/L}$ erreichte. Für den Salzgehalt 33, der im überwiegenden Teil der Deutschen Bucht vorherrscht, wurde der Phosphatgehalt auf $0.68 \pm 0.10 \mu\text{mol/L}$, die Silikatkonzentration auf $10.8 \pm 4.0 \mu\text{mol/L}$, die Summenkonzentrationen der Stickstoffverbindungen mit $19.1 \pm 4.9 \mu\text{mol/L}$ abgeschätzt.

Eine Bewertung der langzeitlichen Entwicklung der Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht ist anhand von *Abb. 4-4* möglich, die für den Salzgehalt 30 geschätzte winterliche Konzentrationen von Phosphat, Silikat sowie Nitrat und Nitrit im Zeitraum 1978 – 2003 zeigt. Für Phosphat und Silikat sind darüber hinaus Referenzkonzentrationen aus dem Jahr 1936 angegeben, als die Landwirtschaft noch extensiv – d.h. ohne größeren Einsatz von Mineraldünger und ohne intensive Viehhaltung – betrieben wurde.

Die Phosphatkonzentrationen zeigen trotz zeitweilig starker zwischenjährlicher Schwankungen eine Abnahme seit Beginn der 1990er Jahre, die sich jedoch in der jüngsten Zeit nicht fortzusetzen scheint. Im Winter 1978 lag die Konzentration mit $2.40 \pm 0.52 \mu\text{mol/L}$ noch viermal so hoch wie 1936 ($0.56 \pm 0.14 \mu\text{mol/L}$). Im Winter 2003 hingegen wurde die Referenzkonzentration nur noch um ca. 70 % überschritten.

Die Gesamtkonzentration von Nitrat und Nitrit ist trotz starker Schwankungen von Jahr zu Jahr ebenfalls seit Beginn der 1990er Jahre rückläufig. Eine Referenzkonzentration für das Jahr 1936 liegt nicht vor.

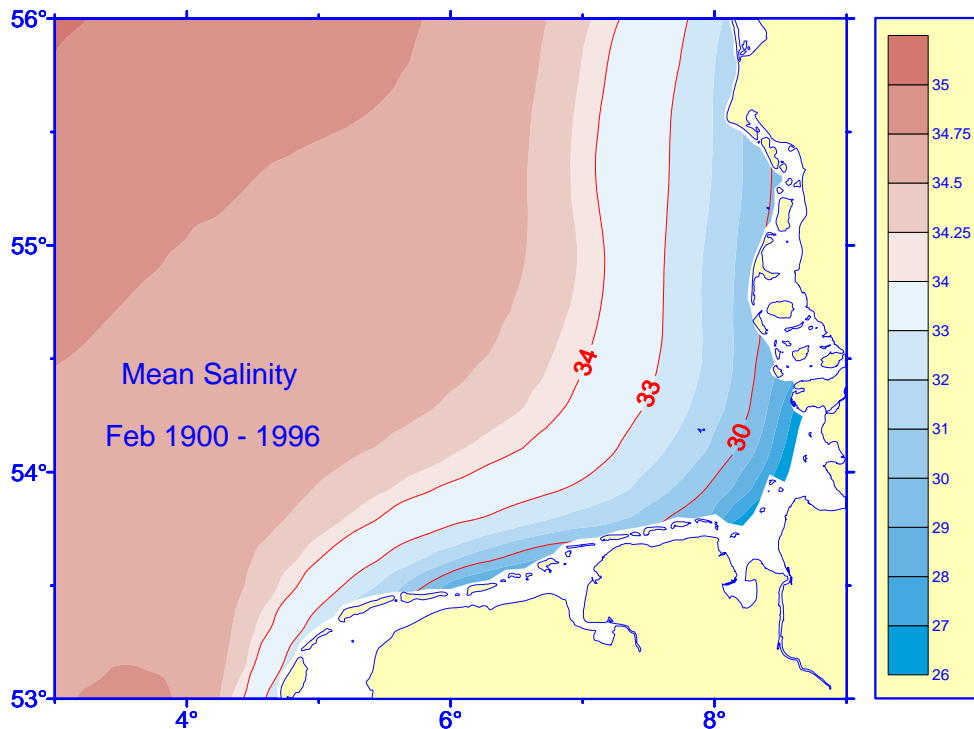


Abb. 4-3: Klimatologische Salzgehaltsverteilung (1900 – 1996) in der Deutschen Bucht (nach JANSSEN ET AL. 1999).

Fig. 4-3: Long-term mean salinity distribution (1900 – 1996) in the German Bight (after JANSSEN ET AL. 1999).

Auch die winterlichen Silikatkonzentrationen unterliegen einer starken zwischenjährlichen Variabilität. Während die geschätzten Konzentrationen von 1993 bis 1996 im Bereich des Referenzwertes für 1936 von $18.5 \pm 2.9 \mu\text{mol/L}$ lagen, wurde in den Folgejahren eine Zunahme bis auf gegenwärtig $26.9 \pm 4.0 \mu\text{mol/L}$ beobachtet.

Während die Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser die Referenzwerte von 1936 immer noch überschreiten, sind die Phosphat- und Silikatkonzentrationen im Wasser der eigentlichen Deutschen Bucht (Salzgehalt 33) inzwischen von entsprechenden Vergleichswerten nicht mehr signifikant verschieden. Für die Gesamtkonzentration von Nitrat und Nitrit liegt auch bei einem Salzgehalt von 33 kein Referenzwert aus dem Jahr 1936 vor.

Während die Phosphatkonzentrationen in der Deutschen Bucht nicht mehr vom Niveau der Vorkriegszeit entfernt sind, liegen sie im Küstenbereich noch deutlich oberhalb dieses Niveaus. Die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen, für die es keine Referenzwerte gibt, sind zwar rückläufig, diese Verbindungen leisten jedoch unverändert den höchsten Beitrag zur Gesamtnährstoffbelastung. Die Silikatkonzentrationen werden durch industrielle oder landwirtschaftliche Aktivitäten kaum beeinflusst.

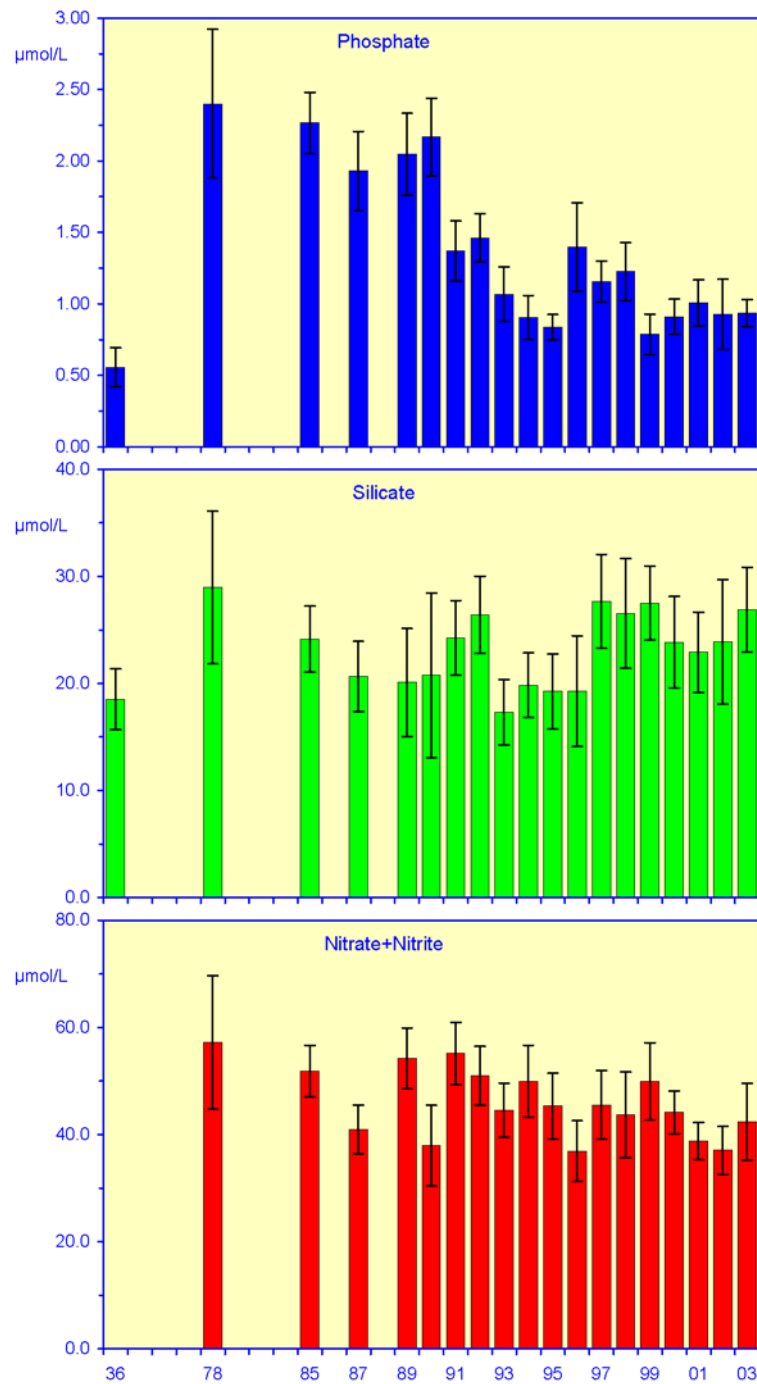


Abb. 4-4: Zeitserien der geschätzten winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (Salzgehalt 30) mit Standardschätzfehlerbalken (95 %) und Referenzwerten von 1936, soweit verfügbar.

Fig. 4-4: Time series of wintry nutrient concentrations estimated for salinity 30, typical of coastal waters in the German Bight. Standard errors of estimate given as 95%-bars. Reference concentrations from 1936 only shown where available.

4.1.3 Sommer 2003

Während der FS Gauss Reise #405 (28. 7. – 13. 8. 2003) wurde ein umfangreicher Datensatz gewonnen. Neben anorganischen Nährsalzen wurden weitere Parameter analysiert, wie gelöster Sauerstoff, Chlorophyll-a und Wassertrübung (als Maß für Schwebstoffkonzentrationen). Eine weitere Überwachungsfahrt wurde mit FS Gauss vom 8. 9. – 17. 9. 2003 zur Aufnahme von Sauerstoffdefiziten in der Deutschen Bucht durchgeführt (Reise #406).

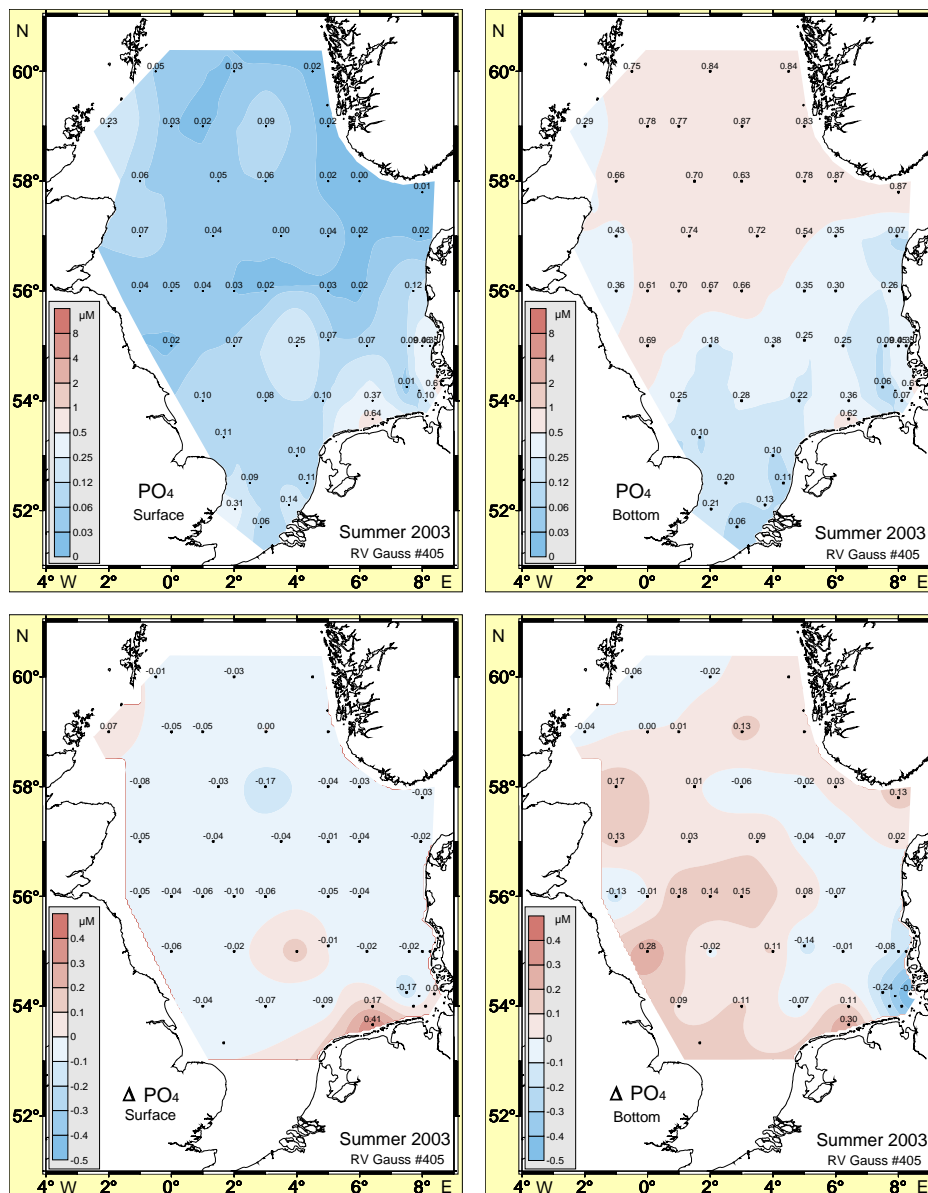


Abb. 4-5: Phosphatkonzentrationen ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003 (oben, \log_2 -Farbskala beachten) mit Abweichungen von langjährigen Mittelwerten (1980 – 2001).

Fig. 4-5: Phosphate concentrations ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003 (top, note \log_2 color scale) and departures from long-term means (1980 – 2001).

Die Gradienten von Temperatur, Salzgehalt und Nährstoffen im Sommer 2003 weisen starke Ähnlichkeiten auf, und zwar sowohl untereinander als auch im Vergleich mit denjenigen der vorangegangenen drei Jahre. Dieser Umstand belegt eine relative Beständigkeit der unterschiedlichen regionalen Prozesse und deren Reichweiten. Die tiefenabhängige Stabilität der vertikalen Schichtung kontrolliert den Nährsalzaustausch zwischen der im Sommer infolge der Planktonproduktion an Nährstoffen verarmten Deckschicht und dem nährstoffreicheren Bodenwasser.

4.1.3.1 Phosphat

Die Phosphatkonzentrationen (*Abb. 4-5*) im Oberflächenwasser der tieferen östlichen Nordsee lagen zumeist um ca. $0.03 \mu\text{mol/L}$ niedriger als im Sommer des Vorjahres, denn die höheren Oberflächentemperaturen begünstigten hier intensivere Umsätze. Im Bodenwasser der flachen südlichen Nordsee traten infolge häufiger vertikaler Durchmischung verminderte Konzentrationen auf, die oft $0.25 \mu\text{mol/L}$ unterschritten. Die in die euphotische Zone eingetragenen Nährsalze wurden ebenso wie die lateralen Einträge aus den Abflüssen zur Deutschen Bucht schnell vom Phytoplankton aufgenommen wie auch die lokalen Einträge im Bereich der Deutschen Bucht. Im Gegensatz hierzu blieben die Nährsalzkonzentrationen im Tiefenwasser aus dem Atlantik bzw. unterhalb einer stabilen Dichtesprungschicht hoch oder nahmen durch die Remineralisierung von aus der Deckschicht sedimentierter Biomasse sogar zu.

Im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten des Spätsommers (BROCKMANN UND TOPCU 2001) erhöhten sich die Phosphatwerte im Bodenwasser der zentralen Nordsee um bis $0.2 \mu\text{mol/L}$; lediglich stellenweise wurde eine Abnahme um $0.1 \mu\text{mol/L}$ festgestellt (*Abb. 4-5*). Im Bereich der Elbmündung wurde allerdings infolge der verminderten Phosphoreinträge ein deutlicher Rückgang der Konzentrationen um über $0.2 \mu\text{mol/L}$ beobachtet. Die Phosphat-Konzentrationen im Oberflächenwasser blieben weiträumig um $0.04 \mu\text{mol/L}$ unter den langjährigen Mittelwerten; im kontinentalen Küstenwasser waren sie allerdings punktuell erhöht. Die Verminderung der Phosphateinleitungen hat sich demnach bislang nur sehr kleinräumig ausgewirkt.

4.1.3.2 Nitrat

Infolge der unternormalen Abflussraten der Elbe (*Abb. 3-30, S. 91*) fielen die Nitratkonzentrationen im Sommer 2003 im Vergleich zu den Vorjahren im Küstenwasser sehr niedrig aus (*Abb. 4-6*). Im Oberflächenwasser der zentralen und nördlichen Nordsee wurden hingegen verglichen mit den Vorjahresverhältnissen erhöhte Konzentration von $0.1 - 0.2 \mu\text{mol/L}$ angetroffen (Loewe et al. 2003). Die Nitrat/Phosphat-Verhältnisse blieben generell unter 10, so dass bei Redfield-Verhältnissen von 16 von einer Stickstofflimitierung für das Phytoplankton auszugehen ist. Die Stickstoffverarmung der flachen südlichen Nordsee wird ähnlich wie in vorausgehenden Sommern an den geringen Nitratkonzentrationen des Bodenwassers von $< 0.5 \mu\text{mol/L}$ deutlich (*Abb. 4-6*). Dies trifft auch auf die Doggerbank und Gebiete in deren Strömungs-Lee zu, denn in den wegen der geringen Wassertiefe stabilen euphotischen Zonen werden Nährsalze vom Phytoplankton ständig entnommen.

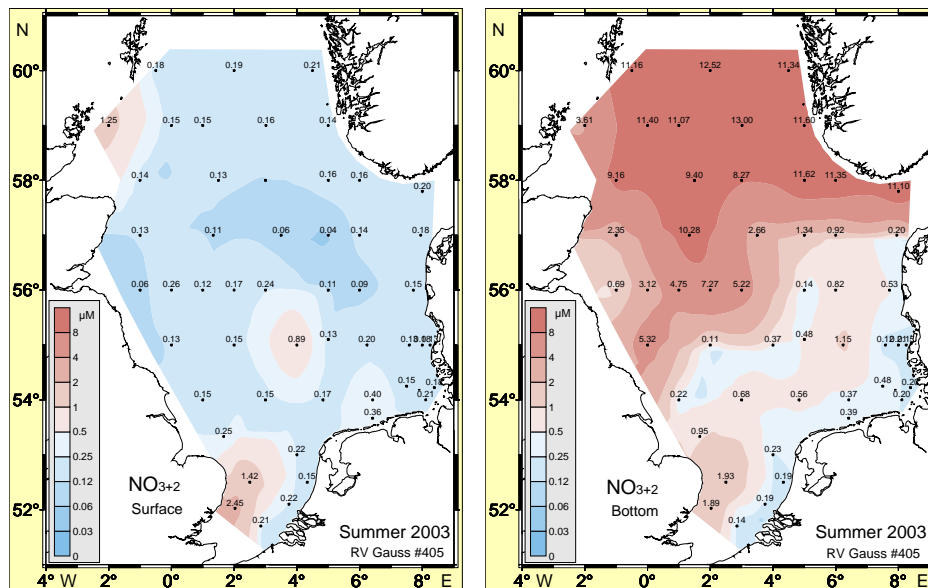


Abb. 4-6: Nitrat & Nitrit ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003; \log_2 -Farbskala beachten.

Fig. 4-6: Nitrate & Nitrite concentrations ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003; note \log_2 color scale.

4.1.3.3 Ammonium

Die schnelle und umfassende Remineralisierung aus der Deckschicht sedimentierter Biomasse ist im Bodenwasser der zentralen Nordsee an den hohen Konzentrationen des Ammoniums von über $2 \mu\text{mol/L}$ direkt erkennbar (Abb. 4-7). Dieses Seegebiet der Nordsee zeichnet sich durch die längsten Austauschzeiten aus (LENHART UND POHLMANN 1997). Im Bodenwasser der überwiegend durchmischten flachen Küstengewässer der Deutschen Bucht wurden ähnlich hohe Ammonium-Konzentrationen vorgefunden, die auf eine entsprechend effiziente Remineralisierung hinweisen.

Im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten des Spätsommers (BROCKMANN UND TOPCU 2001) haben die Ammoniumkonzentrationen im Oberflächenwasser großräumig abgenommen, während diejenigen im Bodenwasser der zentralen und südlichen Nordsee um etwa $1 \mu\text{mol/L}$ zunahmen (Abb. 4-7). In den nordwestlichen Seegebieten ($57^\circ - 59^\circ \text{N}$) reduzierten sich die Konzentrationen im Bodenwasser hingegen um $3 \mu\text{mol/L}$. In den Vorjahren (2000 – 2002) waren auch in diesem Gebiet erhöhte Ammoniumwerte festgestellt worden. Auch in der östlichen Nordsee nahmen die bodennahen Konzentrationen ab. Der extreme Rückgang vor der Elbmündung und in der inneren Deutschen Bucht erklärt sich aus den geringen Frischwasserabflussraten (s. o.) und dem generellen Rückgang der Ammoniumkonzentrationen in der Elbe.

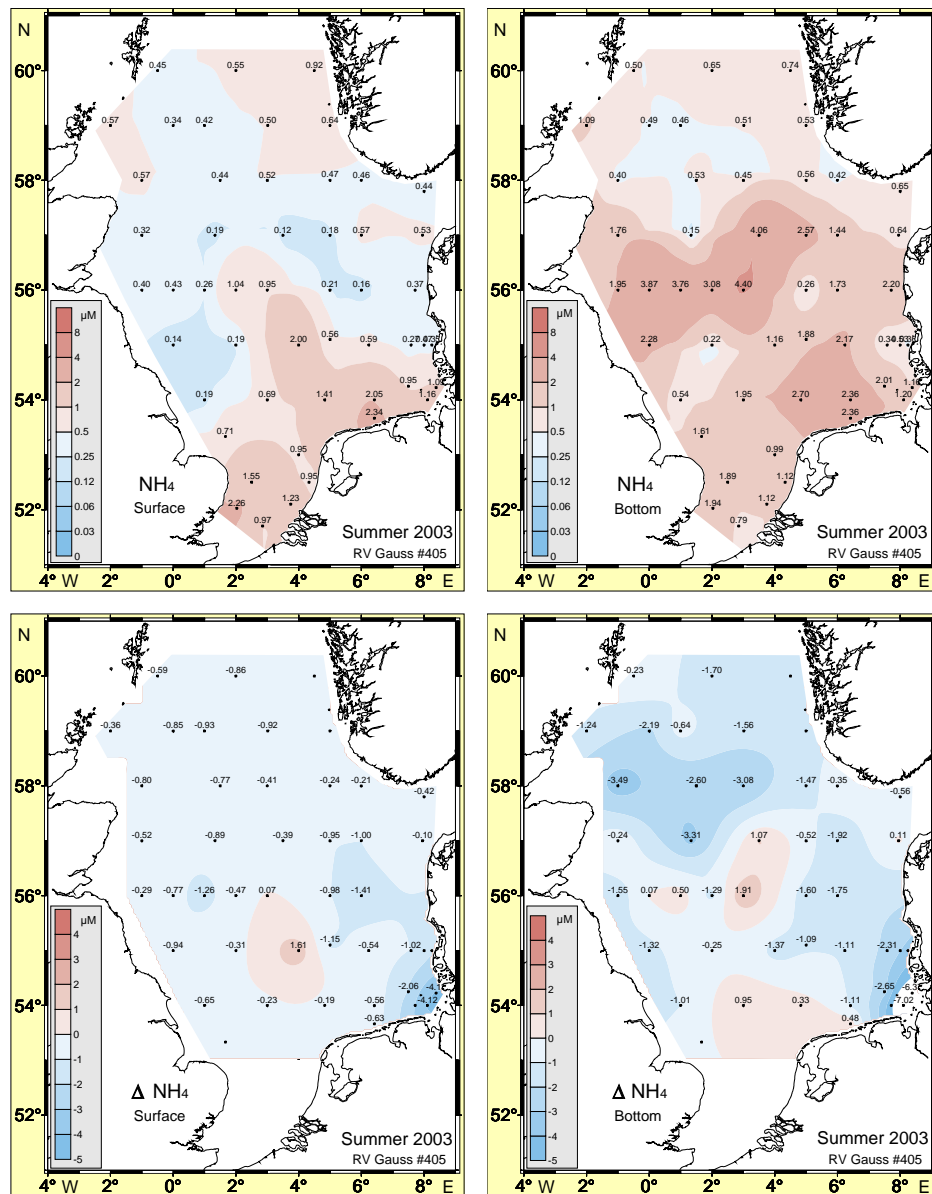


Abb. 4-7: Ammoniumkonzentrationen ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003 (oben, \log_2 -Farbskala beachten) mit Abweichungen von langjährigen Mittelwerten (1980 – 2001).

Fig. 4-7: Ammonium concentrations ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003 (top, note \log_2 color scale) and departures from long-term means (1980 – 2001).

4.1.3.4 Chlorophyll / Trübung

Im Sommer 2003 wies die zentrale Nordsee wieder eine stabile thermohaline Schichtung auf (vgl. Abb. 3-20, S. 78 und Abb. 3-29, S. 90). Die Nährstoffarmut der Deckschicht, die bis ca. 20 m Tiefe reichte, wird anhand eines Vertikalschnitts bei 56°N illustriert (Abb. 4-8).

Sowohl Phosphat ($< 0.05 \mu\text{mol/L}$) als auch Nitrat ($< 0.2 \mu\text{mol/L}$) dürften in der Deckschicht das Phytoplanktonwachstum begrenzt haben. Die Stickstofflimitierung wird durch geringe Nitrat/Phosphat-Relationen ($< 10 \text{ M/M}$, normal: 16) und Nitrat/Silikat-

Verhältnisse (< 0.5 M/M, normal: 1) indiziert. Das Chlorophyllmaximum wurde deshalb im Bereich der Dichtesprungschicht angetroffen, wo einerseits die Nährsalzkonzentrationen anstiegen und andererseits (bei gemessenen Sichttiefen von 10–18 m) noch ausreichende Lichtbedingungen herrschten (Abb. 4-9).

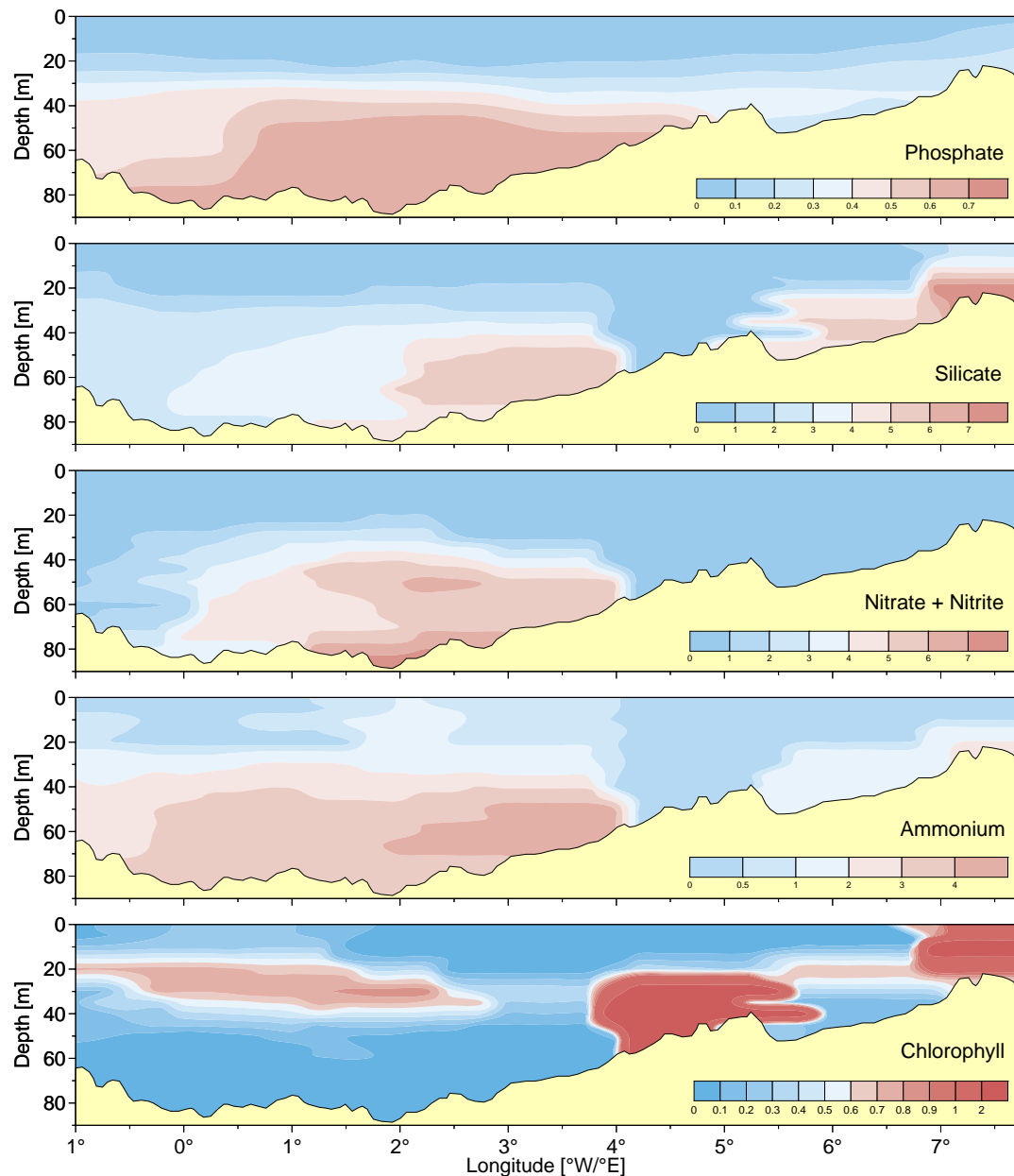


Abb. 4-8: Vertikalverteilungen von Phosphat, Silikat, Nitrat & Nitrit, Ammonium ($\mu\text{mol/L}$) und Chlorophyll ($\mu\text{g/L}$) entlang 56°N im Sommer 2003 (FS Gauss, Reise #405).

Fig. 4-8: Vertical profiles of phosphate, silicate, nitrate & nitrite, ammonium ($\mu\text{mol/L}$) and chlorophyll ($\mu\text{g/L}$) along 56°N in summer 2003 (RV Gauss, cruise #405).

Die Schwebstoffkonzentrationen, gemessen als Trübung, lagen oberhalb des Chlorophyllmaximums meistens unter 0.1 NTU (nephelometric turbidity units) und unterhalb davon oft über 0.2 NTU, da das Phytoplankton selbst trübungsverstärkend wirkt. In der zentralen Nordsee war die Trübung im Oberflächenwasser am geringsten (< 0.1 NTU, Abb. 4-10) und die Sichttiefe am größten (> 14 m, Abb. 4-9). Auch die Tie-

fen maximaler Chlorophyll-Konzentration erreichten hier Extremwerte von > 30 m (Abb. 4-9). In diesen grossen Wassertiefen lagen die Konzentrationen von Phosphat oberhalb $0.2 \mu\text{mol/L}$, von Silikat oberhalb $1 \mu\text{mol/L}$; die Nitrat-Konzentrationen überschritten in der nordwestlichen Nordsee $1 \mu\text{mol/L}$, während sie in der südöstlichen Nordsee unter $0.5 \mu\text{mol/L}$ blieben. Daher dürfte an der Dichtesprungschicht häufig das eindringende Licht der das Wachstum begrenzende Faktor gewesen sein, wenn die Beweidung durch das Zooplankton, die nicht untersucht wurde, außer Acht bleibt.

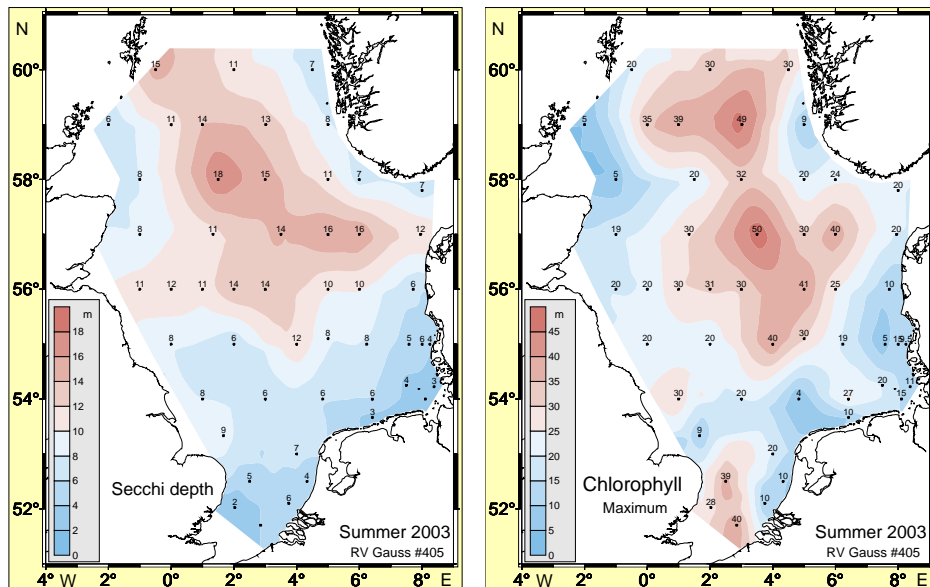


Abb. 4-9: Sichttiefe und Tiefe (m) der maximalen Chlorophyllkonzentration im Sommer 2003.

Fig. 4-9: Secchi depth and depth (m) of maximum chlorophyll concentration in summer 2003.

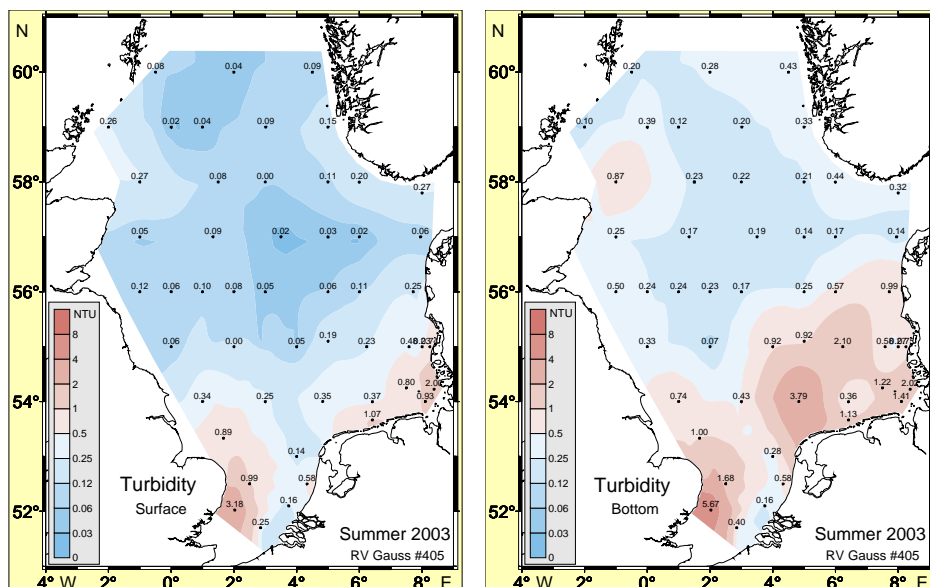


Abb. 4-10: Wassertrübung (NTU) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003; \log_2 -Farbskala beachten.

Fig. 4-10: Turbidity (NTU) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003; note \log_2 color scale.

4.1.3.5 Sauerstoff

Gebiete mit Sauerstoffzehrung im Bodenwasser wurden vor allem in der östlichen Nordsee festgestellt (Abb. 4-11). Die maximale Untersättigung lag hier bei 60 %. Im Sommer 2002 trat kein ausgedehnter Sauerstoffmangel auf (LOEWE ET AL. 2003), wenn von einem regionalen Minimum im Skagerrak abgesehen wird, das dort auch im Sommer 2001 beobachtet worden war.

Sowohl bei der oxidativen Desaminierung wie bei der Nitrifizierung des freigesetzten Ammoniums wird Sauerstoff verbraucht. Dies würde für eine räumliche Nähe von Ammoniummaxima und Sauerstoffminima sprechen. Tatsächlich wurde eine räumliche Trennung maximaler Ammoniumkonzentrationen (vgl. Abb. 4-7, S. 113) und minimaler Sauerstoffkonzentrationen beobachtet, die bei gekoppelten Abbauprozessen nicht zu erwarten ist und weiterer Untersuchungen bedarf. Als aufschlussreich könnte sich z. B. die Bestimmung von gelöstem und partikulärem organischen Kohlenstoff erweisen, da allein die Oxydation dieser Verbindungen bereits die Bildung von Sauerstoffminima bewirken könnte.

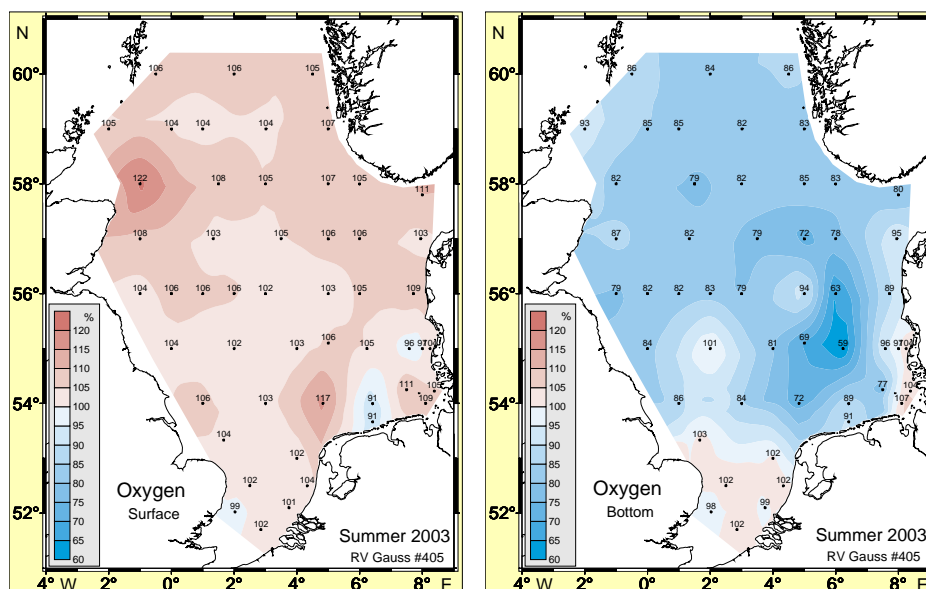


Abb. 4-11: Sauerstoffsättigung (%) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003.

Fig. 4-11: Oxygen saturation (%) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003.

Infolge gehäufte ruhiger Hochdrucklagen im Sommer 2003 bildete sich im tieferen Wasser der Deutschen Bucht ab Juni eine ungewöhnlich starke Temperaturschichtung aus (vgl. Abb. 3-21, S. 79). Durch die Stabilität der Schichtung wurde die vertikale Sauerstoffzufuhr unterbunden, so dass sich die Sauerstoffsättigungswerte im Bodenwasser bereits Anfang August im Gebiet der Weißen Bank auf 46 – 60% verringerten und bis Anfang September weiter auf 38 % absanken.

Mit den ersten Herbststürmen wurde die Schichtung schnell aufgebrochen und das Sauerstoffdefizit behoben. Die küstennahen Gebiete der Deutschen Bucht und das Wattenmeer waren von der Sauerstoffzehrung nicht betroffen. Durch die Bodenreibung des Gezeitenstroms wird die Temperaturschichtung hier immer wieder aufgelöst und atmosphärischer Sauerstoff eingetragen.

4.1.4 Nährstoffdynamik bei Helgoland

Die Konzentrationen der Nährstoffe Silikat, Phosphat, Ammonium, Nitrat und Nitrit werden bei Helgoland Reede an jedem Werktag nass chemisch bestimmt, so dass inzwischen lange hochaufgelöste Zeitserien vorliegen. In diesem Beitrag wird die saisonale Entwicklung der Konzentrationen für die genannten Stoffe im Jahr 2003 dokumentiert und mit mittleren Jahresgängen für die Zeiträume 1990 – 1999 sowie 2000 – 2002 verglichen (*Abb. 4-12*).

Die monatlichen Silikatkonzentrationen rangierten im Jahr 2003 zwischen saisonalen Extremwerten von 0.6 $\mu\text{mol/L}$ im Juni und 7.4 $\mu\text{mol/L}$ im September (*Abb. 4-12*). Das sekundäre Maximum im März fiel deutlich flacher aus als in beiden mittleren Jahresgängen, in denen zu dieser Zeit die höchsten Konzentrationen auftreten. Die Konzentrationen für die Periode 2000 – 2002 sind gegenüber denjenigen des Zeitraums 1990 – 1999 generell und erheblich geringer. Dieser Trend setzte sich zwar in der ersten Jahreshälfte 2003 fort, kehrte sich jedoch im Verlauf des sehr warmen Sommers um (vgl. *Abb. 3-16, S. 70*), so dass die Silikatkonzentrationen im September und Oktober eher im Bereich der mittleren Verhältnisse der 1990er Jahre lagen.

Die mittleren Ammoniumkonzentrationen im Zeitraum 2000 – 2002 lagen in allen Jahreszeiten klar unterhalb derjenigen der 1990er Jahre. Gleichzeitig wurde in jüngster Zeit der saisonale Konzentrationsanstieg im Herbst nicht mehr beobachtet, sondern durch ein Extremum im Juni ersetzt, welches im Jahr 2003 allerdings ausblieb (*Abb. 4-12*). Stattdessen ereignete sich im Spätsommer ein ungewöhnlich steiler Anstieg der Ammoniumkonzentration auf das 15fache der mittleren Konzentration im Juli, nämlich 4.4 $\mu\text{mol/L}$ im September. Diesem extremen Anstieg folgte ein ebenso jäher Konzentrationsabfall. Beides stellt eine bemerkenswerte Abweichung von der mittleren saisonalen Entwicklung dar, die zudem nicht in den Trend einer sich verringernden Ammoniumbelastung passt.

Eine Reduktion der mittleren Phosphatkonzentrationen im Zeitraum 2000 – 2002 gegenüber denjenigen der 1990er Jahre ist insbesondere ab dem Monat Mai erkennbar (*Abb. 4-12*). Die jahreszeitliche Entwicklung der Phosphatkonzentrationen im Berichtsjahr 2003 zeigte bis einschließlich Juli einen ähnlichen und darum unauffälligen Verlauf. Im Spätsommer stiegen die Konzentrationen jedoch deutlich an und lagen bis zum Jahresende sogar oberhalb des mittleren Niveaus der 1990er Jahre.

Auch für die Summenkonzentrationen von Nitrat und Nitrit wurde ein Rückgang gegenüber entsprechenden Konzentrationen der 1990er Jahre festgestellt. Diese durch Mittelwerte im Zeitraum 2000 – 2002 belegte Entwicklung setzte sich im Jahr 2003 fort. Die saisonalen Extremwerte wurden mit ca. 32 $\mu\text{mol/L}$ und 2 $\mu\text{mol/L}$ im April und Juli erreicht. Die jahreszeitliche Entwicklung wies im Gegensatz zu denjenigen der anderen Nährstoffe keine Besonderheiten auf (*Abb. 4-12*).

Im Folgenden wird kurz und am Beispiel des Salzgehaltseinbruchs in der ersten Aprildekade auf Zusammenhänge zwischen Salzgehalt, Nährstoffkonzentrationen und Algenentwicklung eingegangen (*Abb. 4-13* und *Abb. 4-14*). Dieses im Frühjahr häufig zu beobachtende Absinken des Salzgehaltes, welches sich in der Monatsstatistik für das Jahr 2003 als Jahresminimum widerspiegelt (*Abb. 3-31, S. 92*), wurde durch eine temporäre Verstärkung des Süßwassereinflusses auf die Region Helgoland verursacht, die wiederum durch eine antizyklonale Wetterlage über der Nordsee (*Tab. 2-1, S. 32*) und daraus resultierende, nach W bzw. NW setzende Strömungen in der Deutschen Bucht zustande kam (*Tab. 3-1, S. 51*).

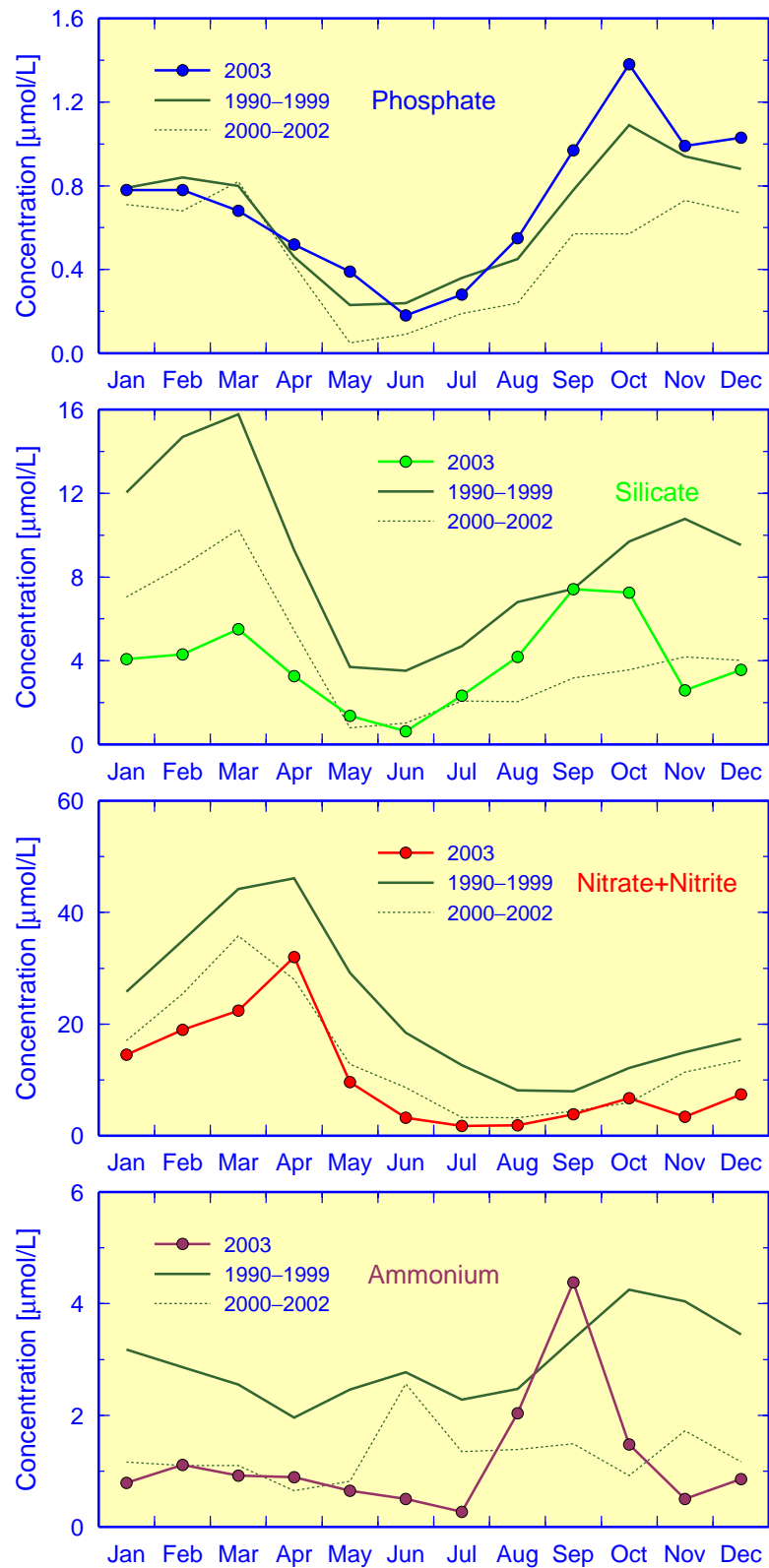


Abb. 4-12: Jahresgänge der Nährstoffkonzentrationen ($\mu\text{mol/L}$) bei Helgoland Reede mit Klimatologie.

Fig. 4-12: Annual cycles of nutrient concentrations ($\mu\text{mol/L}$) at Helgoland Roads versus climatology.

Der Salzgehalt fiel bis zum 10. April von 32 auf 29 ab und ging mit einer Verdreifachung der Nitrat- und Nitritkonzentration auf $67 \mu\text{mol/L}$ sowie einer Verdopplung des Silikatgehalts auf $8 \mu\text{mol/L}$ einher (Abb. 4-13, die NO_{2+3} -Gehalte sind mit 10 zu multiplizieren).

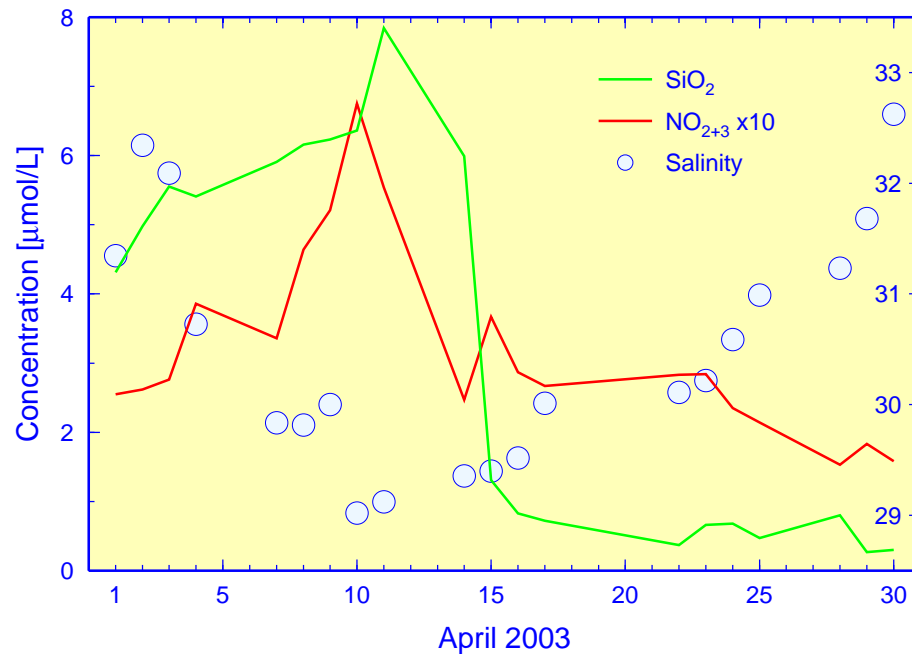


Abb. 4-13: Nährstoffkonzentrationen bei Helgoland Reede während des Salzgehaltseinbruchs im April 2003.

Fig. 4-13: Nutrient concentrations at Helgoland Roads during the salinity decline in April 2003.

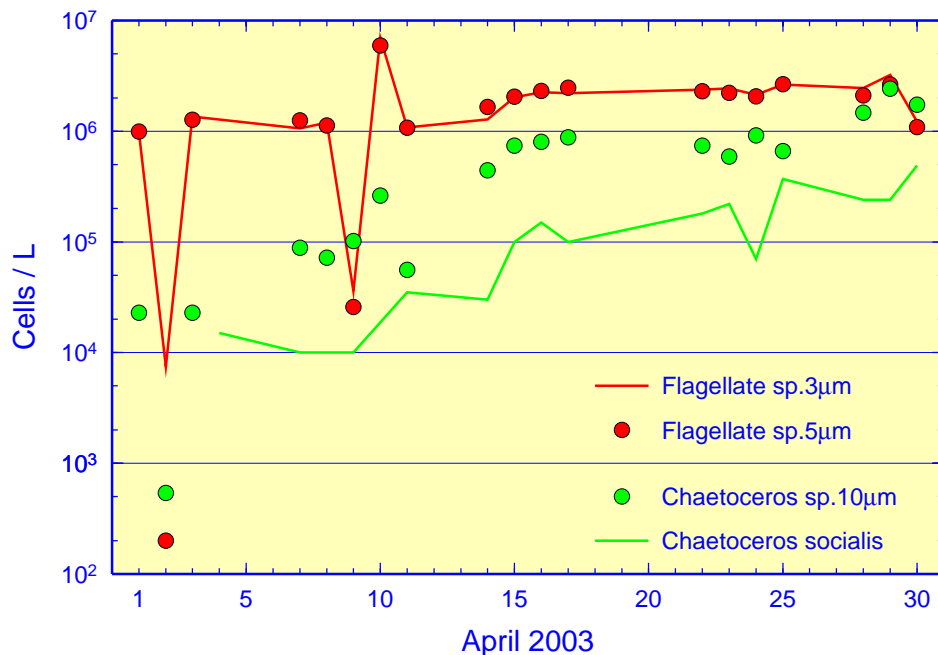


Abb. 4-14: Algenentwicklung bei Helgoland Reede im April 2003.

Fig. 4-14: Evolution of some algae at Helgoland Roads in April 2003.

Aus den Algenzählungen der Helgoland Reede ergab sich vom 9. zum 10. April ein Anstieg in den Flagellatenzahlen um 2 – 3 Größenordnungen (Abb. 4-14). Ob diese mit dem Flusswasser nach Helgoland transportiert wurden, oder ob die örtlichen Flagellaten besonders schnell auf das erhöhte Nährstoffangebot reagierten, ist unklar. Das einige Tage später beobachtete Absinken der Silikatkonzentration (Abb. 4-13) könnte auf einen erhöhten Verbrauch dieser Nährstoffe durch eine infolge des Frischwassereinflusses veränderte Algengesellschaft hinweisen. Die Algen ›Chaetoceros socialis‹ und ›Chaetoceros sp.‹ von 10 µm Größe vermehrten sich in diesem Zeitraum stark.

Insgesamt tendierten die saisonalen Konzentrationen der meisten Nährstoffe im Jahr 2003 zu gleichbleibenden oder sinkenden Werten. Für Phosphat und Silikat wurden ab dem Spätsommer jedoch überdurchschnittlich hohe Konzentrationen festgestellt. Die Ammoniumkonzentration erreichte ein ungewöhnliches, kurzlebiges Extremum im September. Kurzfristige Strömungsanomalien in der Deutschen Bucht im April belegen den zeitweilig starken Einfluss der Süßwasserzuflüsse auf Salzgehalt und Nährstoffkonzentrationen und somit auch die Algenartenzusammensetzung bei Helgoland.

4.2 Organische Schadstoffe

4.2.1 Einführung

Der überwiegende Teil der heute bekannten 18 Mio. chemischen Substanzen sind organische Verbindungen. Davon besitzen ca. 20 000 industrielle Bedeutung und werden in größeren Mengen hergestellt. Etwa 2 000 Verbindungen gelten als umweltrelevant (Schadstoffe), weil sie giftig (toxisch) oder in der Umwelt beständig (persistent) sind und/oder sich in der Nahrungskette anreichern (bioakkumulieren) können. 100 bis 300 dieser Verbindungen sind z. Z. in Listen prioritär zu behandelnder Stoffe erfasst (EU-Liste, EPA-Liste).

Die in diesem Bericht betrachteten Substanzen stammen aus industrieller Produktion und gelangen durch menschliche Aktivitäten in die Meeresumwelt. Gegenwärtig überwacht das BSH routinemäßig ca. 100 organische Schadstoffe, die aufgrund ihrer Umweltrelevanz von besonderer Bedeutung sind oder als Leitsubstanzen für ganze Schadstoffklassen angesehen werden (THEOBALD 1998). Unter den Schadstoffen finden sich viele Verbindungen mit polyzyklischen Strukturen (z. B. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) – wie Benzo(a)pyren) – und Stoffe, die Halogene (Chlor, Brom, Fluor) enthalten.

Mit Ausnahme der HCH-Isomere sind die meisten Organochlorverbindungen ausgesprochen lipophil (fettlöslich) und damit nur in geringem Maße wasserlöslich. Sie reichern sich daher besonders in Sedimenten und im Fettgewebe von Organismen an. Da sie zudem oft hochgradig persistent sind, wird eine Akkumulation innerhalb der Nahrungskette begünstigt. Die Anreicherung und damit Belastung eines Organismus ist dabei um so größer, je hochrangiger seine Stellung in der Nahrungskette ist. Neben der unmittelbaren toxischen Wirkung der aufgenommenen Substanzen können im Organismus erzeugte Abbauprodukte zu einer Verstärkung der Schadstoffwirkung führen.

Von besonderer Bedeutung sind Schadstoffe, die hormonelle Wirkungen (z. B. DDE, Dieldrin, TBT) aufweisen. Diese als Umweltöstrogene oder Xenoöstrogene bezeichneten organischen Verbindungen sind hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur – und damit auch in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften – sehr heterogen. Indem sie in die hormonellen Regelkreise von Organismen eingreifen, sind Funktionsstörungen mit negativen Folgen für Fortpflanzung und Entwicklung möglich.

Anthropogene Schadstoffe sind im Meer ungleichmäßig verteilt und kommen in sehr unterschiedlichen Konzentrationen vor. Diese Verteilungen hängen von vielerlei Faktoren ab, wie ozeanographischen Zustandsvariablen, aber auch von den Quellen (Schifffahrt, Industrie, Haushalt, Landwirtschaft), den Eintragsmengen und Eintragspfaden (direkt über Flüsse, diffus über Atmosphäre) sowie den charakteristischen physikalischen und chemischen Eigenschaften und der Stabilität der Schadstoffe. All diese Einflussgrößen können von Stoff zu Stoff sehr verschieden sein. Aus diesen Gründen verhalten sich die meisten Schadstoffe selten konservativ, d. h. ein einfacher Zusammenhang zwischen der Konzentration anthropogener Stoffe und den hydrodynamischen Variablen ist selten erfüllt. Allenfalls für regional begrenzte Gebiete mit klaren Quellenzuordnungen lassen sich einfache Korrelationen finden und nutzen. Für

eine Zustandsbeschreibung ist daher eine separate und differenzierte Betrachtung der verschiedenen Schadstoffklassen unumgänglich.

Die Routineüberwachung organischer Schadstoffe in der Deutschen Bucht wird vom BSH hauptsächlich im Sommer im Rahmen von zwei bis drei Überwachungsfahrten durchgeführt. Die Beprobung des Meerwassers erfolgt dabei an festen geographischen Positionen (Abb. 4-15). Darüber hinaus wurde im Jahr 2003 die Schadstoffbelastung der gesamten Nordsee untersucht. Neben der routinemäßigen Bestimmung der in den nationalen und internationalen Überwachungsprogrammen (BLMP, CEMP) festgelegten Pflichtstoffe werden im Rahmen von Sonderuntersuchungen ein gezieltes Screening auf prioritäre Stoffe (Target-Screening) und ein umfassendes allgemeines Screening auf neue unbekannte Stoffe (Non-Target-Screening) durchgeführt; auf diese Weise können neue Umweltgefahren relativ rasch erkannt werden. Das BSH führt ferner bei Unfällen (Sandoz-Unfall, Apron Plus) oder ungewöhnlichen natürlichen Ereignissen (Jahrhunderhochwasser der Elbe im August 2002) Sonderuntersuchungen durch, um die Öffentlichkeit zu aktuellen Fragestellungen zu informieren.

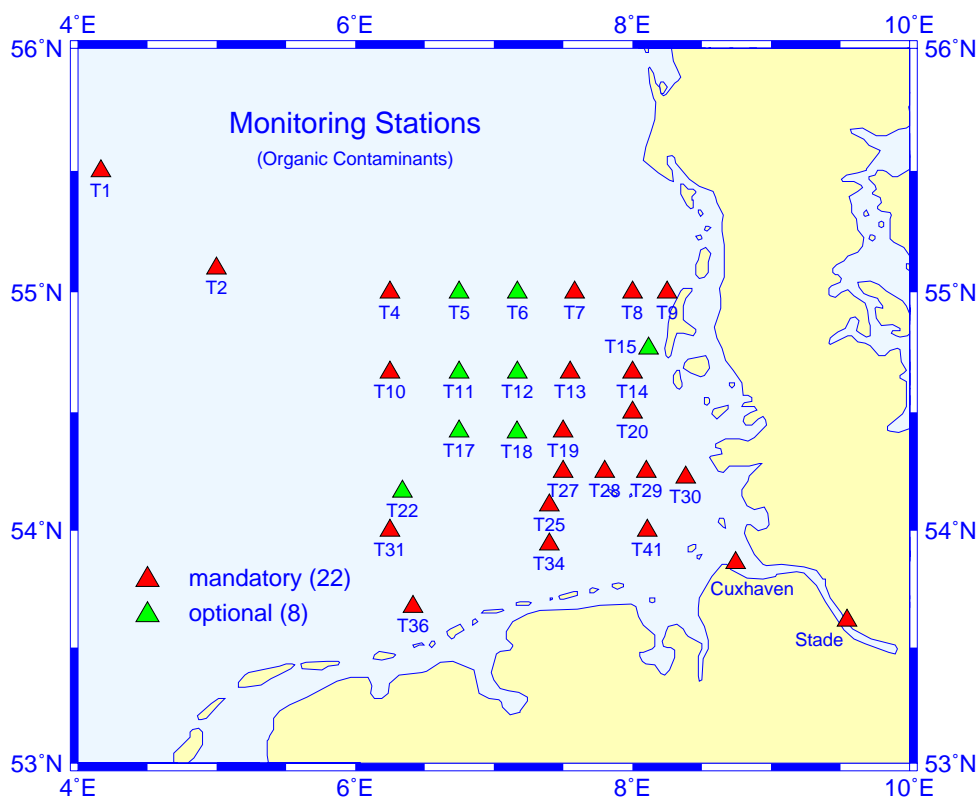


Abb. 4-15: Stationsnetz zur Schadstoffüberwachung im Meerwasser der Deutschen Bucht.

Fig. 4-15: Observational network for contaminant monitoring in the German Bight.

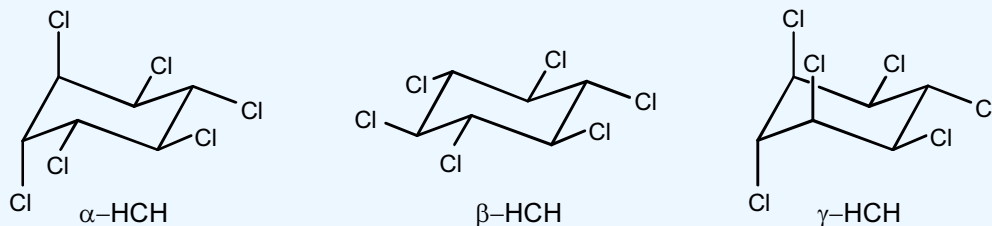
4.2.2 Hexachlorcyclohexan-Isomere (α -, β -, γ -HCH)

Die HCH-Isomere wurden seit vielen Jahrzehnten in großen Mengen in die Umwelt eingetragen, so dass auch im Meeresbereich eine ubiquitäre Grundbelastung beobachtet wird. Aufgrund ihrer relativ polaren Eigenschaften ($\log K_{OW}$ Werte¹ von 3.6 bis 3.9) liegen die HCH hauptsächlich in der Wasserphase vor und verhalten sich relativ konservativ. Nur ein Anteil von ca. 10 % des in der Wassersäule vorhandenen HCH ist an Schwebstoffe gebunden. In Sedimenten erfolgt nur eine Anreicherung um den

Faktor 1000. Durch Anreicherung werden im Sediment lediglich 1000fach höhere HCH-Konzentrationen als in der Wassersäule erreicht.

Tafel 4-2: HCH-Isomere

Hexachlorcyclohexan (HCH) wird seit 1950 weltweit in großen Mengen als Insektizid eingesetzt. Ursprünglich wurde ein technisches HCH-Gemisch verwendet, das aus verschiedenen HCH-Isomeren besteht (α -HCH: ca. 65 – 70 %, β -HCH: ca. 7 – 20 %, γ -HCH: ca. 15 %, δ -HCH: ca. 6 – 10 %, ϵ -HCH: ca. 1 – 2 %). Als Insektizid wirksam ist lediglich das γ -Isomer Lindan. Seit Mitte der 1970er Jahre besteht in den meisten europäischen Ländern ein Anwendungsverbot für das technische Gemisch. In den Industrieländern wird inzwischen nur das reine γ -Isomer (Lindan) verwendet, während in einigen Entwicklungsländern weiterhin auch technisches HCH hergestellt und eingesetzt wird.



Die Elbe stellt für alle drei HCH-Isomere eine bedeutende Belastungsquelle der Deutschen Bucht dar. Aufgrund der unterschiedlichen Hintergrundbelastung für die einzelnen Isomere in der Nordsee und Deutschen Bucht ergibt sich eine interessante Möglichkeit, anhand der Isomerenverhältnisse Aussagen über die Quellen und die Wassermassen zu treffen.

4.2.2.1 HCH-Gehalte des Meerwassers

Die Verteilung der Konzentrationen von α -, β - und γ -HCH (Lindan) im Mai 2003 in der Deutschen Bucht ist in Abb. 4-16 wiedergegeben. Während die drei HCH-Isomere in der Elbe in etwa gleichen Konzentrationen von ca. 1.8 – 2.5 ng/L vorlagen, zeigten sie in der Deutschen Bucht und in den Küstengebieten sehr unterschiedliche Gehalte und Verteilungen.

Die Grundbelastung für β -HCH im Meerwasser ist sehr gering und liegt meist unter der Bestimmungsgrenze von 30 pg/L. Da β -HCH aber im Elbewasser in relativ hoher Konzentration vorkommt (2 ng/L), wird die Elbfahne entlang der nordfriesischen Küste sehr gut durch die β -HCH-Konzentrationen abgebildet.

α -HCH weist eine höhere Hintergrundkonzentration im Meerwasser auf und erreichte in der Deutschen Bucht außerhalb der Elbfahne Konzentrationen von 0.05 bis 0.1 ng/L. In der Elbfahne selbst wurden im Mai 2003 nur wenig höhere Konzentrationen bis 0.2 ng/L gemessen. Das γ -HCH wies in der Deutschen Bucht mit 0.1 bis 0.45 ng/L die höchsten Konzentrationen der drei Isomeren auf, wobei insbesondere die relativ ho-

1. Der K_{OW} -Wert ist der Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizient eines Stoffes, der sich aus der Verteilung der Substanz zwischen den Phasen Wasser (polar) und Octanol (unpolar, lipophil) ergibt. Diese Gleichgewichtskonstante ist ein Maß für die Polarität des Stoffes. Da die K_{OW} -Werte der verschiedenen organischen Substanzen über einen großen Bereich variieren können, wird i. A. der Logarithmus angegeben ($\log K_{OW}$). Der $\log K_{OW}$ -Wert variiert meist zwischen 1 und 8, wobei eine Verbindung um so unpolarer ist, je größer der Wert. Substanzen mit einem $\log K_{OW}$ -Wert > 4 gelten als lipophil und zeigen eine hohe Affinität zu festen Phasen (Schwebstoffe, Sedimente) sowie eine hohe Tendenz zur Bioakkumulation.

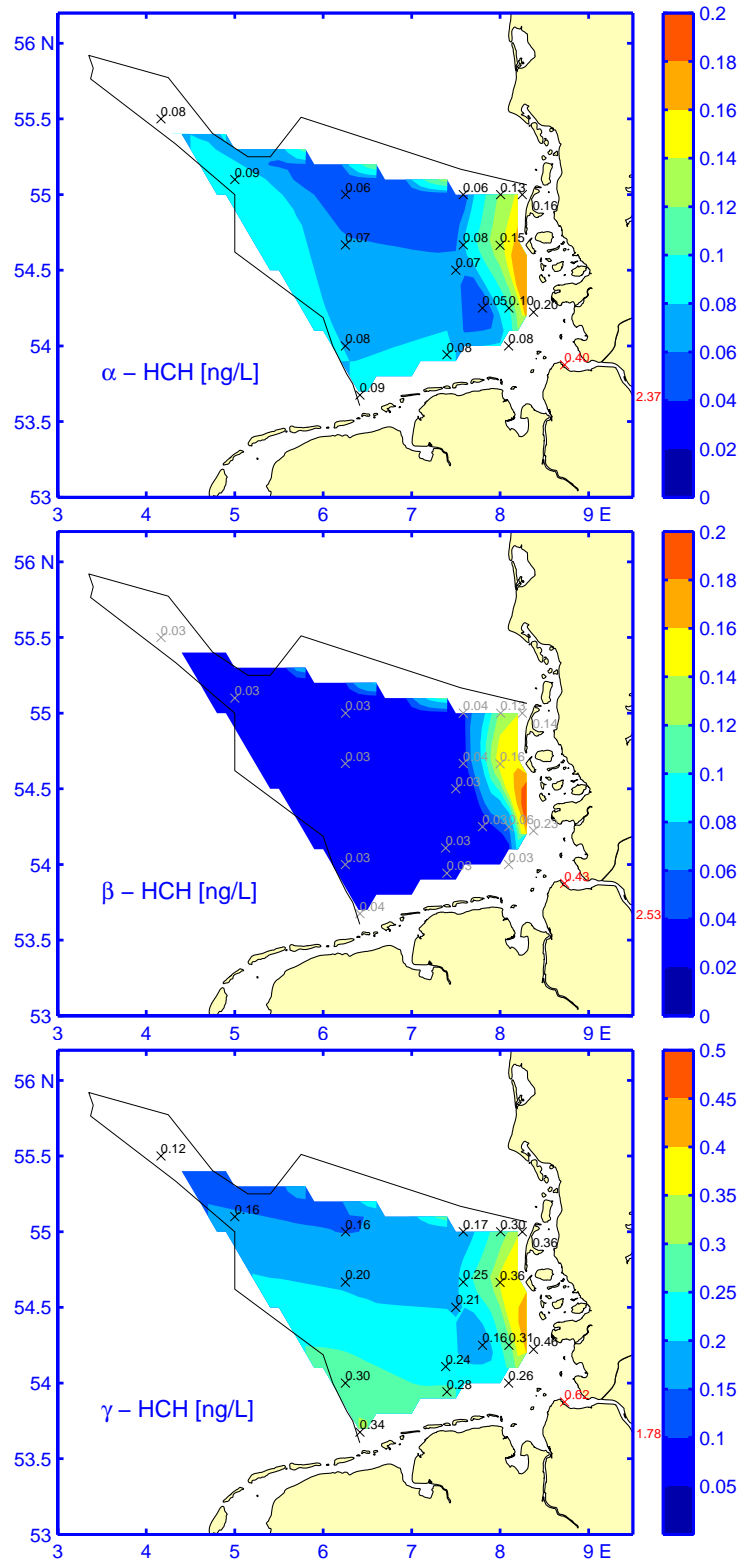


Abb. 4-16: Geographische Konzentrationsverteilungen (ng/L) von α -, β - und γ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai 2003.

Fig. 4-16: Geographical distributions of α -, β -, and γ -HCH concentrations (ng/L) for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May 2003.

hen Werte am westlichen Rand der Deutschen Bucht bemerkenswert sind. Ferner zeigt die Verteilung ein deutliches Konzentrationsgefälle von Süden nach Norden, das nur graduell durch die Elbe beeinflusst wird.

Die Abhängigkeit der HCH-Konzentrationen vom Süßwasseranteil in der Deutschen Bucht wird anhand von Abb. 4-17 deutlich. In dieser logarithmischen Darstellung sind die HCH-Konzentrationen auf die Werte von Stade normiert (= 100 %); ebenso ist der Salzgehalt formal in einen Süßwasseranteil umgerechnet (Stade = 100 %, Nordseewasser mit Salzgehalt 34.5 = 0 %). Quer zur Elbfahne (bis Station T7) nehmen die relativen HCH-Anteile offensichtlich parallel mit dem Süßwasseranteil ab. In der äußeren Deutschen Bucht (Stationen T4 bis T1) bricht dieser einfache Zusammenhang durch andere überlagerte Einflüsse jedoch zusammen. Die drei Isomeren verhalten sich hier sehr unterschiedlich.

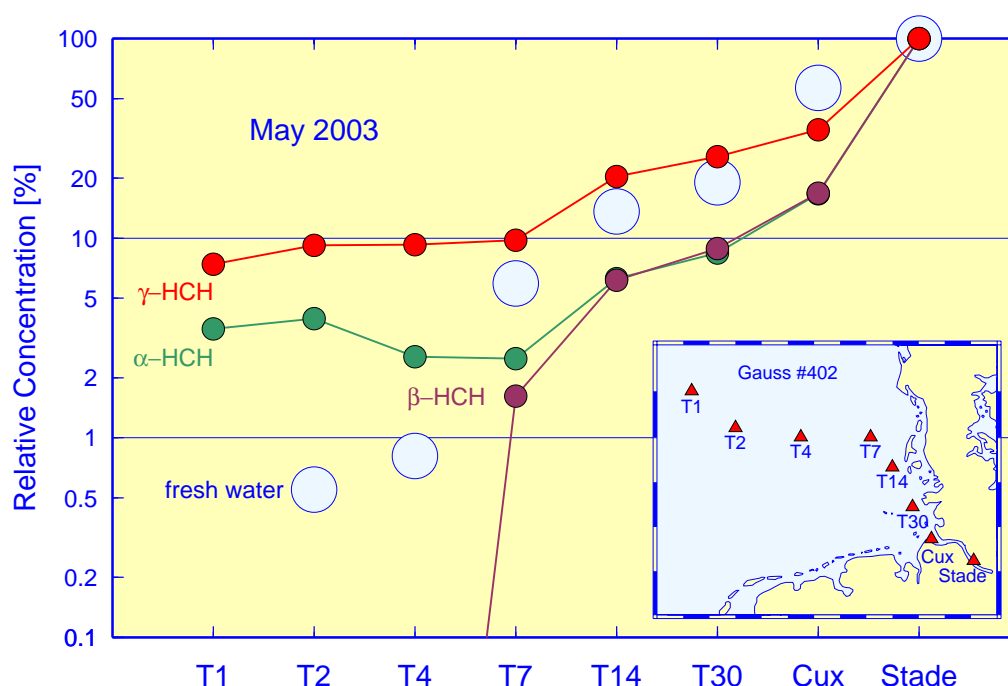


Abb. 4-17: Konzentrationen der HCH-Isomeren relativ zu Stade (100 %) entlang des Salzgehaltsgradienten der Elbfahne. Salzgehalt als Frischwasseranteil (%); \log_{10} -Skala beachten.

Fig. 4-17: HCH concentrations relative to Stade (100 %) along the salinity gradient of the Elbe river plume. Salinity as percent fresh water; note \log_{10} -scaling.

Besser interpretierbar werden die Konzentrationsverteilungen bei großräumiger Betrachtung, wie sie z. B. die Gesamtaufnahme der Nordsee im Juli / August 2003 ermöglicht (Abb. 4-18). Besonders deutliche Strukturen treten hervor, wenn die Konzentrationen von α -HCH zu denjenigen von γ -HCH ins Verhältnis gesetzt werden. In der südlichen Nordsee, am Ausgang des englischen Kanals, wurden für die beiden Isomeren Konzentrationen von 0.02 bzw. 0.12 ng/L gefunden, also ein Verhältnis von 0.16. Am Nordrand der Nordsee, wo Konzentrationen von 0.089 bzw. 0.053 ng/L gemessen wurden, ergibt sich ein erheblich höheres Verhältnis von 1.68.

Die Konzentrationen des α -HCH nehmen also von Süden nach Norden zu, während diejenigen des γ -HCH in dieser Richtung abnehmen. Dieses Verhalten erklärt sich aus der Tatsache, dass α -HCH (und auch β -HCH) hauptsächlich aus älteren Einträgen in der Umwelt vorhanden ist und heute nur durch Altlasten in die Umwelt eingetragen

wird (Elbe). Die höheren α -HCH-Konzentrationen im Norden kommen durch eher diffusere Altlasten, die globale Verteilung (Global Distillation) und atmosphärische Deposition zustande. Auch technische Gemische mit hohen α -HCH-Gehalten, die in einigen Entwicklungsländern noch verwendet werden, gelangen auf diesem Wege in den Nordatlantik und die Nordsee.

γ -HCH wird dagegen auch in Europa weiterhin angewendet, was die vom europäischen Festland im Süden nach Norden hin abnehmenden Konzentrationen erklärt. Der geschilderte Sachverhalt erlaubt darüber hinaus Rückschlüsse auf die Herkunft

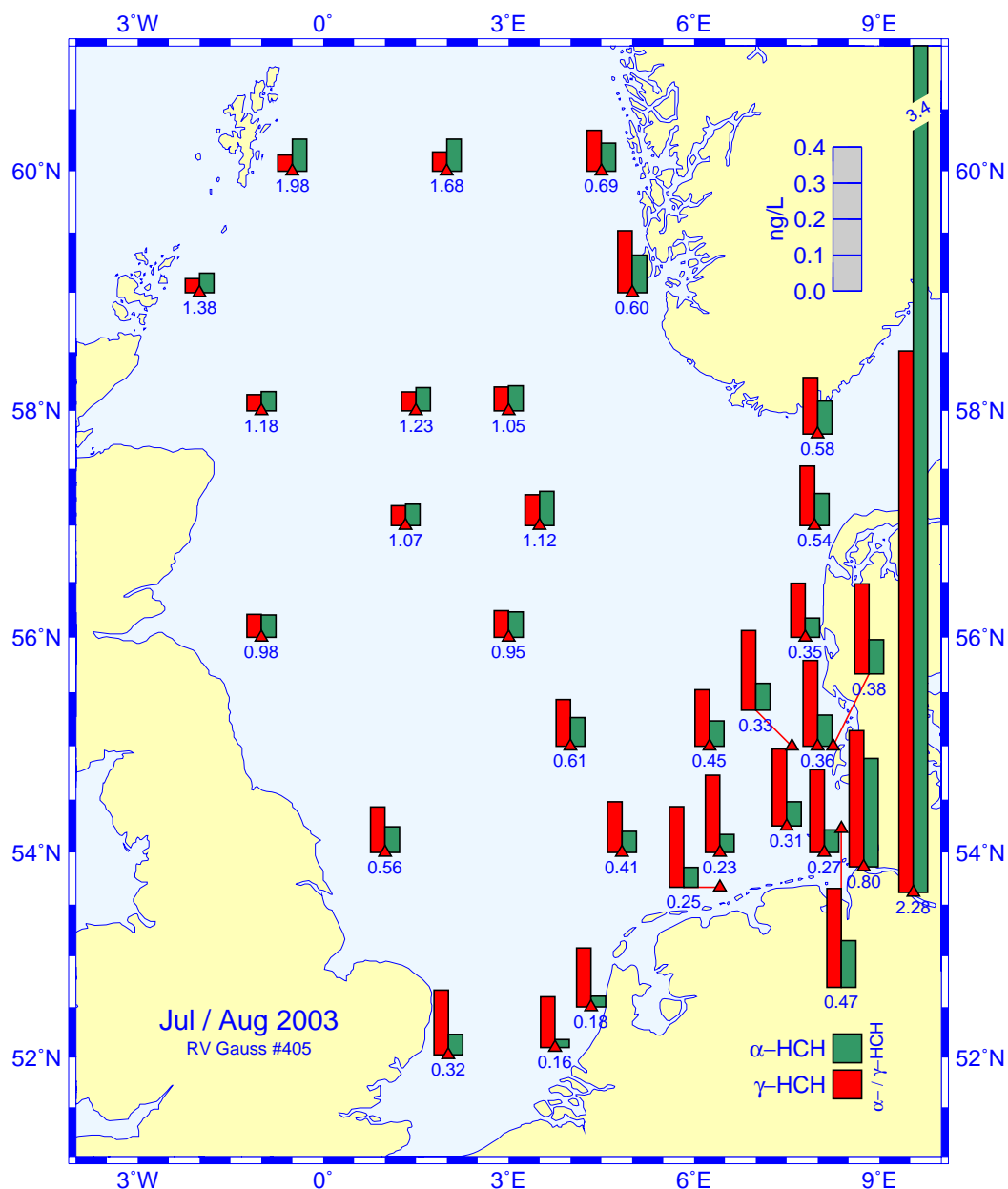


Abb. 4-18: Geographische Konzentrationsverteilungen für α - und γ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Juli / August 2003. Werte unterhalb der Säulen geben das Verhältnis α/γ -HCH, Säulenhöhen in ng/L.

Fig. 4-18: Geographical distributions of α - and γ -HCH concentrations for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in July / August 2003. Figures below columns give the ratio α/γ -HCH, column heights in ng/L.

der Wassermassen. Das durch den Kanal einströmende Atlantikwasser ist durch ein Isomerenverhältnis < 0.5 gekennzeichnet, während die über den Nordrand einströmenden Wassermassen α/γ -Verhältnisse > 1 aufweisen (Abb. 4-18).

Ein weiterer Wasserkörper, der eine charakteristische Isomerenzusammensetzung aufweist, ist das im Skagerrak ausströmende Ostseewasser. Allerdings müssen hier für eine Identifizierung auch die β -HCH-Gehalte einbezogen werden. Auf Station 40 an der Südspitze Norwegens wurden für die drei α -, β - und γ -Isomere Konzentrationen von 0.09, 0.08 und 0.156 ng/L beobachtet.

4.2.2.2 Zeitliche Entwicklung der Meerwasserbelastung

Da für die HCH-Isomeren verlässliche Messwerte bereits seit 1975 vorliegen, ist die langfristige Entwicklung der Konzentrationen gut dokumentiert. Zeitserien solcher Konzentrationen sind beispielhaft für Station T41 in der inneren Deutschen Bucht in Abb. 4-19 dargestellt.

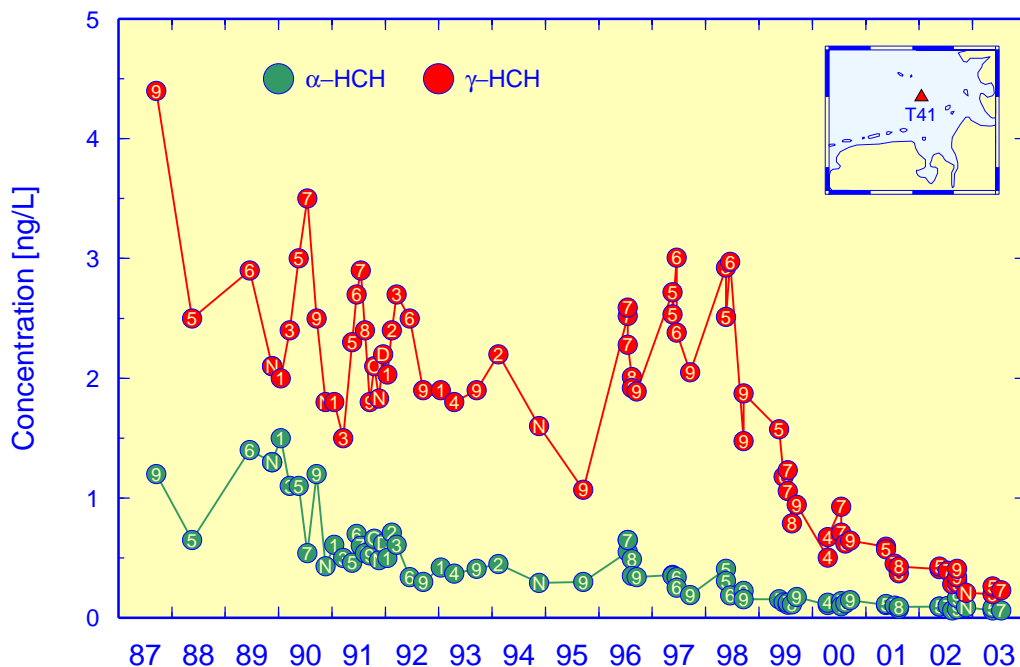


Abb. 4-19: Zeitliche Entwicklung der α -, β - und γ -HCH-Konzentrationen an Station T41 seit 1987. Werte innerhalb der Kreise geben den Beobachtungsmonat an (1, 2, 3, ..., O, N, D).

Fig. 4-19: Temporal evolution since 1987 of α -, β - and γ -HCH concentrations at station T41. Figures inside bullets give month of observation (1, 2, 3, ..., O, N, D).

Seit 1986 konnte für α -HCH trotz hoher Schwankungen ein Rückgang der Konzentrationen beobachtet werden. Beim Lindan war bis 1998 eine große Schwankungsbreite festzustellen, die sich aus intramonatlichen und saisonale Variationen zusammensetzte; hohe Konzentration waren vor allem im Frühsommer zu beobachten. Seither sind auch die γ -HCH-Konzentrationen klar rückläufig, wenngleich das Konzentrationsniveau oberhalb desjenigen des α -HCH blieb. Von 1998 bis 2003 verringerten sich die γ -HCH-Konzentrationen von 3 ng/L auf unter 0.25 ng/L (Abb. 4-19). Parallel zur Abnahme der Konzentrationen war auch eine Verringerung der saisonalen Schwankungen zu beobachten, was mit einer Abnahme der Anwendung im Frühsommer erklärt werden könnte.

Es ist bemerkenswert und aus der zu Abb. 4-19 alternativen logarithmischen Darstellung besonders einfach ersichtlich, dass die Konzentrationen aller drei HCH-Isomeren seit Ende der 1990er Jahre von unterschiedlichen Ausgangsniveaus um ca. eine Größenordnung abgefallen sind (Abb. 4-20). Dieser exponentielle Konzentrationsabfall erscheint wegen der log-Skalierung linear und ließe sich durch drei Geraden ähnlicher Steigung approximieren.

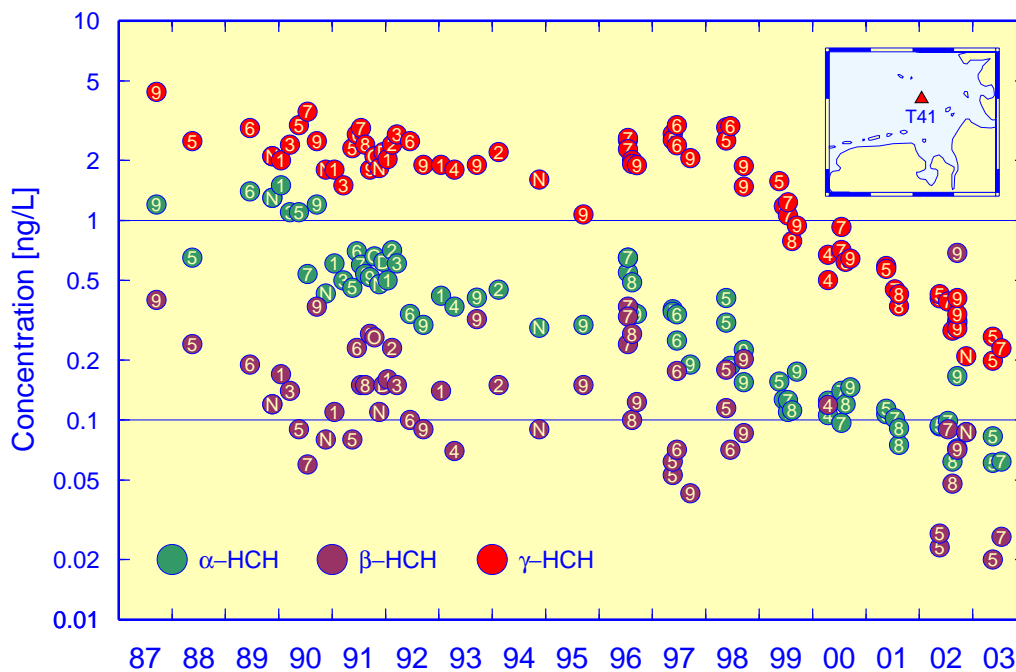


Abb. 4-20: Wie Abb. 4-19, jedoch mit logarithmischer Konzentrationskala.

Fig. 4-20: As Fig. 4-19, except for logarithmic concentration scale.

Im Jahr 2003 war die kurzfristige Entwicklung gegenüber dem Vorjahr von besonderem Interesse, da im Sommer 2002 infolge des Jahrhunderthochwassers der Elbe für α -HCH und besonders für β -HCH erhöhte Konzentrationen in der inneren Deutschen Bucht aufgetreten waren (NIES ET AL. 2003). Die Verhältnisse normalisierten sich jedoch im Verlauf von Frühjahr und Sommer 2003 vollständig (Abb. 4-19).

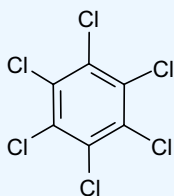
4.2.2.3 HCH-Gehalte des Sediments

Aufgrund der relativ polaren Eigenschaften der HCH-Verbindungen findet nur eine geringe Anreicherung im Sediment statt; die Konzentrationen lagen daher häufig unterhalb der Bestimmungsgrenzen.

In der Deutschen Bucht wurden die höchsten Konzentrationen in Proben der schlickreichen Station KS11 vor der Elbmündung gemessen. Im Mittel wurde hier Belastungen mit α -HCH von 0,12 $\mu\text{g/kg}$ und mit γ -HCH von 0,13 $\mu\text{g/kg}$ festgestellt. Im übrigen Gebiet variierten die Gehalte zwischen 0,01 und 0,06 $\mu\text{g/kg}$.

Zeitliche Trends sind aufgrund der hohen Variabilität der Konzentrationen und des relativ kurzen Beobachtungszeitraums von gegenwärtig 10 Jahren bislang nicht erkennbar.

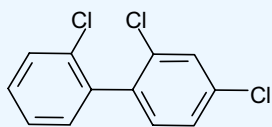
4.2.3 Lipophile Chorkohlenwasserstoffe (HCB, PCB, DDT)

Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe

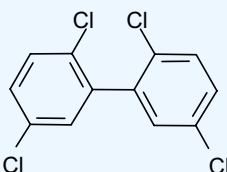
Hexachlorbenzol (HCB) wurde als Weichmacher und Flammschutzmittel für Kunststoffe und Schmiermittel, vor allem aber als Fungizid in Holzschutzmitteln angewandt; ferner gelangt es bei der Herstellung von Lösungsmitteln und beim Verbrennen chlorhaltiger Produkte in die Umwelt. Herstellung und Weiterverarbeitung wurden in Deutschland 1993 eingestellt, Emissionen fallen jedoch immer noch aus der Hausmüllverbrennung und anderen Verbrennungsprozessen sowie bei der CKW-Herstellung an.

Polychlorierte Biphenyle (PCB) stellen eine Verbindungs-Klasse dar, die aus 209 Isomeren und homologen Vertretern (Kongeneren) besteht. PCB wurden seit Ende der 1920er Jahre industriell in großen Mengen hergestellt. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften wurden sie in den unterschiedlichsten Bereichen verwendet, z. B. als Kühl- und Isolierflüssigkeiten in Transformatoren, als Weichmacher für Lacke und Klebstoffe sowie als Hydraulikflüssigkeiten und Wärmeüberträgeröle. Der Einsatz der PCB ist seit 1976 durch verschiedene Gesetze und Richtlinien stark eingeschränkt. In Deutschland werden PCB seit 1983 nicht mehr produziert, international wurde 1989 ein Produktionsverbot ausgesprochen. Aktuelle Quellen für PCB sind jedoch nach wie vor alte Anlagen und Geräte.

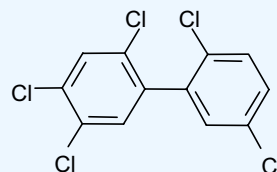
PCB sind giftig und zeigten im Tierversuch krebserregende Wirkung. Im tierischen Organismus werden sie kaum abgebaut, sondern reichern sich zu hohen Konzentrationen an. In der Übersicht sind einige der wichtigsten PCB-Kongeneren dargestellt.



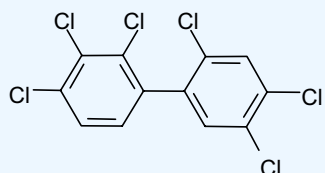
PCB 28



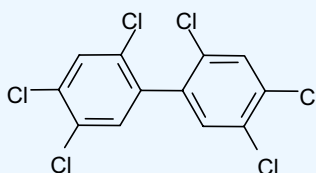
PCB 52



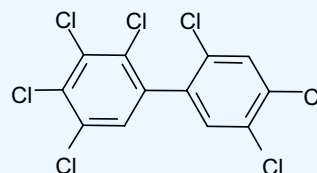
PCB 101



PCB 138

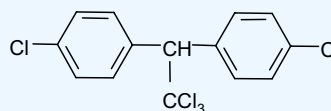


PCB 153

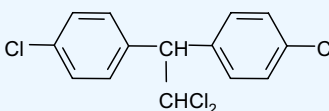


PCB 180

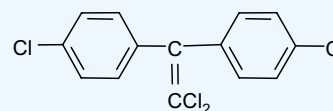
Dichlor-diphenyl-trichlorethan (DDT) ist ein Insektizid, das seit den 1930er Jahren in der Land- und Forstwirtschaft zur Bekämpfung von Schadinsekten eingesetzt wurde. Seine Anwendung wurde in der BRD 1972 und in der ehemaligen DDR 1988 verboten. In einigen Entwicklungsländern wird DDT nach wie vor zur Malaria bekämpfung angewandt. Über die Atmosphäre und den Import von Agrarprodukten gelangt DDT auch weiterhin nach Europa. Neben den Konzentrationen des Hauptisomeren p,p'-DDT werden meistens auch diejenigen der Hauptabbauprodukte p,p'-DDE und p,p'-DDD bestimmt.



p,p'-DDT



p,p'-DDD



p,p'-DDE

Obwohl die drei Schadstoffklassen HCB, PCB und DDT sehr unterschiedliche Anwendungen haben und sich chemisch unterscheiden, lassen sie sich gut gemeinsam abhandeln. Alle drei Gruppen sind sehr lipophil (K_{OW} -Werte von 5 bis 7, s. Fußnote, S. 123) und in der Umwelt recht stabil (persistent), weshalb sie sich in abiotischer Umgebung sehr ähnlich verhalten. Ihre Lipophilie bedingt eine hohe Affinität zu Feststoffen und demzufolge eine starke Anreicherung dieser Schadstoffe in Schwebstoffen und Sedimenten, so dass nur geringe Mengen in gelöster Form im Wasser verbleiben. Eine noch stärkere Anreicherung findet in Biota statt (Bioakkumulation). Auch die Eintragspfade ähneln sich insofern, als es heute kaum noch direkte Eintragsquellen gibt, da die Anwendung dieser Stoffe reglementiert ist. Als Eintragswege kommen insbesondere diffuse Quellen in Betracht, unter denen die atmosphärische Deposition eine bedeutende Rolle spielt.

4.2.3.1 CKW-Gehalte des Meerwassers

Die Elbe ist mit HCB deutlich belastet; allerdings nimmt die HCB-Konzentration bereits im Ästuar sehr stark ab. Im August 2003 sank beispielsweise die Konzentration von Stade (357 pg/L) über Cuxhaven (14 pg/L) bis zur Station T30 (3.6 pg/L) in der inneren Deutschen Bucht um zwei Größenordnungen. Die starke Affinität des HCB zum Schwebstoff führt über Sedimentation zur raschen Reduktion der HCB-Konzentrationen in der Wassersäule.

Im Sommer 2003 wurde in der Elbfahne der Deutschen Bucht eine Mediankonzentration von 3 pg/L bestimmt. In der übrigen Deutschen Bucht und Nordsee lag eine sehr homogene und sehr niedrige HCB-Grundbelastung des Wassers in einem Bereich von 2 – 3 pg/L vor, ohne dass Konzentrationsschwerpunkte oder Quellen außerhalb der Flüsse festgestellt wurden.

Während in der Elbe bei Stade im August 2003 für das Leit-PCB CB153 eine Konzentration von 163 pg/L beobachtet wurde, sanken die Gehalte bei Cuxhaven auf ein Zehntel (17 pg/L) und in der inneren Deutschen Bucht auf 3 – 10 pg/L ab. Das Konzentrationsgefälle ähnelt somit demjenigen des HCB sehr stark. In der Nordsee lag die Konzentration im Mittel bei 2 pg/L; in Küstennähe traten Werte bis 6 pg/L auf, in der offenen See lagen sie z. T. unter der Bestimmungsgrenze von 1 pg/L. Die Konzentration des CB153 lag zwar unter derjenigen von HCB, allerdings resultiert die Umweltbelastung nicht allein aus dem CB153-Gehalt, sondern aus den Beiträgen von insgesamt 209 PCB-Kongeneren. (In technischen Gemischen variiert der CB153-Anteil zwischen ca. 4 und 11 %.)

Das Abbauprodukt p,p'-DDD ist aus der DDT-Gruppe diejenige Verbindung, die im Wasser (und Sediment) die höchsten Konzentrationen aufweist. In der Elbe wurde im August 2003 ein Gehalt von 1010 pg/L gemessen; für p,p'-DDE und p,p'-DDT lagen die Konzentration bei 160 pg/L. (Im Folgenden wird das p,p'-Präfix unterdrückt.) Das Konzentrationsgefälle zur Deutschen Bucht war ähnlich stark geprägt wie bei den PCB und dem HCB. DDT und DDE waren außerhalb des Elbeästuars nicht mehr nachzuweisen. Auf das Abbauprodukt DDD trifft dies nicht zu. Auf küstennahen Stationen wurden für DDD Maximalwerte von bis zu 25 pg/L festgestellt. Im Mittel lagen die DDD-Gehalte im Küstenbereich der Deutschen Bucht und Nordsee bei 2 – 7 pg/L. In der offenen Nordsee lagen die Konzentrationen meist unterhalb der Bestimmungsgrenze von 1 pg/L.

Das DDD ist von den drei Stoffgruppen HCB, PCB und DDT die Komponente mit der höchsten Konzentration in der Elbe und kann mithin als Elbe-charakteristischer Stoff

angesehen werden. In der Nordsee ist DDD allerdings weniger verbreitet als HCB und CB153. Der Eintrag über andere Quellen (Flüsse, Atmosphäre) scheint für letztere größer zu sein.

In Tab. 4-1 sind die CKW-Konzentrationen für verschiedene Gebiete im Überblick zusammengefasst.

AUG 2003 pg/L	STADE 1 sample	CUXHAVEN 1 sample	GERMAN BIGHT		
			min	median	max
HCB	357	14	1	3	5
CB28	31	5	1	1	2
CB52	61	8	1	1	4
CB153	163	17	1	2	10
DDD-p,p'	1010	90	1	1	24
DDE-p,p'	167	11	<1	<1	5
DDT-p,p'	162	5	<1	<1	3

Tab. 4-1: Konzentrationen (pg/L) der lipophilen CKW im Meerwasser im August 2003.

Table 4-1: Concentrations (pg/L) of lipophilic chlorinated hydrocarbons in sea water in August 2003.

Alle Konzentrationen liegen auf dem Niveau der Vorjahre. Zuverlässige Messungen im Konzentrationsbereich < 10 pg/L sind erst seit dem Jahr 2000 möglich. Trendaussagen können aufgrund der hohen Variabilität und des kurzen Beobachtungszeitraums bislang für keine Substanzgruppe getroffen werden.

4.2.3.2 CKW-Gehalte des Sediments

Die Schadstoffkonzentrationen im Sediment sind nicht nur abhängig von speziellen, lokalen Belastungsfaktoren, sondern werden sehr stark von Sedimenteigenschaften wie dem TOC-Gehalt (Total Organic Carbon) beeinflusst. Insbesondere beim Fehlen intensiver lokaler Quellen sind die Sedimentparameter entscheidend für die Anreicherung von Schadstoffen und deren Konzentration im Sediment. Um diesen Einfluss auszugleichen, wird auf den TOC-Gehalt der Sedimente normiert. Im Folgenden werden die Konzentrationen daher sowohl auf die Trockenmasse (TM) als auch auf den TOC-Gehalt bezogen angegeben.

Die geographische Verteilung der TOC-Gehalte des Sediments in der Deutschen Bucht ist in Abb. 4-21 dargestellt. Die TOC-Gehaltsverteilung lässt sich nach drei Belastungsgruppen klassifizieren, welche über die Konzentrationsintervalle 7.3 – 11.5 mg/g (rot), 2.3 – 4.6 mg/g (orange) und 0.3 – 1.3 mg/g (grün) definiert sind. Die sehr schlickreiche Station SSL (Sylter Sandloch) nimmt mit einem TOC-Gehalt von 27.7 mg/g eine singuläre Sonderstellung ein und gilt nicht als gebietsrepräsentativ.

Die auf Trockenmasse bezogenen Konzentrationsverteilungen von HCB, CB153 und DDD in der Deutschen Bucht im Mai 2003 sind in Abb. 4-22 (oben) wiedergegeben. Alle drei Schadstoffgruppen verhalten sich insofern ähnlich, als ihre Verteilungen untereinander gleiche Belastungsschwerpunkte aufweisen. Diese Schwerpunkte fallen mit dem räumlichen Muster der TOC-Gehaltsverteilung zusammen (Abb. 4-21).

Die höchsten auf Trockenmasse bezogenen Schadstoffkonzentrationen von 0.3 – 1 µg/kg TM wurden auf der schlickreichen Station KS11 sowie den unmittelbar be-

nachbarten Stationen KS8 und der BL2 in der inneren Deutschen Bucht festgestellt. Ein weiterer Schwerpunkt ($0.03 - 0.2 \mu\text{g/kg TM}$) liegt im Gebiet der Stationen UE20, WB5 und WB1, deren Sediment ebenfalls einen relativ hohen Feinkornanteil aufweist. Die Sedimente aller anderen Stationen sind sehr sandig und wiesen nur sehr geringe Schadstoffkonzentrationen in der Nähe der Bestimmungsgrenzen auf (< 0.01 bis $0.02 \mu\text{g/kg TM}$). Auf die Sonderstation SSL vor Sylt ist das Sediment hingegen sehr schlickereich, weshalb dort hohe Konzentrationen auftraten.

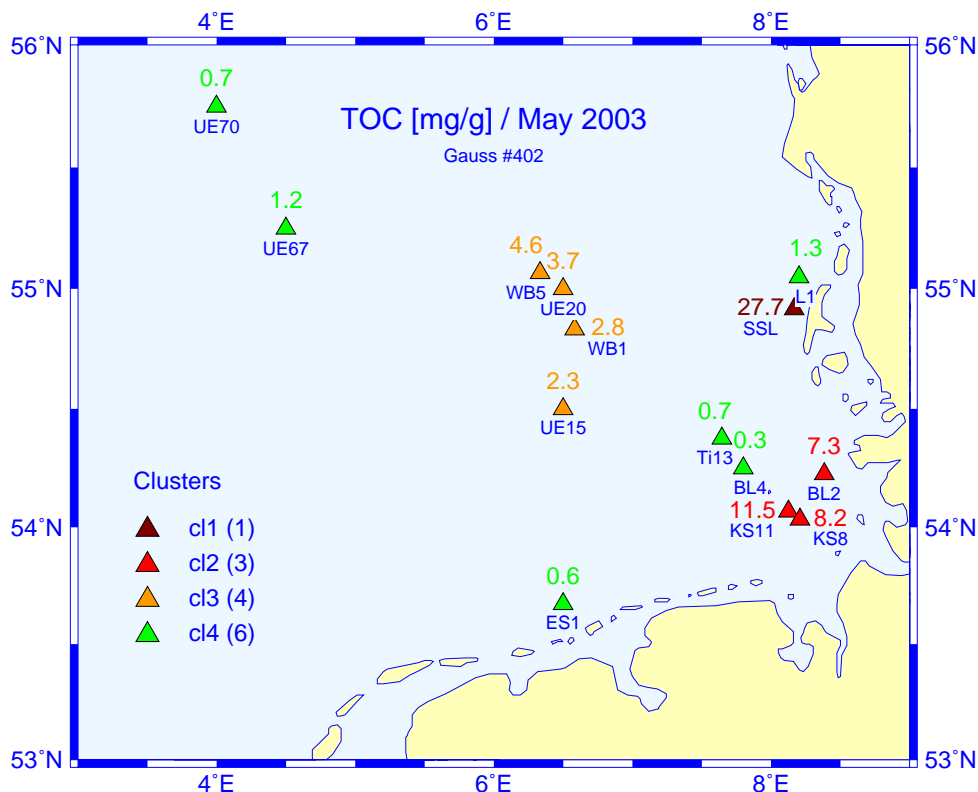


Abb. 4-21: Geographische Verteilung der TOC-Gehalte in Oberflächensedimenten der Deutschen Bucht im Mai 2003.

Fig. 4-21: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight in May 2003.

Bei Normierung der Schadstoffkonzentrationen auf den TOC-Gehalt ergibt sich eine deutliche Nivellierung der oben geschilderten Konzentrationsunterschiede (Abb. 4-22, unten). Maximum-zu-Minimum-Verhältnisse reduzieren sich dabei von > 400 auf < 20 . Die Gruppierung in drei Belastungsklassen bleibt jedoch bestehen. Die Station SSL reiht sich jetzt in die Klasse höchster Konzentrationen ein.

Die niedrigsten Konzentrationen wurden auf allen Stationen für HCB gefunden. Auf den KS-Stationen vor der Elbmündung lagen CB153 und DDD in etwa gleichen Konzentrationen vor; ebenso auf den Stationen UE15 und L1. Dagegen waren auf den Stationen UE20 und WB5 die DDD-Gehalte deutlich höher als diejenigen des CB153. Die drei Verbindungen zeigen somit ein unterschiedliches räumliches Konzentrationsgefälle. HCB und CB153 scheinen weiträumiger verteilt zu sein als DDD, das schon in der äußeren Deutschen Bucht nicht mehr nachweisbar war. Ein ähnlicher Sachverhalt ist bereits für die Konzentrationen des Wasser festgestellt worden.

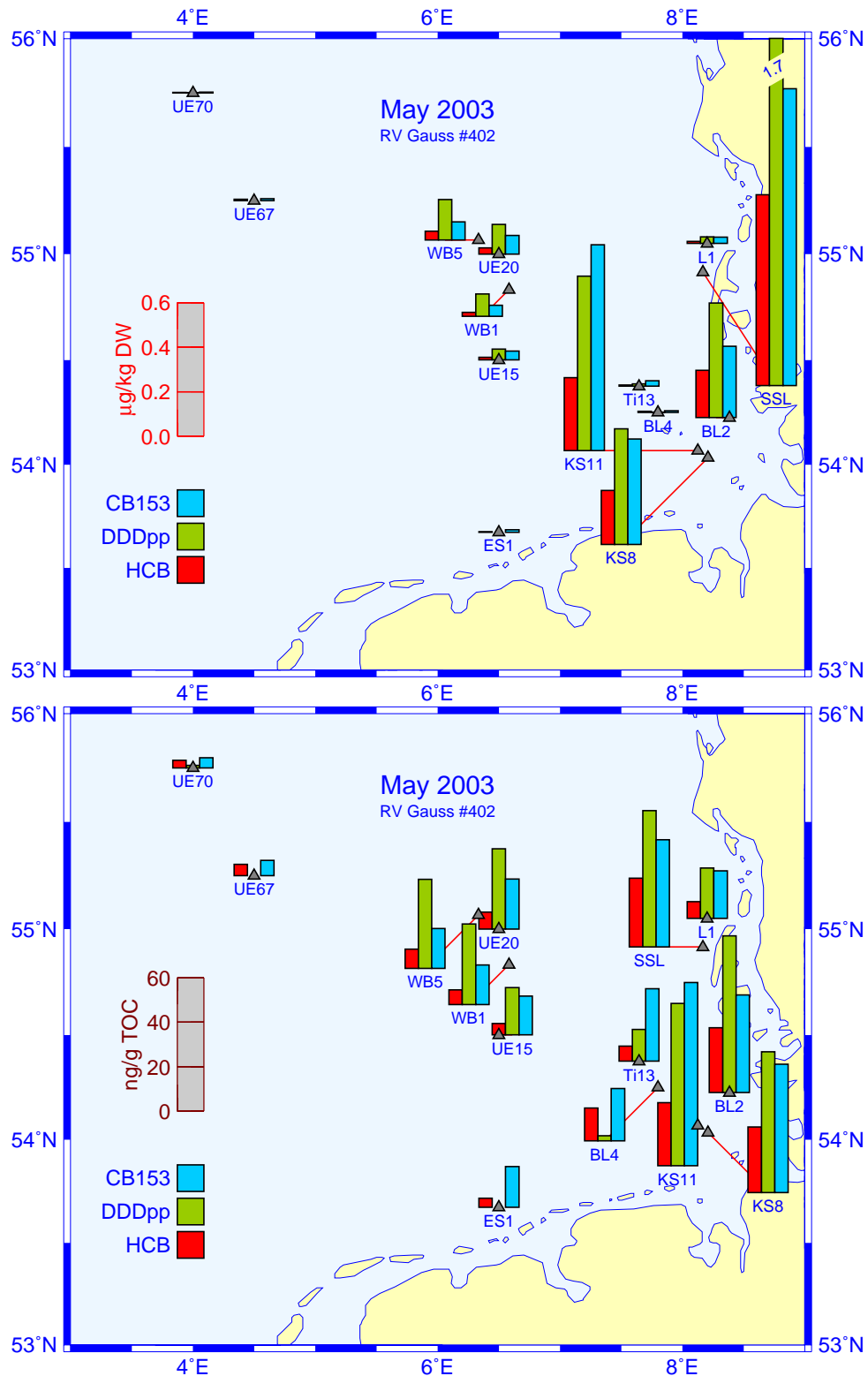


Abb. 4-22: HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2003.

Fig. 4-22: HCH-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2003.

Die unterschiedlichen Konzentrationsmuster von DDD und HCB sind z. Z. schwierig zu interpretieren. Die Tatsache, dass DDD in der Elbe selbst die höchsten Konzentrationen aufweist, erscheint zunächst im Einklang mit den gegenüber den HCB-Gehalten deutlich höheren Konzentrationen im Einflussbereich der Elbfahne. Andererseits liegt HCB im Elbewasser in zweithöchster Konzentration vor, in den schwebstoffbürtigen Sedimenten der Elbe sogar mit den höchsten Konzentrationen (Tab. 4-2). In den Sedimenten der Deutschen Bucht hingegen weist HCB die niedrigsten Konzentrationen auf. Allerdings ist HCB auch die Komponente mit der größten Wasserlöslichkeit, so dass eine leichtere Remobilisierung durch Auswaschen denkbar ist. Die Sedimentgehalte in der inneren Deutschen Bucht sind daher kaum als direkte Ablagerung von Elbesedimenten oder -schwebstoffen interpretierbar. Schon weil der Sedimentationsprozess einer Zeitverzögerung unterliegt, müssten für eine mögliche Klärung der Zusammenhänge länger zurückliegende Konzentrationen berücksichtigt werden.

Abschließend werden die mittleren Konzentrationen in den Sedimenten der drei wichtigsten Zuflüsse der Deutschen Bucht in Tab. 4-2 zum Vergleich aufgeführt.

'99 – '02	EMS mean sediment concentration [$\mu\text{g/kg DW}$]	WESER	ELBE
HCB	< 0.1	0.3	5.96 – 8.2
CB153	0.3 – 1.0	3.1 – 4.4	3.3
p,p'-DDD	0.13	0.85	4.8

Tab. 4-2: CKW-Konzentrationen im Oberflächensediment der Mündungsbereiche der Flüsse Ems, Weser und Elbe. Mittelwerte in $\mu\text{g/kg}$ Trockenmasse für die Jahre 1999 – 2002 (MESSPROGRAMM MEERESUMWELT 2005).

Table 4-2: CHC-concentrations in surface sediments of the estuaries of rivers Ems, Weser, and Elbe. Mean values in $\mu\text{g/kg}$ dry weight for 1999 – 2002 (MESSPROGRAMM MEERESUMWELT 2005).

In der Ems wurden erwartungsgemäß die niedrigsten Konzentrationen festgestellt. Das Sediment der Weser wies relativ hohe PCB-Konzentrationen auf, die auf ähnlich hohem Niveau lagen wie für die Elbe. In der Elbe wurden darüber hinaus sowohl vergleichsweise hohe HCB- als auch DDD-Konzentrationen im Sediment gemessen.

Zeitliche Tendenzen sind für keinen der Stoffe auf keiner Station bisher erkennbar. Gründe hierfür sind wiederum der kurze Beobachtungszeitraums von nur 10 Jahren und die hohe Variabilität der Konzentrationen. Auch ein Normieren der Konzentrationen auf den TOC-Gehalt führte zu keiner spürbaren Reduktion der hohen Schwankungen.

4.2.4 Kohlenwasserstoffe

Tafel 4-4: Kohlenwasserstoffe

Erdöl wird weltweit in großen Mengen gefördert, transportiert und verarbeitet, so dass eine besondere Umweltbeobachtung vor allem aufgrund der großen Mengen angezeigt ist. Die Hauptbestandteile des Erdöls, das aus einem Gemisch tausender verschiedener Stoffe besteht, sind **Erdölkohlenwasserstoffe (EKW)**. Mengenmäßig ist die Untergruppe der **Aliphaten (n-Alkane)** am bedeutendsten, während aus toxikologischer Sicht die **Aromaten** am relevantesten sind. EKW sind wenig wasserlöslich und werden an Schwebstoffen und in Sedimenten stark angereichert. EKW sind sehr stabil, jedoch werden n-Alkane relativ leicht biochemisch abgebaut. Kohlenwasserstoffe werden aus der Luft, durch die Flüsse, von Schiffen und Offshore-Förderanlagen ins Meer eingetragen.

Die früher zur Untersuchung der Umweltbelastung durch EKW verwendete summarische Größe ›Gesamtkohlenwasserstoff‹ wurde seit 2001 nicht mehr bestimmt. Stattdessen wurden ausgewählte Einzelkomponenten, wie n-Alkane und Aromaten, erfasst. Einige der im Erdöl vorkommenden Kohlenwasserstoffe (z. B. n-Alkane) können auch durch pflanzliche oder tierische Organismen gebildet werden. Eine Unterscheidung zwischen biogenem und petrogenem Ursprung ist durch Betrachtung der relativen Konzentrationen der einzelnen Kohlenwasserstoffe zueinander möglich. Bei den Alkanen weist eine Verteilung mit Bevorzugung ungeradzahliger Kettenlängen auf Landpflanzen als Ursprung hin. Als Maß für den Anteil an biogenen Alkanen wird der ›**Carbon Preference Index**‹ (CPI: Summe der ungeradzahligen n-Alkane dividiert durch die Summe der geradzahligen im Bereich von n-C₂₀ bis n-C₃₀) verwendet, der für petrogene Muster etwa 1 und für biogene Muster > 4 ist. Auch Algen sind Produzenten bestimmter n-Alkane; von diesen werden vor allem n-C₁₇, n-C₁₉ und n-C₁₅ gebildet.

Bei der Stoffgruppe der Kohlenwasserstoffe (KW) haben zwei Untergruppen eine besondere ökologische Bedeutung: Gesättigte KW (Alkane, Aliphaten) und aromatische KW. Die Alkane (*Abschnitt 4.2.4.2, S. 136*) gewinnen ihre Bedeutung dadurch, dass sie mengenmäßig der Hauptbestandteil von Erdöl (und daraus gewonnener Produktöle) sind. Aromatische KW kommen zwar auch – in geringeren Konzentrationen – im Erdöl vor, haben aber z. T. auch noch andere Quellen. Ökologisch relevant sind sie insbesondere aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften, die wesentlich höher sind als die der Alkane. Dies gilt in noch stärkerem Maß für die Aromaten-Untergruppe der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK, *Abschnitt 4.2.4.3, S. 139*).

4.2.4.1 Akute Ölverschmutzungen

Obwohl bei den Untersuchungen der chronischen Verschmutzung durch Erdölkohlenwasserstoffe nur eine geringe Belastung im Meerwasser beobachtet wurde (vgl. *Abschnitt 4.2.4.2, S. 136*), sind auch im Jahr 2003 zahlreiche akute Verschmutzungen durch Öl in der Deutschen Bucht beobachtet worden, die z. T. an den Küsten zu beträchtlichen Schäden führten. Das BSH führt deshalb seit einigen Jahren eine Gesamtstatistik über beobachtete Gewässerverunreinigungen.

Von der Küstenwache (Bundesgrenzschutz See, Zoll, Vollzugsorgane der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Fischereiaufsicht), der Marine, der Wasserschutzpolizei sowie durch private Dritte wurden im Jahr 2003 insgesamt 240 Verunreinigungen gemeldet (2002: 274; 2001: 305). In diesen Angaben sind in der deutschen AWZ der Ostsee und inneren Gewässern beobachtete Verunreinigungen enthalten. In der Regel handelte es sich um Ölverschmutzungen. Die räumliche Verteilung der in der Deutschen Bucht beobachteten Verschmutzungen ist in *Abb. 4-23* dargestellt. Die Häufung von Ölverschmutzungen außerhalb der ostfriesischen Insel fällt mit den Hauptfahrwassern zusammen.

Im Rahmen von 30 Strafverfahren wurden am BSH vergleichende Analysen zwischen Proben aus Ölfilmen und von verdächtigten Schiffen durchgeführt. Insgesamt wurden dazu im Jahr 2003 151 Ölproben untersucht.

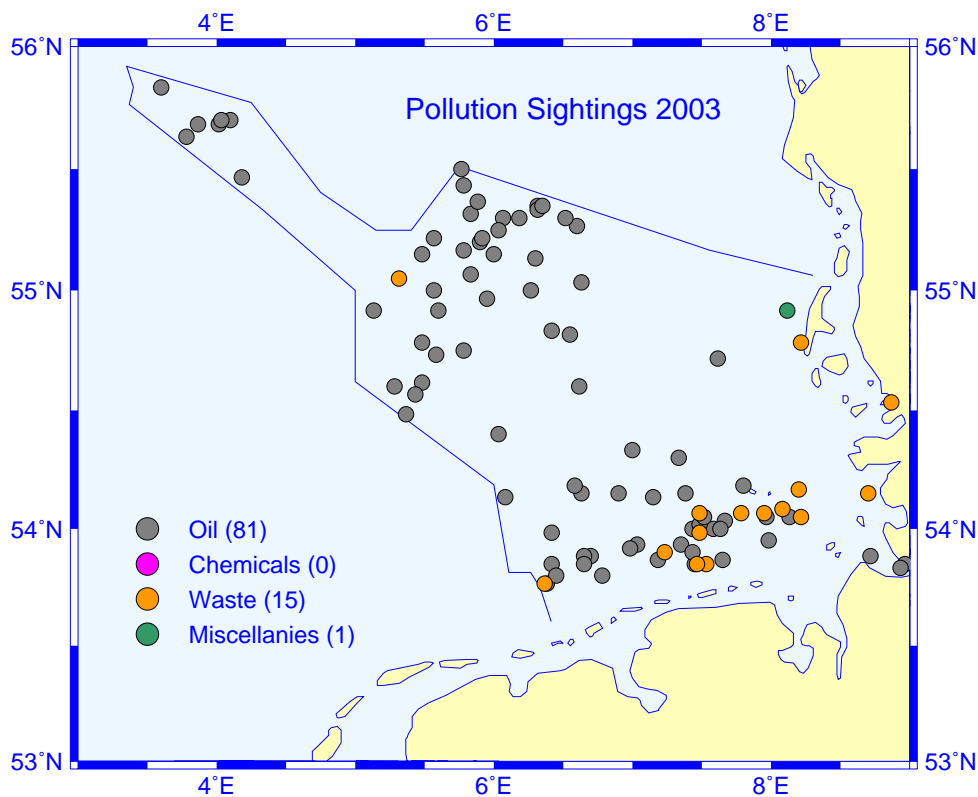


Abb. 4-23: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht im Jahr 2003.

Fig. 4-23: Pollution sightings in the German Bight in 2003.

4.2.4.2 Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane

Der Konzentrationsbereich der Summe der Aliphaten lag im August 2003 zwischen 13 ng/L in der nördlichen Nordsee und 151 ng/L in der südlichen Deutschen Bucht (Tab. 4-3). Die Mediankonzentrationen einzelner n-Alkane im Bereich C₂₀ bis C₃₀ lagen in der Nordsee zwischen 0.4 und 2 ng/L, während Maximalkonzentrationen bis zu 8.6 ng/L auftraten. Die relativ homogene Konzentrationsverteilung (Abb. 4-24, S. 138) mit einem mittleren Carbon Preference Index von 1.3 weist auf eine gewisse Grundbelastung der Nordsee durch Erdölkohlenwasserstoffe hin. Die Konzentrationen zeigen allerdings, dass diese chronische Belastung relativ gering ist. In der Elbe wurde ein anderes Verteilungsmuster der Konzentrationsbeiträge der n-Alkane beobachtet (Tab. 4-3, Abb. 4-24). Die Bevorzugung ungeradzahlicher Kettenlängen (Maximum bei C₂₉) deutet auf Landpflanzen als Hauptquelle hin; ein zusätzlicher (petrogener) Öl-Anteil ist jedoch auch hier vorhanden.

In den Monaten mit starker Primärproduktion (Mai bis Juli) übertrafen die Konzentrationen von C₁₇ (bis 53.8 ng/L), C₁₉ (bis 52.5 ng/L) und vereinzelt auch C₁₅ (bis 10.4 ng/L) diejenigen aller anderen Alkane. Diese drei Alkane sind bekannte Stoffwechselprodukte von Algen.

Wie Abb. 4-25, S. 139 zeigt, waren die hohen Konzentrationen von C₁₇ und C₁₉ im Hochsommer vor allem im Küstenbereich der südlichen Nordsee zu beobachten. Eine

gute Korrelation zum Schwebstoffgehalt besteht nicht. Eine ähnliche Konzentrationsverteilung wurde auch im Mai in der Deutschen Bucht angetroffen. Auf den ost- und nordfriesischen Küstenstationen wurden C₁₇-Konzentrationen von bis zu 70 ng/L gemessen.

AUG 2003 ng/L	STADE 1 sample	CUXHAVEN 1 sample	NORTH SEA				STADE / min
			min	max	median	mean	
C ₁₂	2.85	1.44	0.21	1.70	0.54	0.65	13.6
C ₁₃	2.30	0.87	0.12	0.70	0.37	0.37	18.6
C ₁₄	2.11	1.75	0.25	1.13	0.57	0.61	8.4
C ₁₅	5.33	3.43	1.33	10.38	3.66	3.68	4.0
C ₁₆	2.29	2.01	0.28	1.50	0.60	0.71	8.3
C ₁₇	32.42	38.03	0.52	53.82	2.05	14.43	62.2
C ₁₈	2.20	5.65	0.30	25.89	0.66	3.48	7.2
C ₁₉	1.48	39.99	0.18	52.55	0.58	11.53	8.2
C ₂₀	0.94	0.62	0.20	1.94	0.39	0.52	4.7
C ₂₁	3.20	0.81	0.21	3.17	0.45	0.61	15.6
C ₂₂	2.06	0.77	0.30	4.00	0.49	0.68	7.0
C ₂₃	5.75	1.23	0.30	5.03	0.65	0.85	18.9
C ₂₄	3.42	1.33	0.38	5.43	0.85	1.04	8.9
C ₂₅	9.81	2.41	0.59	8.59	1.25	1.62	16.7
C ₂₆	4.91	1.82	0.49	7.21	1.14	1.49	10.0
C ₂₇	12.58	2.53	0.53	6.17	1.24	1.46	23.6
C ₂₈	4.68	1.55	0.46	4.81	0.95	1.12	10.2
C ₂₉	17.30	3.49	1.12	6.22	1.99	2.29	15.4
C ₃₀	4.32	1.20	0.41	3.17	0.81	1.07	10.5
PRISTAN	1.31	1.48	0.79	20.53	4.11	5.27	1.7
PHYTAN	1.15	0.33	0.03	0.60	0.11	0.17	35.2
Σ Aliph.	122.3	112.7	13.3	151.2	25.7	53.6	9.2
CPI	2.5	1.6	0.8	1.9	1.3	1.3	3.0

Tab. 4-3: Konzentrationen von n-Alkanen im Wasser der Nordsee im August 2003.

Table 4-3: Concentrations of n-Alkanes in North Sea sea water in August 2003.

Bemerkenswert ist, dass die Gesamtkonzentration der Aliphaten in der Elbe durchaus nicht immer die Höchstkonzentration im Nordseegebiet darstellt (vgl. Tab. 4-3). In Algenblüten werden z. T. deutlich höhere Summenkonzentrationen erreicht. Die beobachteten Konzentrationen stellen keine biologisch relevante Belastung dar. Die in der Öffentlichkeit mit dem Begriff »Ölverschmutzung« verknüpfte Umweltgefährdung resultiert vor allem aus geschlossenen Ölfilmen und den damit verbundenen Folgen; solche Ölfilme bilden sich bei den beobachteten Konzentrationen jedoch nicht aus.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Nordsee und Deutschen Bucht eine Grundbelastung durch Reste von Erdölkohlenwasserstoffen nachweisbar war. Auf einigen wenigen Stationen – z. B. in der Deutschen Bucht und in einem Plattformgebiet vor der schottischen Küste – wurden auch leicht erhöhte Konzentrationen gemessen. Wesentlich höhere Konzentrationen einzelner Kohlenwasserstoffe wurden

durch Algen verursacht. Von Land wurden zusätzlich über die Flüsse weitere biogene Kohlenwasserstoffe eingetragen. Außerhalb von akuten Ölverschmutzungen können somit biogene Quellen einen markanten Beitrag zur Gesamtkonzentration aliphatischer Kohlenwasserstoffe leisten.

Aufgrund der hohen Variabilität waren bisher keine zeitlichen Tendenzen in den Konzentrationsverteilungen der Aliphaten erkennbar. Das Überwachungsprogramm des BSH sieht gegenwärtig keine Bestimmung von Aliphatenkonzentrationen im Sediment vor.

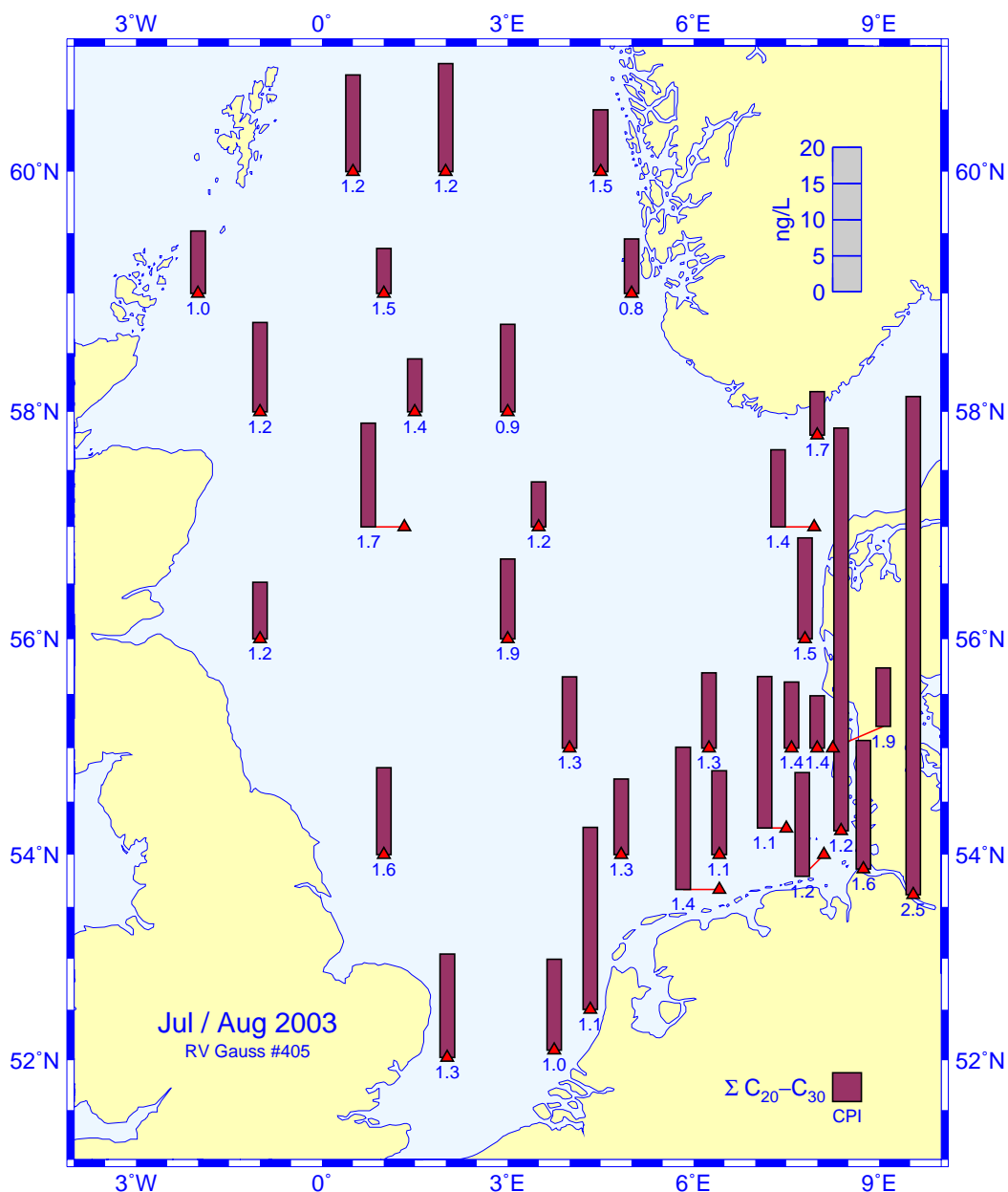


Abb. 4-24: Geographische Konzentrationsverteilung für die Summe der n-Alkane von C₂₀ bis C₃₀ im Oberflächenwasser der Nordsee (5 m) im Juli / August 2003. Werte unterhalb der Säulen geben den CPI, Säulenhöhen in ng/L.

Fig. 4-24: Geographical distribution of total concentration of n-Alkanes from C₂₀ to C₃₀ for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in July / August 2003. Figures below columns give the CPI, column heights in ng/L.

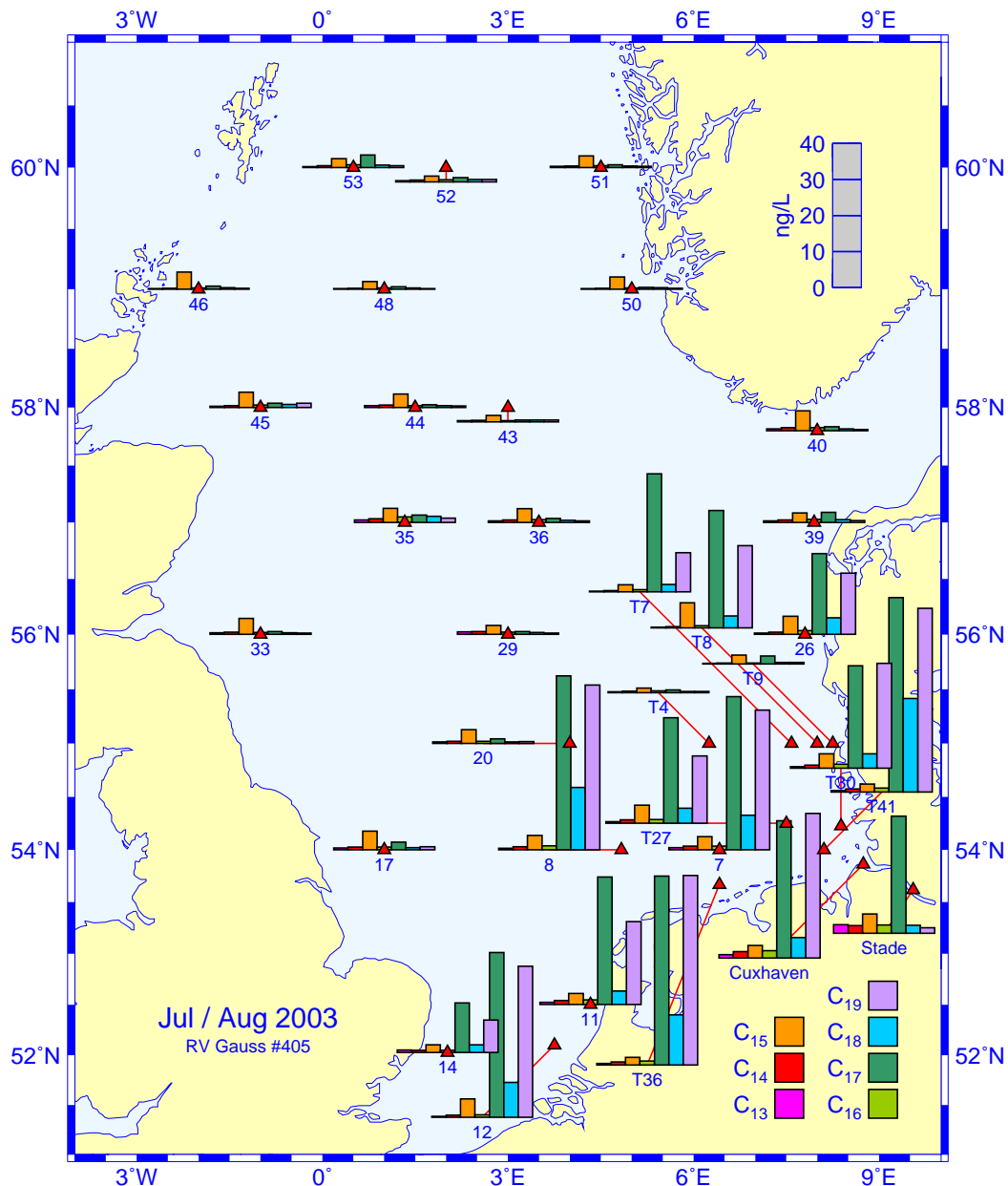


Abb. 4-25: Geographische Konzentrationsverteilungen für die n-Alkane C_{13} bis C_{19} im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Juli / August 2003. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-25: Geographical distribution of concentrations of n-Alkanes C_{13} to C_{19} for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in July / August 2003. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.

4.2.4.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Die PAK sind zwar strukturell einander ähnlich, unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften erheblich. Einige lassen sich als ideale Modellverbindungen zur Verfolgung ökologischer Prozesse nutzen. Unter den PAK finden sich sowohl relativ flüchtige Vertreter wie Naphthalin als auch schwerflüchtige Homologe. Ebenso gibt es relativ gut wasserlösliche, aber auch sehr lipophile Verbindungen in dieser Schadstoffklasse (log K_{OW} Bereich von 3.3 – 8,

s. Fußnote, S. 123). Unterschiedliche Konzentrationsverteilungen sind in der Verschiedenheit physikalisch-chemischer Eigenschaften und Eintragspfade begründet.

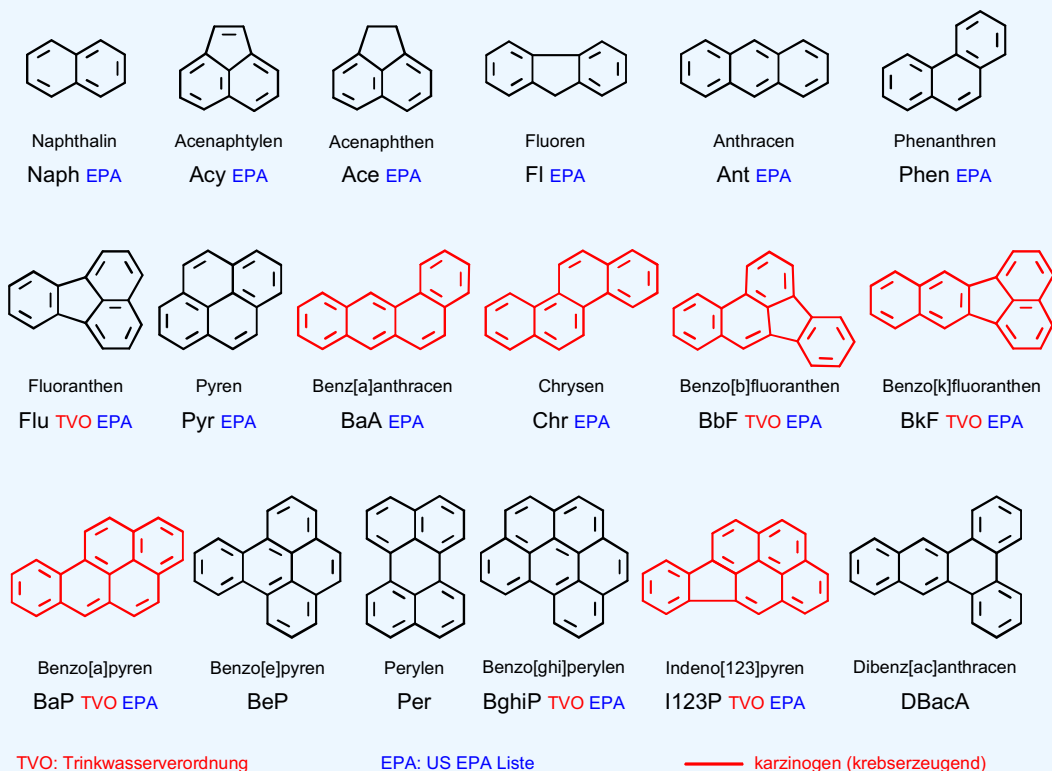
Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, engl. PAH) sind organische Verbindungen, die aus zwei oder mehreren kondensierten, aromatischen Ringen bestehen. Von den Hunderten PAK, die bisher in der Umwelt nachgewiesen wurden, wird nur eine begrenzte Auswahl für Überwachungsuntersuchungen herangezogen. PAK sind als reine Kohlenwasserstoffe wenig wasserlöslich, zeigen eine hohe Affinität zu festen Oberflächen und werden an Schwebstoffen, Sedimenten und in Biota stark angereichert. Sie entstehen bei allen unvollständigen Verbrennungsprozessen von organischem Material (Holz, Kohle, Benzin, Öl) und sind ferner im Steinkohlenteer und im Erdöl vorhanden. PAK gelangen nicht ausschließlich aus anthropogenen Quellen in die Umwelt, denn sie entstehen beispielsweise auch bei natürlichen Verbrennungsprozessen (Waldbrände).

Einige PAK lösen Krebserkrankungen aus. Wegen der hohen Expositionswahrscheinlichkeit und ihres ubiquitären Vorkommens gelten sie als prioritär gefährliche Umweltkanzerogene. Mengenmäßig sind sie wohl die bedeutendste Schadstoffklasse überhaupt.

In die Meeresumwelt werden sie hauptsächlich direkt aus der Luft und über die Flüsse eingetragen. Aufgrund ihrer hohen Affinität zu Schwebstoffen beobachtet man sehr starke Konzentrationsgefälle von den Flussästuaren und Küsten (hohe Schwebstoffgehalte) zur offenen See hin (geringe Schwebstoffgehalte).

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die routinemäßig im BSH bestimmt werden:



a) PAK-Gehalte des Meerwassers

Eine Dokumentation der Konzentrationsverteilungen und Verhaltensweisen aller vom BSH überwachten PAK würde den Rahmen des Berichts sprengen. Um eine sinnvolle Auswahl von PAK-Verbindungen treffen zu können, wurden die im Mai und Juli / Au-

gust 2003 in der Nordsee gemessenen Konzentrationen der PAK zunächst im Hinblick auf Ähnlichkeiten einer Cluster- und einer Regressionsanalyse unterzogen.

Aufgrund der Cluster-Analyse weist Naphthalin (Naph) das eigenständigste Verhalten auf, gefolgt von Fluoren (Fl) und Phenanthren (Phen). Einander ähnlich verhalten sich die Konzentrationen von Fluoranthen (Flu) und Pyren (Pyr). Das Hauptcluster mit den geringsten Unterschieden in den Konzentrationsverteilungen bilden die 5- und 6-Ring-Aromaten – BaA, Chr/Tr, BbF, BaP, BeP, Per, BghiP, DBaA und I123P, vgl. *Tafel 4-5*.

Die Regressionsanalyse bestätigt diese Ergebnisse (*Tab. 4-4*). Die Konzentrationen der 2- bis 3-Ring-Aromaten – Naph, Fl, Phen – sind unkorreliert mit denjenigen anderer PAK, während zwischen den Konzentrationen höherer Aromaten z. T. sehr hohe lineare Korrelationen festgestellt wurden. Für alle höher kondensierten Aromaten ab BaA ergaben sich wechselseitige Korrelationskoeffizienten > 0.95 . Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in *Tab. 4-4* stellvertretend für diese Aromatengruppe lediglich die Korrelationsergebnisse für BaA, BaP und I123P aufgeführt.

$r^2 \backslash r$	Naph	Ace	Fl	Phen	Flu	BaA	BaP	I123P	S	SPM
Naph	1	0.6	0.6	0.6	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	-0.2
Ace	0.4	1	0.8	0.9	0.7	0.6	0.6	0.6	-0.4	-0.1
Fl	0.3	0.6	1	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	-0.2	-0.0
Phen	0.3	0.8	0.7	1	0.8	0.7	0.7	0.7	-0.4	-0.1
Flu	0.1	0.5	0.4	0.7	1	0.8	0.8	0.8	-0.5	0.1
BaA	0.1	0.3	0.3	0.5	0.6	1	1	1	-0.3	-0.0
BaP	0.2	0.4	0.3	0.5	0.7	1	1	1	-0.3	-0.1
I123P	0.1	0.3	0.2	0.5	0.7	1	1	1	-0.3	-0.0
S	0.0	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	1	0.1
SPM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1

Tab. 4-4: Lineare Korrelationsmatrix für einige PAK, Salz- und Schwebstoffgehalt (S & SPM). Oberhalb Hauptdiagonale: Korrelationskoeffizienten (r), unterhalb: erklärte Varianz (r^2).

Table 4-4: Linear correlation matrix for some PAH, salinity (S), and suspended particulate matter (SPM). Above main diagonal: correlation coefficients (r), below: accounted variance (r^2).

Ein weiteres bemerkenswertes Ergebnis besteht darin, dass die PAK weder mit dem Salzgehalt noch mit dem Schwebstoffgehalt korrelieren. Von den physikalisch chemischen Eigenschaften her hätte bei den relativ gut wasserlöslichen 2- bis 3-Ring-Aromaten eine Korrelation zum Salzgehalt, bei den übrigen PAK eine zum Schwebstoffgehalt bestehen können. Die Unabhängigkeit der PAK-Konzentrationen von diesen Variablen weist auf spezielle und verschiedene Eintragsquellen hin (s. u.).

Aufgrund dieser Voranalysen kann eine eingehendere Betrachtung der PAK-Verteilungen auf wenige typische Verbindungen beschränkt bleiben. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden die Verbindungen Naph, Fl, Phen, Flu und BaP ausgewählt, die sich entweder sehr eigenständig oder repräsentativ verhalten.

Die Konzentrationen dieser PAK-Verbindungen variierten im Mai 2003 in der Elbe bei Stade zwischen 0.7 ng/L (Naph) und 11.6 ng/L (Flu). In der Deutschen Bucht lagen alle Konzentrationen im Intervall 0.005 – 2.1 ng/L, während Mediankonzentrationen zwischen 0.032 ng/L (BaP) und 0.76 ng/L (Naph) rangierten. Mit Ausnahme der Naph-Verteilung zeigten alle PAK-Verteilungen einen mehr oder minder starken Konzentrationsanstieg von der offenen See zur Küste hin (*Abb. 4-26*). Für die hochkonden-

sierten 5- und 6-Ring-Aromaten war dieser Gradient sehr stark ausgeprägt; die Verhältnisse der Konzentrationen in der Elbe zu den Minimalkonzentrationen in der Deutschen Bucht waren > 500 . Für die 2- und 3-Ring-Aromaten fiel der Gradient weniger steil aus (Konzentrationsverhältnisse < 30). Der Unterschied rührt hauptsächlich daher, dass die hochkondensierten polyzyklischen Aromaten – im Gegensatz zu den besser wasserlöslichen, niedrig kondensierten 2- und 3-Ring-Aromaten – eine sehr große Affinität zu Schwebstoffen zeigen, die offensichtlich eine starke Abhängigkeit der Konzentrationen von den Schwebstoffgehalten verursacht. Zur Veranschaulichung des Sachverhalts sind in Abb. 4-27 die relativen Konzentrationen verschiedener PAK gemeinsam mit dem Süßwasseranteil entlang eines Schnitts von der Elbe bis in die äußere Deutsche Bucht dargestellt.

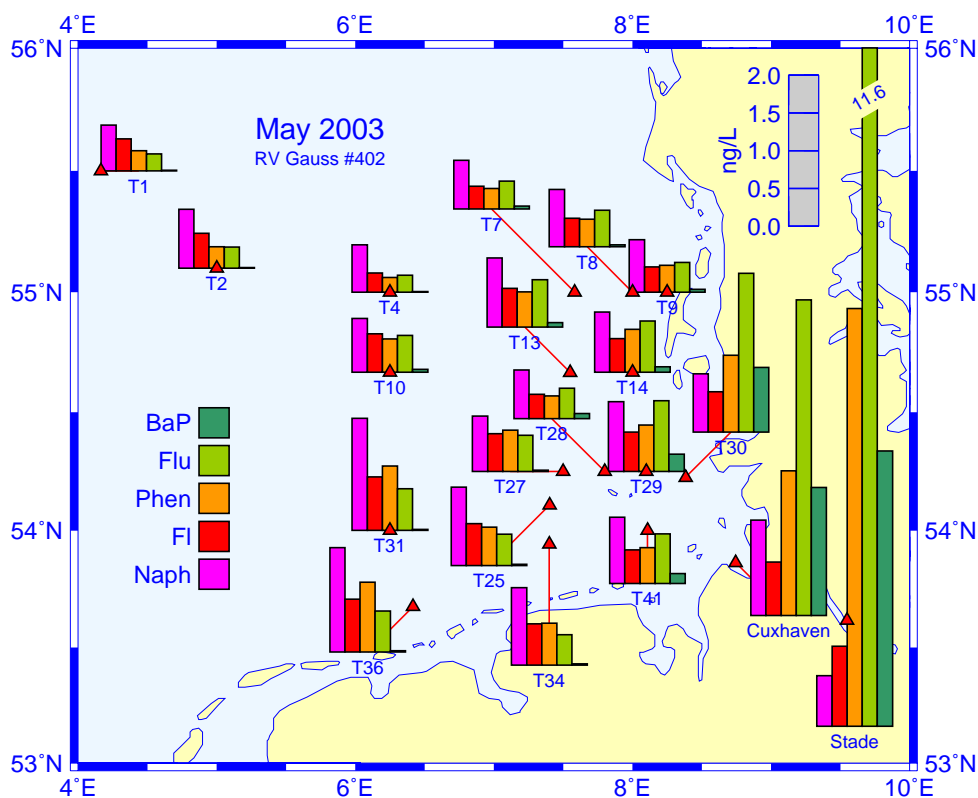


Abb. 4-26: Konzentrationen (ng/L) einiger PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai 2003.

Fig. 4-26: Concentrations (ng/L) of some PAHs in surface water (5 m) of the German Bight in May 2003.

Die Nordsee-Gesamtaufnahme im Juli / August 2003 ermöglicht eine großräumige Betrachtung der PAK-Verteilungen (Abb. 4-28, S. 144). Die Konzentrationen in der zentralen und nördlichen Nordsee waren gegenüber denjenigen in der äußeren Deutschen Bucht um bis zu 70 % reduziert. Neben dem Belastungsschwerpunkt im Einflussbereich der Elbe fanden sich weitere vor der Themsemündung (Station 14), vor der norwegischen Küste (Station 50) und vor der schottischen Küste (Station 45). Die deutlich erhöhten Naphthalin-Konzentrationen vor der Schottischen Küste fallen räumlich mit einem Ölförderungsgebiet zusammen. Einfache Beziehungen der verschiedenen PAK-Konzentrationen zum Schwebstoff- und Salzgehalt existieren offenbar nicht.

Abgesehen von den in der stark belasteten Elbe gemessenen singulären PAK-Konzentrationen lassen sich drei unterschiedliche Belastungsbereiche angeben, denen alle Stationsmessungen zugeordnet werden können. Diese Bereiche wurde mittels einer Clusteranalyse bestimmt, in die alle PAK außer Naph und FI einbezogen wurden. Eine räumlich getrennte Gruppe von Belastungsschwerpunkten wird danach durch die küstennahen Stationen 14, T30 und T36 in der südlichen Nordsee gebildet (Abb. 4-28, S. 144), die als mäßig belastet einzustufen sind. Der Übergang zur nächst geringer belasteten Gruppe ist fließend. Ihr sind alle Stationen der inneren Deutschen, die Stationen 8, 11, und 12 vor den Westfriesischen Inseln und dem Rheindelta, die Station 45 nordöstlich von Aberdeen (Ölfördergebiet) sowie die Stationen 40 und 50 im Skagerrak (Ostseewasser) bzw. außerhalb Stavanger zuzurechnen. Die verbleibenden Stationen, die mehrheitlich in der zentralen und nördlichen Nordsee liegen, bilden die dritte Gruppe, die als weitgehend unbelastet bzgl. PAK anzusehen ist. In allen drei Gruppen waren die Gesamtkonzentrationen dominiert von etwa gleichhohen Phen-, Flu- und Pyr-Beiträgen, welche von ca. 0.6 (Gruppe 1) über 0.4 auf 0.2 ng/L abfielen.

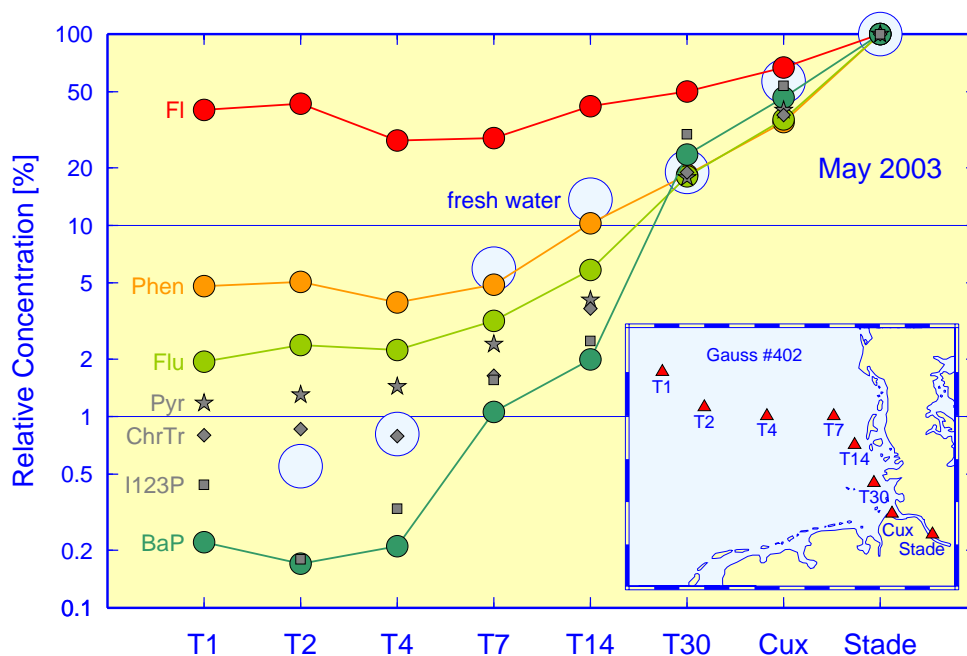


Abb. 4-27: Konzentrationen einiger PAK relativ zu Stade (100 %) entlang des Salzgehaltsgradienten der Elbfahne. Salzgehalt als Frischwasseranteil (%); \log_{10} -Skalierung beachten.

Fig. 4-27: Concentrations of some PAHs relative to Stade (100 %) along the salinity gradient of the Elbe river plume. Salinity as percent fresh water (%); note \log_{10} -scaling.

Eine Berücksichtigung der Stoffe FI und insbesondere Naph in der Clusteranalyse hätte nicht zu grundsätzlich anderen Ergebnissen geführt. Allerdings wären die Stationen 14, 17, 33, 35, 44, und 45 vor der britischen Küste wohl weniger günstig eingestuft worden. Die hier nachgewiesenen hohen Naph-Konzentrationen sind offenbar petrogenen Ursprungs (Ölverschmutzung).

Die Konzentrationen der verschiedenen PAK sind zeitlich hochvariabel, so dass gegenwärtig keine Aussagen zur langfristigen Entwicklung getroffen werden können. Da im Jahr 2003 Beprobungen auf den Sommer beschränkt blieben, sind jahreszeitliche Schwankungen nicht erfasst worden. Aus früheren Untersuchungen ist jedoch be-

kannt (KOOPMANN ET AL. 1993, NIES ET AL. 2003), dass die PAK-Konzentrationen im Sommer (August / September) an allen Stationen ein Minimum durchlaufen, während im Zeitraum November bis April höhere Konzentrationen auftreten. Letztere sind auf im Winter höhere Schwebstoffgehalte, geringere Abbauraten sowie höhere Einträge durch Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen.

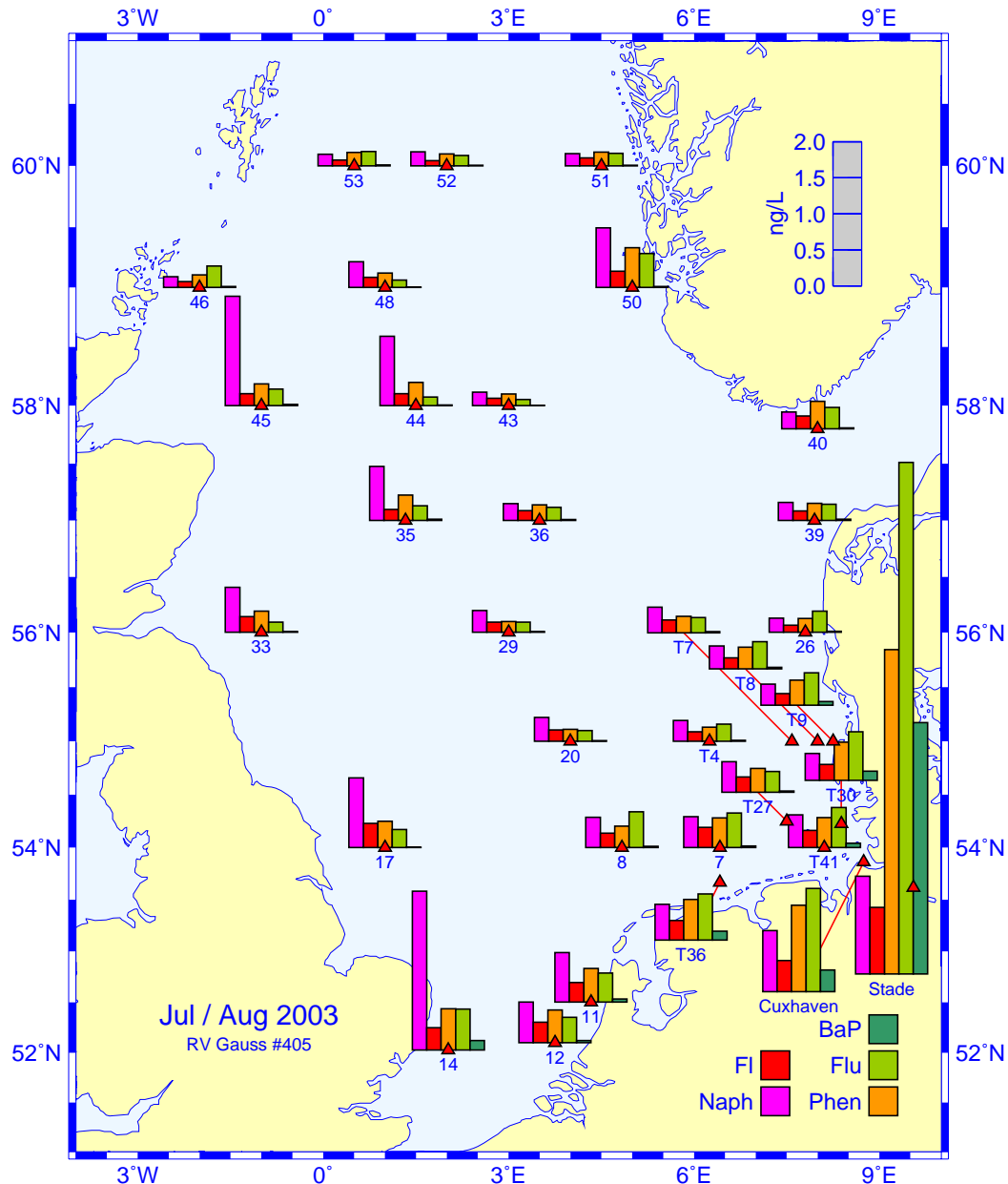


Abb. 4-28: Konzentrationen einiger PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Juli / August 2003. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-28: Concentrations of some PAHs in North Sea surface water (5 m) in July / August 2003. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.

b) PAK-Gehalte des Sediments

Aufgrund ihrer unpolaren Eigenschaften werden die meisten PAK an festen Oberflächen stark angereichert und liegen in Sedimenten und Schwebstoffen in ca. 100fach höherer Konzentration vor als in der Wasserphase. Die PAK-Konzentrationen im Se-

diment übertreffen diejenigen der chlorierten Kohlenwasserstoffe um das 100 – 1000fache. PAK waren daher auf allen Stationen nachweisbar.

Die Konzentrationsmuster der PAK-Verbindungen im Sediment (Abb. 4-29) ähneln einander noch stärker als in der Wasserphase. Daher soll stellvertretend für alle PAK das stark karzinogene Benzo[a]pyren (BaP) zur Diskussion der Überwachungsergebnisse herangezogen werden. Die PAK-Muster in Wasser- und Sedimentproben unterscheiden sich deutlich. In Sedimenten sind die 5- und 6-Ring-Aromaten (I123P, BghiP) in deutlich höheren Konzentrationen vorhanden als die 2- bis 4-Ring-Aromaten. Im Gegensatz dazu werden maximale Konzentrationen in Seewasserproben meist für Phen oder Flu festgestellt.

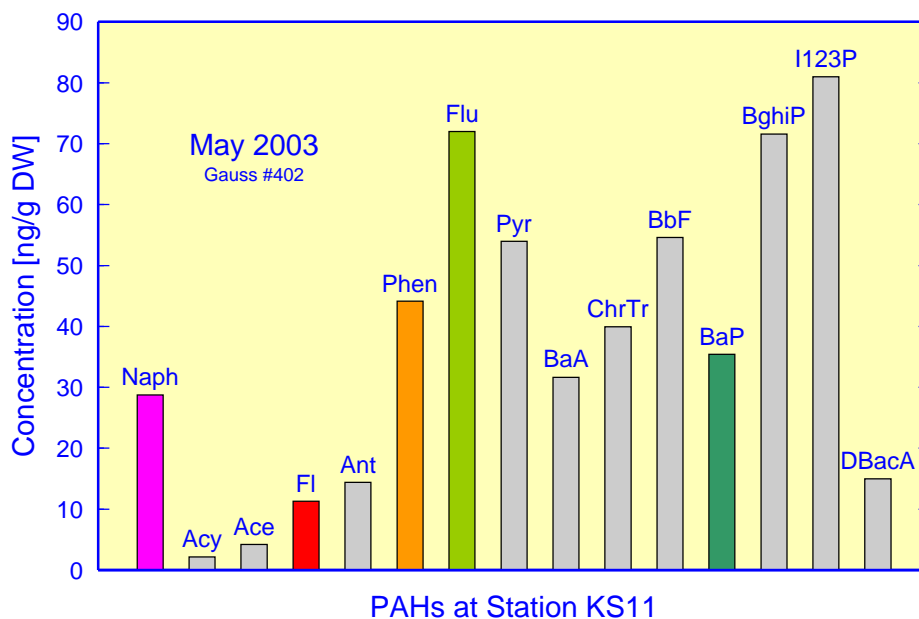


Abb. 4-29: Typisches PAK-Konzentrationsmuster einer Sedimentprobe aus der Deutschen Bucht.

Fig. 4-29: Typical PAH concentration pattern in a sediment sample from the German Bight.

Im Mai 2003 lagen die mittleren BaP-Konzentrationen in der Deutschen Bucht zwischen 0.3 – 35.4 µg/kg TM (Abb. 4-30, oben); wie für CKW (vgl. Abb. 4-22, S. 133) wurden die höchsten Konzentrationen vor der Elbmündung (KS11) und an Stationen mit relativ hohen TOC-Gehalten in der zentralen Deutschen Bucht (WB5, UE20) beobachtet.

Von allen organischen Schadstoffen weisen PAK im Sediment die räumlich gleichmäßigsten Konzentrationsverteilungen auf; dies wird besonders deutlich für die auf den TOC-Gehalt bezogenen Konzentrationen (Abb. 4-30, unten). Der Variationsbereich der Konzentrationen reduziert sich für diese Normierung auf das schmale Intervall 0.5 – 6.2 µg/g TOC. Die nahezu fehlende räumliche Struktur der Konzentrationsverteilungen ist höchstwahrscheinlich eine Konsequenz des sehr diffusen Eintrags und des ubiquitären Vorkommens der PAK in der Umwelt.

Vergleicht man die auf den TOC-Gehalt bezogenen Konzentrationsverteilungen des BaP (Abb. 4-30, unten) und der CKW (Abb. 4-22, unten), fällt allerdings auf, dass BaP in der zentralen Deutschen Bucht (WB5 etc.) maximale Konzentrationen erreichte. Die-

ser Umstand deutet auf eine besondere lokale Quelle hin, die jedoch bislang nicht identifiziert werden konnte.

Zeitliche Tendenzen sind aufgrund der hohen Variabilität der Konzentrationen und des relativ kurzen Beobachtungszeitraums bislang nicht erkennbar.

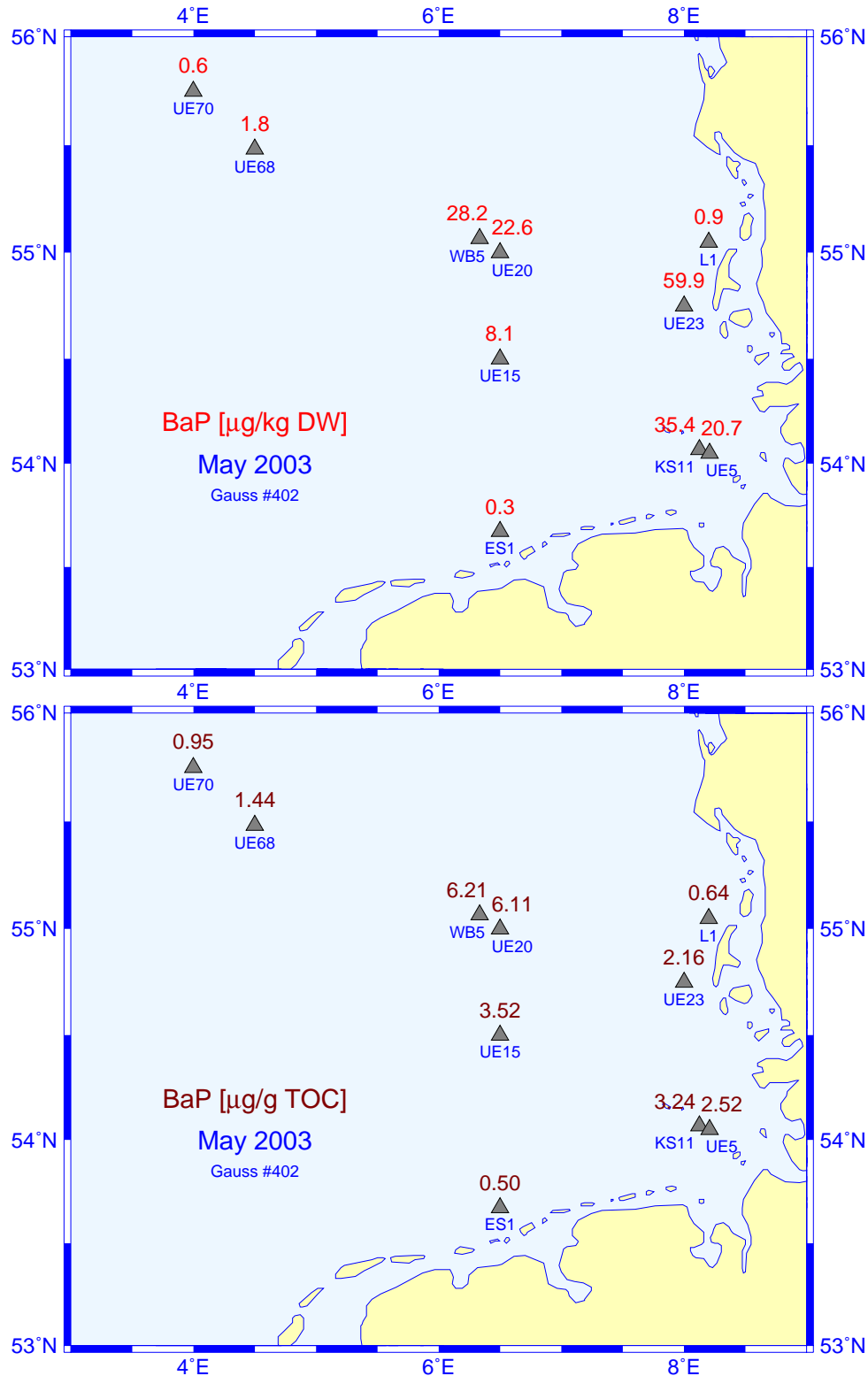


Abb. 4-30: Benzo[a]Pyren-Konzentrationen im Oberflächensediment der Deutschen Bucht.

Fig. 4-30: B[a]P concentrations in surface sediments of the German Bight.

4.2.5 Zinnorganische Verbindungen

Tafel 4-6: Organozinnverbindungen

Organozinnverbindungen werden in unterschiedlichen Bereichen großtechnisch eingesetzt. Neben der Verwendung von Mono- und Dialkylzinnverbindungen als Stabilisatoren und Katalysatoren in der kunststoffverarbeitenden Industrie werden Tributylzinnverbindungen (TBT) insbesondere in Antifouling-Farben zur Verhinderung von Bewuchs auf Schiffsrümpfen verwendet. Bereits in extrem niedrigen Konzentrationen von wenigen ng/L entfaltet TBT seine hormonähnliche Wirkung auf das Reproduktionssystem mariner Schneckenarten, die zur Vermännlichung der weiblichen Tiere (Imposex- und Intersexphänomen) und damit zum Verlust der Fortpflanzungsfähigkeit führen kann. Deshalb wurde der Einsatz von TBT inzwischen verboten.

Die hier dokumentierte Belastung der Nordsee durch Zinnorganische Verbindungen beschränkt sich auf Konzentrationsbestimmungen im Seewasser der Deutschen Bucht und der Elbe im Zeitraum 1999 – 2002. Da die TBT-Abbauprodukte DBT (Dibutylzinn) und MBT (Monobutylzinn) ebenfalls toxisch wirken, wurden diese neben weiteren Organozinnverbindungen mit industrieller Bedeutung – Trioctylzinn, Tri(cyclohexyl)zinn und Triphenylzinn und deren di- und monoalkylierten Abbauprodukte – in die Untersuchungen einbezogen. Die Mittelwerte der im Zeitraum 1999 – 2002 im Seewasser der Deutschen Bucht gemessenen Konzentrationen sind für diejenigen Verbindungen, die oberhalb der Bestimmungsgrenzen lagen, in Tab. 4-5 aufgeführt.

'99 – '02	SAMPLE SIZE	MBT	DBT	TBT	TTBT	TPhT
mean sea water concentration [ng/L]						
Stade	1	9.23	11.90	24.88	3.11	0.23
Brunsbüttel	1	5.36	9.74	12.41	0.00	0.27
Cuxhaven	6	1.82	1.57	3.42	0.17	0.12
T41	5	0.58	1.07	1.33	0.04	0.07
T30	8	0.59	1.00	0.86	0.06	0.06
T29	2	0.47	0.86	0.94	0.09	0.02
T20	1	0.82	1.09	1.26	0.19	0.08
T14	1	0.67	1.40	1.04	0.03	0.08
T9	4	0.43	0.53	0.39	0.07	0.05
T13	1	0.24	0.47	0.71	0.14	0.03
T25	1	0.70	1.11	1.94	0.35	0.18
T27	5	0.55	0.85	0.83	0.09	0.04
T31	1	0.53	1.29	0.91	0.00	0.07
T36	5	0.45	1.14	2.40	0.11	0.04
T4	3	0.38	0.39	0.37	0.07	0.06
T2	1	0.13	0.18	0.15	0.00	0.00
T1	2	0.39	0.33	0.61	0.01	0.00

Tab. 4-5: Mittlere Konzentrationen (ng/L) zinnorganischer Schadstoffe an ausgewählten Stationen in der Deutschen Bucht im Zeitraum 1999 – 2002. Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-31, S. 148.

Table 4-5: Mean concentrations (ng/L) of organotin compounds at selected stations in the German Bight for the period 1999 – 2002. Cf. Fig. 4-31, p. 148 for a station map.

Die Abbauprodukte des TBT wurden in ähnlichen Konzentrationen wie das TBT selbst angetroffen und sollten deshalb bei einer ökotoxikologischen Bewertung berücksichtigt werden. Von den anderen Verbindungen war lediglich Triphenylzinn (TPhT) nachweisbar. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Bestimmungsgrenze für TPhT um eine Größenordnung tiefer liegt als für die übrigen Verbindungen. Das Tetrabutylzinn (TTBT) wurde hauptsächlich in der Elbe angetroffen und stammt aus einem Produktionsbetrieb am Oberlauf der Elbe; die TTBT-Konzentrationen nahmen in den letzten Jahren sehr stark ab.

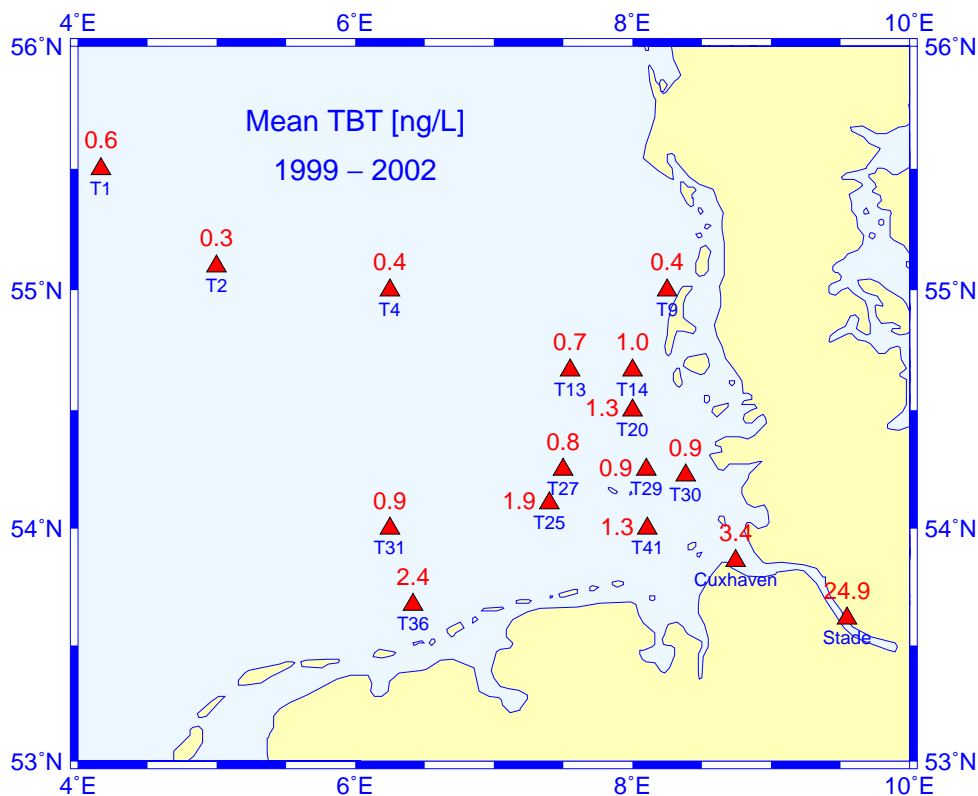


Abb. 4-31: Mittlere TBT-Konzentrationen (ng/L) im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Zeitraum 1999 – 2002.

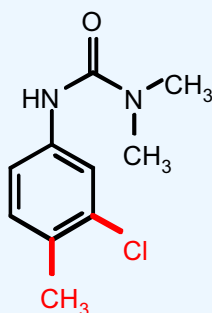
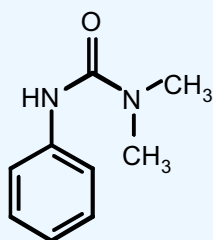
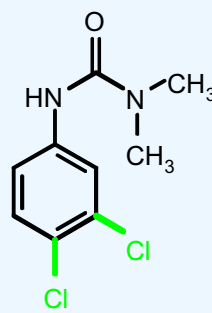
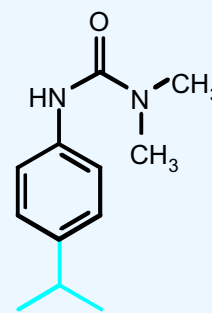
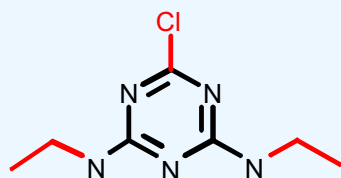
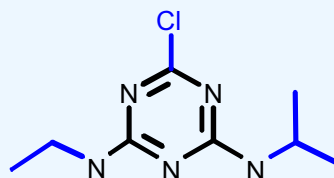
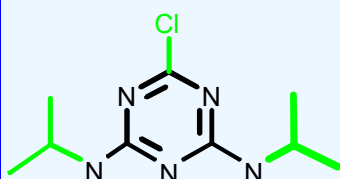
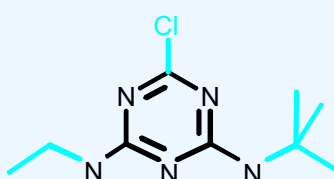
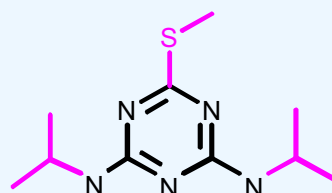
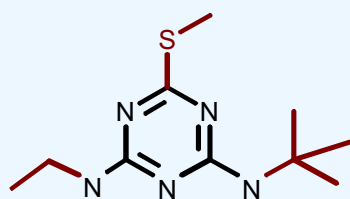
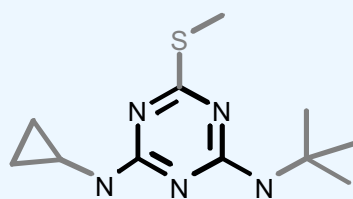
Fig. 4-31: Mean TBT concentrations (ng/L) in near-surface water of the German Bight during 1999 – 2002.

Die räumliche Verteilung der mittleren TBT-Konzentrationen im Zeitraum 1999 – 2002 ist in Abb. 4-31 dargestellt. In der Elbe fielen die TBT-Konzentrationen von 25 ng/L bei Stade auf 3.4 ng/L vor Cuxhaven ab. In Küstennähe der Deutschen Bucht wurden TBT-Konzentrationen von 0.9 – 2.4 ng/L nachgewiesen, die bereits in den Bereich der biologischen Wirkschwelle von 1 – 2 ng/L fallen. In der äußeren Deutschen Bucht wurden geringere Konzentrationen von 0.3 – 0.6 ng/L festgestellt. TBT ist nach heutigen Erkenntnissen der einzige hier untersuchte Schadstoff, der auch im marinen Bereich in akut toxischen Konzentrationen auftrat.

4.2.6 Polare Pestizide

Tafel 4-7: Herbizide

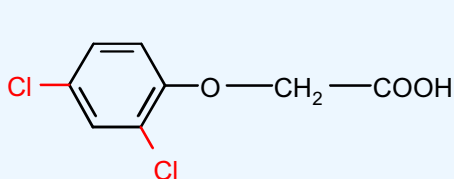
Herbizide (Unkrautbekämpfungsmittel) werden in großen Mengen in der Landwirtschaft eingesetzt und gelangen direkt durch Auswaschung oder über die Flüsse ins Meer; über die Atmosphäre sind ebenfalls signifikante Einträge möglich. Unter den Herbiziden ist eine Vielzahl verschiedener Stoffklassen zu finden. Die gegenwärtig am häufigsten angewendeten Herbizide gehören zu den Klassen Phenylharnstoffe, Triazine und Phenoxyessigsäuren, denen eine Reihe strukturell ähnlicher Substanzen zugeordnet sind.

Phenylharnstoff-Herbizide**Chlortoluron****Fenuron****Diuron****Isoproturon****Triazin-Herbizide****Simazin****Atrazin****Propazin****Terbutylazin****Prometryn****Terbutryn****Irgarol****(Fortsetzung ...)**

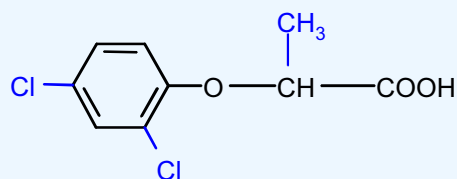
Tafel 4-7: Herbizide

(... Fortsetzung)

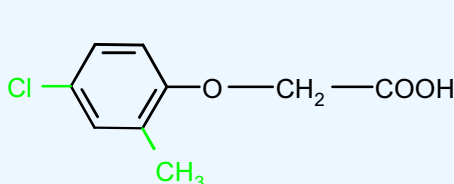
Phenoxyessigsäure-Herbizide



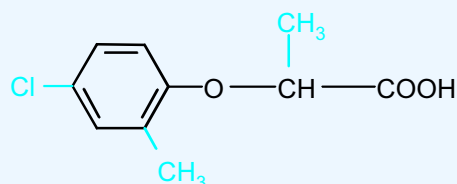
2,4-D [2,4-Dichlorphenoxyessigsäure]



Dichlorprop



MCPA



Mecoprop

Im Gegensatz zu den »klassischen«, unpolaren Schadstoffen besitzen die meisten modernen Pflanzenbehandlungsmittel häufig polare Eigenschaften und sind oft auch weniger persistent. Sie umfassen eine Vielzahl verschiedener Stoffgruppen, so dass ihre Analytik schwierig und aufwendig ist. Infolgedessen sind Kenntnisse über ihr Vorkommen in der Umwelt weniger umfangreich. Neben den in der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union (EU-WRR) gelisteten Pestiziden werden im BSH vor allem solche Pestizide prioritär bestimmt, die in großen Mengen eingesetzt werden. Im Rahmen der Meeresüberwachung wurden über 100 verschiedene Stoffe analysiert, von denen etwa die Hälfte zu den modernen Pestiziden zählt. Letztere sind häufig noch so persistent, dass sie auch im Meerwasser nachgewiesen werden können.

Unter den verschiedenen Wirkstoffklassen der Pestizide nehmen die Herbizide aufgrund ihrer hohen Anwendungsmengen eine herausragende Position ein. Allein in Deutschland werden einzelne Herbizide in Mengen von 500 bis über 1000 t pro Jahr angewendet. Im folgenden Abschnitt wird die Herbizidbelastung der Nordsee im Juli / August 2003 dokumentiert und interpretiert. Aus allen drei Hauptstoffklassen der Herbizide – nämlich Phenylharnstoffe, Triazine und Phenoxyessigsäuren – wurden mehrere Vertreter im ng/L-Konzentrationsbereich im Seewasser der Nordsee nachgewiesen.

4.2.6.1 Herbizidgehalte des Meerwassers

Da die Elbe die stärkste Quelle für Schadstoffeinträge in die Deutsche Bucht und südöstliche Nordsee darstellt, wurden Proben aus dem Elbeästuar in die Untersuchung einbezogen. 21 von 37 analysierten Pestiziden waren in der Elbe nachweisbar. Der Pestizeidetrug und demzufolge die Pestizidkonzentrationen des Wassers unterliegen erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen, die aus der saisonalen Anwendung der einzelnen Wirkstoffe resultieren (vgl. Abschnitt 4.2.6.2, S. 154). Alle in der Elbe nachgewiesenen Pestizide wurden auch in der Deutschen Bucht angetroffen.

Die am häufigsten und in höchsten Konzentrationen angetroffenen Vertreter der Phenylharnstoffe sind Diuron und Isoproturon. Von den Triazin-Herbiziden wurden vor allem Terbutylazin, Simazin und Atrazin gefunden, während unter den Phenoxyessigsäuren Mecoprop und 2,4-D in höchsten Konzentrationen festgestellt wurden.

Die räumlichen Konzentrationsverteilungen in der Nordsee sind in Abb. 4-32 für die sieben wichtigsten Triazine wiedergegeben. In der Elbe waren diese Stoffe in Konzentrationen von 5 bis 50 ng/L nachweisbar. Ähnliche oder sogar noch höhere Konzentrationen wurden auch in Schelde und Rhein gemessen (TON VAN DER ZANDE 2003). Diese hohen Einträge sind weitgehend verantwortlich für die hohe Belastung der Küstenregionen der südlichen Nordsee. Zur offenen See hin wurde ein steiles Konzen-

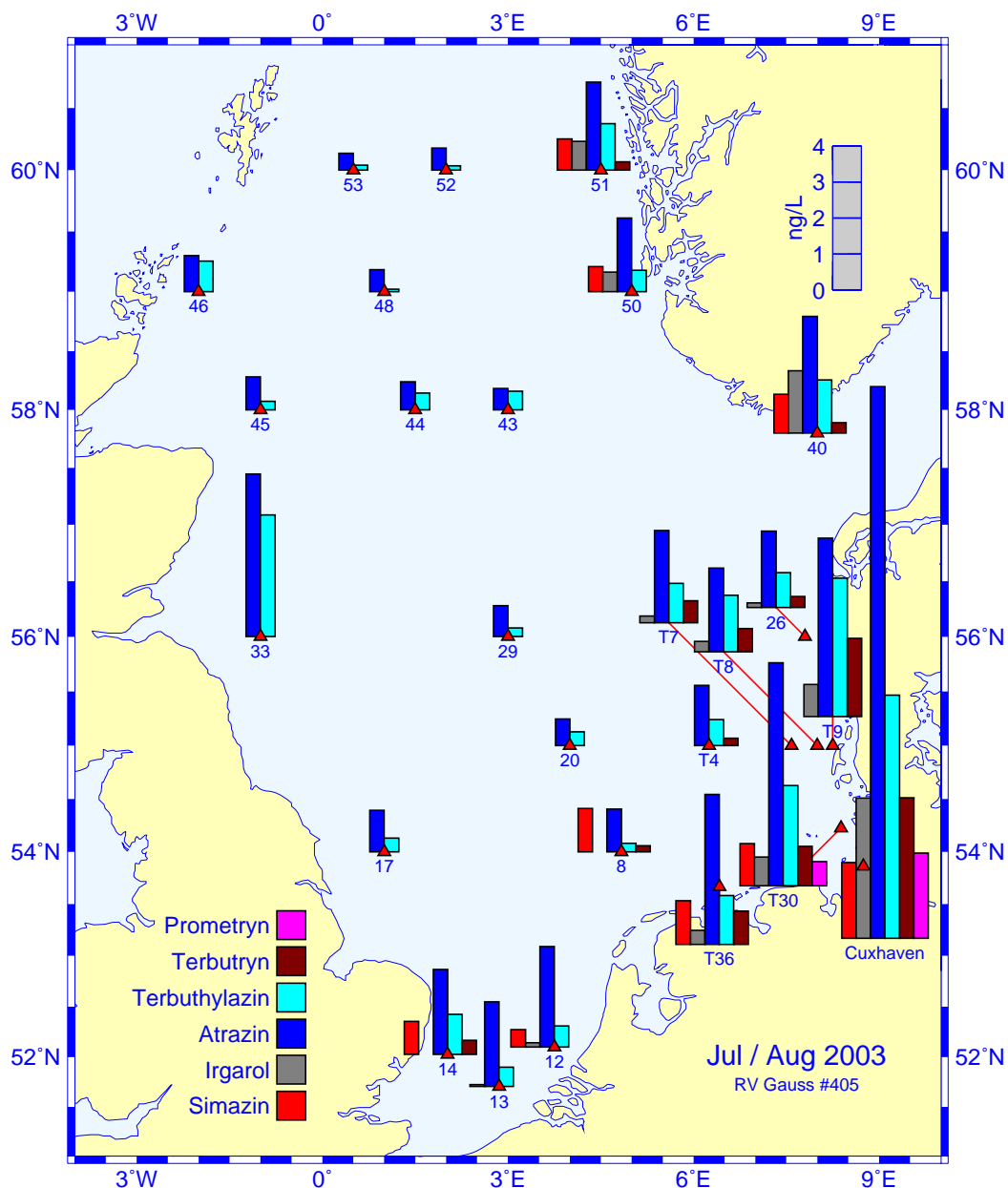


Abb. 4-32: Konzentrationen (ng/L) einiger Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Juli / August 2003.

Fig. 4-32: Concentrations (ng/L) of some triazine herbicides in near-surface sea water of the North Sea in July / August 2003.

trationsgefälle beobachtet, so dass in der zentralen und nördlichen Nordsee nur noch Atrazin und Terbutylazin nachweisbar waren. Vor der norwegischen Küste wurden ebenfalls hohe Konzentration angetroffen, die wohl auf belastetes Ostseewasser zurückzuführen sind.

Die Konzentrationsverteilungen für die vier wichtigsten Phenylharnstoff-Herbizide sind in Abb. 4-33 dargestellt. Das grundsätzliche Verteilungsmuster ähnelt dem der Triazine stark; die absoluten Konzentrationen unterscheiden sich natürlich.

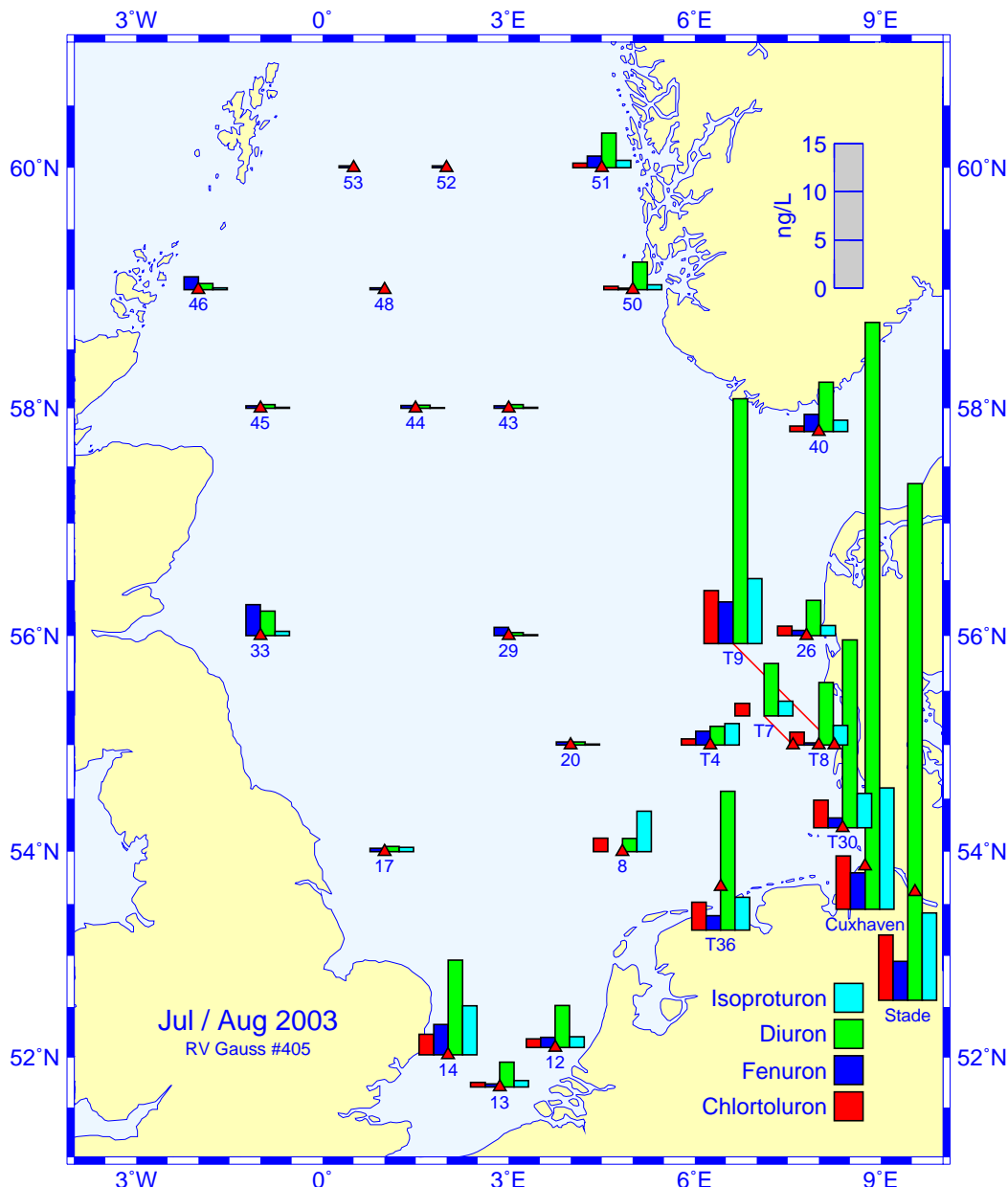


Abb. 4-33: Konzentrationen (ng/L) einiger Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Juli/August 2003.

Fig. 4-33: Concentrations (ng/L) of some phenylurea herbicides in near-surface sea water of the North Sea in July / August 2003.

In der Tab. 4-6 sind regionale Konzentrationsmittelwerte für die 17 im Juli / August 2003 am häufigsten nachgewiesene Herbizide zusammengefasst. In der Elbe variier-

ten die Konzentrationen zwischen 2 und 60 ng/L, in Küstengewässern zwischen 0.5 und 15 ng/L, in der offenen Nordsee zwischen < Nachweisgrenze und 0.7 ng/L. In der offenen See waren bei den gegenwärtigen Bestimmungsgrenzen nur Diuron, Fenuron und Isoproturon sowie Atrazin und Terbutylazin nachweisbar. Das Konzentrationsgefälle von der Elbe zur offenen See hin erscheint für manche Pestizide flacher als durch Vermischung zu erwarten wäre. Eine Vorbelastung küstenfernen Seewassers kann sowohl von Altlasten als auch von atmosphärischen Einträgen herrühren.

AUG 2003 ng/L	ELBE RIVER	COASTAL WATERS	TRANSITION ZONE	OPEN NORTH SEA	NORWEGIAN COAST
METAZACHLOR	2.44	0.73	0.25	< LoD	0.22
METOLACHLOR	6.49	1.24	0.34	< LoD	< LoD
CHLORTOLURON	6.15	3.34	0.98	< LoD	0.46
FENURON	3.90	2.48	0.97	0.41	1.04
DIURON[†]	57.17	15.26	3.39	0.39	3.85
ISOPROTURON[†]	10.81	4.04	1.42	0.10	0.81
SIMAZIN[†]	6.49	1.33	0.70	< LoD	0.87
ATRAZIN[†]	39.35	4.49	2.51	0.71	2.57
TERBUTHYLAZIN	13.96	2.27	1.02	0.31	1.11
PROMETRYN	4.19	0.67	< LoD	< LoD	< LoD
TERBUTRYN	4.81	1.14	0.35	< LoD	0.26
IRGAROL	5.32	0.69	0.14	< LoD	1.02
2,4-D	2.50	0.52	0.48	< LoD	0.37
MCPA	2.17	0.52	0.62	< LoD	0.35
DICHLORPROP	2.07	0.65	0.69	< LoD	< LoD
MECOPROP	3.36	1.08	0.75	< LoD	0.37
CLOFIBRINSÄURE[‡]	3.38	0.75	0.53	< LoD	< LoD
MEDIAN	4.81	1.14	0.69	< LoD	0.37
COLUMN TOTAL	174.6	41.20	15.14	1.92	13.30

† Among priority organic contaminants according to the EC Water Framework Directive.
‡ Medicament.

Tab. 4-6: Regional gemittelte Konzentrationen (ng/L) einiger polarer Pestizide in der Nordsee im August 2003. (LoD = Nachweisgrenze.)

Table 4-6: Regional average concentrations (ng/L) of some polar pesticides in the North Sea in August 2003. (LoD = Limit of Detection.)

Die beobachteten Konzentrationen der polaren Pestizide lagen generell deutlich höher als die der klassischen Schadstoffe. Gegenüber den HCH-Isomeren wurden ca. 10fach, gegenüber den lipophilen PCB, DDT oder PAK über 100fach höhere Konzentrationen festgestellt. Darüber hinaus stellen etliche der analysierten Herbizide strukturell ähnliche Verbindungen dar (vgl. *Tafel 4-7, S. 149*). Ihre gemeinsame Grundstruktur macht einen ähnlichen Wirkmechanismus wahrscheinlich, so dass bei der ökotoxikologischen Bewertung die um 1 – 2 Größenordnungen höhere Summenkonzentration dieser Herbizide betrachtet werden sollte (vgl. *Tab. 4-6*).

4.2.6.2 Zeitliche Variabilität der Herbizidgehalte

Pestizide werden meist sehr gezielt eingesetzt, so dass die Eintragsmengen und demzufolge die Konzentrationen des Wasser starken saisonalen Schwankungen unterliegen. In Abb. 4-34 ist beispielhaft der jahreszeitliche Konzentrationsverlauf einiger Phenylharnstoff-Herbizide in der Elbe bei Blankenese im Jahr 2003 wiedergegeben. Etwa gleichzeitig mit der einsetzenden landwirtschaftlichen Aktivität traten ausgeprägte Maximalkonzentrationen beim Diuron und Isoproturon im April auf.

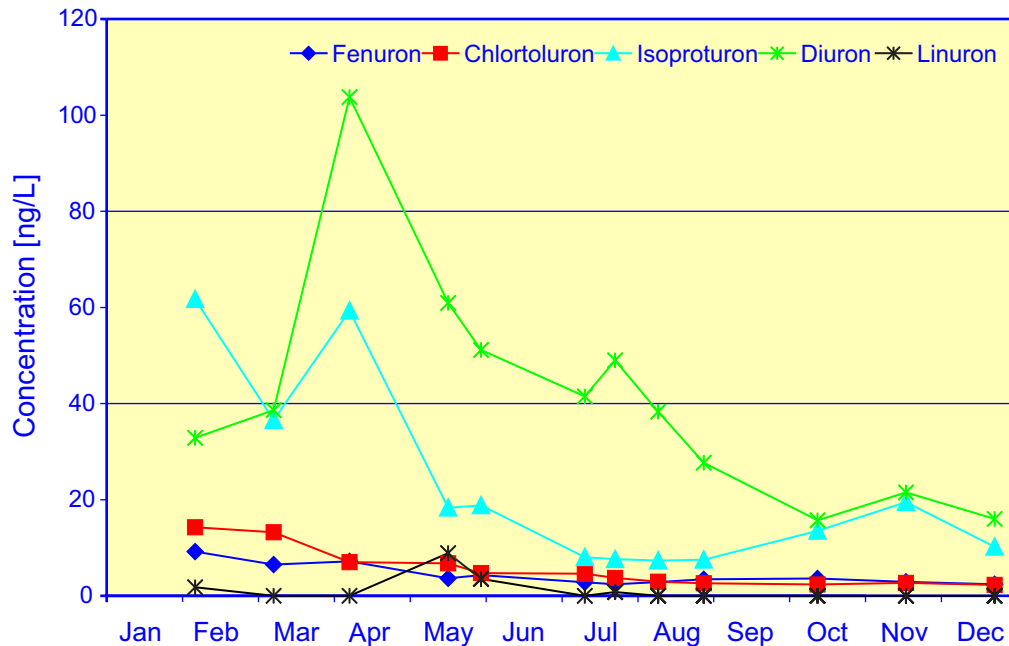


Abb. 4-34: Saisonale Entwicklung der Konzentrationen einiger Phenylharnstoff-Herbizide in der Elbe bei Blankenese im Jahr 2003.

Fig. 4-34: Seasonal evolution of phenylurea herbicides in the river Elbe at Blankenese in 2003.

Die zeitliche Datendichte für die Deutsche Bucht ist verständlicherweise weitaus geringer, aber auch anhand der Ergebnisse der Überwachungsfahrten in Mai und Juli / August 2003 sind unterschiedliche Belastungen erkennbar (Tab. 4-7 und Tab. 4-8). Die Konzentrationen der meisten Substanzen übertrafen im August auf fast allen Stationen diejenigen im Mai um das 0.6 bis 16fache. Die Phenoxycarbonsäuren zeigten dabei den geringsten, die Phenylharnstoffe den höchsten Konzentrationsanstieg. Erstaunlicherweise verlief die saisonale Entwicklung der Konzentrationen in der Elbe im gleichen Zeitraum entgegengesetzt (Abb. 4-34). In Küstennähe war der Konzentrationsanstieg von Mai bis August deutlich stärker ausgeprägt als auf hoher See, wo infolge der größeren Entfernung zu den Eintragsquellen oft keine Unterschiede zwischen beiden Monaten feststellbar waren.

Bemerkenswert ist, dass die Konzentrationen einiger Stoffe in Küstennähe nicht parallel mit dem Süßwasseranteil abnehmen. So wurden bei Cuxhaven im August für viele Stoffe ähnlich hohe oder sogar höhere Konzentrationen bestimmt als bei Stade. Dieser Umstand scheint auf Einträge aus dem landwirtschaftlich intensiv genutzten ›Alten Land‹ stromab von Stade hinzuweisen. Die im August – gegenüber denjenigen auf Station T30 – beobachteten höheren Konzentrationen einiger Schadstoffe auf Station T9 (Tab. 4-8, für Positionen vgl. Abb. 4-15, S. 122) lassen sich nur durch stark variiere-

rende Einträge erklären, denn aufgrund der Lage der Elbfahne bzw. der Unterschiede im Salzgehalt (T30: 29.1; T9: 30.9) sind entgegengesetzte Konzentrationsverhältnisse plausibel und zu erwarten.

MAY 2003	Pesticide Concentrations [ng/L] in the German Bight							
	STADE	CUX	T30	T9	T8	T7	T4	T1
METAZACHLOR	4.3	1.7	1.0	1.3	0.7	0.4	< LoD	< LoD
METOLACHLOR	1.9	0.9	0.5	0.8	0.4	< LoD	< LoD	< LoD
CHLORTOLURON	4.6	2.4	1.6	2.1	1.4	1.0	0.4	< LoD
FENURON	5.0	0.6	0.3	0.3	0.1	< LoD	< LoD	< LoD
DIURON[†]	60.0	11.2	7.5	6.5	4.5	3.1	1.7	0.3
ISOPROTURON[†]	30.7	6.9	4.2	5.5	3.6	2.0	0.7	0.1
SIMAZIN[†]	4.0	1.3	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	< LoD
ATRAZIN[†]	15.6	3.4	4.1	3.6	3.1	2.4	1.6	0.7
TERBUTHYLAZIN	7.2	1.7	0.9	0.8	0.7	0.4	0.2	< LoD
PROMETRYN	5.3	1.0	0.4	0.2	0.2	< LoD	< LoD	< LoD
TERBUTRYN	3.1	1.1	0.6	0.6	0.5	0.3	< LoD	< LoD
IRGAROL	10.5	1.2	0.3	0.2	0.2	0.1	< LoD	< LoD
2,4-D	2.3	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD
MCPA	5.4	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD
DICHLORPROP	5.2	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD
MECOPROP	7.8	1.6	1.7	1.1	1.0	0.8	< LoD	< LoD
CLOFIBRINSÄURE[‡]	8.3	3.6	1.2	1.2	1.0	0.6	< LoD	< LoD
SALINITY	./.	./.	28.07	29.67	30.43	32.61	34.49	34.67

† Among priority organic contaminants according to the EC Water Framework Directive.
‡ Medicament.

Tab. 4-7: Konzentrationen (ng/L) einiger Pestizide in der Deutschen Bucht im Mai 2003. LoD = Nachweisgrenze; zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-15, S. 122.

Table 4-7: Concentrations (ng/L) of some pesticides in the German Bight in May 2003. LoD = Limit of Detection; cf. Fig. 4-15, p. 122 for a station map.

Langfristige Trendabschätzungen sind nicht möglich, da die meisten Stoffe erst seit dem Jahr 2000 bestimmt werden. Auch sind zeitliche Tendenzen infolge der hohen Variabilität der Konzentrationen gegenwärtig nicht erkennbar. Für einige Triazine könnten allerdings innerhalb von Forschungsprojekten gewonnene Konzentrationsdaten aus den Jahren 1990 bis 1997 für Trendschätzungen genutzt werden. Die von BESTER UND HÜHNERFUSS (1993) für das Jahr 1991 berichteten Konzentrationen von Atrazin und Simazin auf Stationen in der Elbfahne sind mit 70 bis 200 ng/L erheblich höher als die im Jahr 2003 gemessenen Werte. Trotz dieser deutlichen Reduktion erscheint bemerkenswert, dass beide Stoffe immer noch in relativ hohen Konzentrationen angetroffen wurden, denn die Anwendung von Atrazin und Simazin wurde bereits vor einigen Jahren in Deutschland und vielen EU-Staaten verboten.

Die Konzentrationen der nachfolgenden Substanzen lagen im Jahr 2003 stets unter ihrer jeweiligen Nachweisgrenze: Aldrin, Dieldrin, Isodrin, Endrin, Trifluralin (alle < 0.03 ng/L) und Hexachlorbutadien (< 0.01 ng/L).

AUG 2003	Pesticide Concentrations [ng/L] in the German Bight							
	STADE	CUX	T30	T9	T8	T7	T4	T1
METAZACHLOR	2.6	2.3	0.7	1.5	0.3	0.3	0.3	< LoD
METOLACHLOR	5.2	7.8	1.7	2.1	0.4	0.3	< LoD	< LoD
CHLORTOLURON	6.8	5.5	2.8	5.5	1.3	1.3	0.6	< LoD
FENURON	4.0	3.8	1.0	4.3	0.2	< LoD	1.4	0.3
DIURON[†]	53.6	60.8	19.5	25.4	6.5	5.4	1.9	0.3
ISOPROTURON[†]	9.0	12.6	3.6	6.7	2.0	1.5	2.2	0.1
SIMAZIN[†]	10.9	2.1	1.2	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD
ATRAZIN[†]	63.4	15.3	6.2	4.9	2.3	2.6	1.7	0.7
TERBUTHYLAZIN	21.2	6.7	2.8	3.8	1.6	1.1	0.7	0.4
PROMETRYN	6.0	2.0	0.7	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD	< LoD
TERBUTRYN	5.7	3.9	1.1	2.2	0.6	0.6	0.2	< LoD
IRGAROL	6.8	3.9	0.8	0.9	0.3	0.2	< LoD	< LoD
2,4-D	2.5	< LoD	0.6	< LoD	< LoD	0.5	< LoD	< LoD
MCPA	3.5	0.8	0.4	< LoD	< LoD	0.4	< LoD	< LoD
DICHLORPROP	2.9	1.2	0.8	< LoD	0.7	< LoD	< LoD	< LoD
MECOPROP	4.9	1.8	1.0	1.0	1.0	0.8	0.4	< LoD
CLOFIBRINSÄURE[‡]	5.5	1.3	0.9	0.9	0.7	0.4	< LoD	< LoD
SALINITY	0	./.	29.1	30.9	31.3	32.6	34.3	34.6

[†] Among priority organic contaminants according to the EC Water Framework Directive.
[‡] Medicament.

Tab. 4-8: Konzentrationen (ng/L) einiger Pestizide in der Deutschen Bucht im August 2003.
LoD = Nachweisgrenze; zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-15, S. 122.

Table 4-8: Concentrations (ng/L) of some pesticides in the German Bight in August 2003.
LoD = Limit of Detection; cf. Fig. 4-15, p. 122 for a station map.

4.3 Metalle

4.3.1 Einführung

Metalle kommen natürlich in der Umwelt vor. Durch Verwitterung, Vulkanismus, und Ausgasungen werden sie für den geochemischen Kreislauf mobilisiert. Elementkonzentrationen, die durch natürliche Prozesse in die Umwelt gelangen, werden als Hintergrundkonzentration bezeichnet. Der Nachweis von Metallen in der Umwelt ist somit nicht zwangsläufig als Verschmutzung zu werten. Es gibt zahlreiche essentielle Elemente wie Kupfer oder Zink. Ihre Bioverfügbarkeit ist in einem bestimmten Konzentrationsbereich Voraussetzung für biologisches Wachstum. Organismen sind in der Lage, sich in einer bestimmten Bandbreite an veränderliche Elementkonzentrationen anzupassen. Wird diese Bandbreite zu höheren Konzentrationen verlassen, tritt eine toxische Wirkung ein. Andere Elemente wie Quecksilber, Cadmium oder Blei haben keine bekannte vitale Funktion.

Durch menschliche Aktivitäten werden zum Teil erhebliche zusätzliche Mengen einzelner Elemente in der Umwelt mobilisiert, wodurch die natürlichen Hintergrundkonzentrationen regional deutlich überschritten werden können. Maßnahmen zur Emissionsminderung führten in den vergangenen Jahrzehnten jedoch zur kontinuierlichen Abnahme vieler Schadstoffe in Luft, Wasser, Biota und Sediment.

Generell werden die Metallgehalte des Meerwassers durch die Struktur, Dynamik und Stärke der Quellen, die großräumige Zirkulation der marinen Wassermassen und die Effizienz ihrer Senkenprozesse bestimmt. Wesentliche Quellen für das anthropogen verursachte Metallsignal in marinen Ökosystemen sind die Abflüsse von kontaminierten Süßwassermassen aus den kontinentalen Flusssystemen, der Schadstofftransport über die Atmosphäre, sowie die Wechselwirkung mit dem Sediment. Weitere Einträge werden durch Offshore-Aktivitäten wie Rohstofferkundung und Förderung sowie Verklappung von Baggergut verursacht. Dem stehen die Sedimentation, mit ihren komplexen, vorgelagerten Gleichgewichten zwischen Schwebstoff, Biota und Wasserphase und in Ausnahmefällen die Wechselwirkung mit der Atmosphäre als Schlüsselprozesse zur Entfernung der Metalle aus dem Meer gegenüber.

Im Detail unterscheidet sich jedoch das Verhalten der verschiedenen Metalle erheblich. Schon die Quellmuster und damit die Bedeutung der unterschiedlichen Eintragspfade variieren stark. Während z. B. menschlich verursachte Bleiemissionen größtenteils über die Atmosphäre in die Nordsee gelangen, wird Kupfer überwiegend über die Flüsse transportiert. Im Wasser und Sediment wirken sich die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften der Elemente auf deren Wechselwirkung mit dem Schwebstoff, der Biota und dem Sediment aus. Dem zufolge variiert auch die Bedeutung der unterschiedlichen Senkenprozesse von Element zu Element. Ein einfacher, konservativer Zusammenhang zwischen Metallkonzentration im Wasserkörper und dem Transport und der Mischung von Wassermassen unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung existiert somit nur in Ausnahmefällen.

Im BSH wurde mit der Überwachung der Metallgehalte im Meerwasser, Schwebstoff und Sediment in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts begonnen. Sie ist national und international eingebettet in die Überwachungsprogramme des Bundes-Länder-Messprogramms (BLMP) und der Meeresschutzkonventionen für Nord- (OSPAR) und Ostsee (HELCOM).

Tafel 4-8: Metalle mit toxischem Potential in der Meeresumwelt

Quecksilber zählt zu den gefährlichsten Umweltgiften. Es bioakkumuliert durch die gesamte aquatische Nahrungskette. Seit der katastrophalen Methylquecksilbervergiftung der Bevölkerung in Minamata (Japan), ausgelöst durch den Konsum von quecksilberkontaminierten Fisch in den fünfziger Jahren, steht die Belastung der marinen Umwelt durch Quecksilber im wissenschaftlichen und öffentlichen Interesse.

Das Verhalten von Quecksilber in der Umwelt ist durch für ein Metall außergewöhnliche physikalische und chemische Eigenschaften gekennzeichnet. Es liegt in elementarer Form, bei Raumtemperatur flüssig vor und ist durch einen relativ hohen Dampfdruck gekennzeichnet. Gleichzeitig ist Quecksilber in der Atmosphäre mit einer durchschnittlichen Verweilzeit von einem Jahr sehr reaktionsträge. Folglich werden regionale Quecksilberemissionen über die Atmosphäre global verteilt. Aus der Atmosphäre wird es in elementarer und in reaktiver Form überwiegend durch Niederschläge in das Meer eingetragen.

Quecksilber wird industriell vor allem in der Chloralkali-Elektrolyse sowie der Holz und Metall verarbeitenden Industrie eingesetzt. Darüber hinaus wird es bei der Müllverbrennung, bei der Verbrennung von Kohle und anderen fossilen Brennstoffen sowie in der Zementindustrie freigesetzt. Im Wasser und im Sediment entstehen durch mikrobielle Aktivität Methylquecksilberverbindungen, die von biologischen Systemen leicht aufgenommen und angereichert werden und toxischer als die anorganischen Salze sind.

Das im Wasser vorhandene Quecksilber wird vom Phytoplankton aufgenommen und unabhängig von der Bindungsform angereichert. Beim Durchlaufen der Nahrungskette vom Phytoplankton über das Zooplankton bis hin zu Fischen und Vögeln erhöht sich der Anteil des Monomethylquecksilbers stufenweise um jeweils etwa 10 %. Bei höher entwickelten Lebewesen wie den marinen Säugetieren ist das Zentralnervensystem das anfälligste Organ für Belastungen durch Monomethylquecksilber. Durch Aufnahme von Quecksilber wird die Immunabwehr bei Mensch und Tier verringert und eine ganze Reihe von Krankheitssymptomen hervorgerufen, wobei die häufigsten neurologische Beeinträchtigungen sind. Schwere Quecksilbervergiftungen führen zum Tode.

Cadmium kommt in der Erdkruste sehr selten vor und ist weitgehend gleichmäßig verteilt. Es wird in industriellen Produkten und Prozessen eingesetzt, z. B. in der galvanischen Industrie, in Pigmenten, als Plastikstabilisator, in Batterien und Metalllegierungen. Darüber hinaus wird es bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe, im Straßenverkehr, bei der Müllverbrennung und Buntmetallverhüttung in die Atmosphäre emittiert. In den Boden gelangt es häufig über Phosphatdünger. Es reichert sich in der Nahrungskette an und kann Krebs, Missbildungen und genetische Veränderungen hervorrufen. Cadmium ist in der Umwelt sehr mobil und gelangt vorwiegend über die Atmosphäre und Flüsse in die Nordsee.

Blei ist ein in der Natur allgegenwärtiges, aber kein lebensnotwendiges Element. Es wird seit historischen Zeiten durch den Menschen verarbeitet. In der jüngeren Zeit wurde und wird Blei unter anderem für die Herstellung von Batterien und Akkumulatoren, als Additiv zu Kraftstoffen (Tetraethylblei), für Verlötnungen, in Farbpigmenten und im Korrosionsschutz eingesetzt. In die Atmosphäre gelangt Blei durch eine Vielzahl von Verbrennungsprozessen, und durch Emissionen aus dem Straßenverkehr. Eine signifikante Minderung der Bleibelastung der Atmosphäre wurde durch die Einschränkung bzw. das Verbot von Bleizusätzen zu Kraftstoffen in den achtziger Jahren erreicht.

Die akute Toxizität von Blei ist gering, jedoch kommt es zu chronischen Vergiftungen bei Aufnahme kleiner Mengen über einen längeren Zeitraum. Anorganische Bleiverbindungen reichern sich in den Knochen, Zähnen und den Haaren an; die Halbwertszeit im menschlichen Körper beträgt mehr als 20 Jahre. Vergiftungserscheinungen betreffen hauptsächlich Nieren, Hoden, den Gastrointestinaltrakt, das Nervensystem und die Biosynthese des Hämoglobins.

Kupfer ist als essentielles Spurenelement Bestandteil vieler Enzyme und ist daher von zentraler Bedeutung für den Stoffwechsel. In erhöhten Konzentrationen kann es jedoch ähnlich giftig wirken wie die nicht-essentiellen Schwermetalle Blei oder Quecksilber. Kupfer ist toxisch, wenn die Kapazität der homeostatischen Regulierung im Körper überschritten wird, d. h. wenn überschüssiges Kupfer nicht mehr an die vorhandenen Kupferproteine gebunden werden kann.

Kupfer findet vor allem in der Elektro- und Metallindustrie Verwendung und ist Bestandteil von Farbstoffen und Pestiziden. Der Eintrag in die Gewässer erfolgt vor allem durch die metallverarbeitende Industrie, kommunale Abwässer und atmosphärische Deposition. Speziell in den Küstengewässern ist ein Eintrag durch den Einsatz von Kupfer in bewuchshemmenden Antifoulingfarben und Holzschutzimprägnierungen gegeben.

(Fortsetzung ...)

Tafel 4-8: Metalle mit toxischem Potential in der Meeresumwelt (... Fortsetzung)

Zink ist Bestandteil vieler Enzyme und für Pflanzen und Tiere ein essentielles Spurenelement. Ein Mangel an diesem Element hat negative Auswirkungen auf das Wachstum und Wohlergehen von Pflanzen, Tieren und Menschen. Der Tagesbedarf des Menschen liegt zwischen 5 und 40 mg. Die Giftigkeit anorganischer Zinkverbindungen ist gering. Einige Pflanzen-, Phytoplankton- und Fischarten reagieren empfindlich auf Zink. Eine übergroße Zinkkonzentration in Gewässern kann bei einigen Fischarten zu Problemen bei der Atmung führen. Zink findet hauptsächlich in der metallverarbeitenden Industrie als Korrosionsschutz von Eisen- und Stahlprodukten Anwendung.

Hauptuntersuchungsgebiet ist die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ). Das aktuelle Messprogramm umfasst vier, über das Jahr verteilte Überwachungsfahrten in die AWZ der Nordsee, bei denen 12 Spurenelemente im Wasser und 17 im Sediment bestimmt werden. Im Rahmen dieses Berichtes werden die ökotoxikologisch wichtigen Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink behandelt. Zunächst werden die verwendeten Bewertungskriterien vorgestellt. Anschließend folgt eine Darstellung der Metallbelastungssituation erst im Wasserkörper und anschließend im Sediment, wobei sowohl die räumliche Struktur mit einer Kennzeichnung der Belastungsschwerpunkte als auch die zeitliche Entwicklung der Gehalte behandelt werden.

4.3.2 Zeitliche Entwicklung der Metalleinträge

Die überwiegende Zahl anthropogener Schwermetallemissionen in die Atmosphäre und -einleitungen in Gewässer ist rückläufig. Abhängig von deren Anteil an der (natürlich und anthropogen verursachten) Gesamtemission sowie deren Retentionsverhalten im Boden und den Flusssystemen wurden auch zurückgehende Einträge in die gesamte Nordsee erwartet.

Quecksilber wird überwiegend über die Flussläufe in die Deutsche Bucht und die weitere Nordsee eingetragen. Für die Jahre von 1990 bis 1996 wurde ein abnehmender Trend abgeschätzt. Während 1990 noch ein Quecksilbereintrag von 19 – 49 t/a bilanziert wurde, ergab sich für 1996 ein reduzierter Eintrag von lediglich 7.3 – 8.5 t/a (OSPAR 1998).

Im gleichen Zeitraum variierten die Cadmumeinträge über die Flüsse in die gesamte Nordsee ohne erkennbaren Trend zwischen 31 – 36 t/a (OSPAR 1998). Der Cadmumeintrag durch die Elbe in die Deutsche Bucht hat sich dagegen nach einer Abschätzung von BAKKER ET AL. (1996) zwischen 1989 und 1996 signifikant verringert. Etwa ein Drittel der Cadmiumgesamtfracht gelangt über die Atmosphäre in die Nordsee. In quellnäheren Regionen der südlichen Nordsee kann der atmosphärische Anteil bis zu 50 % betragen.

Die aus Messungen der trockenen und nassen Deposition von Blei abgeleiteten atmosphärischen Einträge nahmen von ca. 2000 t/a im Jahr 1987 bis 1995 um 50 – 60 % ab. Der Anteil der über die Flüsse eingetragenen Bleimenge lag 1995 um den Faktor 2 höher als der Eintrag über die Atmosphäre (OSPAR 1998). Die Kupfereinträge über die Flusssysteme zeigen von 1990 bis 1996 keinen so deutlichen Trend wie die Elemente Blei oder Quecksilber. Für das Jahr 1996 wurde ein Kupfereintrag von 900 bis 1000 t/a abgeschätzt (OSPAR 1998). Dagegen wurden wesentlich geringere Mengen von lediglich 56 t/a für den atmosphärischen Pfad abgeschätzt (VAN PUL ET AL. 1998).

Der Zinkeintrag in die Deutsche Bucht war von 1987 bis 1996 stark rückläufig, was vor allem auf die in diesem Zeitraum auf ein Drittel reduzierten Zinkfrachten der Elbe zurückzuführen war. CHESTER ET AL. (1994) schätzten die atmosphärischen Zinkeinträge in die Nordsee Ende der 1980er Jahre auf 3800 – 4100 t/a, die Einträge aus Flusssystemen auf ca. 7300 t/a und die aus Direkteinleitungen und Dumping auf 9850 t/a.

4.3.3 Bewertungskriterien

Bezugspunkt zur Bewertung beobachteter Elementkonzentrationen sind für die Nordsee bzw. Deutsche Bucht angenommene Hintergrundkonzentrationen. Hintergrundkonzentrationen von synthetischen Substanzen sollten theoretisch gleich Null sein. Hintergrundkonzentrationen von Stoffen die natürlich im Meerwasser vorkommen, wie es für die meisten Metalle der Fall ist, werden anhand von Proben aus entlegenen, durch menschliche Aktivität kaum beeinflussten Gebieten festgelegt. Metallhintergrundkonzentrationen im Sediment werden in der Regel aus tieferen, älteren Schichten von Kernprobenahmen bestimmt.

4.3.3.1 Hintergrund-Referenzkonzentrationen (BRC)

Grundlage der Bewertung der Wasserproben sind sogenannte ›Background Reference Concentrations‹ (BRC). Es handelt sich hierbei um Hintergrundbelastungswerte, die durch OSPAR für die Region ›Greater North Sea‹ abgeleitet wurden. In Tab. 4-9 sind die BRCs für gelöste Elementkonzentrationen angegeben. Zusammen mit den Wasserhintergrundwerten sind in derselben Tabelle Sedimenthintergrundwerte des BSH für die Deutsche Bucht aufgenommen. Die Spannweiten der Konzentrationen wurden aus der < 20 µm Korngrößenfraktion tiefer gelegener Schichten aus Sedimentkernen abgeleitet. Die vorhandenen OSPAR-Hintergrundwerte wurden für Sedimente nicht herangezogen, da diese sowohl aus feinen Sedimenten als auch der Feinkornfraktion abgeleitet wurden und auf die Aluminiumkonzentration normiert sind. Eine vollständige Umrechnung der Messwerte aus dem BSH-Monitoring war jedoch nicht möglich, da Aluminium nicht immer mitbestimmt wurde.

<i>ELEMENT</i>	<i>WATER [ng/L] OSPAR (BRC)</i>	<i>SEDIMENT [mg/kg_{DW}] BSH</i>
<i>Cd</i>	8 – 25	0.08 – 0.24
<i>Cu</i>	50 – 90	16 – 29
<i>Pb</i>	10 – 20	12 – 38
<i>Hg</i>	0.2 – 0.5	0.02 – 0.04
<i>Zn</i>	250 – 450	81 – 103

Tab. 4-9: Hintergrundkonzentrationen der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink in der gelösten Fraktion (Wasser) und im Sediment (< 20 µm). Wasser: OSPAR Region ›Greater North Sea‹. Sediment: BSH-Sedimentkernuntersuchungen in der Deutschen Bucht.

Table 4-9: Background concentrations of cadmium, copper, lead, mercury and zinc in the dissolved fraction (water) and in sediment (< 20 µm). Water: OSPAR region ›Greater North Sea‹, sediment: BSH sediment core samples in the German Bight.

4.3.3.2 Ökotoxikologische Bewertungskriterien (EAC)

›Ecotoxicological Assessment Criteria‹ (EACs) wurden entwickelt, um marine chemische Überwachungsdaten aus dem OSPAR-Gebiet zu bewerten. EACs sind Element- bzw. Schadstoffkonzentrationen, bei deren Unterschreitung keine negativen Wirkungen auf das marine Ökosystem zu erwarten sind. Die Bewertungskriterien wurden auf Basis verfügbarer qualitätsgesicherter ökotoxikologischer Daten entwickelt (OSPAR 1996). Die Anwendung der EACs sollte die Identifikation von Problemgebieten bezüglich spezifischer Schadstoffe ermöglichen und eine Einschätzung erlauben, ob negative biologische Effekte zu erwarten sind. Es ist allerdings wichtig, darauf hinzuweisen, dass EACs im Wesentlichen aus Laboruntersuchungen an Frischwasserorganismen abgeleitet wurden. Ihre einheitliche Übertragung bzw. Anwendung auf unterschiedliche marine Ökosysteme ist daher nicht unproblematisch, zumal weder kombinierte Wirkungen verschiedener Schadstoffe, noch die chronische Langzeitwirkung einzelner Verbindungen berücksichtigt wurden. EACs sollten daher nur unter Einbeziehung von Expertenwissen zur Bewertung der Qualität mariner Ökosysteme herangezogen werden. In Tab. 4-10 sind die EACs für die untersuchten Elemente zusammengefasst. Der Wert für Quecksilber ist als vorläufig anzusehen. Der Kupferwert liegt im Bereich der Hintergrundkonzentrationen und sollte nur mit dem bioverfügbaren Teil der Kupferbelastung verglichen werden.

<i>ELEMENT</i>	<i>WATER [ng/L] OSPAR (EAC)</i>
<i>Cd</i>	10 – 100
<i>Cu</i>	5 – 50
<i>Pb</i>	500 – 5000
<i>Hg</i>	5 – 50 prelim.
<i>Zn</i>	500 – 5000

Tab. 4-10: Ökotoxikologische Bewertungskriterien (EAC) der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink in Wasser.

Table 4-10: Ecotoxicological assessment criterion (EAC) for cadmium, copper, lead, mercury and zinc in water.

Für die Sedimentbelastung sind ebenfalls EACs publiziert worden. Diese sind jedoch für Metalle ausnahmslos vorläufiger Natur. Aus diesem Grund wurden sie nicht in den vorliegenden Bericht aufgenommen.

4.3.4 Metallgehalte des Meerwassers

Ein beträchtlicher Anteil der Metalleinträge in die Nordsee wird durch die Zuflüsse aus den großen europäischen Flusssystemen wie Elbe, Rhein, Themse oder Humber geliefert. Die Metalle werden partikelgebunden oder gelöst durch die Flussmündungen in die Küstengewässer transportiert. Der Mischungsbereich zwischen dem Meerwasser mit hohem Salzgehalt und dem süßen Flusswasser ist ein Gebiet intensiver chemischer und biologischer Umwandlungen. Abhängig von den chemischen Eigenschaften der Elemente wirken die Mischungsbereiche der Flussästuare als Filter.

Die Bedingungen für die biologische Primärproduktion, chemische Bedingungen – wie Salzgehalt oder pH-Wert – und die physikalischen Randbedingungen – wie Lichtein-

strahlung und Trübungsverhältnisse – beeinflussen hier das Gleichgewicht zwischen gelösten und partikelgebundenen Spurenstoffen besonders intensiv. Als Folge der Mischungsprozesse ist der Austausch zwischen Wasserkörper und Sediment (Sedimentation, Resuspension) und Atmosphäre (Deposition, Verdampfung) im Mündungsbereich der Flüsse besonders ausgeprägt. Eine Vielzahl von Elementen wird in den Flussästuaren effektiv zurückgehalten, einige Elemente verhalten sich konservativ, d. h. sie werden beim Übergang vom Fluss ins Meer nahezu ausschließlich verdünnt, andere Elemente werden durch Desorption und Remineralisierung in der gelösten Phase angereichert.

Neben dem Eintrag über die Flusssysteme ist der Eintrag über die Atmosphäre für einige Elemente von großer Bedeutung. Auch hier nimmt die Stärke des Eintragungssignals mit zunehmender Entfernung von den Ballungszentren an der Küste ab.

Die räumliche Verteilung der Elemente Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber und Zink in der gelösten Fraktion des Oberflächenwassers der Nordsee zeigt die Bedeutung der Süßwasserzuflüsse als Quellen für die Belastung. Exemplarisch ist in Abb. 4-35 die räumliche Verteilung der Kupfergehalte im Frühjahr 2003 im Bereich des deutschen Festlandssockels dargestellt.

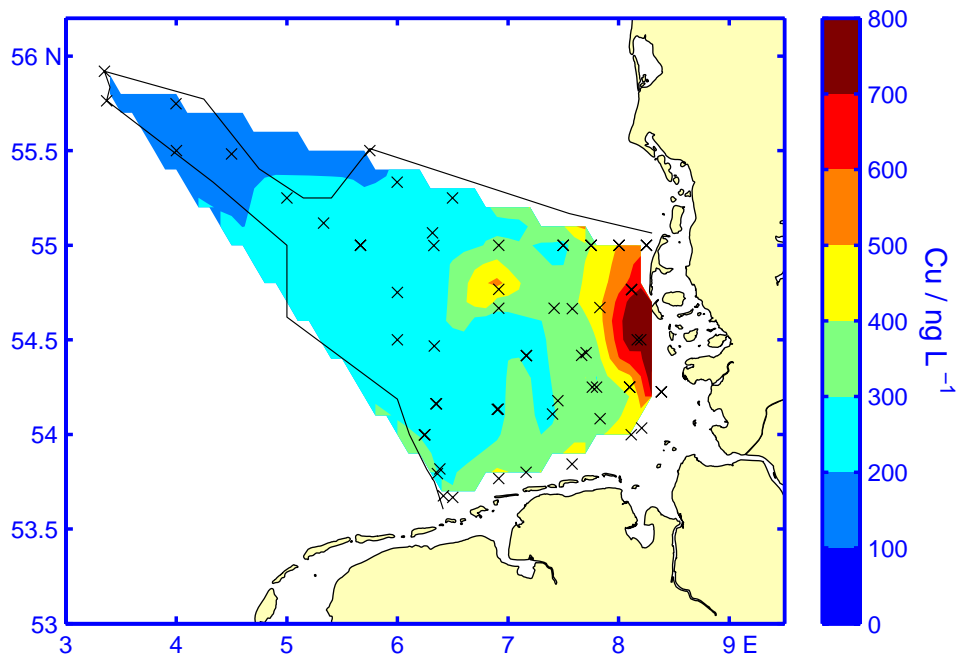


Abb. 4-35: Räumliche Verteilung der oberflächennahen (10 m) gelösten Kupfergehalte in gefiltertem Meerwasser in ng/L in den Wintermonaten 2003 (Januar – März). Die Probenahmestationen sind durch Kreuze gekennzeichnet.

Fig. 4-35: Spatial distribution of near-surface (10 m) copper concentrations (ng/L) in filtrated sea water during winter 2003 (January – March). Crosses indicate sampling sites.

Um das durch den Einfluss biologischer Aktivität verursachte »Rauschen« in den beobachteten Elementkonzentrationen zu eliminieren, wurden für die Datenanalyse nur Messkampagnen aus den Wintermonaten Januar bis März und November bis Dezember berücksichtigt, wenn kein anderer Zeitraum explizit genannt ist. In Küstennähe wurden Kupferkonzentrationen von über 600 ng/L gemessen, die jedoch mit wachsender Entfernung von der Küste schnell abnahmen. Auffällig durch ihre erhöhte Kup-

ferfracht ist die in nördlicher Richtung verlaufende relativ breite Abflussfahne der Elbe, die sich mit den von Westen her in die Deutsche Bucht einfließenden Wassermassen vermischt. Ähnliche Verteilungsmuster wurden auch für Cadmium, Blei, Quecksilber und Zink beobachtet.

Im küstenfernen Bereich, im Oberflächenwasser mit Salzgehalten über 34 (vgl. Abb. 3-28, S. 88), lagen die im Jahr 2003 gemessenen Konzentrationen der diskutierten Elemente überwiegend im Bereich der Hintergrundwerte (vgl. Tab. 4-9, S. 160). Lediglich Kupfer fiel mit einem gemessenen Konzentrationsbereich von 200 bis 350 ng/L aus dem Rahmen und lag damit deutlich über dem Hintergrundintervall von 50 bis 90 ng/L. In Küstennähe, im Wasser mit Salzgehalten zwischen 28 und 30, wurden die Hintergrundwerte aller genannten Elemente deutlich überschritten. Auch hier fiel Kupfer mit ca. 10fach erhöhten Konzentrationen (550 - 700 ng/L) auf. In Tab. 4-11 sind die in 2003 gemessenen Konzentrationen der Elemente Cd, Cu, Pb, Hg und Zn, gruppiert nach zwei Salzgehaltsbereichen, aufgelistet.

ELEMENT	SAMPLES	PERCENTILE 25%	MEDIAN 50%	PERCENTILE 75%	SALINITY
Cd	8	29	34	36	28 – 31
Cu	8	531	582	662	
Pb	8	24	30	97	
Hg	8	539	625	736	
Zn	8	1432	1498	1730	
Cd	17	13	16	19	≥ 34
Cu	17	200	282	318	
Pb	17	11	19	28	
Hg	17	222	254	294	
Zn	17	355	462	526	

Tab. 4-11: Elementkonzentrationen im filtrierten Meerwasser. Die Proben wurden im Jahr 2003 in der deutschen AWZ genommen und nach Salzgehaltsbereichen unterschieden. Alle Konzentrationen sind in ng/L, nur Quecksilber in pg/L angegeben.

Table 4-11: Element concentrations in filtered sea water. Samples from 2003 taken in the German EEZ and stratified by salinity. All concentrations in ng/L, but mercury in pg/L.

Nachdem im Frühjahr 2002 die Elementgehalte im filtrierten Wasser mit Ausnahme des Cadmium gegenüber 2001 erhöht waren, sind sie in 2003 wieder auf das Niveau der Vorjahre zurückgegangen. Besonders ausgeprägt wurde dieser Effekt bei niedrigen Salzgehalten unter 31 beobachtet. Vor allem die im Frühjahr 2002 erhöhten Konzentrationen der Elemente Kupfer und Blei fielen aus dem Rahmen. Exemplarisch ist die Zeitreihe des Blei in Abb. 4-36 dargestellt. Es wurde eine Boxdarstellung mit einer robusten Statistik verwendet, in der die Verteilungskennzahlen der jahresweise zusammengefassten Messwerte ablesbar sind. Jedes Boxsymbol zeigt den Median (zentrale rote Linie), den 98 % Vertrauensbereich des Medians (Einschnürung der Box), das 25 % und 75 % Perzentil (oberes und unteres Ende der Box) sowie Minimum und Maximum der Messwerte (Ausleger). Ausreißer sind durch rote Kreuze gekennzeichnet und befinden sich jenseits des 1.5-fachen des Interquartilbereiches außerhalb der Box.

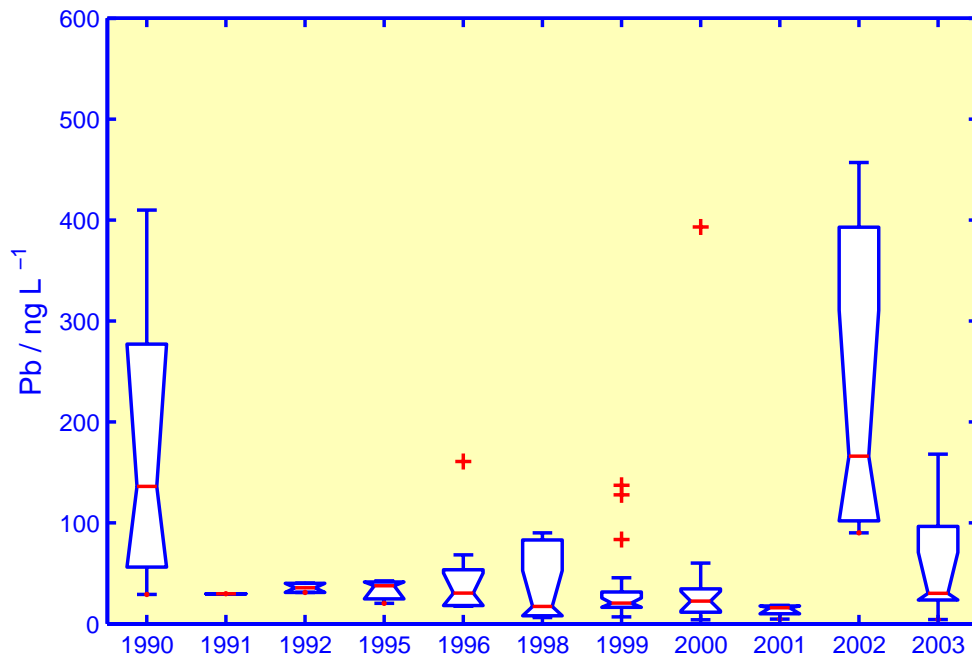


Abb. 4-36: Zeitreihe der Bleigehalte in den Wintermonaten im filtrierten, oberflächennahen (10 m) Meerwasser der Deutschen Bucht bei niedrigen Salzgehalten von 28 – 31.

Fig. 4-36: Time series of lead concentrations in winter in filtrated near-surface (10m) sea water from the German Bight. Only samples with an associated salinity within the range 28 – 31 were used.

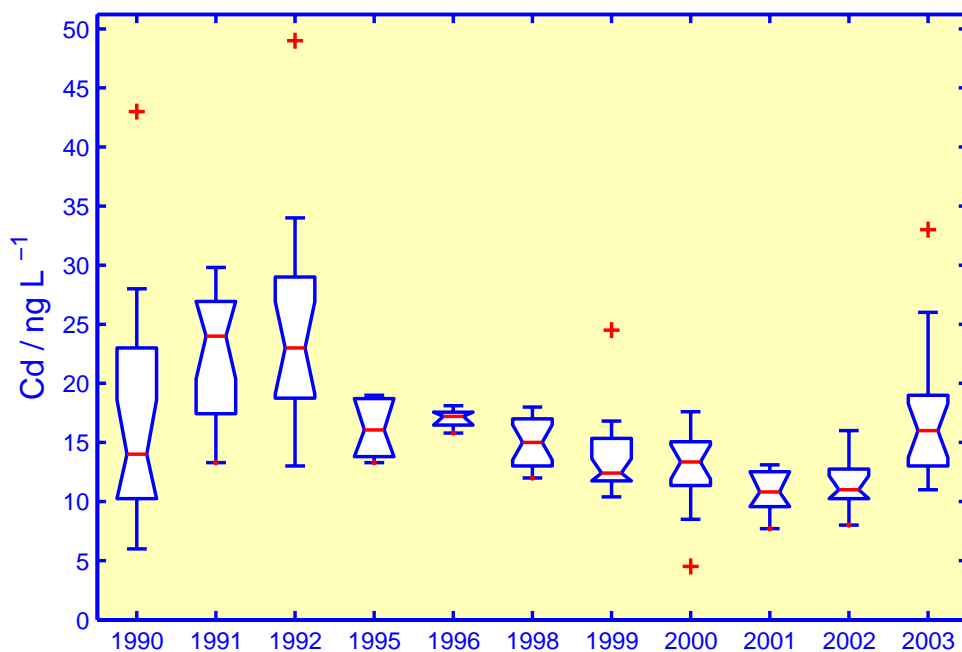


Abb. 4-37: Zeitreihe der Cadmiumgehalte in den Wintermonaten im filtrierten oberflächennahen (10 m) Meerwasser der Deutschen Bucht bei Salzgehalten über 34.

Fig. 4-37: Time series of cadmium concentrations in winter in filtrated near-surface (10 m) sea water from the German Bight. Only samples with an associated salinity above 34 were used.

In der äußeren Deutschen Bucht bei Salzgehalten über 34 wurde die kurzfristige Erhöhung der Elementgehalte in 2002 und anschließende Abnahme in 2003 nicht beobachtet. Die Zeitreihen der im küstenfernen Bereich der Deutschen Bucht gemessenen Elementgehalte sind weitgehend von den Beobachtungen unter Land entkoppelt. So wurden hier nicht nur geringere Konzentrationen gefunden, sondern auch eine andere zeitliche Entwicklung. Exemplarisch ist in *Abb. 4-37* die zeitliche Entwicklung der Cadmiumkonzentration im filtrierten Meerwasser bei hohen Salzgehalten über 34 dargestellt. Die Befunde weisen deutlich darauf hin, dass die Elementgehalte in den unterschiedlichen Wasserkörpern unter Land und auf hoher See durch unterschiedliche Regime dominiert werden. Während auf hoher See vor allem die großräumige Dynamik der Nordsee und der Austausch mit der Atmosphäre und dem Sediment die Elementgehalte beeinflussen, sind es unter Land vor allem die Süßwasserzuflüsse aus den großen Europäischen Flusssystemen sowie die Dynamik in den Flussästuaren.

4.3.5 Metallgehalte des Sediments

Der Meeresboden stellt die wichtigste Senke für Spurenmetalle im marinen Ökosystem dar. Die vorwiegend am Schwebstoff gebundenen Elemente sedimentieren in relativ eng umgrenzten Gebieten der Nordsee. Physikalisch zeichnen sich diese Regionen vor allem durch einen geringen Energieeintrag aus; einmal sedimentierte Teilchen zeigen hier eine geringe Neigung zur Resuspension. Das wichtigste Sedimentakkumulationsgebiet der Nordsee befindet sich im tieferen Teil des Skagerrak. Aber auch im Schlickfallgebiet südöstlich von Helgoland, im Urstromtal der Elbe, wird Nettosedimentation beobachtet. Hier enthält das Sediment einen hohen Feinkornanteil (Korngrößen $< 20 \mu\text{m}$) von 15 bis 45 %. Dagegen sind weite Teile der Nordsee mit Sanden bedeckt. Diese als dispersiv geltenden Gebiete – hier findet keine Nettosedimentation statt – zeichnen sich durch geringe Feinkornanteile im Sediment aus. *Abb. 4-38* zeigt Ergebnisse von Korngrößenanalysen der in den Jahren von 1995 bis 2003 auf dem Deutschen Festlandsockel entnommenen Sedimentproben. Deutlich sind die schlickigen bzw. feinsandigen Gebiete (hoher Feinkornanteil) in der inneren Deutschen Bucht und auf der Weißen Bank zu erkennen.

Während die grobe Sandfraktion des Sediments vor allem aus Silikaten besteht und durch ihre chemische Beschaffenheit und ihre relativ kleine Oberfläche eine geringe Affinität zur Adsorption von Spurenmetallen zeigt, besteht die Feinkornfraktion vor allem aus Tonmineralen und organischem Material. In der Feinkornfraktion sind unter anderem Eisen(III)-oxid-hydrate, Mangan(IV)-oxid-hydrate und Eisen(II)-sulfide enthalten, deren Gegenwart, neben derjenigen von organischem Material und den Tonmineralen, zur effizienten Anreicherung vieler Spurenelemente in der Feinkornfraktion beiträgt. Um die Metallbelastung in dispersiven und Akkumulationsgebieten vergleichen zu können, werden die Elementgehalte in der Regel auf den Feinkornanteil standardisiert, bzw. direkt in der Korngrößenfraktion $< 20 \mu\text{m}$ bestimmt. Auf diese Weise wird die Verdünnung der Feinkornfraktion durch Sand herausgerechnet, bzw. durch die Fraktionierung (Siebung) vermieden. Zur vergleichenden Bewertung wird also nur die Sedimentfraktion herangezogen, die ein hohes Potential zur Adsorption der Spurenelemente besitzt. Wenn kein anderer Bezug explizit genannt ist, beziehen sich somit die im folgenden Text diskutierten Elementkonzentrationen ausschließlich auf die Gehalte in der Feinkornfraktion.

In größeren Abständen, zuletzt in den Jahren 1995 und 2000, werden umfangreiche Sedimentprobenahmen auf dem Deutschen Festlandsockel durchgeführt, die über

das Standardmessprogramm zur Bestimmung zeitlicher Trends deutlich hinausgehen. Die räumliche Auswertung der Metallgehalte in den gewonnenen Oberflächen-sedimentproben liefert ein klares Bild über Belastungsschwerpunkte in der Deutschen Bucht. Ähnlich wie im Wasserkörper wurden von allen diskutierten Elementen in Küstennähe erhöhte Konzentrationen gemessen. Exemplarisch ist in Abb. 4-39 die räumliche Verteilung des Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion aus dem Jahr 1995 dargestellt.

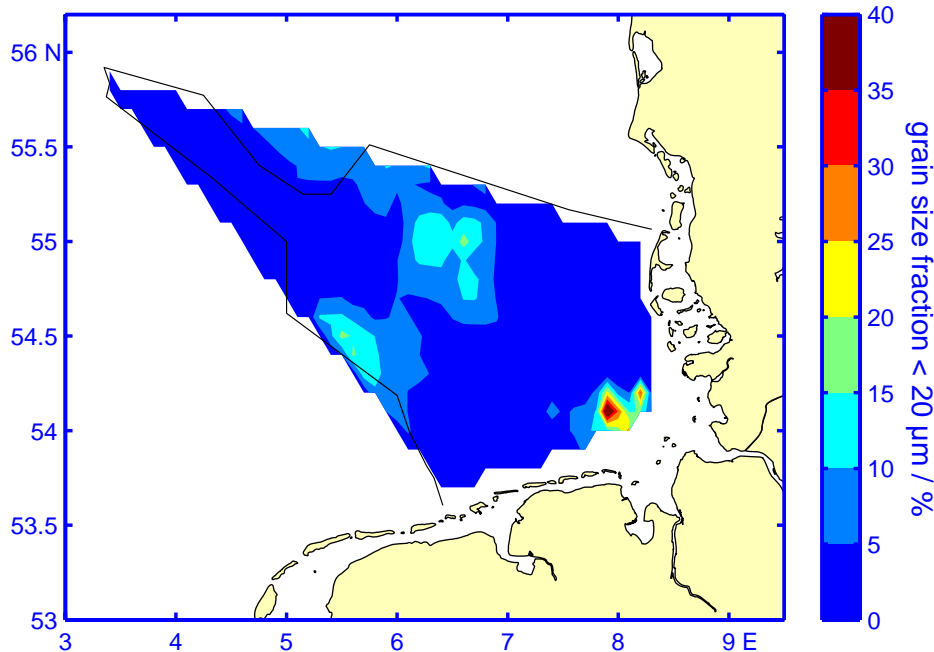


Abb. 4-38: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) am Gesamtsediment, ausgedrückt in Prozent (1995 – 2003).

Fig. 4-38: Mean spatial distribution pattern of relative grain size fraction $< 20 \mu\text{m}$ as compiled from surface sediment samples from the period 1995 to 2003.

Deutlich ist die Hg-Anreicherung im Elbeästuar und nordwärts entlang der Nordfriesischen Küste erkennbar. Ein ca. 100 km breiter Streifen weist erhöhte Gehalte von über 0.3 mg/kg auf. Auch vor der Niedersächsischen Küste wurden erhöhte Konzentrationen gemessen, allerdings nahmen hier die Konzentrationen seewärts schnell ab. Die räumliche Verteilung der Elementgehalte im Oberflächensediment zeigte eine ähnliche Struktur, wie sie bereits im Wasser beobachtet wurde. An der räumlichen Verteilung der meisten Elementgehalte im Sediment ist also der dominierende Einfluss der erhöhten Metallfrachten aus den belasteten großen Flusssystemen wie Rhein, Weser und Elbe deutlich zu erkennen. Es ist allerdings wichtig an dieser Stelle zu bemerken, dass die Abnahme der Quecksilberkonzentration mit zunehmenden Abstand zur Küste in dieser Deutlichkeit nur durch den Bezug des Elementgehaltes auf die Feinkornfraktion sichtbar wird (Abb. 4-39). Bezogen auf das Gesamtsediment wurden die mit Abstand höchsten Quecksilbergehalte im Schlickfallgebiet südöstlich Helgolands nachgewiesen.

Anders als beim Quecksilber erreichten die Blei-gehalte in der Feinkornfraktion des Sediments nicht nur in Küstennähe, sondern auch im äußeren Bereich des Festlandssockels deutlich erhöhte Werte (Abb. 4-40). Hier, im küstenfernen Gebiet, wird ein sandiges Sediment mit sehr geringen Feinkornanteil von unter 2 % vorgefunden. Die er-

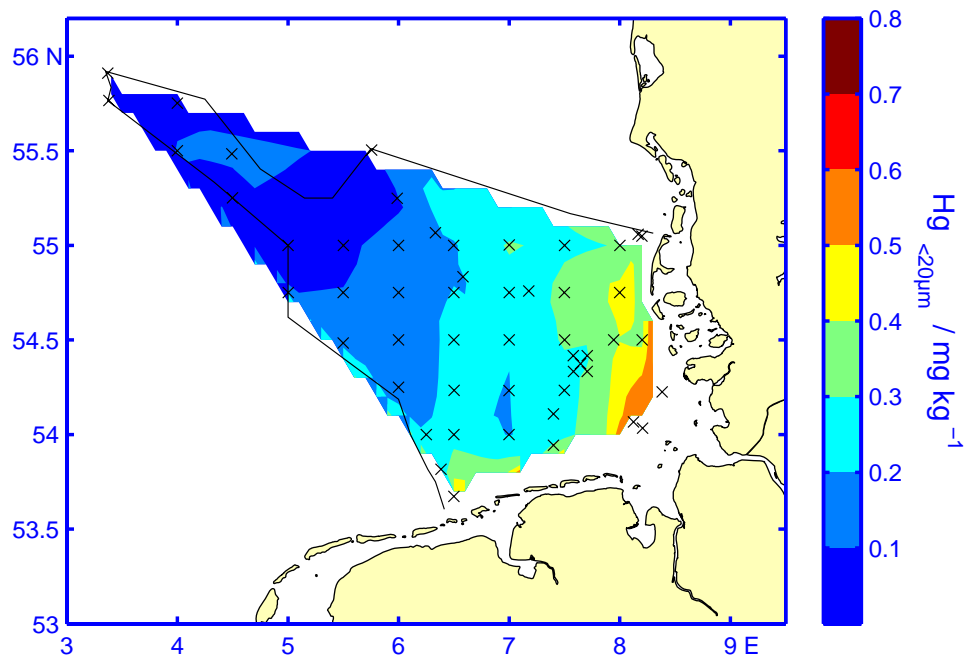


Abb. 4-39: Räumliche Verteilung des Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) des Oberflächensediments im Jahr 1995.

Fig. 4-39: Spatial distribution of mercury content in the fine grain fraction ($< 20 \mu\text{m}$) of surface sediment samples from 1995.

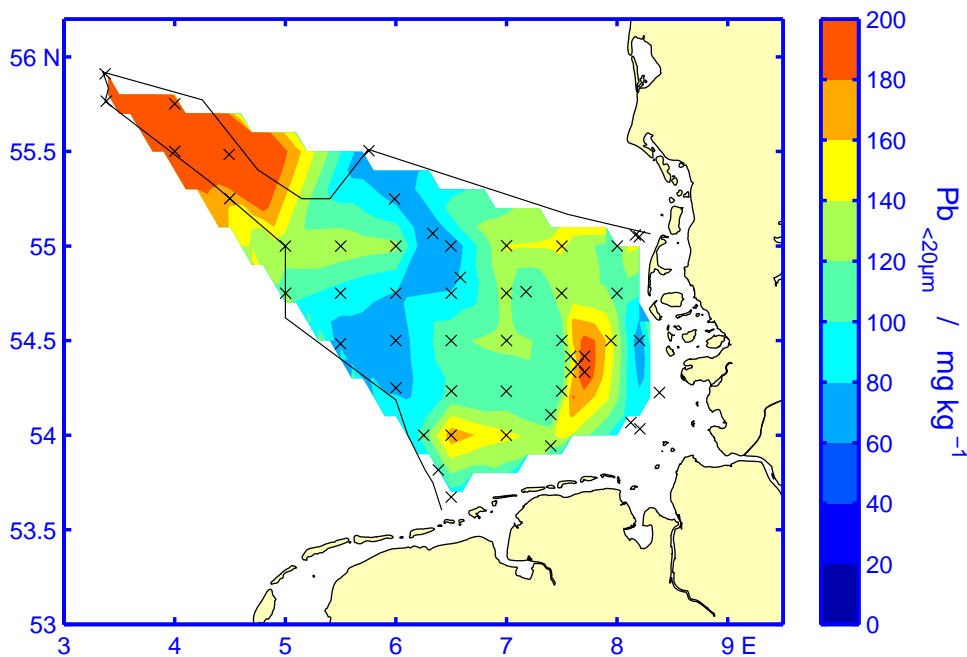


Abb. 4-40: Räumliche Verteilung der Bleigehalte in der Feinkornfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) des Oberflächensediments im Jahr 1995.

Fig. 4-40: Spatial distribution of mercury content in the fine grain fraction ($< 20 \mu\text{m}$) of the surface sediment sampled during 1995.

höhten Bleigehalte können kaum ausschließlich durch die Bleifrachten aus den großen Flusssystemen erklärt werden. Eher kommt als Ursache der Schadstofftransport über die Atmosphäre oder regionale Emissionen und die veränderten physikochemischen Verhältnisse bei sehr geringen Schwebstofffrachten in der offenen Nordsee in Frage. Um hier zu tragfähigen Antworten zu kommen, sind großräumigere Sedimentuntersuchungen notwendig, die über die Deutsche AWZ hinausgehen.

Seit Beginn der Überwachung der Metallgehalte im Oberflächensediment im Jahr 1975 wurden in der Deutschen Bucht abnehmende, später stagnierende Quecksilber-, Cadmium-, Blei-, Kupfer- und Zinkgehalte beobachtet. Unerwartet zeigten sich jedoch in den Jahren von 1999 bis 2003 wieder deutlich erhöhte Quecksilbergehalte im Elbeästuar und entlang der nordfriesischen Küste. Auch die Streuung der Einzelbeobachtungen stieg sprunghaft an, wobei im Jahr 2000 die höchsten Gehalte gemessen wurden. Sie überschritten die 1999 und in den fünf Jahren zuvor beobachteten Werte um den Faktor 2. Es wurden wieder Maximalwerte gemessen, die zuletzt in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts typisch waren. Abb. 4-41 zeigt die Zeitreihe der Quecksilbergehalte im Oberflächensediment des Schlickfallgebiets südöstlich Helgolands in der inneren Deutschen Bucht (s. Weiserkarte). Kupfer, Blei und Zink zeigten einen ähnlichen, wenn auch weniger deutlich ausgeprägten Effekt. Ende 2003 gingen die Konzentrationen wieder auf das Niveau der Vorjahre zurück. Tab. 4-12 fasst die im Jahr 2003 im Oberflächensediment des Schlickfallgebietes gemessenen Elementgehalte zusammen.

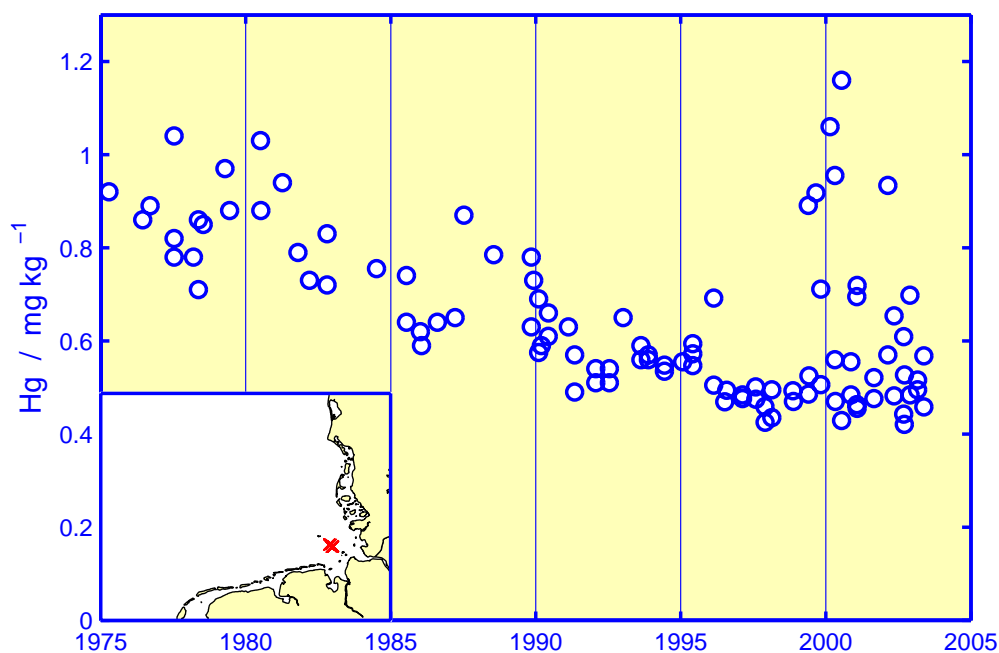


Abb. 4-41: Zeitreihe der Quecksilbergehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments südöstlich Helgolands.

Fig. 4-41: Time series of the mercury content in the fine grain fraction of surface sediment samples from a small-scale area southeast of Helgoland (cf. inset).

Bei dem 1999 bis 2003 beobachteten Effekt handelte es sich um kein lokales Ereignis. Ca. 50 km weiter nördlich des Schlickfallgebietes, querab Norderoog Sand, wurden im gleichen Zeitraum ebenfalls erhöhte Quecksilbergehalte gemessen (Abb. 4-42).

Dies ist bemerkenswert, da es sich hier im Gegensatz zum Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland um ein Sediment mit geringem Feinkornanteil handelt.

2003	SAMPLES	MEAN	STD. DEV.
Cd	4	0.66	0.18
Cu	4	26	4
Pb	4	95	31
Hg	4	0.51	0.05
Zn	4	237	61

Tab. 4-12: Mittelwert und Standardabweichung im Jahr 2003 der Elementgehalte (mg/kg) in der Feinkornfraktion von Oberflächensedimentproben aus der inneren Deutschen Bucht (Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland).

Table 4-12: Mean and standard deviation in 2003 of element content (mg/kg) in the fine grain fraction of surface sediment samples from the inner German Bight (mud area SE of Helgoland).

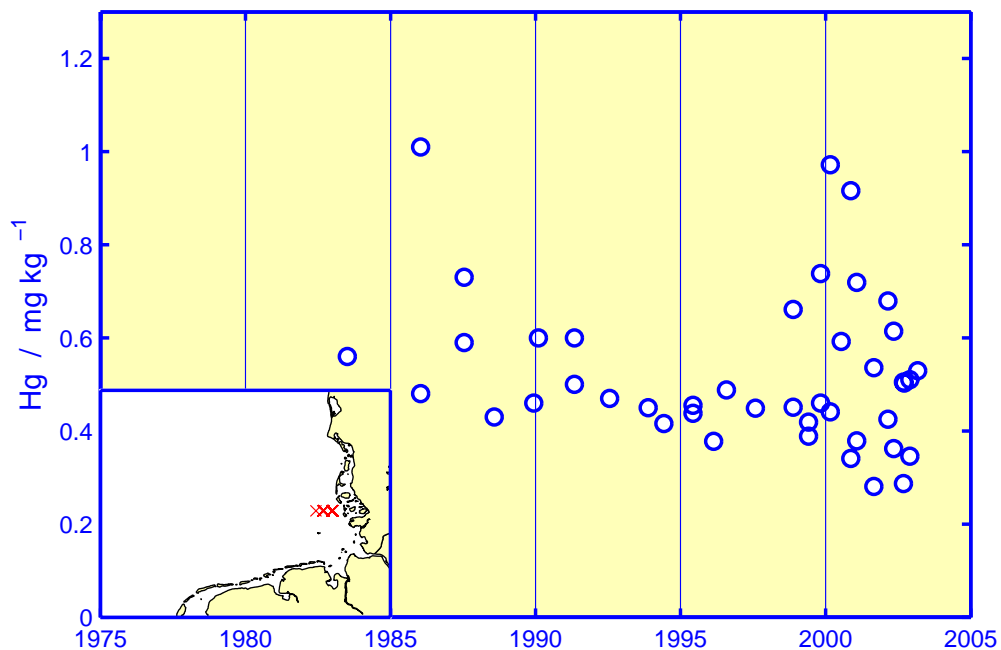


Abb. 4-42: Zeitreihe der Quecksilbergehalte in der Feinkornfraktion der Oberflächensedimente vor der Nordfriesischen Küste.

Fig. 4-42: Time series of mercury content in the fine grain fraction of surface sediments off the North Frisian Islands (cf. inset).

Ganz anders stellen sich die Verhältnisse ca. 60 km westlich des Schlickfallgebietes, d. h. nördlich von Norderney, dar. Hier wurde eine seit 1983 stetig abnehmende Quecksilberbelastung festgestellt (Abb. 4-43). Auch im Zeitraum zwischen 1999 und 2002 wurden hier keine Anomalien beobachtet. Schon das insgesamt vergleichsweise niedrige Konzentrationsniveau der im Sediment vor Norderney bestimmten Quecksilbergehalte weist darauf hin, dass die erhöhten Werte im Elbeästuar und an der schleswig-holsteinischen Küste auf langfristige Emissionen aus der Elbe zurückzuführen sind. Die Quecksilbergehalte vor den ostfriesischen Inseln lagen durchgehend um

den Faktor 2 bis 3 niedriger als im Schlickfallgebiet. Auch das Fehlen jeglicher Veränderungen im Zeitraum 1999 bis 2003 ist ein Hinweis darauf, dass der weiter östlich beobachtete plötzliche Anstieg der Quecksilbergehalte direkt auf Veränderungen in der inneren Deutschen Bucht zurückzuführen ist, denn an der niedersächsischen Küste verläuft die Vorzugsströmungsrichtung von West nach Ost (vgl. *Abschnitt 3.1.3*, S. 49).

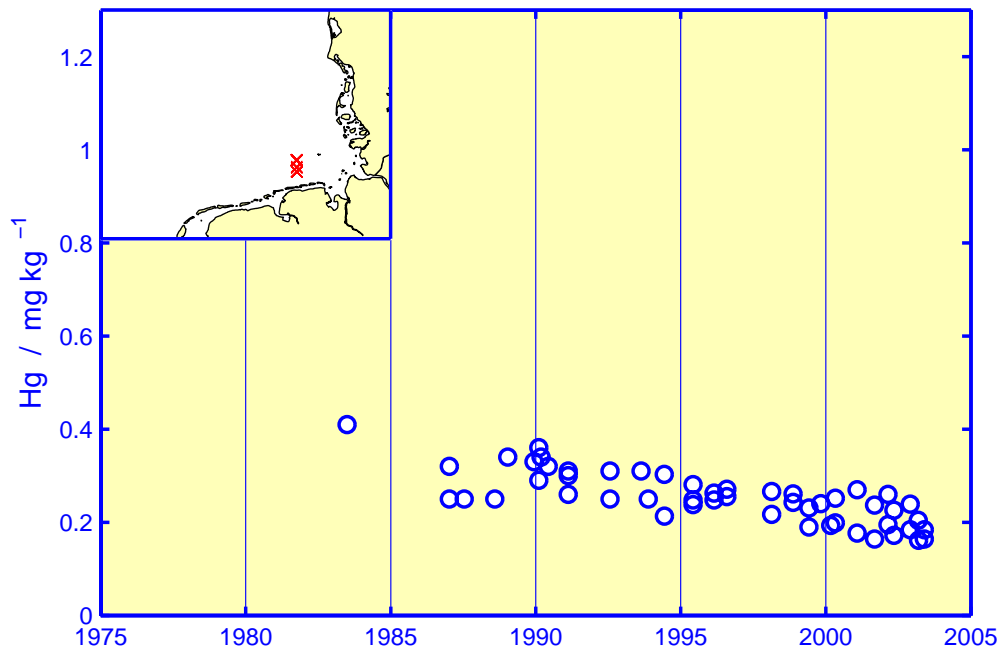


Abb. 4-43: Zeitreihe der Quecksilbergehalte in der Feinkornfraktion der Oberflächensedimente vor der Niedersächsischen Küste.

Fig. 4-43: Time series of the mercury content in the fine grain fraction of surface sediments off the East Frisian Islands.

Einen weiträumigeren Blick auf die unterschiedliche regionale Entwicklung der Quecksilbergehalte im Oberflächensediment eröffnet die vergleichende Untersuchung der 1995 und 2000 durchgeführten Gesamtaufnahmen der deutschen AWZ. Die Differenz der für beide Jahre vorliegenden, räumlich relativ hochaufgelösten Messwerte, unterstreicht den gefundenen Effekt im küstennahen Bereich vor der Elbemündung und entlang der schleswig-holsteinischen Küste. Abb. 4-44 bietet eine IsoPLETHendarstellung der Differenzen der Hg-Gehalte an allen, in beiden Jahren beprobten Stationen. Deutlich sind die im küstennahen östlichen Teil der AWZ zunehmenden Hg-Gehalte zu erkennen, während die allgemeine Tendenz zwischen den Jahren im gesamten restlichen Untersuchungsgebiet abnehmend war.

Im Tidebereich der Elbe werden von der ARGE-Elbe Metallgehalte im Sediment und im schwebstoffbürtigen Sediment bestimmt. An der Messstation Seemannshöft (nordwestlicher Stadtrand von Hamburg, Strom-km 628.9) zeigten sich im Zeitraum zwischen 1999 und 2003 keine auffälligen Konzentrationsschwankungen. Der mittlere Gehalt bewegte sich ohne erkennbaren Trend um 1.9 mg/kg (ARGE-ELBE 2004, S. 13 A.A.O.). Unterhalb Seemannshöft bis hin zur Elbemündung wurden im Zeitraum 1999 – 2002 Mediangehalte von 0.8 mg/kg und Maximalgehalte von 1.4 mg/kg in der Feinkornfraktion gemessen (MESSPROGRAMM MEERESUMWELT 2005, S. 43 A.A.O.). Die hier im Tidebereich der Elbe nachgewiesenen Quecksilbergehalte entsprachen

recht gut dem im Schlickfallgebiet zwischen 1999 und 2003 gemessenen Gehalten von 0.4 bis 1.2 mg/kg.

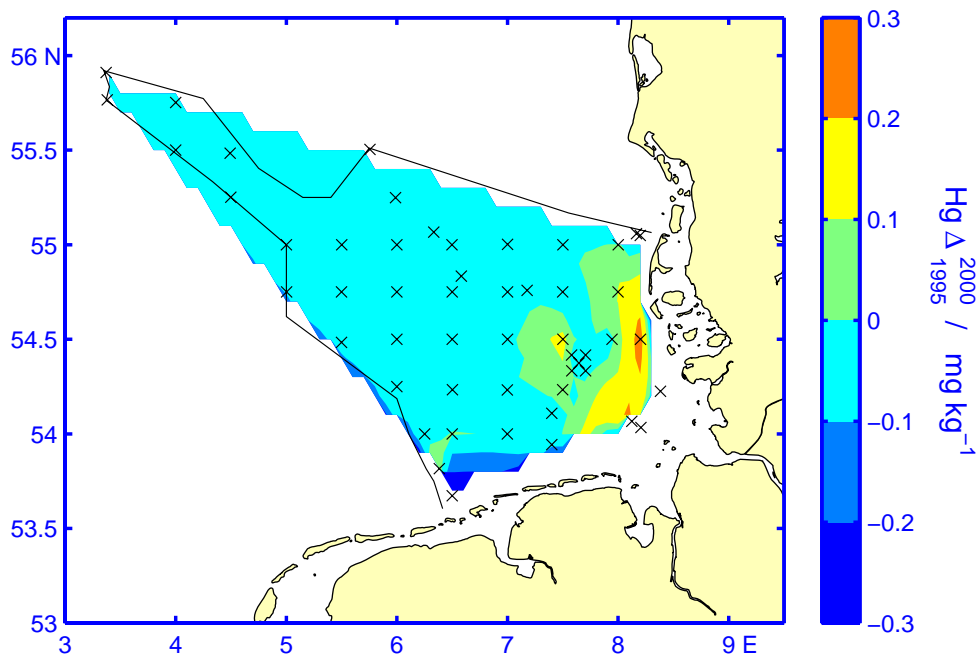


Abb. 4-44: Räumliche Verteilung der Differenzen im Quecksilbergehalt des Oberflächensediments in den Jahren 2000 und 1995.

Fig. 4-44: Spatial distribution of differences in mercury content in the fine grain fraction of surface sediment samples from the years 2000 and 1995.

Um weitere Hinweise auf die Ursachen der Entwicklung der Metallbelastung im Schlickfallgebiet südöstlich von Helgoland zu erhalten, wurden in den vergangenen Jahren seit 1986 wiederholt Kernuntersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe des eingesetzten großen Kastengreifers konnten Sedimentkerne bis zu einer Tiefe von 45 cm genommen werden. Die Kerne wurden in 3 cm Schichten unterteilt und einzeln auf ihre Metallgehalte in der Feinkornfraktion untersucht. Abb. 4-45 zeigt die Tiefenprofile der gemessenen Quecksilbergehalte.

Der in der obersten Schicht (0 – 3 cm) der jüngsten Probe vom Januar 2004 gemessene Gehalt von 0.55 mg/kg Quecksilber deckt sich mit den gegen Ende 2003 gemessenen Werten aus dem Oberflächensediment (vgl. Abb. 4-41, S. 168). Allerdings liegen schon ab einer Tiefe von 3 cm bis in den tiefen Teil des Kerns fast homogene, um den Faktor 2 erhöhte Werte vor. Anscheinend ist nur eine recht dünne Deckschicht geringer kontaminierten Materials für die nach dem Jahr 2002 einsetzende Normalisierung der Hg-Oberflächenkonzentrationen verantwortlich.

Im Oktober 1999, also vor dem im Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland beobachteten Effekt, wurden im gesamten Sedimentkern, bis zu einer Tiefe von 35 cm, Quecksilbergehalte von 0.5 mg/kg gemessen. Die früheren Kernuntersuchungen lassen jedoch vermuten, dass in dem beobachteten Gebiet keine ungestörte Sedimentation mit entsprechend einfach interpretierbaren Tiefenprofilen der Elementgehalte, sondern größere Sedimentumlagerungen stattfanden. Mit einer Verzögerung von nur acht Monaten wurden erst im Mai und dann im Oktober 1999 deutlich unterschiedliche Tiefenprofile gemessen. Ein Effekt, der durch schnelle, tiefgreifende Umlagerungsprozesse

erklärt werden kann, aber kaum auf reine Sedimentation zurückführbar ist. In Frage kommen hier die mechanische Beanspruchung des Meeresbodens durch Grundnetz-fischerei, aber auch weiträumigere Umlagerungsprozesse durch Sturmereignisse. Bis heute konnte nicht eindeutig geklärt werden, wo die Ursachen für die im Zeitraum zwischen 1999 und 2003 erhöhten Quecksilberkonzentrationen im Schlickfallgebiet süd-östlich Helgoland und entlang der schleswig-holsteinischen Küste lagen. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

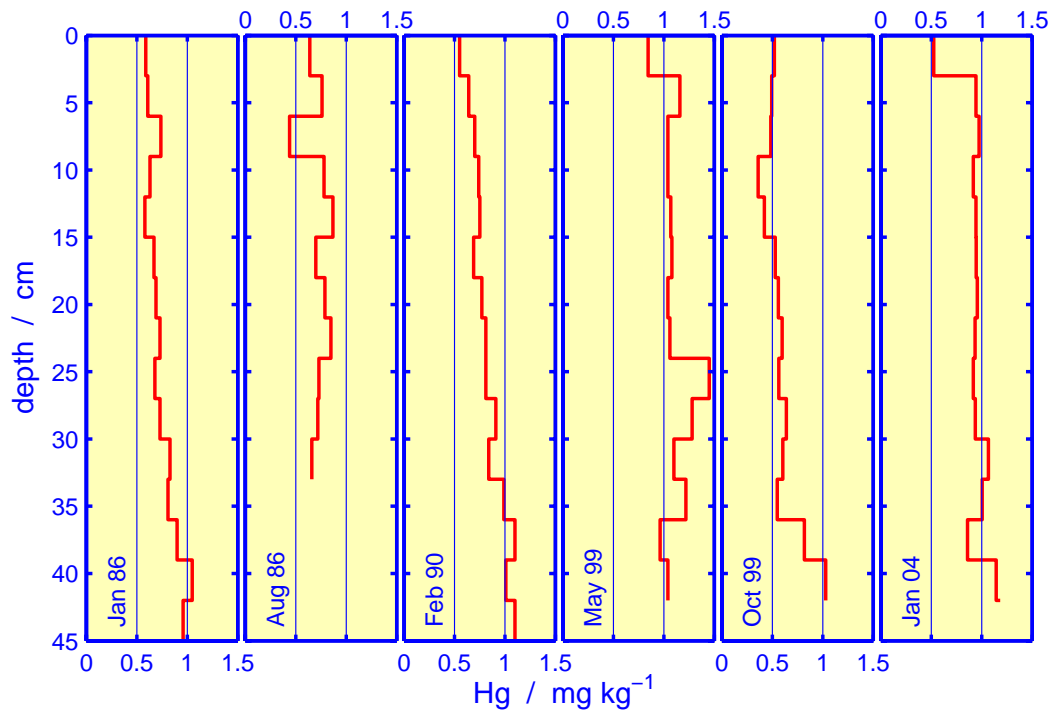


Abb. 4-45: Profile des Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion einiger Sedimentkernproben aus dem Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland und dem Zeitraum 1986 – 2004.

Fig. 4-45: Profiles of Mercury content in the fine grain fraction of some sediment cores from the mud-area SE of Helgoland during the period 1986 – 2004.

4.4 Radioaktive Stoffe

4.4.1 Einführung

Die Nordsee ist ein flaches Schelfmeer des Atlantischen Ozeans, das starken anthropogenen Einflüssen aus den dicht besiedelten Anrainerstaaten unterliegt. Fast alle Anrainer nutzen seit vielen Jahren die Kernenergie. Daher sind künstliche Radionuklide aus dieser Nutzung in der Nordsee nachweisbar.

Das ozeanische Meerwasser besitzt einen Salzgehalt von etwa 35. Im Salz des Meeres sind alle chemischen Elemente einschließlich natürlicher Radionuklide in unterschiedlichster Konzentration enthalten. Die Konzentrationen sind gewöhnlich vom Salzgehalt abhängig und nehmen mit diesem ab. Geochemische Prozesse führen dazu, dass einige Nuklide aus der Wassersäule abgereichert, in Schwebstoffen angereichert und auf dem Sediment deponiert werden, so dass ihre Konzentration im Wasser extrem gering ist, das Sediment aber wesentlich höhere spezifische Aktivitäten aufweist.

RADIO NUCLIDE	HALF-LIFE yrs	SEA WATER Bq/m ³	SEDIMENT Bq/kg
Tritium	12.3	20 – 100 [†]	–
⁷Be	0.146	1.1 – 3.4	–
¹⁴C	5.73 × 10 ³	5.5 – 6.7	–
³²Si	172 ± 4	0.2 – 3.3 × 10 ⁻³	–
⁴⁰K	1.28 × 10 ⁹	11800 – 12300	100 – 1000
⁸⁷Rb	4.80 × 10 ⁴	10 ⁶	–
²³²Th	1.41 × 10 ¹⁰	0.4 – 20 × 10 ⁻³	12 – 50
²²⁸Ra	5.76	0.8 – 8	–
²²⁸Th	1.91	0.004 – 0.3	–
²³⁵U	7.04 × 10 ⁸	1.9	0.1 – 10
²³⁸U	4.47 × 10 ⁹	40 – 44	2.5 – 200
²³⁴Th	0.066	0.6 – 0.8	#
²³⁴U	2.45 × 10 ⁵	47	#
²³⁰Th	8.0 × 10 ⁴	2.52 × 10 ⁻³	#
²²⁶Ra	1617	0.8 – 8	20 – 80
²¹⁰Pb	22.3	0.4 – 2	100 – 300 [‡]
²¹⁰Po	0.378	0.6 – 1.9	100 – 300 [‡]

† Holds for oceanic deep-water, free of anthropogenic contributions.
 # In North Sea sediments equilibrium with Uranium-238 is assumed.
 ‡ Holds for surface sediments. Radon-222 emanation from land masses and subsequent deposition on the sea surface of its decay products results in an excess of Lead/Polonium-210 relative to Radium-226 in-situ decay in surface sediments. Thus sedimentation rates in largely undisturbed sediments may be determined back in time for up 200 yrs.

Tab. 4-13: Konzentration und spezifische Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser (mit Salzgehalt 35) und Sedimenten der Nordsee.

Table 4-13: Concentration and specific activity of some natural radio nuclides for North Sea sea-water (at salinity 35) and sediments.

Tafel 4-9: Radioaktivität

Zu den **Natürliche Radionukliden** zählen vor allem die primordialen[†] Nuklide Kalium-40, Rubidium-87 sowie Uran-238, Uran-235, Thorium-232 und deren Zerfallsreihen. Meerwasser weist eine relativ hohe natürliche Uran-Konzentration von etwa 3.3 µg/l auf. Die kosmogenen[‡] Nuklide Tritium, Beryllium-7 und -10 und Kohlenstoff-14 werden über die Atmosphäre in das Meer eingetragen.

[†] Primordial nennt man radioaktive Elemente, die aufgrund ihrer extrem langen Halbwertszeiten seit der Entstehung des Weltalls vorhanden sind.

[‡] Kosmogene Radionuklide, deren Halbwertszeit durchaus kurz sein kann, entstehen durch die kosmische Höhenstrahlung.

Künstliche Radionuklide entstehen bei der Kernspaltung aus Uran oder Plutonium. Allerdings gibt es einige Nuklide, die sowohl bei natürlichen Prozessen als auch durch die Nutzung der Kernenergie anfallen (z. B. Tritium oder ¹⁴C).

Strahlenauswirkung: In Presse und Öffentlichkeit wird immer wieder »Konzentration« mit »Strahlenbelastung« gleichgesetzt. Die Konzentration eines Nuklids sagt jedoch tatsächlich nichts über eine mögliche Strahlenexposition aus. So weist das natürliche Nuklid Kalium-40 die höchste Konzentration im Meerwasser gegenüber allen natürlichen und meist auch künstlichen Radionukliden auf. Dieses Isotop des überall vorkommenden Kaliums leistet aber keinen zusätzlichen Beitrag für eine mögliche Strahlenexposition. Wesentlich für die Höhe einer Strahlenexposition und einer möglichen Schädigung ist die absorbierte Energie in einer Zelle oder die zugeführte Dosis. Diese hängt von der Strahlenart und der Menge der applizierten Strahlung ab. Da eine applizierte Dosis im Organismus selbst nicht gemessen werden kann, hat man Berechnungsverfahren eingeführt, um Risiken radioaktiver Strahlung abzuschätzen. Die Dosis – z. B. aufgrund der Inkorporation eines Radionuklids – wird dabei mit dem Dosisfaktor des entsprechenden Nuklids verknüpft. Dieser Dosisfaktor berücksichtigt die Dauer der Inkorporation, der physiko-chemischen Eigenschaften, der unterschiedlichen Verteilung und der Strahlenart dieses Nuklids im Körper. Nähere Einzelheiten können weiterführender einschlägiger Information zum Strahlenschutz entnommen werden.

Für eine Strahlenexposition des Menschen durch Verzehr von Meerestieren spielt der alpha-Strahler Polonium-210 aus der Uran-238 bzw. der Ra-226-Zerfallsreihe die größte Rolle, denn Polonium-210 wird in manchen Meeresorganismen stark angereichert und liefert dadurch den Hauptbeitrag für die Dosis.

Radioaktive Elemente sind seit jeher natürliche Bestandteile der Umwelt, so dass die belebte Natur gelernt hat, die Auswirkungen dieses Phänomens zu bewältigen. Zusätzlich zu dieser natürlichen radioaktiven Strahlung sind alle Organismen auch der kosmischen Höhenstrahlung ausgesetzt. In beiden Fällen handelt es sich um ionisierende Strahlung, die schädliche Auswirkungen auf Organismen haben kann, wenn deren Dosis gewisse Grenzwerte überschreitet. Deshalb gehört in allen Staaten die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt zum Standardumweltüberwachungsprogramm. Die vom BSH durchgeführte Überwachung radioaktiver Stoffe im Meer beschränkt sich dabei überwiegend auf künstliche Radionuklide. In *Tab. 4-13* sind ungefähre Aktivitätskonzentrationen bzw. spezifische Aktivitäten einiger natürlich vorkommender Radionuklide im Meerwasser bzw. Sediment der Nordsee aufgelistet.

4.4.2 Eintragsquellen künstlicher Radionuklide

Künstliche radioaktive Stoffe in den Meeren stammen hauptsächlich aus folgenden Eintragsquellen:

- Globaler Fallout aufgrund atmosphärischer Kernwaffentests in den 1950er und 1960er Jahren.

- Aquatische Ableitungen aus den nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen BNFL in Sellafield (UK) in die Irische See und COGEMA am Cap de la Hague (F) in den Kanal.
- Fallout nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl im April 1986.
- Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen wie Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.

Andere Quellen – wie etwa das im April 1989 in der Norwegischen See gesunkene Atom-U-Boot ›Komsomolets‹, die im Nordostatlantik (bis 1982) oder in den arktischen Randmeeren Barents- und Karasee (bis 1992) versenkten schwach-radioaktiven Abfälle, oder abgestürzte, mit nuklearen Energieerzeugern bestückte Satelliten – spielen für eine mögliche Belastung der Nordsee keine Rolle. Auch erhöhte Einleitungen natürlicher Radionuklide infolge industrieller Aktivitäten, z. B. bei der Produktion von Düngemitteln, sind inzwischen in Europa von untergeordneter Bedeutung.

Die Aktivitätskonzentration langlebiger künstlicher Radionuklide in der Nordsee war über viele Jahre überwiegend durch die kontrollierten und genehmigten Einleitungen radioaktiver Abwässer aus den europäischen Wiederaufbereitungsanlagen La Hague und Sellafield bestimmt. Aufgrund der vorherrschenden Meeresströmungen und des damit verbundenen Wassermassentransportes konnten etliche Radionuklide aus diesen Einleitungen in Abhängigkeit von der Transportzeit auch nach mehreren Jahren und in weit entfernten Gebieten nachgewiesen werden. Die Transportzeiten von La Hague bzw. Sellafield (Irische See) bis in die Deutsche Bucht belaufen sich auf etwa ein bzw. drei Jahre.

Internationale Anstrengungen haben bewirkt, dass die in den 1970er Jahren sehr hohen Einleitungen beider Wiederaufbereitungsanlagen seit langem auf ein deutlich reduziertes Niveau zurückgegangen sind. Das Meerwasser der Nordsee ist deshalb inzwischen nur sehr gering durch künstliche Radionuklide belastet. So nahm in der mittleren Nordsee bis Ende der 1990er Jahre die Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs (Cäsium) mit einer strömungsbedingten Zeitverzögerung von zwei bis drei Jahren kontinuierlich ab. Eine Ausnahme bildet das Tritium, weil beide Wiederaufbereitungsanlagen seit Jahren den Tritiumgehalt ihrer Einleitungen erhöhen. Da dieses Radionuklid aber praktisch in Meeresorganismen nicht angereichert wird, ist es für eine Strahlenexposition des Menschen über den »Expositionspfad Meer« weitgehend irrelevant.

Die Anlage Sellafield erhöhte ab 1994 über einige Jahre deutlich die eingeleitete Aktivität von ^{99}Tc (Technetium). Dies rief heftige internationale Proteste hervor, weil das sehr langlebige ^{99}Tc ($T_{1/2} = 213\,000$ Jahre) in oxischem Meerwasser in der chemischen Form als Pertechnetat (TcO_4) vorliegt und mit dem Wasser über große Strecken transportiert wird. Darüber hinaus wird es in Hummern und Braunalgen (z. B. Blasen tang, Sägezahn tang) sehr stark angereichert.

4.4.3 Geographische Radioaktivitätsverteilungen

Die Überwachung künstlicher Radioaktivität durch das BSH erstreckt sich in der Nordsee seit Jahren schwerpunktmäßig auf die Nuklide Tritium, ^{99}Tc , ^{137}Cs , ^{90}Sr und einige Transurane (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu und ^{241}Pu ; ^{241}Am und ^{244}Cm). Diese Radionuklide werden als radiologisch relevant für eine mögliche Strahlenexposition des Menschen und der Natur angesehen.

Die räumliche Verteilungen der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs und ^{90}Sr in der südlichen Nordsee und der Deutschen Bucht im Herbst 2002 sind in Abb. 4-46 dargestellt; Abb. 4-47 bietet eine Isoplethendarstellung der ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration im Meerwasser der Deutschen Bucht im September 2003. Sowohl in der Deutschen Bucht als auch in den anderen Seegebieten der Nordsee liegen die Aktivitätskonzentrationen inzwischen auf einem sehr niedrigen Niveau. Die ehemals hohen Ableitungen aus der Anlage Sellafield lassen sich allenfalls an den leicht höheren Konzentrationen in der äußeren Deutschen Bucht und den Aktivitätsverhältnissen dieser beiden Radionuklide erkennen. Die Werte übersteigen nur noch geringfügig diejenigen des Fallouts im Oberflächenwasser des Atlantischen Ozeans.

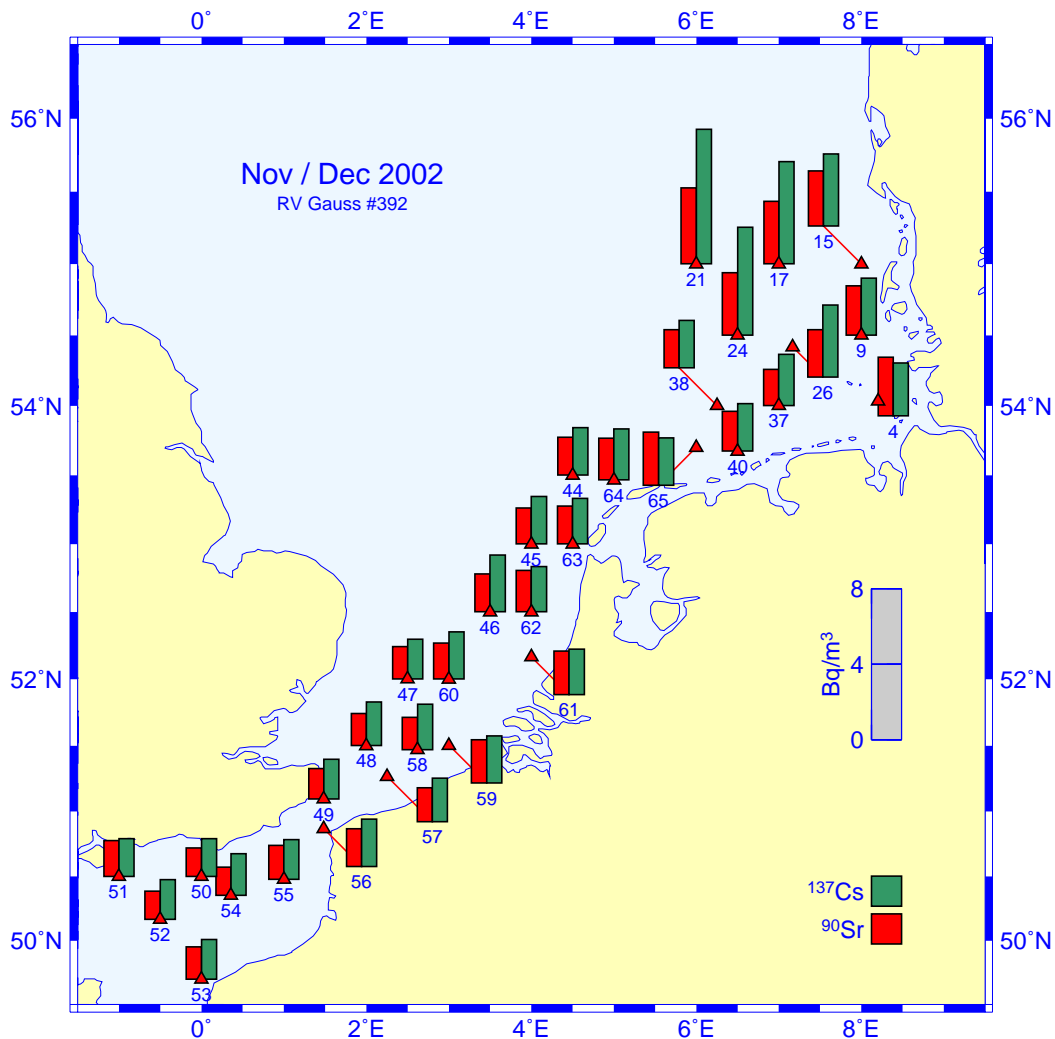


Abb. 4-46: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr und ^{137}Cs im Wasser der südlichen Nordsee im Spätherbst 2002. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-46: Distribution of ^{90}Sr and ^{137}Cs activity concentrations in southern North Sea sea-water in late fall 2002. Underneath columns station IDs.

Ein Teil der nachweisbaren ^{137}Cs -Kontamination des Meerwassers der Nordsee stammt aus inzwischen resuspendiertem Material kontaminierter Sedimente der Irischen See, welche insbesondere durch Einleitungen in den 1970er Jahren stark belastet wurden. Dies gilt in geringerem Maße auch für das Sediment der kontinentalen Küste. Die Resuspension wird sowohl durch natürliche Ereignisse – wie Stürme – als

auch durch menschliche Aktivitäten – wie Grundnetz- und Baumkurrenfischerei – ausgelöst. ^{134}Cs ist im Meerwasser der Nordsee nicht mehr nachweisbar, denn die aktuelle Konzentration liegt unter der Nachweisgrenze von ca. 0.2 Bq/m^3 .

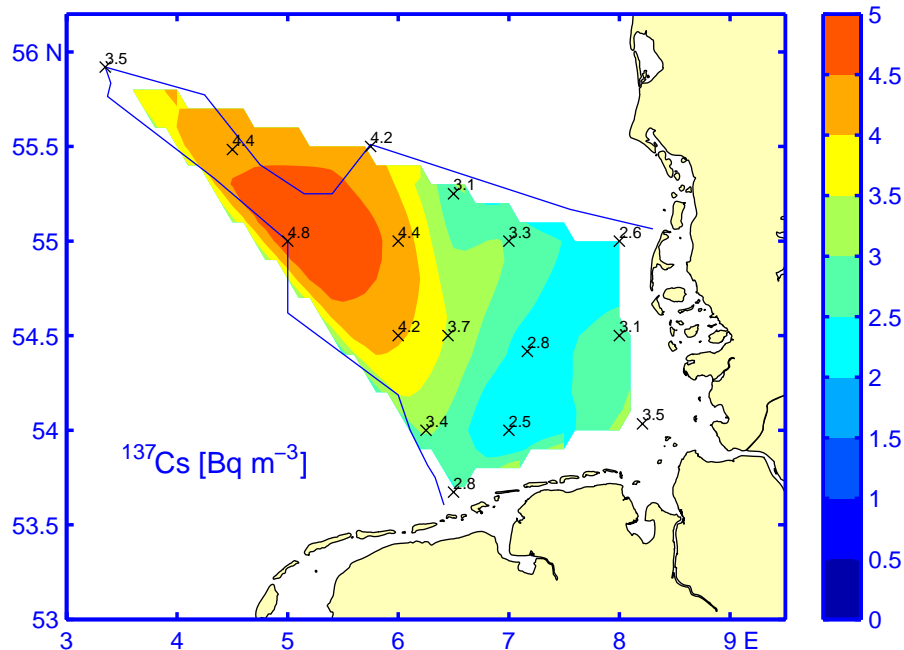


Abb. 4-47: Verteilung der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs im Wasser der Deutschen Bucht im September 2003.

Fig. 4-47: Distribution of ^{137}Cs activity concentration in German Bight sea-water in September 2003.

Eine ganz ähnliche räumliche Verteilung wie beim ^{137}Cs ist auch beim ^{90}Sr festzustellen (Abb. 4-46). Die ^{90}Sr -Konzentrationen liegen jedoch insgesamt etwas niedriger, weil der Fallout an ^{90}Sr aus den oberirdischen Kernwaffentests der 1960er Jahre gegenüber demjenigen an ^{137}Cs geringer ausfiel, was wiederum auf die unterschiedliche Spaltausbeute der Isobaren ^{137}I bzw. ^{90}Y bei der Kernspaltung zurückzuführen ist.

Auch die Transurane Plutonium und Americium lassen sich sowohl im globalen Fallout als auch in den Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlagen Sellafield und La Hague nachgewiesen. Die Aktivitätsverhältnisse der Transurane sind für diese verschiedenen Quellen sehr unterschiedlich. So liegt das Verhältnis für $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ im globalen Kernwaffen-Fallout bei etwa 0.04, für die Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlagen häufig deutlich über 0.5 bis sogar oberhalb 1.0. Auch das Aktivitätsverhältnis zwischen ^{241}Am und $^{239,240}\text{Pu}$ überschreitet für die Einleitungen aus den Anlagen Sellafield und La Hague den Fallout-Wert von ca. 0.3 deutlich.

Die Transurane gehören zu denjenigen Radionukliden, denen sich Partikel anlagern, wodurch ihre Deposition im Sediment begünstigt wird. Jedoch wurden in der Vergangenheit nicht nur im Sediment, sondern auch im Meerwasser der Deutschen Bucht und anderer Seegebiete der Nordsee Aktivitätsverhältnisse vorgefunden, die auf eine Kontamination durch die Wiederaufbereitungsanlagen hindeuten. In Abb. 4-48 ist die räumliche Verteilung der Transurankonzentrationen in der südlichen Nordsee und der Deutschen Bucht für den Spätherbst 2002 dargestellt. Die höchsten Konzentrationen

mit für die Anlage La Hague typischen Aktivitätsverhältnissen wurden im Bereich des Kanals angetroffen. Weiter nordöstlich in Richtung der Deutschen Bucht nahmen die Konzentrationen ab, während sich die Aktivitätsverhältnisse denjenigen des globalen Fallouts annäherten. ^{244}Cm ist in der Deutschen Bucht praktisch nicht mehr nachzuweisen.

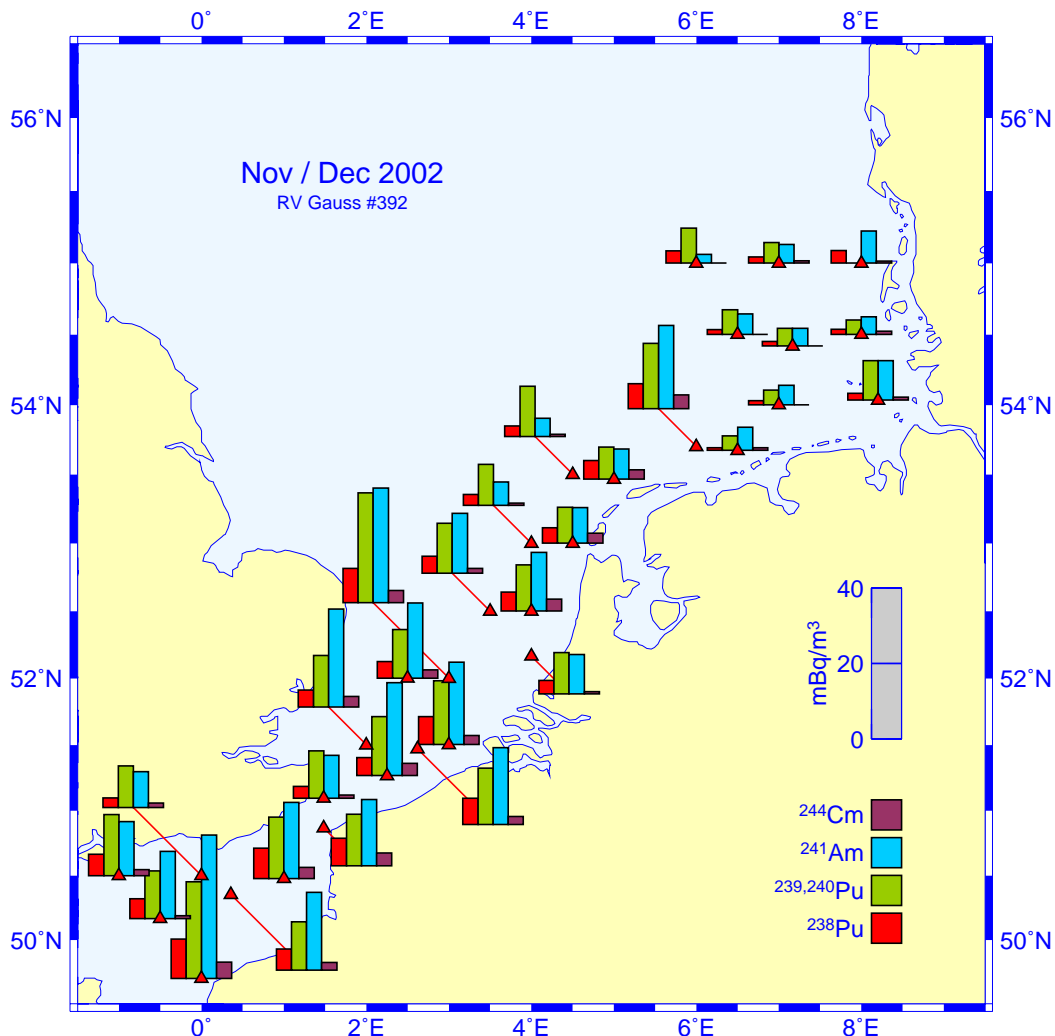


Abb. 4-48: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen der Transurane $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am im Wasser der südlichen Nordsee im Spätherbst 2002.

Fig. 4-48: Distribution of activity concentrations of transuranics $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu and ^{241}Am in southern North Sea sea-water in late fall 2002.

4.4.4 ^{137}Cs und ^{90}Sr -Zeitserien in der Deutschen Bucht

Die zeitliche Entwicklung der ^{137}Cs - und ^{90}Sr -Aktivitätskonzentrationen seit 1961 ist in Abb. 4-49 an den früheren Positionen der Feuerschiffe ›Elbe 1‹ und ›Borkumriff‹ dargestellt.

Deutlich treten die hohen Konzentrationen von ^{137}Cs aus dem Fallout nach dem Tschernobyl-Unfall hervor, der sich im April 1986 ereignete. An der Position ›Elbe 1‹ in der inneren Deutschen Bucht wurden lange Zeit höhere Konzentrationen gemessen als an der Position ›Borkumriff‹, was sich aus den höheren Konzentrationen des Ab-

flusswassers der Elbe selbst erklärt. Heute ist der Tschernobyl-Fallout in der Deutschen Bucht nicht mehr nachweisbar. Lediglich im Skagerrak entlang der norwegischen Küste können noch geringe Spuren aus dieser Quelle im Ausstromwasser der Ostsee erfasst werden.

Die kurzzeitige Spitzenkonzentration beim ^{137}Cs im Jahr 1981 bei ›Borkumriff‹ ist auf das Vordringen höher kontaminierter Wassermassen aus nördlicheren Seegebieten zurückzuführen. Dieser Konzentrationsanstieg ging einher mit einer verminderten ^{90}Sr -Aktivität, was Sellafield eindeutig als Quelle ausweist, denn das Nuklidmuster der Emissionen von Sellafield und La Hague unterschied sich zu diesem Zeitpunkt deutlich voneinander.

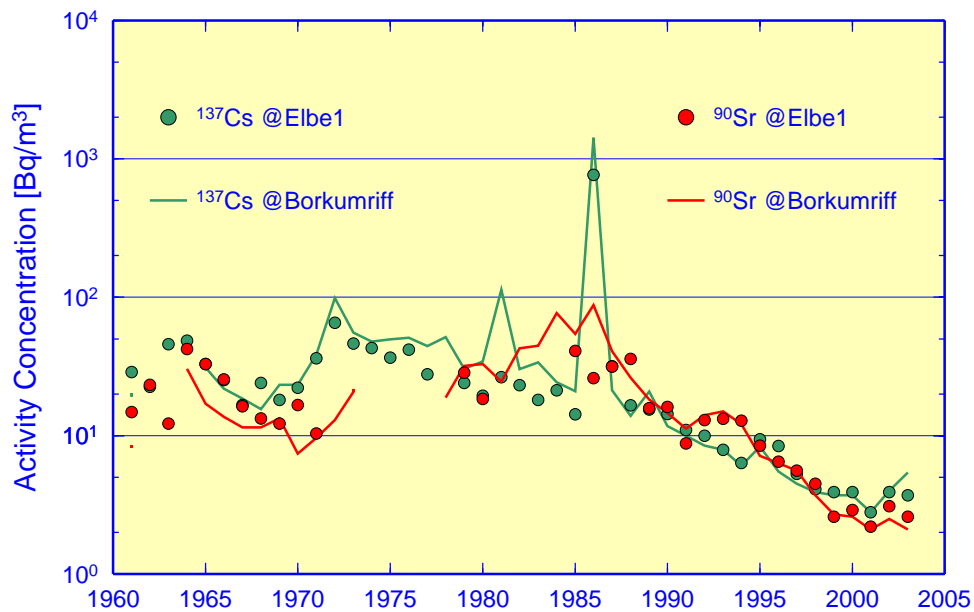


Abb. 4-49: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr an den früheren Positionen der Feuerschiffe ›Borkumriff‹ und ›Elbe 1‹.

Fig. 4-49: Time series of annual maximum activity concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr at former positions of out-of-operation light vessels ›Borkumriff‹ and ›Elbe 1‹.

Der weitgehend stetige Rückgang der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs und ^{90}Sr seit Ende der 1980er Jahre ist nur zum geringen Teil auf den radioaktiven Zerfall selbst zurückzuführen. Der Hauptgrund hierfür liegt vielmehr in den geringeren Einleitungen dieser Radionuklide durch beide Wiederaufbereitungsanlagen. Dieser Rückgang wurde für ein breites Spektrum anderer Nuklide beobachtet, jedoch nicht für Tritium und ^{99}Tc . Diese beiden Radionuklide sind jedoch in der Radioökologie des Meeres hinsichtlich einer Strahlenexposition weniger bedeutsam als ^{137}Cs und ^{90}Sr . Insgesamt ist der deutliche Rückgang der Belastung der Nordsee durch Radionuklide als Erfolg der internationalen Übereinkommen zum Schutze des Meere zu werten (OSPAR, Nordseeschutzkonferenzen).

4.4.5 Aktivitätskonzentrationen im Sediment

Sedimente reichern häufig Stoffe aus der Wassersäule an und sind dadurch eine wesentliche Senke für ins Meer eingetragene Schadstoffe. In Abhängigkeit ihrer chemischen Eigenschaften und der Schwebstoffbeschaffenheit reichern sich auch radioak-

tive Stoffe durch Sedimentation am Meeresboden an. Für eine Reihe von Nukliden bedeutet diese Anreicherung einen weitgehend irreversiblen Prozess, durch den die Radioaktivität der Wassersäule »ausgekämmt« und in der Meeresbodenoberfläche konzentriert wird. Je nach den chemischen und physikalischen Gegebenheiten ist die Wiederfreisetzung der abgelagerten Radionuklide in die Wassersäule durch Resuspension durchaus möglich und wird gegenwärtig in der Irischen See auch beobachtet.

In Abb. 4-50 sind beispielhaft Konzentrationsprofile verschiedener Radionuklide in einem Sedimentkern aus 470 m Tiefe aus dem Skagerrak aus dem Jahre 2001 dargestellt. Anhand dieser Profile lässt sich die zeitliche Eintragsentwicklung der künstlichen Radionuklide klar verfolgen. Die Schicht bei etwa 9 cm wurde vermutlich in den 1960er Jahren abgelagert.

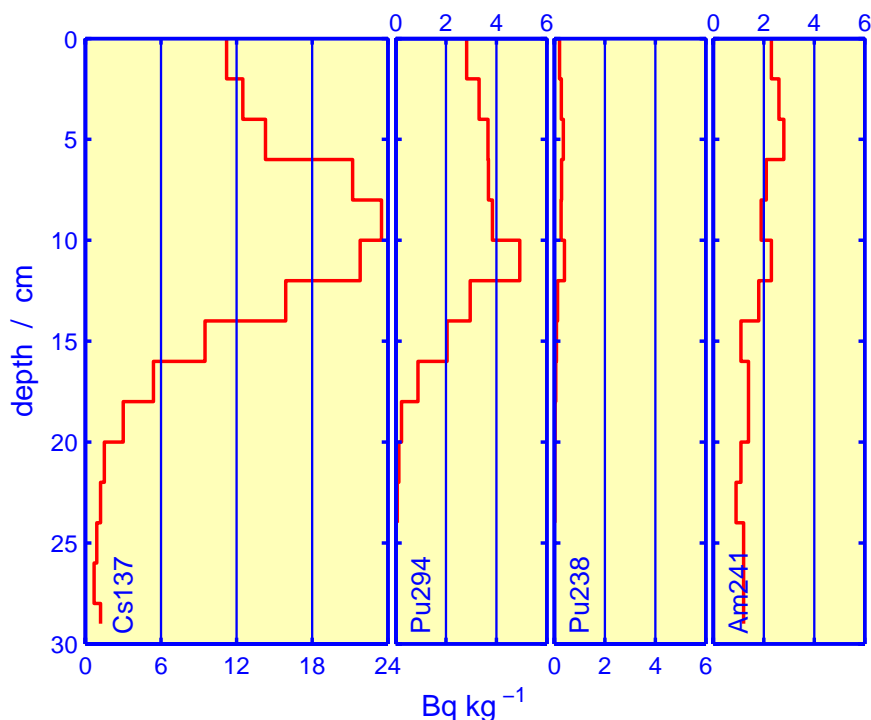


Abb. 4-50: Vertikalverteilung der Radionuklide ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am in einem Sedimentkern vom 29. Juni 2001 aus dem Skagerrak ($57^{\circ} 45' \text{ N}$, 8° E).

Fig. 4-50: Vertical distribution of ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am in a sediment core from the Skagerrak at $57^{\circ} 45' \text{ N}$, 8° E (June, 29 2001).

4.4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich für die Nordsee festhalten:

- Die Einleitungen aus Wiederaufbereitungsanlagen Sellafield und La Hague nehmen seit vielen Jahren für die meisten Radionuklide deutlich ab. Die höchsten Aktivitätskonzentrationen an ^{137}Cs treten im Skagerrak durch abfließendes Ostseeoberflächenwasser auf (Tschernobyl).
- Das Sediment der Irischen See stellt die zweitstärkste Quelle für ^{137}Cs dar. Vergleichende Betrachtungen ergeben, dass zwischen 50 und 70 TBq/Jahr an ^{137}Cs resuspendiert werden. Dies entspricht dem 5–10fachen der gegenwärtigen Einlei-

tungen. Die Radionuklide im Meerwasser der Irischen See werden zu einem großen Teil mit den Meeresströmungen in die Nordsee transportiert.

- Trotz der insgesamt niedrigen Konzentrationen künstlicher Radionuklide sind die Wiederaufbereitungsanlagen als Quellen identifizierbar, und zwar sowohl anhand der Transurankonzentrationen im Meerwasser als auch durch typische Aktivitätsverhältnisse. Demnach unterliegen auch partikelgebundene Transurane einem weiträumigen Transport in der Wasserphase, welcher z. T. an Schwebstofftransporte gebunden sein mag.
- Die gegenwärtig in der Nordsee nachgewiesenen Aktivitätskonzentrationen der meisten künstlichen Radionuklide übersteigen meist nur noch geringfügig die im Oberflächenwasser des offenen Atlantik gemessenen Konzentrationen, welche dem globalen Fallout zuzuschreiben sind.
- Die vorgefundenen Konzentrationen künstlicher Radionuklide lassen den Schluss zu, dass auch in der Nahrungskette des Meeres keine Werte erreicht werden, die eine relevante Strahlenexposition des Menschen infolge des Verzehrs von Meeresfrüchten zur Folge hätten. Auch für die Nordsee gilt der Strahlenschutzgrundsatz: »Die belebte Meeresumwelt ist geschützt, solange der Mensch geschützt ist«.

4.5 Referenzen

ARGE-Elbe, Gewässergütebericht der Elbe 2003, *Wassergütestelle Elbe*, Hamburg, 30pp, 2004.

ASMO '97: OSPAR Convention – Summary Record 97/16/1 Annex 9. www.ospar.org

Bakker, J. F., W. Bartelds, P. H. Becker, K. Bester, D. Dijkhuizen, B. Frederiks und B. Reineking, Marine Chemistry. 85-117 in: Wadden Sea Quality Status Report 1999, F. De Jong et al., *Wadden Sea Ecosystem No. 9*, Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Monitoring and Assessment Group, Quality Status Report Group, Wilhelmshaven, Germany, 264pp, 1999.

Bester, K. und H. Hühnerfuss, Triazines in the Baltic and North Sea, *Mar. Poll. Bull.*, 26, 423-427, 1993.

Brockmann, U. und D. Topcu, Nutrient atlas of the North Sea, *Umweltbundesamt*, Berlin, 64pp, 404 figs, mit CD-ROM, 2001.

Chester, R., G. F. Bradshaw, C. J. Ottley, The atmospheric distributions of trace metals, trace organics and nitrogen species over the North Sea. 543-556 in: Understanding the North Sea system, H. Charnock, K. R. Dyer, J. M. Huthnance, P. S. Liss, J. H. Simpson & P. N. Tett (eds.), *Philos. Trans. T. Soc.*, London, Ser. A. 343, 1994.

Janssen, F., C. Schrum und J. Backhaus, A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea, *Dt. hydrogr. Z.*, Supp. 9, 1999.

Koopmann, G., D. Voppel und N.-P. Rühl, Transport, Umsatz und Variabilität von Schad- und Nährstoffen in der Deutschen Bucht 1990 – 1992 (TUVAS), Abschlussbericht zum BMFT-Vorhaben, *BSH*, 57pp, 1993.

Körner, D. und G. Weichart, Nährstoffe in der Deutschen Bucht: Konzentrationen und Trend 1978 bis 1990, *Dt. hydrogr. Z.*, Erg. H., Reihe A, Nr. 17, 41pp, 1991.

Ladwig, N., K.-J. Hesse und U. Brockmann, Eutrophierungsbewertung für die Deutsche Bucht. 33-50 in: *Aktuelle Probleme der Meeresumwelt*, Vorträge des 11. Symposiums, 231pp, 2001. Herausgegeben vom BSH in Zusammenarbeit mit dem UBA im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hamburg und Rostock, 2002.

Lenhart, N. J. und T. Pohlmann, The ICES-boxes approach in relation to results of a North Sea circulation model. *Tellus*, 49A, 139-160, 1997.

Loewe, P., G. Becker, U. Brockmann, A. Frohse, K. Herklotz, H. Klein, A. Schulz, Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht, *Berichte des BSH*, Nr. 33, 89pp, 2003.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht33/index.jsp

Messprogramm Meeresumwelt, 2005: Zustandsbericht 1999 – 2002 für Nordsee und Ostsee, *BSH*, 296pp, 2005.

www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/BLMP-Messprogramm/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, 2003.

OSPAR, *Report of the 3rd OSPAR workshop on ecotoxicological assessment criteria*, The Hague, 25.-29. November 1996.

OSPAR, Integrated Assessment of Inputs to the OSPAR Convention Area 1990-1996. Outcome of INPUT Special Assessment Workshop, Den Haag 26.-27. März 1998, OSPAR Commission, *Meeting Document ASMO 98/5/9*, 122pp, 1998.

Ott, J., Meereskunde, *UTB für Wissenschaft*, 2. Auflage, 424pp, 1996.

Redfield, A. C., On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. 176-192 in: James Johnstone Memorial Volume, R. J. Daniel (ed.), *University Press*, Liverpool, UK, 348pp, 1934.

Theobald, N., Identifizierung neuer Schadstoffe im Rahmen der Meeresumwelt-Überwachung (Target- und Non-Target-Screening), *Dt. Hydrogr. Z.*, Suppl. 8, 27-37, 1998.

van der Zande, T., *pers. Mitt.*, 2003.

van Pul, W., W. Nijenhuis und F. de Leeuw, Deposition of heavy metals to the Convention waters of OSPAR, *RIVM Report 722401016*, 1998.

Anhang A: Wetterlagenklassifizierung

Das von JENKINSON UND COLLINSON (1977) entwickelte objektive Verfahren zur Klassifizierung der bodennahen atmosphärischen Zirkulation besteht durch Einfachheit und Effizienz. Aus der Luftdruckverteilung im mittleren Meeresniveau (MSLP) werden zwei für die Nordseeregion repräsentative Indizes für Wind und Vorticity (Wirbelstärke) abgeleitet. Empirische Relationen zwischen beiden Größen legen anschließend nicht nur den Zirkulationstyp fest (Zyklonal, Nordwest etc.), sondern erlauben zusätzlich die Identifizierung von Sturmereignissen.

Grundlage der Bestimmung charakteristischer Größen für Wind und Vorticity aus der Luftdruckverteilung ist die gestrophische Approximation der horizontalen Bewegungsgleichungen, die sich durch Abschätzung der Größenordnung der Gleichungsterme (Skalenanalyse) legitimieren lässt.

A.1 Wind

Die geostrophische Approximation reduziert die horizontalen Bewegungsgleichungen auf eine diagnostische Gleichgewichtsbeziehung zwischen Coriolisbeschleunigung und Druckgradient

$$\begin{aligned} -fu &= -2\Omega \sin \varphi u = \rho^{-1} \frac{\partial p}{\partial y} = \rho^{-1} \frac{\partial p}{R \partial \varphi} \approx \rho^{-1} \frac{\Delta_{\varphi} p}{R \Delta \varphi} \\ fv &= 2\Omega \sin \varphi v = \rho^{-1} \frac{\partial p}{\partial x} = \rho^{-1} \frac{\partial p}{R \cos \varphi \partial \lambda} \approx \rho^{-1} \frac{\Delta_{\lambda} p}{R \cos \varphi \Delta \lambda} \end{aligned} \quad \text{Gl. A-1}$$

Hier sind x und y krummlinige Distanzen (Bogenlängen) entlang der Breitenkreise (φ) bzw. Meridiane (λ) im sphärischen Koordinatensystem mit R als radialer Entfernung vom Erdmittelpunkt. Die Achsenorientierung ist E-wärts, N-wärts und aufwärts in Richtung der örtlichen Vertikalen positiv vereinbart, so dass $u > 0$ und $v = 0$ ($u = 0$, $v > 0$) einen reinen Westwind (Südwind) repräsentiert.

Weiter sind ρ und p Luftdichte und Luftdruck im Meeresniveau, Ω ($= 2\pi/24\text{h}$) die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation und f ($\equiv 2\Omega \sin \varphi$) der breitenabhängige Coriolisparameter. Dieser hat den 2-fachen Wert der lokalen Vertikalkomponente des Vektors $\vec{\Omega}$, der parallel zur Erdachse orientiert ist und auf der Nordhalbkugel in die Atmosphäre weist, und kann deshalb als doppelte Winkelgeschwindigkeit der Tangentialebene im Punkt (λ, φ, R) um die örtliche Vertikale infolge der Erdrotation interpretiert werden (planetarische Vorticity). Die Coriolisbeschleunigung führt auf der Nordhalbkugel zu einer Rechtsablenkung des zunächst in Richtung des stärksten Druckgefälles wehenden Windes. Im gestrophischen Gleichgewicht ist die Windrichtung tangential zu den Isobaren (Linien gleichen Drucks) und die Windstärke proportional zum Druckgradienten bzw. Isobarenabstand.

Unter Verwendung der nachfolgend angegebenen Konstanten – der Erdradius wurde so festgelegt, dass eine Bogenminute entlang des Äquators oder eines Meridians der Internationalen Seemeile entspricht –

$$\begin{aligned}
 \rho &= 1.225 \text{ kg/m}^3 \text{ (Standardluftdichte)} \\
 \Omega &= 2\pi/86400 \text{ s} = 0.7272 \times 10^{-4} \text{ (Radiant) s}^{-1} \\
 f(55^\circ\text{N}) &= 1.1914 \times 10^{-4} \text{ (Radiant) s}^{-1} \\
 R &\approx R_e = 6\,366\,707 \text{ m (Erdradius)} \\
 \Delta\lambda &= \Delta\varphi = 10^\circ = 0.17453283 \text{ (Radiant)} \\
 R\Delta\varphi &= 600' \times 1852 \text{ m} = 600 \text{ sm}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. A-2}$$

lassen sich der Proportionalitätsfaktor

$$c_w = \frac{100}{\rho f R \Delta\varphi} = 0.62 \text{ m}^2\text{s/kg} \tag{Gl. A-3}$$

definieren und die äußeren Terme der Gl. A-1 wie folgt umschreiben

$$\begin{aligned}
 u(\text{m s}^{-1}) &= -c_w \Delta\varphi p = 0.62 u^* \\
 v(\text{m s}^{-1}) &= c_w \Delta\lambda p / \cos\varphi = 0.62 v^* .
 \end{aligned}
 \tag{Gl. A-4}$$

Die Bestimmung von Wind (und Vorticity, s. *Abschnitt A.2, S. 187*) setzt also lediglich die Kenntnis der Druckverteilung voraus. Das Auswerteverfahren des Druckfeldes ist eine Kombination diskreter Differenzierung und gewichteter (binomischer) Mittelung von Druckwerten an den aus *Abb. 2-3, S. 28* ersichtlichen 16 Gitterpunkten und liefert für die in hPa anzugebenden Geschwindigkeitsindizes

$$\begin{aligned}
 u^* (\text{hPa}) &= -\{p(\lambda_0, \varphi_0 + \Delta\varphi/2) - p(\lambda_0, \varphi_0 - \Delta\varphi/2)\} \\
 &= \frac{1}{2}(p_{12} + p_{13}) - \frac{1}{2}(p_4 + p_5)
 \end{aligned}
 \tag{Gl. A-5}$$

$$\begin{aligned}
 v^* (\text{hPa}) &= \frac{1}{\cos\varphi_0} \{p(\lambda_0 + \Delta\lambda/2, \varphi_0) - p(\lambda_0 - \Delta\lambda/2, \varphi_0)\} \\
 &= \frac{1}{\cos 55^\circ} \left\{ \frac{1}{4}(p_5 + 2p_9 + p_{13}) - \frac{1}{4}(p_4 + 2p_8 + p_{12}) \right\} .
 \end{aligned}
 \tag{Gl. A-6}$$

Die Ergebnisse gelten formal für den Zentralpunkt $(\lambda_0, \varphi_0) = (5^\circ\text{E}, 55^\circ\text{N})$, sind jedoch repräsentativ für das Gebiet zwischen $0^\circ - 10^\circ\text{E}$ und $50^\circ - 60^\circ\text{N}$.

Der Betrag des resultierenden Vektorwindes ergibt sich aus

$$V^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} . \tag{Gl. A-7}$$

Bei der Berechnung der meteorologischen Windrichtung sind die Definition der Windrichtung als Herkunftsrichtung, der Unterschied zwischen mathematischer und Kom-

passrichtung sowie die Mehrdeutigkeit der Arcustangens-Funktion zu beachten. Die Windrichtung Θ ergibt sich mit

$$\vartheta = \frac{180^\circ}{\pi} \operatorname{atan}(v^*/u^*) \quad \text{Gl. A-8}$$

in Abhängigkeit von der Vorzeichenkombination der Windgeschwindigkeitskomponenten bzw. vom mathematischen Quadranten gemäß

Quadrant	u^*	v^*	Θ
I	+	+	$270^\circ - \vartheta$
II	–	+	$90^\circ - \vartheta$
III	–	–	$90^\circ - \vartheta$
IV	+	–	$270^\circ - \vartheta$.

Gl. A-9

A.2 Vorticity

Die relative Vorticity ist als Vertikalkomponente der Rotation des Geschwindigkeitsfeldes definiert und unter geostrophischen Bedingungen proportional zur Divergenz des Druckgradienten

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{1}{\rho f} \left\{ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right\}, \quad \text{Gl. A-10}$$

wenn die Ableitung des Coriolisparameters f unterdrückt wird; dies lässt sich durch Substitution von Gl. A-1 leicht zeigen. Wie früher stehen dx und dy für die sphärischen Inkremente $R \cos \varphi d\lambda$ bzw. $R d\varphi$. Wegen $\Delta\lambda = \Delta\varphi$ ist analog zu Gl. A-3 die Einführung des Proportionalitätsfaktors

$$c_\zeta = \frac{c_w}{R \Delta\varphi} = 0.55 \times 10^{-6} \text{ ms/kg} \quad \text{Gl. A-11}$$

sinnvoll, mit dem die Geschwindigkeitsscherungen in Gl. A-10 die diskrete Form

$$\zeta(s^{-1}) = c_\zeta \left\{ \frac{\Delta_\lambda v^*}{2 \cos \varphi} - \Delta_\varphi k_f u^* \right\} = c_\zeta \{ \zeta_v^* + \zeta_u^* \} = 0.55 \times 10^{-6} \zeta^* \quad \text{Gl. A-12}$$

annehmen.

Zur Bestimmung des westlichen

$$\zeta^*_u = - \left\{ \frac{\sin \varphi_0}{\sin(\varphi_0 + \Delta\varphi/2)} u^*(\lambda_0, \varphi_0 + \Delta\varphi/2) - \frac{\sin \varphi_0}{\sin(\varphi_0 - \Delta\varphi/2)} u^*(\lambda_0, \varphi_0 - \Delta\varphi/2) \right\} \quad \text{Gl. A-13}$$

$$= \frac{\sin 55^\circ}{\sin 50^\circ} \left\{ \frac{1}{2} [(p_{15} + p_{16}) - (p_8 + p_9)] \right\} - \frac{\sin 55^\circ}{\sin 60^\circ} \left\{ \frac{1}{2} [(p_8 + p_9) - (p_1 + p_2)] \right\}$$

und südlichen Scherungsvorticity-Index

$$\zeta^*_v = \frac{1}{2 \cos \varphi_0} \{ v^*(\lambda_0 + \Delta\lambda, \varphi_0) - v^*(\lambda_0 - \Delta\lambda, \varphi_0) \}$$

$$= \frac{1}{2 \cos^2 55^\circ} \left\{ \frac{1}{4} [(p_6 + 2p_{10} + p_{14}) - (p_5 + 2p_9 + p_{13})] \right. \quad \text{Gl. A-14}$$

$$\left. - \frac{1}{4} [(p_4 + 2p_8 + p_{12}) - (p_3 + 2p_7 + p_{11})] \right\}$$

sind dann lediglich Linearkombinationen des Luftdrucks (in hPa) auszuwerten. Der Faktor k_f in Gl. A-12 symbolisiert die Sinus-Quotienten in Gl. A-13 zur Korrektur des in c_ζ enthaltenen Coriolisparameters $f(\varphi_0)$ auf die Breiten $\varphi_0 \pm \Delta\varphi/2$. Der Faktor 0.5 in Gl. A-12 und Gl. A-14 resultiert aus dem Umstand, dass $\Delta_\lambda v^*$ über eine Distanz von $2\Delta\lambda$ berechnet wird.

A.3 Klassifizierungskriterien

Die Wetterlagenklassifizierung beruht auf empirischen Relationen zwischen Wind-Index V^* (Gl. A-7) und Vorticity-Index $\zeta^* = \zeta^*_u + \zeta^*_v$ (Gl. A-13 und Gl. A-14):

CONDITION	FLOW	TYPE	Gl. A-15
$ \zeta^* < V^*$	directional	e.g. W	
$ \zeta^* > 2V^*$	rotational	C (if $\zeta^* > 0$) A (if $\zeta^* < 0$)	
$V^* \leq \zeta^* \leq 2V^*$	hybrid	e.g. CW	
$V^* \leq 6 \text{ hPa} \geq \zeta^* $	diffuse	UNC	

Bei Beschränkung auf die Hauptrichtungen eines 8-Punkte Kompasses sind nach diesen Kriterien insgesamt 27 Wetterlagentypen möglich. Neben den 8 durch eine vorherrschende Windrichtung ausgezeichneten Richtungstypen und den beiden zyklonalen (C) bzw. antizyklonalen (A) Wirbeltypen, sind 2×8 hybride Wetterlagen unterscheidbar, die Anteile dieser reinen Strömungsformen vereinigen. Darüber hinaus gibt es nicht klassifizierbare Wetterlagen (UNC), die durch sehr schwache Luft-

druckgegensätze gekennzeichnet sind. Abgesehen vom Typ UNC ist die Klassifizierung unabhängig von den »Absolutwerten« der Indizes.

Zusätzlich zur Charakterisierung der Wetterlage lassen sich Sturmereignisse aufgrund von

G* (hPa)	CONDITION	SEVERITY	TYPE
30	<	gale	G
40	< $\sqrt{V^{*2} + \zeta^{*2}/4}$	severe gale	SG
50	<	very severe gale	VSG

Gl. A-16

identifizieren und bewerten. Das Sturmkriterium beruht auf einer Ellipse, deren Halbachsen über den Sturmindex $G^* = a/2 = b$ definiert sind; dabei ist die große Halbachse offensichtlich mit dem Vorticity-Index assoziiert (s. Abb. 2-4, S. 29).

Beispiel: Wetterlage am 21. Dezember 2003 (s. Abb. 2-3, S. 28).

$V^* = 10.6$ hPa (6.6 m/s), $\Theta = 307.5^\circ$ (NW) und $\zeta^* = 109.3$ hPa (was 5.2 Radiant bzw. $298^\circ/\text{Tag}$ oder ca. $f/2$ entspricht). Nach Gl. A-15 ergibt sich der Typ C. Die Auswertung des Wurzelausdrucks in Gl. A-16 liefert $G^* = 55.7$ hPa und demnach einen Orkan (VSG).

A.4 Referenzen

Jenkinson, A. und F. Collison, An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, No. 62, 18pp, UK Met Office, Bracknell, 1977.

Anhang B: Windstatistik

Elliptische Windverteilungen sind u. a. typisch für Grenzgebiete zwischen kontinentalen und maritimen Regimes (CRUTCHER 1956). Der statistischen Beschreibung der Windvariabilität im Nordseegebiet (vgl. *Abschnitt 2.3, S. 35*) liegt deshalb eine bivariate Normalverteilung zugrunde. Diese ist durch Mittelwerte, Standardabweichungen und Korrelation der zonalen und meridionalen Windkomponenten bestimmt. Linien gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte sind konzentrische Ellipsen, deren Achsenorientierung bei Korrelation $\rho \neq 0$ von den Koordinatenachsen der Windkomponenten abweicht. Mittels Hauptachsentransformation ist der Übergang zu unabhängigen Windkomponenten möglich (*Abschnitt B.2, S. 192*). In *Abschnitt B.3, S. 193* wird schließlich die bivariate Wahrscheinlichkeitsdichte über elliptische Gebiete integriert. Aus der Lösung folgen für vorgegebene kumulative Wahrscheinlichkeiten Skalierungsfaktoren zur Konstruktion der zugehörigen Windwahrscheinlichkeitsellipsen (vgl. *Abb. 2-7, S. 37*).

B.1 Bivariate Normalverteilung

Ein Zufallsvektor (U, V) heißt (bivariat) normalverteilt, wenn er die Wahrscheinlichkeitsdichte

$$f(u, v) = A e^{-z(u, v)} \quad \text{Gl. B-1}$$

besitzt, in der die Normierungskonstante

$$A = \frac{1}{2\pi\sigma_U\sigma_V\sqrt{1-\rho^2}} \quad \text{Gl. B-2}$$

aus der Bedingung $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(u, v) du dv = 1$ folgt und

$$z(u, v) = \frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \frac{(u-\mu_U)^2}{\sigma_U^2} - 2\rho \frac{(u-\mu_U)(v-\mu_V)}{\sigma_U\sigma_V} + \frac{(v-\mu_V)^2}{\sigma_V^2} \right\}. \quad \text{Gl. B-3}$$

Die gemeinsame Dichte $f(u, v)$ der Zufallsvariablen U und V kann man sich als 3-dimensionales Histogramm oder als Höhenverteilung eines »gestauchten glockenförmigen Berges« denken, dessen Orographie durch 5 Parameter vollständig festgelegt ist: Die Mittelwerte μ_U und μ_V , die zugehörigen Standardabweichungen σ_U und σ_V sowie den (linearen) Korrelationskoeffizienten ρ zwischen U und V . Der Gipfel mit Höhe A liegt bei $(u = \mu_U, v = \mu_V)$; die Linien gleicher Höhe bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte sind konzentrische Ellipsen in der (u, v) -Ebene, denn $f(u, v) = \text{const}$ erfordert $z(u, v) = \text{const}$. Bei Unabhängigkeit von U und V sind beide Variablen unkorreliert, d.h. $\rho = 0$ und die Dichte vereinfacht sich zu

$$f(u, v) = f(u) \cdot f(v) = \frac{1}{2\pi\sigma_U\sigma_V} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{u-\mu_U}{\sigma_U} \right)^2 + \left(\frac{v-\mu_V}{\sigma_V} \right)^2 \right\}}. \quad \text{Gl. B-4}$$

Nur in diesem Sonderfall liegen die Hauptachsen der Ellipsen parallel zu den Koordinatenachsen oder fallen mit diesen zusammen, wenn (μ_U, μ_V) als Ursprung gewählt wird.

B.2 Hauptachsentransformation

Im Fall $\rho \neq 0$ lassen sich jedoch die abhängigen Zufallsvariablen U und V durch die Koordinatentransformation

$$\begin{aligned} u^* &= (u - \mu_U) \cos \theta + (v - \mu_V) \sin \theta \\ v^* &= (v - \mu_V) \cos \theta - (u - \mu_U) \sin \theta \end{aligned} \quad \text{Gl. B-5}$$

in unabhängige Zufallsvariablen U^* und V^* überführen (e. g. ESSENWANGER 1986), deren gemeinsame Dichte $f(u^*, v^*)$ formal der Hauptachsenform von Gl. B-4 entspricht (s.u.). Diese Transformation beinhaltet eine Verschiebung des Ursprungs nach (μ_U, μ_V) mit anschließender Drehung der Koordinatenachsen in die Hauptachsenlage der Ellipsen.

Der korrekte Drehwinkel zwischen dem transformierten und dem ursprünglichen Koordinatensystem ergibt sich aus

$$\tan 2\theta = \frac{2\rho\sigma_U\sigma_V}{\sigma_U^2 - \sigma_V^2} \quad \text{Gl. B-6}$$

unter Beachtung des Vorzeichens des Korrelationskoeffizienten und der Relation zwischen den Varianzen

ρ	$\sigma_U^2 - \sigma_V^2$	θ	
+	+	$0 - 45^\circ$	Gl. B-7
+	-	$45 - 90^\circ$	
-	-	$90 - 135^\circ$	
-	+	$135 - 180^\circ$	

Für die Mittelwerte der transformierten Variablen gilt aufgrund der Translation des Ursprungs (vgl. Gl. B-5) $\mu_{U^*} = \mu_{V^*} = 0$, während sich die zugehörigen Standardabweichungen als Wurzeln aus

$$\sigma_{U^*}^2 = \frac{\sigma_U^2 \cos^2 \theta - \sigma_V^2 \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta} \quad \text{Gl. B-8}$$

und

$$\sigma_{V^*}^2 = \frac{\sigma_V^2 \cos^2 \theta - \sigma_U^2 \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta - \sin^2 \theta} \quad \text{Gl. B-9}$$

berechnen lassen. Für die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte des Zufallsvektors (U^*, V^*) ergibt sich schließlich

$$f(u^*, v^*) = f(u^*) \cdot f(v^*) = \frac{1}{2\pi\sigma_{U^*}\sigma_{V^*}} \exp \left\{ -\frac{1}{2}(u^{*2}/\sigma_{U^*}^2 + v^{*2}/\sigma_{V^*}^2) \right\}. \quad \text{Gl. B-10}$$

B.3 Wahrscheinlichkeitsellipsen

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Realisierung (u^*, v^*) in die elliptische Region E^* fällt, ergibt sich als Volumen unter der bivariaten Dichte (Gl. B-10) innerhalb E^* . Aufgrund der elliptischen Geometrie empfiehlt sich für die Berechnung des Doppelintegrals der Übergang von kartesischen zu Polarkoordinaten mittels der Variablentransformation

$$u^* = aR \cos \phi \quad \text{und} \quad v^* = bR \sin \phi, \quad \text{Gl. B-11}$$

bei der a und b die Halbachsen einer Ellipse bezeichnen. Die Transformationsgleichungen bilden Ereignisse (u^*, v^*) in der Region E^* auf Ereignisse (R, ϕ) in der Region E ab. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der Ereignisse bleibt erhalten, so dass

$$P_E = \iint_{E^*} f(u^*, v^*) du^* dv^* = \iint_E f(R, \phi) J\left(\frac{u^*, v^*}{R, \phi}\right) dR d\phi \quad \text{Gl. B-12}$$

worin

$$J\left(\frac{u^*, v^*}{R, \phi}\right) = \begin{vmatrix} \frac{\partial u^*}{\partial R} & \frac{\partial u^*}{\partial \phi} \\ \frac{\partial v^*}{\partial R} & \frac{\partial v^*}{\partial \phi} \end{vmatrix} = abR(\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = abR \quad \text{Gl. B-13}$$

die Jakobi-Determinante bedeutet (e. g. BURRINGTON UND MAY 1970). Mithilfe des positiven Skalierungsparameters

$$c = a/\sigma_{U^*} = b/\sigma_{V^*} \quad \text{Gl. B-14}$$

lässt sich Gl. B-12 unter Verwendung von Gl. B-10 auf die folgende Form bringen

$$P_E = c^2 \sigma_{U^*} \sigma_{V^*} \iint_E f(R, \phi) R dR d\phi = \frac{c^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 e^{-\frac{1}{2}c^2 R^2} d(R^2/2) d\phi. \quad \text{Gl. B-15}$$

Mit der Substitution $x = 0.5 R^2$ (die obere Grenze reduziert sich dabei von 1 auf 0.5) ergibt sich schließlich als Lösung

$$P_E = 1 - e^{-0.5c^2}, \quad \text{Gl. B-16}$$

die sich wie folgt umformen lässt

$$c = \left[2 \ln \frac{1}{1 - P_E} \right]^{1/2}. \quad \text{Gl. B-17}$$

Für vorgegebene Wahrscheinlichkeiten liefert diese Beziehung den Skalierungsfaktor für die Standardabweichungen ($\sigma_{U^*}, \sigma_{V^*}$) und somit die Längen der Halbachsen der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsellipsen (vgl. Gl. B-11). Für die 50%-Ellipsen ergibt sich $c = 1.1774$. Inwieweit diese theoretischen Prozentsätze tatsächlich erreicht werden, lässt sich prüfen, indem man diejenigen Realisierungen (u^*, v^*) eines Datensatzes zählt, welche die Bedingung

$$\frac{u^{*2}}{\sigma_{U^*}^2} + \frac{v^{*2}}{\sigma_{V^*}^2} < c^2 \quad \text{Gl. B-18}$$

erfüllen, und zur Gesamtzahl aller Realisierung ins Verhältnis setzt. Vor der Anwendung von Gl. B-18 sind die Rohdaten mittels Gl. B-5 zu transformieren. Alternativ kann man prüfen, ob die rechte Seite in Gl. B-3 die Bedingung $z(u,v) < c^2$ erfüllt. Der dazu erforderliche Korrelationskoeffizient ist durch

$$\rho = \frac{\mu_{UV} - \mu_U \mu_V}{\sigma_U \sigma_V} \quad \text{Gl. B-19}$$

gegeben.

B.4 Referenzen

Burrington, R. S. und D. C. May, Handbook of probability and statistics, *McGraw-Hill*, 462pp, 1970.

Crutcher, H. L., On the standard vector-deviation wind rose, *J. Met.*, 14, 28-33, 1957.

Essenwanger, O. M., Elements of statistical analysis, World Survey of Climatology, Vol. 1B, *Elsevier*, 424pp, 1986.

Anhang C: Mishmash Climate

The regime character of North Sea SST is placed in the context of atmospheric circulation changes.

The temperature climate of the North Sea is characterized by long-lived quasi-stable cold and warm regimes that are separated through sudden shifts. Evidence is produced that SST regimes are manifestations of intra-annual monsoon-like shifts in the wind climate, while spontaneous reversals in SST regimes are accompanied by a semi-annual phase shift in seasonal wind characteristics. Specifically, the latest cold regime (1978 – 1987) was sustained by a wind regime that alternated between continental in winter and maritime in summer. By contrast, the recent warm regime is maintained by maritime winds in winter that give way to continental winds in summer.

For lack of a better suited term for these bi-stable and hybrid climatic conditions in the North Sea region we call it »mishmash« climate. A sketch of the annual temperature swing in such climates is presented in *Fig. 3-17, p. 71*.

C.1 Bi-stable SST Regimes

A stunningly long run of positive SST anomalies has continued since June 2001. This gave rise to a close inspection of the time series of monthly North Sea SST that was derived from BSH's weekly SST analyses (www.bsh.de/en/index.jsp, menu: marine data – observations – sea surface temperatures). Serial monthly SST anomalies are displayed in *Fig. 3-18, p. 72* as departures from the 1971 – 1993 base period means for 2 consecutive 16-year periods.

Perhaps the most important and just as striking feature is the regime character of SST anomalies, i. e. the persistence of positive and likewise negative departures from normal for extensive periods of time. The current warm regime shown in the upper frame of *Fig. 3-18, p. 72* was preceded by a cold regime of comparable length which again replaced a moderately warm regime in the mid 1970s.

Under the sensible constraint of 3 regimes during the period of observation, their respective lengths in time may be determined by maximizing $\sum |A(R_i)|$, where $A(R_i)$ denotes the mean anomaly of regime i . This procedure yields

$$\max \sum_i |A(R_i)| = 0.24 + 0.36 + 0.51 = 1.11 \text{ K}$$

and December 1976 through August 1987 for the duration of the cold regime.

Instantaneous termination and onset of adjacent regimes do not appear as unbearable idealizations in comparison to actual short term regime shifts. In any event, there is nothing that could be called a gradual or even linear evolution in SST (or SST anomalies). Instead, what is observed are irregular fluctuations about discernible quasi-stable states or levels – viz. $A(R_1)$, $A(R_2)$, and $A(R_3)$ – and spontaneous jumps and drops from one level of excitation to another.

As was verified from the SST record of Helgoland Roads, the alternation of cold and warm regimes extends through at least the past 130 years. The current warm regime turns out as the most intense and longest warm period since the 1870s (LOEWE ET AL.

2003). The years 2002 and 2003, so far, are the warmest and 2nd warmest, respectively, on the North Sea record dating to 1968.

C.2 Hybrid Wind Climate

The distinguished geographic situation of the North Sea on the continental shelf of northwest Europe - and thus on the border of the vast Atlantic ocean and the earth's greatest landmass - makes it a region of competition for all major air masses that took on the surface characteristics of their maritime or continental source regions. As to temperature these characteristics result from the exceedingly large heat capacity of water as compared to rock and soil. Hence maritime climates are characterized by mild winters, cool summers and a flat seasonal temperature cycle, whereas continental climates experience cold winters, hot summers and an enhanced annual temperature range (*Fig. 3-17, p. 71*).

If WLADIMIR KÖPPEN had cared to classify ocean climates, the North Sea had probably been assigned type 'Cfb' standing for a moderately warm (maritime), permanently wet climate. This type would reflect the fact that the redistribution of heat in temperate latitudes is generally brought about by east-travelling waves and eddies such that winds from northwesterly to southwesterly directions predominate. Even so, one should not lose sight of the fact that atmospheric circulation in mid-latitudes is very changeable on all time scales such that large departures from mean wind conditions (and otherwise) are nothing particular.

It is a widely supported idea that the primary cause of climatic fluctuations are changes in the frequency of atmospheric circulation patterns. To gain further insight into the bi-stability phenomenon of North Sea SST dynamics a circulation typing scheme originally devised by JENKINSON AND COLLINSON (1977) is currently being employed to analyze a North Sea subset of UK MET OFFICE northern hemisphere daily mean sea level pressure fields. The data set was kindly placed at our disposal through the BRITISH ATMOSPHERIC DATA CENTRE (badc.nerc.ac.uk/data/mslp).

An intermediate step in the typing scheme is the calculation of a single geostrophic wind vector representative of the entire North Sea domain on a particular day. As wind is the motor of air mass advection it appeared natural for a first step to analyze seasonal wind distributions as to differences during the cold and warm SST regime. Results of this preliminary analysis are presented in *Fig. 3-19, p. 75*.

For obvious geographical reasons winds from northeasterly to southerly directions (i. e. NE – S or 22.5° – 202.5°) are qualified »continental«, while those from the complementary hemisphere are termed »maritime«. Since all modes of the set of 4 wind distributions are located in the maritime wind sector, the overall generalized wind climate indeed is maritime ('Cfb'). However, intensity and position of these modes in the velocity/direction plane exhibit substantial differences, not only among different seasons of the same SST regime, but also among the same seasons of different regimes. If, on the other hand, one had to choose 2 pairs from the set that best resemble one another, one would »espouse« the winter (summer) distribution of the warm regime and the summer (winter) distribution of the cold regime (to obtain »pedigree maritime (continental) offspring«). The maritime couple is characterized by intense modes about W and reduced densities about E. Conversely, attributes of the continental couple are E-shifted weaker modes and increased densities about E. Instead of selecting

by the *birds of a feather flock together* rule, however, nature couples maritime and continental wind characteristics according to the complementary principle *opposites attract* which results in a hybrid wind climate.

While within-regime differences among the seasonal distributions are significant beyond doubt, the cross-regime differences for the winter and summer distributions (Fig. 3-19, p. 75, bottom) were felt to deserve statistical confirmation. To this end, a 2-dimensional Kolmogorov-Smirnov test (PRESS ET AL. 1992) was performed on the unbinned seasonal sample distributions. The K-S test statistic D is the maximum difference in the fraction of data within 1 of 4 natural quadrants around the maximizing data point in the velocity/direction plane which is found by ranging over both all data points and associated quadrants. For the 2 winter distributions D attains a maximum of 19 % in the quadrant northeast of approx. (8 hPa, 200°). Similarly, for the summer samples, $D = 17$ % again in the quadrant NE of about (5 hPa, 190°). Both, the wintry and the summery distributions turn out to be significantly different at p-levels next to certainty, viz. $< 5 \times 10^{-8}$ % and $< 7 \times 10^{-6}$ %, respectively. The D -values are in good agreement with cumulative differences within the ± 0.5 % contours of Fig. 3-19, p. 75 (bottom) which amount to ± 18 % for winter (JFM) and ± 15 % for summer (JAS). As an aside, the complementary difference patterns of Fig. 3-19, p. 75 imply that annual wind statistics would not have produced any cross-regime differences to speak of due to mutual cancellation over the annual cycle.

A quantitative summary of Fig. 3-19, p. 75 is supported by Table 3-9, p. 76. Notably different decadal SST regimes ($-A(R_2) + A(R_3) \approx 1$ K) are sustained by hybrid couples of wind distributions. The cold regime is consistent with an intra-annual shift from continental winds in winter (cold) to maritime winds in summer (cold). A regime shift in SST is accompanied by a consistent reversal of the seasonal wind climate.

The most recent cold to warm shift in the late 1980s went along in winter with a 61 % increase in strong maritime winds on the expense of a 40 % decrease in moderate continental winds ($\text{»ConWin«} \Rightarrow \text{»MarWin«}$). Conversely, strong maritime winds dropped by 26 % in summer due to an overall increase of continental winds by 59 % ($\text{»MarSum«} \Rightarrow \text{»ConSum«}$). While changes in direction and velocity were about balanced in winter, directional changes clearly surpassed velocity changes in summer.

C.3 Concluding Remarks

The bi-stability of SST regimes casts doubt on the usefulness of standard CliNo climatologies in climatic mishmash regions such as the North Sea where the implicit assumption of climatic stationarity is violated. As a consequence, the *»significant-departure-from-normal alert«* is on next to constantly (cf. Fig. 3-18, p. 72) because the alarm device is not *»aware«* of a significant change in normality. A solution might consist in judging the significance of anomalies from mixed probability density functions that account for the bi-stability phenomenon.

The findings as to hybrid and reversed wind distributions during different SST regimes were obtained for the cold period 1978 – 1987 and the recent warm episode. The robustness of these results should be examined e. g. by way of extending the analysis to the long SST time series of Helgoland Roads.

Finally, it would appear useful to explore how the changeable wind characteristics across the North Sea associate with large scale (anomalous) features of the general

atmospheric circulation. While the wintry wind characteristics correlate with preferences of the North Atlantic Oscillation for its negative mode during the cold SST regime, and, conversely, for its positive mode during the current warm regime (LOEWE ET AL. 2003), the NAO cannot probably be held responsible for the alternation in the summery wind climates, even though the Azores high is expected to be a key player.

C.4 References

Jenkinson, A. and F. Collison, An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, No. 62, 18pp, UK Met Office, Bracknell, 1977.

Loewe, P., G. Becker, U. Brockmann, A. Frohse, K. Herklotz, H. Klein, A. Schulz, Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht, *Berichte des BSH*, Nr. 33, 89pp, 2003.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht33/index.jsp

Press, W., S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, Numerical Recipes in Fortran, 2nd Ed., 963pp, *Cambridge University Press*, 1992.

Abbildungsverzeichnis

Atmosphärenphysik

- Abb. 2-1: NAO-Index 2003. 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/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatmon). cpccdb: Amplitude des NAO-Musters aus rotierter Hauptkomponentenanalyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).25
- Abb. 2-2: 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 12 gelben bzw. blauen Kreise (1, 2, ..., 8, 9, O, N, D) zeigt die Entwicklung der rohen (gelb) bzw. über 6 Monate tiefpassgefilterten (blau) monatlichen dynamischen NAO-Zustände im Jahr 2003.26
- Abb. 2-3: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 21. Dez. 2003 (Orkantief »Jan«) mit Gitternetz (1 – 16) für Wetterlagenklassifizierung (s. Anhang A, S. 185).28
- Abb. 2-4: Relative Häufigkeitsverteilung der täglichen Zirkulationszustände im Zeitraum 1971 – 2000 mit Klassifizierungskriterien (s. Anhang A.3, S. 188).29
- Abb. 2-5: Luftströmung um Hoch (A) und Tief (C).30
- Abb. 2-6: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung; JFM = Januar, Februar, März etc.35
- Abb. 2-7: Saisonale 50%-Wahrscheinlichkeitsellipsen des »Nordseewindes« (1=Winter=JFM, 2=Frühling, etc.).37
- Abb. 2-8: Kumulierte tägliche Vektoren des »Nordseewindes«. Zeitmarken bezeichnen die Monatsanfänge. Die Distanz zwischen 2 beliebigen Zeitmarken dividiert durch das Zeitintervall in Tagen liefert den mittleren Vektorwind (z. B. ca. 6.5 m/s im Januar 2003).38
- Abb. 2-9: Jahresgang 2003 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}40
- Abb. 2-10: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney für 2002 und 2003 mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 zwischenjährige Standardabweichungen). ...41

Physikalische Ozeanographie

- Abb. 3-1: Saisonale Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2003 (JFM = Januar-Februar-März, AMJ ...). Vektormittel aus Strömungsfeldern des »BSHcmod«. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.47
- Abb. 3-2: Wassertransport durch die Straße von Dover in 2003 (BSHcmod); $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. .48
- Abb. 3-3: Wassertransport durch das Kattegat in 2003 (BSHcmod); $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$49
- Abb. 3-4: Schematik der Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht.50
- Abb. 3-5: Häufigkeit und Andauer der drei wichtigsten Zirkulationstypen.52
- Abb. 3-6: Saisonale Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2002 und 2003.52

Abb. 3-7: Saisonale geographische Verteilungen von Windsee und Dünung im Jahr 2003; JFM = Januar, Februar, März etc.....	55
Abb. 3-8: Wie Abb. 3-7, jedoch für das Jahr 2002.....	56
Abb. 3-9: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für beobachtete Windgeschwindigkeit und -richtung am »UFS DB« im Jahr 2003.....	59
Abb. 3-10: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für Wellenhöhe und -richtung an der Position »UFS DB« im Jahr 2003 (WAM-Modell, DWD). Die Horizontalachsen (k) sind \log_2 -skaliert.	60
Abb. 3-11: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für Wellenhöhe und -richtung an der Position »Entenschnabel« im Jahr 2003 (WAM-Modell, DWD). Die Horizontalachsen (k) sind \log_2 -skaliert.....	63
Abb. 3-12: Hochwasserstände bei Cuxhaven im Jahr 2003 (bezogen auf NN) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band sowie intramonatlichen 90%-Grenzen.	66
Abb. 3-13: Hochwasserstände bei Cuxhaven und NW-Komponente des »Nordseewinds« (2003).	66
Abb. 3-14: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2003 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K. ...	69
Abb. 3-15: Jahresgang der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen im Jahr 2003 mit Ensemble der Jahresgänge seit 1968 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971 – 1993) und zwischenjährigen Standardabweichungen (Kreisradius).	70
Abb. 3-16: Jahresgang 2003 der monatlich gemittelten Oberflächentemperatur bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).	70
Abb. 3-17: Schematik des jährlichen Temperaturgangs (Mittel und saisonale Extrema) für kontinentales und maritimes Klima (CON & MAR) sowie kühles und warmes Mischmasch-Klima (MMC / Kaltregime & MMW / Warmregime).....	71
Abb. 3-18: Serielle monatliche Anomalien der Nordseetemperatur für zwei 16-jährige Zeitabschnitte. Kreise indizieren statistisch signifikante Anomalien ($\pm 1.96 s$). Die Kurve gibt den über zwei Jahre geglätteten Verlauf wieder. Regimelängen und -grenzen sind durch eine Step-Funktion bestimmt (vgl. Text).	72
Abb. 3-19: Saisonale relative Häufigkeitsverteilungen des geostrophischen Windes über der Nordsee für das SST-Warmregime (1991 – 2000, oben) und das SST-Kaltregime (1978 – 1987, mitte); links Winterverteilungen (JFM = Januar – März), rechts Sommerverteilungen (JAS = Juli – September), unten Regimedifferenzen. Die 0.5 % Konturlinie (gestrichelt) umhüllt 98 % aller Windzustände (900 für JFM, 920 für JAS). Die kumulativen Differenzen innerhalb der ± 0.5 % Enveloppen (unten) erreichen ± 18 % für JFM and ± 15 % für JAS. Die Geschwindigkeit ist in hPa pro 10° Breite bei 55° N angegeben, wobei eine Einheit 1.2 Kt oder 0.62 m/s entspricht.....	74
Abb. 3-20: Temperaturschichtung ($^\circ\text{C}$) im Sommer 2003 (FS Gauss, Reise #405).	78
Abb. 3-21: Temperaturschichtung ($^\circ\text{C}$) im Jahr 2003 an den MARNET-Stationen »Deutsche Bucht«, »Ems« und »NSB II«. Sensortiefen: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.	79
Abb. 3-22: Geographische Verteilung des Wärmeinhalts pro Volumeneinheit im August 2003 und Juli 2002.....	81
Abb. 3-23: Wärmeinhalt pro Einheitswassersäule entlang 58° N im August 2003, Modell- versus Beobachtungsdaten.	82
Abb. 3-24: Saisonale Entwicklung des Wärmeinhalts der Nordsee in 2002 und 2003 (Modelldaten) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). Obs = Gauss #385 (Jul 2002), Gauss #405 (Aug 2003).....	83

Abb. 3-25: Monatsmittel des Wärmeinhalts ($\times 10^{21}$ J) der Nordsee mit Anomalien und Perzentilen (%) und NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). Tiefpassfilterbreite 6 Monate. Farbstufen für Perzentile: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %.	84
Abb. 3-26: Wärmeinhalt versus Oberflächentemperatur der Nordsee (Jahresmittel).	85
Abb. 3-27: Wärmeinhalt der Nordsee (Jahresmittel) versus Winter NAO-Index (Dez-Jan-Feb, LOEWE UND KOSLOWSKI 1998).	85
Abb. 3-28: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2003.	88
Abb. 3-29: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2003 (FS Gauss, Reise #405).	90
Abb. 3-30: Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe in Jahr 2003 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. (Quelle: WSA-Lauenburg).	91
Abb. 3-31: Jahresgang 2003 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).	92
Abb. 3-32: Eis-Klimastationen (blau) an der deutschen Nordseeküste.	93
Abb. 3-33: Flächenbezogene Eisvolumensumme für die deutsche Nordseeküste im Zeitraum 1897 – 2003.	94
Abb. 3-34: Akkumuliertes flächenbezogenes Eisvolumen mit Pentadenmitteln der Lufttemperatur von Norderney im Winter 2002/3.	95
Abb. 3-35: Bedeckungsgrad und Dicke des Eises an den Eis-Klimastationen der deutschen Nordseeküste im Winter 2002/3.	96

Meereschemie

Abb. 4-1: Phosphat, Silikat, Nitrat & Nitrit und Ammonium Verteilungen ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächenwasser im Winter 2003; log ₂ -Farbskala beachten (außer für PO ₄).	105
Abb. 4-2: Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit in der Deutschen Bucht im Januar 2003.	106
Abb. 4-3: Klimatologische Salzgehaltsverteilung (1900 – 1996) in der Deutschen Bucht (nach JANSSEN ET AL. 1999).	108
Abb. 4-4: Zeitserien der geschätzten winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (Salzgehalt 30) mit Standardschätzfehlerbalken (95 %) und Referenzwerten von 1936, soweit verfügbar.	109
Abb. 4-5: Phosphatkonzentrationen ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003 (oben, log ₂ -Farbskala beachten) mit Abweichungen von langjährigen Mittelwerten (1980 – 2001).	110
Abb. 4-6: Nitrat & Nitrit ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003; log ₂ -Farbskala beachten.	112
Abb. 4-7: Ammoniumkonzentrationen ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003 (oben, log ₂ -Farbskala beachten) mit Abweichungen von langjährigen Mittelwerten (1980 – 2001).	113
Abb. 4-8: Vertikalverteilungen von Phosphat, Silikat, Nitrat & Nitrit, Ammonium ($\mu\text{mol/L}$) und Chlorophyll ($\mu\text{g/L}$) entlang 56° N im Sommer 2003 (FS Gauss, Reise #405).	114
Abb. 4-9: Sichttiefe und Tiefe (m) der maximalen Chlorophyllkonzentration im Sommer 2003.	115
Abb. 4-10: Wassertrübung (NTU) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003; log ₂ -Farbskala beachten.	115

Abb. 4-11: Sauerstoffsättigung (%) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2003.....	116
Abb. 4-12: Jahresgänge der Nährstoffkonzentrationen ($\mu\text{mol/L}$) bei Helgoland Reede mit Klimatologie.....	118
Abb. 4-13: Nährstoffkonzentrationen bei Helgoland Reede während des Salzgehaltseinbruchs im April 2003.....	119
Abb. 4-14: Algenentwicklung bei Helgoland Reede im April 2003.	119
Abb. 4-15: Stationsnetz zur Schadstoffüberwachung im Meerwasser der Deutschen Bucht.	122
Abb. 4-16: Geographische Konzentrationsverteilungen (ng/L) von α -, β - und γ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai 2003.	124
Abb. 4-17: Konzentrationen der HCH-Isomeren relativ zu Stade (100 %) entlang des Salzgehaltsgradienten der Elbfahne. Salzgehalt als Frischwasseranteil (%); \log_{10} -Skala beachten. .	125
Abb. 4-18: Geographische Konzentrationsverteilungen für α - und γ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Juli / August 2003. Werte unterhalb der Säulen geben das Verhältnis α / γ -HCH, Säulenhöhen in ng/L.	126
Abb. 4-19: Zeitliche Entwicklung der α -, β - und γ -HCH-Konzentrationen an Station T41 seit 1987. Werte innerhalb der Kreise geben den Beobachtungsmonat an (1, 2, 3, ..., O, N, D). .	127
Abb. 4-20: Wie Abb. 4-19, jedoch mit logarithmischer Konzentrationsskala.	128
Abb. 4-21: Geographische Verteilung der TOC-Gehalte in Oberflächensedimenten der Deutschen Bucht im Mai 2003.....	132
Abb. 4-22: HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2003..	133
Abb. 4-23: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht im Jahr 2003....	136
Abb. 4-24: Geographische Konzentrationsverteilung für die Summe der n-Alkane von C_{20} bis C_{30} im Oberflächenwasser der Nordsee (5 m) im Juli / August 2003. Werte unterhalb der Säulen geben den CPI, Säulenhöhen in ng/L.	138
Abb. 4-25: Geographische Konzentrationsverteilungen für die n-Alkane C_{13} bis C_{19} im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Juli / August 2003. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.....	139
Abb. 4-26: Konzentrationen (ng/L) einiger PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai 2003.	142
Abb. 4-27: Konzentrationen einiger PAK relativ zu Stade (100 %) entlang des Salzgehaltsgradienten der Elbfahne. Salzgehalt als Frischwasseranteil (%); \log_{10} -Skalierung beachten. .	143
Abb. 4-28: Konzentrationen einiger PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Juli / August 2003. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.	144
Abb. 4-29: Typisches PAK-Konzentrationsmuster einer Sedimentprobe aus der Deutschen Bucht.	145
Abb. 4-30: Benzo[a]Pyren-Konzentrationen im Oberflächensediment der Deutschen Bucht. ...	146
Abb. 4-31: Mittlere TBT-Konzentrationen (ng/L) im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Zeitraum 1999 – 2002.	148
Abb. 4-32: Konzentrationen (ng/L) einiger Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Juli / August 2003.	151
Abb. 4-33: Konzentrationen (ng/L) einiger Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Juli/August 2003.	152

Abb. 4-34: Saisonale Entwicklung der Konzentrationen einiger Phenylharnstoff-Herbizide in der Elbe bei Blankenese im Jahr 2003.....	154
Abb. 4-35: Räumliche Verteilung der oberflächennahen (10 m) gelösten Kupfergehalte in gefiltertem Meerwasser in ng/L in den Wintermonaten 2003 (Januar – März). Die Probenahmestationen sind durch Kreuze gekennzeichnet.	162
Abb. 4-36: Zeitreihe der Bleigehalte in den Wintermonaten im filtrierten, oberflächennahen (10 m) Meerwasser der Deutschen Bucht bei niedrigen Salzgehalten von 28 – 31.....	164
Abb. 4-37: Zeitreihe der Cadmiumgehalte in den Wintermonaten im filtrierten oberflächennahen (10 m) Meerwasser der Deutschen Bucht bei Salzgehalten über 34.....	164
Abb. 4-38: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion (< 20 µm) am Gesamtsediment, ausgedrückt in Prozent (1995 – 2003).	166
Abb. 4-39: Räumliche Verteilung des Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion (< 20 µm) des Oberflächensediments im Jahr 1995.	167
Abb. 4-40: Räumliche Verteilung der Bleigehalte in der Feinkornfraktion (< 20 µm) des Oberflächensediments im Jahr 1995.....	167
Abb. 4-41: Zeitreihe der Quecksilbergehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments südöstlich Helgolands.	168
Abb. 4-42: Zeitreihe der Quecksilbergehalte in der Feinkornfraktion der Oberflächensedimente vor der Nordfriesischen Küste.....	169
Abb. 4-43: Zeitreihe der Quecksilbergehalte in der Feinkornfraktion der Oberflächensedimente vor der Niedersächsischen Küste.	170
Abb. 4-44: Räumliche Verteilung der Differenzen im Quecksilbergehalt des Oberflächensediments in den Jahren 2000 und 1995.....	171
Abb. 4-45: Profile des Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion einiger Sedimentkernproben aus dem Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland und dem Zeitraum 1986 – 2004.	172
Abb. 4-46: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr und ^{137}Cs im Wasser der südlichen Nordsee im Spätherbst 2002. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.	176
Abb. 4-47: Verteilung der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs im Wasser der Deutschen Bucht im September 2003.	177
Abb. 4-48: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen der Transurane $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am im Wasser der südlichen Nordsee im Spätherbst 2002.....	178
Abb. 4-49: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr an den früheren Positionen der Feuerschiffe ›Borkumriff‹ und ›Elbe 1‹.	179
Abb. 4-50: Vertikalverteilung der Radionuklide ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am in einem Sedimentkern vom 29. Juni 2001 aus dem Skagerrak (57° 45' N, 8° E).....	180

Tabellenverzeichnis

Atmosphärenphysik

Tab. 2-1: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2003. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	32
Tab. 2-2: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2003 (%).	32
Tab. 2-3: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2002. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	33
Tab. 2-4: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2002 (%).	33

Physikalische Ozeanographie

Tab. 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht im Jahr 2003.	51
Tab. 3-2: Wellenhöhenstatistik (Modelldaten, alle Angaben in m).	56
Tab. 3-3: Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für die beobachtete Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Feuerschiff »Deutsche Bucht« im Jahr 2003.	58
Tab. 3-4: Wie Tab. 3-3, jedoch für Modelldaten des DWD (WAM-Antrieb).	58
Tab. 3-5: Wie Tab. 3-3, jedoch für Windsee (WAM-Modell, DWD).	58
Tab. 3-6: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (SWH) bei Helgoland (Waverider-Daten, keine Seegangsrichtung).	61
Tab. 3-7: Monatsstatistik 2003: Waverider bei Helgoland (ohne Richtung) vs. WAM-Modell an Position »UFS DB«. SWH = signifikante Wellenhöhe.	61
Tab. 3-8: Monatsstatistik 2003: Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe (SWH) für die Position »Entenschnabel« (WAM-Modell). SF = Stabilitätsfaktor.	62
Tab. 3-9: Kontingenztafeln zur Zusammenfassung von Abb. 3-19. NE – S entspricht 22.5° – 202.5°. Wegen der unterschiedlichen Intervallschachtelung der geostrophischen Windgeschwindigkeit ist beim Vergleich der Intra-Regimetabellen Vorsicht geboten.	76
Tab. 3-10: Relative Nordseefläche (%) mit bodennahen Salzgehalten über 35 (Atlantikwasser) mit Winter NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998).	89

Meereschemie

Tab. 4-1: Konzentrationen (pg/L) der lipophilen CKW im Meerwasser im August 2003.	131
Tab. 4-2: CKW-Konzentrationen im Oberflächensediment der Mündungsbereiche der Flüsse Ems, Weser und Elbe. Mittelwerte in $\mu\text{g/kg}$ Trockenmasse für die Jahre 1999 – 2002 (MESS-PROGRAMM MEERESUMWELT 2005).	134
Tab. 4-3: Konzentrationen von n-Alkanen im Wasser der Nordsee im August 2003.	137
Tab. 4-4: Lineare Korrelationsmatrix für einige PAK, Salz- und Schwebstoffgehalt (S & SPM). Oberhalb Hauptdiagonale: Korrelationskoeffizienten (r), unterhalb: erklärte Varianz (r^2).	141
Tab. 4-5: Mittlere Konzentrationen (ng/L) zinnorganischer Schadstoffe an ausgewählten Stationen in der Deutschen Bucht im Zeitraum 1999 – 2002. Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-31, S. 148.	147
Tab. 4-6: Regional gemittelte Konzentrationen (ng/L) einiger polarer Pestizide in der Nordsee im August 2003. (LoD = Nachweisgrenze).	153

<i>Tab. 4-7: Konzentrationen (ng/L) einiger Pestizide in der Deutschen Bucht im Mai 2003. LoD = Nachweisgrenze; zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-15, S. 122.</i>	<i>155</i>
<i>Tab. 4-8: Konzentrationen (ng/L) einiger Pestizide in der Deutschen Bucht im August 2003. LoD = Nachweisgrenze; zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-15, S. 122.</i>	<i>156</i>
<i>Tab. 4-9: Hintergrundkonzentrationen der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink in der gelösten Fraktion (Wasser) und im Sediment (< 20 µm). Wasser: OSPAR Region »Greater North Sea«. Sediment: BSH-Sedimentkernuntersuchungen in der Deutschen Bucht.</i>	<i>160</i>
<i>Tab. 4-10: Ökotoxikologische Bewertungskriterien (EAC) der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink in Wasser.....</i>	<i>161</i>
<i>Tab. 4-11: Elementkonzentrationen im filtrierten Meerwasser. Die Proben wurden im Jahr 2003 in der deutschen AWZ genommen und nach Salzgehaltsbereichen unterschieden. Alle Konzentrationen sind in ng/L, nur Quecksilber in pg/L angegeben.</i>	<i>163</i>
<i>Tab. 4-12: Mittelwert und Standardabweichung im Jahr 2003 der Elementgehalte (mg/kg) in der Feinkornfraktion von Oberflächensedimentproben aus der inneren Deutschen Bucht (Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland).</i>	<i>169</i>
<i>Tab. 4-13: Konzentration und spezifische Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser (mit Salzgehalt 35) und Sedimenten der Nordsee.</i>	<i>173</i>

Tafelverzeichnis

Meereschemie

<i>Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar.....</i>	<i>103</i>
<i>Tafel 4-2: HCH-Isomere</i>	<i>123</i>
<i>Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe.....</i>	<i>129</i>
<i>Tafel 4-4: Kohlenwasserstoffe</i>	<i>135</i>
<i>Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</i>	<i>140</i>
<i>Tafel 4-6: Organozinnverbindungen</i>	<i>147</i>
<i>Tafel 4-7: Herbizide</i>	<i>149</i>
<i>Tafel 4-8: Metalle mit toxischem Potential in der Meeresumwelt</i>	<i>158</i>
<i>Tafel 4-9: Radioaktivität</i>	<i>174</i>

List of Figures

Atmospheric Physics

Fig. 2-1: NAO Index 2003. lk: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE AND 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/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatmon). cpccdb: Amplitude of NAO pattern from rotated principal component analysis of 700 hPa height anomalies (www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html).....	25
Fig. 2-2: 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 relative state density (i. e. rel. # of states per square-bin, 0.6 x 0.6). The sequences of 12 yellow and 12 blue circles (1, 2, ..., 8, 9, O, N, D) show the temporal evolution in 2003 of raw (yellow) and low-pass filtered (6 month, blue) monthly mean states, respectively.....	26
Fig. 2-3: Sea level pressure (hPa) for Dec, 21 2003 (Hurricane »Jan«) and grid (1 – 16) for weatherotyping scheme (cf. Anhang A, S. 185).	28
Fig. 2-4: Percent frequency distribution of daily circulation states for the period 1971 – 2000 together with classification criteria (cf. Anhang A.3, S. 188).	29
Fig. 2-5: Air circulation around high (A) and low pressure systems (C).	30
Fig. 2-6: Seasonal sea level pressure distributions (hPa); JFM = January, February, March etc.	35
Fig. 2-7: Seasonal 50%-probability ellipses for the »North Sea Wind« (1=»winter«=JFM, 2=»spring«, etc.).	37
Fig. 2-8: Progressive daily vectors of the »North Sea Wind«. Markers indicate the first day in a month. The distance between two arbitrary markers divided by the time interval in days yields the mean vector wind (e. g. about 6.5 m/s in January 2003).	38
Fig. 2-9: Seasonal cycle in 2003 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	40
Fig. 2-10: Monthly air surface temperatures at Norderney for 2002 and 2003 together with 1971 – 2000 base period means, and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). .	41

Physical Oceanography

Fig. 3-1: Seasonal surface circulation of the North Sea in 2003 (JFM = January-February-March, AMJ ...). Vector mean currents from »BSHcmod«. Stability (%; colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	47
Fig. 3-2: Volume transport through the Strait of Dover in 2003 (BSHcmod); 1 Sv = 10 ⁶ m ³ /s... 48	48
Fig. 3-3: Volume transport through the Kattegat in 2003 (BSHcmod); 1 Sv = 10 ⁶ m ³ /s.	49
Fig. 3-4: Classification scheme for daily residual currents in the German Bight.	50
Fig. 3-5: Frequency and duration of main circulation types.	52
Fig. 3-6: Seasonal frequencies of circulation patterns in the German Bight for 2002 and 2003. .	52
Fig. 3-7: Seasonal geographical distributions of windsea and swell in 2003; JFM = January, February, March etc.	55

Fig. 3-8: As Fig. 3-7, but for 2002.....	56
Fig. 3-9: Seasonal percent frequency distributions of observed wind speed and direction at »UFS DB« in 2003.	59
Fig. 3-10: Seasonal percent frequency distributions of wave height and direction at position »UFS DB« in 2003 (WAM-Model, DWD). Note \log_2 -scaling of horizontal axis (k).....	60
Fig. 3-11: Seasonal percent frequency distributions of wave height and direction at position »Entenschnabel« in 2003 (WAM-Model, DWD). Note \log_2 -scaling of horizontal axis (k)... ..	63
Fig. 3-12: High-water levels at Cuxhaven in 2003 (rel. to ordnance datum) together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band as well as intramonthly 90%-limits.	66
Fig. 3-13: High-water levels at Cuxhaven and NW-component of the »North Sea Wind« (2003).	66
Fig. 3-14: Monthly SST anomalies in 2003 as departures from 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K.....	69
Fig. 3-15: Seasonal cycle of areal mean weekly SST of the North Sea from December 2002 through November 2003 and ensemble of corresponding cycles since 1968. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971 – 1993.....	70
Fig. 3-16: Seasonal cycle 2003 of monthly mean SST at Helgoland Reede together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).	70
Fig. 3-17: Sketch of annual temperature swing (mean and seasonal extremes) in continental and maritime climates (CON & MAR) as well as in cool and warm mishmash-climates (MMC / cold-regime & MMW / warm-regime).	71
Fig. 3-18: Serial monthly North Sea SST anomalies (base period 1971-1993). Filled circles indicate anomalies beyond $\pm 1.96 \sigma$, green curve is a low-pass smoother of width 24 month. Regime lengths and boundaries are given through a step function (cf. text).	72
Fig. 3-19: Seasonal percent frequency distributions of geostrophic wind speed and direction across the North Sea for warm (1991 – 2000, top) and cold SST regime (1978 – 1987, middle). Left panel is for winter (JFM = January – March), right panel for summer (JAS = July – September), bottom panel shows seasonal regime difference. The 0.5 % contour (stippled) encloses about 98 % of all samples (900 for JFM, 920 for JAS). Cumulative differences within $\pm 0.5 \%$ envelopes (bottom) amount to $\pm 18 \%$ for JFM and $\pm 15 \%$ for JAS. Velocity is expressed in units of hPa per 10° latitude at 55° N, 1 unit being equivalent to 1.2 Kt or 0.62 m/s.....	75
Fig. 3-20: Temperature stratification ($^\circ$ C) in summer 2003 (RV Gauss, Reise #405).....	78
Fig. 3-21: Temperature stratification ($^\circ$ C) in 2003 at MARNET stations »Deutsche Bucht«, »Ems« and »NSB II«. Sensor depths: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.	79
Fig. 3-22: Geographical distribution of heat content per unit volume in August 2003 and July 2002.	81
Fig. 3-23: Heat content per unit water column along 58° N in August 2003, model vs. observations.	82
Fig. 3-24: Seasonal evolution of North Sea heat content in 2002 and 2003 (model data) together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). Obs = Gauss #385 (Jul 2002), Gauss #405 (Aug 2003).	83
Fig. 3-25: Monthly mean North Sea heat content ($\times 10^{21}$ J) with anomalies 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 %.....	84
Fig. 3-26: North Sea heat content versus SST (annual means).	85
Fig. 3-27: North Sea heat content (annual means) versus winter NAO-Index (Dec-Jan-Feb, LOEWE AND KOSLOWSKI 1998).	85

Fig. 3-28: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2003.....	88
Fig. 3-29: Salinity stratification in summer 2003 (RV Gauss, Cruise #405).....	90
Fig. 3-30: Monthly mean and maximum runoff of Elbe River in 2003 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. (Data courtesy of WSA-Lauenburg.).....	91
Fig. 3-31: Seasonal cycle 2003 of monthly mean SSS at Helgoland Roads together with monthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).	92
Fig. 3-32: Ice-climate stations (blue) at the German North Sea coast.....	93
Fig. 3-33: Accumulated areal ice volume for the German North Sea coast during 1897 – 2003.	94
Fig. 3-34: Accumulated areal ice volume and air temperature (5-day running means) during the ice season 2002/3.....	95
Fig. 3-35: Ice concentration and thickness at the ice-climate stations along the German North Sea coast during the 2002/3 sea-ice season.....	96

Marine Chemistry

Fig. 4-1: Phosphate, Silicate, Nitrate & Nitrite, and Ammonium distributions ($\mu\text{mol/L}$) in surface water in winter 2003. Note \log_2 color scale (except for PO_4).	105
Fig. 4-2: Phosphate, silicate, nitrate and nitrite in the German Bight in January 2003.	106
Fig. 4-3: Long-term mean salinity distribution (1900 – 1996) in the German Bight (after JANSSEN ET AL. 1999).....	108
Fig. 4-4: Time series of wintry nutrient concentrations estimated for salinity 30, typical of coastal waters in the German Bight. Standard errors of estimate given as 95%-bars. Reference concentrations from 1936 only shown where available.	109
Fig. 4-5: Phosphate concentrations ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003 (top, note \log_2 color scale) and departures from long-term means (1980 – 2001).....	110
Fig. 4-6: Nitrate & Nitrite concentrations ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003; note \log_2 color scale.	112
Fig. 4-7: Ammonium concentrations ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003 (top, note \log_2 color scale) and departures from long-term means (1980 – 2001).....	113
Fig. 4-8: Vertical profiles of phosphate, silicate, nitrate & nitrite, ammonium ($\mu\text{mol/L}$) and chlorophyll ($\mu\text{g/L}$) along 56° N in summer 2003 (RV Gauss, cruise #405).	114
Fig. 4-9: Secchi depth and depth (m) of maximum chlorophyll concentration in summer 2003.	115
Fig. 4-10: Turbidity (NTU) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003; note \log_2 color scale.	115
Fig. 4-11: Oxygen saturation (%) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2003.....	116
Fig. 4-12: Annual cycles of nutrient concentrations ($\mu\text{mol/L}$) at Helgoland Roads versus climatology.	118
Fig. 4-13: Nutrient concentrations at Helgoland Roads during the salinity decline in April 2003.	119

Fig. 4-14: Evolution of some algae at Helgoland Roads in April 2003.	119
Fig. 4-15: Observational network for contaminant monitoring in the German Bight.....	122
Fig. 4-16: Geographical distributions of α -, β -, and γ -HCH concentrations (ng/L) for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May 2003.	124
Fig. 4-17: HCH concentrations relative to Stade (100 %) along the salinity gradient of the Elbe river plume. Salinity as percent fresh water; note \log_{10} -scaling.....	125
Fig. 4-18: Geographical distributions of α - and γ -HCH concentrations for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in July / August 2003. Figures below columns give the ratio α / γ -HCH, column heights in ng/L.	126
Fig. 4-19: Temporal evolution since 1987 of α -, β -, and γ -HCH concentrations at station T41. Figures inside bullets give month of observation (1, 2, 3, ..., O, N, D).....	127
Fig. 4-20: As Fig. 4-19, except for logarithmic concentration scale.	128
Fig. 4-21: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight in May 2003.....	132
Fig. 4-22: HCH-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2003.	133
Fig. 4-23: Pollution sightings in the German Bight in 2003.	136
Fig. 4-24: Geographical distribution of total concentration of n-Alkanes from C_{20} to C_{30} for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in July / August 2003. Figures below columns give the CPI, column heights in ng/L.	138
Fig. 4-25: Geographical distribution of concentrations of n-Alkanes C_{13} to C_{19} for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in July / August 2003. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.	139
Fig. 4-26: Concentrations (ng/L) of some PAHs in surface water (5 m) of the German Bight in May 2003.	142
Fig. 4-27: Concentrations of some PAHs relative to Stade (100 %) along the salinity gradient of the Elbe river plume. Salinity as percent fresh water (%); note \log_{10} -scaling.	143
Fig. 4-28: Concentrations of some PAHs in North Sea surface water (5 m) in July / August 2003. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.	144
Fig. 4-29: Typical PAH concentration pattern in a sediment sample from the German Bight.	145
Fig. 4-30: B[a]P concentrations in surface sediments of the German Bight.....	146
Fig. 4-31: Mean TBT concentrations (ng/L) in near-surface water of the German Bight during 1999 – 2002.....	148
Fig. 4-32: Concentrations (ng/L) of some triazine herbicides in near-surface sea water of the North Sea in July / August 2003.....	151
Fig. 4-33: Concentrations (ng/L) of some phenylurea herbicides in near-surface sea water of the North Sea in July / August 2003.....	152
Fig. 4-34: Seasonal evolution of phenylurea herbicides in the river Elbe at Blankenese in 2003. .	154
Fig. 4-35: Spatial distribution of near-surface (10 m) copper concentrations (ng/L) in filtrated sea water during winter 2003 (January – March). Crosses indicate sampling sites.....	162
Fig. 4-36: Time series of lead concentrations in winter in filtrated near-surface (10m) sea water from the German Bight. Only samples with associated salinity within the range 28 – 31 were used.	164

Fig. 4-37: Time series of cadmium concentrations in winter in filtrated near-surface (10 m) sea water from the German Bight. Only samples with an associated salinity above 34 were used.	164
Fig. 4-38: Mean spatial distribution pattern of relative grain size fraction < 20 μm as compiled from surface sediment samples from the period 1995 to 2003.....	166
Fig. 4-39: Spatial distribution of mercury content in the fine grain fraction (< 20 μm) of surface sediment samples from 1995.....	167
Fig. 4-40: Spatial distribution of mercury content in the fine grain fraction (< 20 μm) of the surface sediment sampled during 1995.....	167
Fig. 4-41: Time series of the mercury content in the fine grain fraction of surface sediment samples from a small-scale area southeast of Helgoland (cf. inset).	168
Fig. 4-42: Time series of mercury content in the fine grain fraction of surface sediments off the North Frisian Islands (cf. inset).....	169
Fig. 4-43: Time series of the mercury content in the fine grain fraction of surface sediments off the East Frisian Islands.....	170
Fig. 4-44: Spatial distribution of differences in mercury content in the fine grain fraction of surface sediment samples from the years 2000 and 1995.	171
Fig. 4-45: Profiles of Mercury content in the fine grain fraction of some sediment cores from the mud-area SE of Helgoland during the period 1986 – 2004.....	172
Fig. 4-46: Distribution of ^{90}Sr and ^{137}Cs activity concentrations in southern North Sea sea-water in late fall 2002. Underneath columns station IDs.....	176
Fig. 4-47: Distribution of ^{137}Cs activity concentration in German Bight sea-water in September 2003.....	177
Fig. 4-48: Distribution of activity concentrations of transuranics $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu and ^{241}Am in southern North Sea sea-water in late fall 2002.....	178
Fig. 4-49: Time series of annual maximum activity concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr at former positions of out-of-operation light vessels ›Borkumriff‹ and ›Elbe 1‹.	179
Fig. 4-50: Vertical distribution of ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am in a sediment core from the Skagerrak at 57° 45' N, 8° E (June, 29 2001).	180

List of Tables

Atmospheric Physics

Table 2-1: Calendar of daily weather types in 2003. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).....	32
Table 2-2: Contingency table of weather types in 2003 (%).....	32
Table 2-3: Calendar of daily weather types in 2002. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).....	33
Table 2-4: Contingency table of weather types in 2002 (%).....	33

Physical Oceanography

Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2003.....	51
Table 3-2: Wave height statistics (model data, all entries in m).....	56
Table 3-3: Censored percent frequency distribution of observed wind speed and direction at light vessel ›Deutsche Bucht‹ in 2003.	58
Table 3-4: As Table 3-3, but for DWD model data (WAM-Forcing).	58
Table 3-5: As Table 3-3, but for windsea (WAM-Model, DWD).	58
Table 3-6: Percent frequency distribution of significant wave height (SWH) near Helgoland (waverider data, no wave direction).....	61
Table 3-7: Monthly wave statistics 2003: Waverider at Helgoland vs. WAM-Model at position ›UFS DB‹. SWH = significant wave height.	61
Table 3-8: Monthly statistics 2003: Windspeed and significant wave height (SWH) at position ›Entenschnabel‹ (WAM-Model). SF = stability factor.....	62
Table 3-9: Contingency tables summarizing Fig. 3-19. NE – S covers sector 22.5° – 202.5°. On account of different bin sizes for geostrophic wind velocity care should be used when comparing intra-regime tables.....	76
Table 3-10: Fractional North Sea area (%) with near-bottom salinity exceeding 35 (Atlantic water) mit Winter NAO-Index (LOEWE AND KOSLOWSKI 1998).	89

Marine Chemistry

Table 4-1: Concentrations (pg/L) of lipophilic chlorinated hydrocarbons in sea water in August 2003.....	131
Table 4-2: CHC-concentrations in surface sediments of the estuaries of rivers Ems, Weser, and Elbe. Mean values in µg/kg dry weight for 1999 – 2002 (MESSPROGRAMM MEERESUMWELT 2005). .	134
Table 4-3: Concentrations of n-Alkanes in North Sea sea water in August 2003.....	137
Table 4-4: Linear correlation matrix for some PAH, salinity (S), and suspended particulate matter (SPM). Above main diagonal: correlation coefficients (r), below: accounted variance (r ²).	141
Table 4-5: Mean concentrations (ng/L) of organotin compounds at selected stations in the German Bight for the period 1999 – 2002. Cf. Fig. 4-31, p. 148 for a station map.	147
Table 4-6: Regional average concentrations (ng/L) of some polar pesticides in the North Sea in August 2003. (LoD = Limit of Detection.)	153

<i>Table 4-7: Concentrations (ng/L) of some pesticides in the German Bight in May 2003. LoD = Limit of Detection; cf. Fig. 4-15, p. 122 for a station map.</i>	<i>155</i>
<i>Table 4-8: Concentrations (ng/L) of some pesticides in the German Bight in August 2003. LoD = Limit of Detection; cf. Fig. 4-15, p. 122 for a station map.</i>	<i>156</i>
<i>Table 4-9: Background concentrations of cadmium, copper, lead, mercury and zinc in the dissolved fraction (water) and in sediment (< 20 µm). Water: OSPAR region 'Greater North Sea', sediment: BSH sediment core samples in the German Bight.</i>	<i>160</i>
<i>Table 4-10: Ecotoxicological assessment criterion (EAC) for cadmium, copper, lead, mercury and zinc in water.....</i>	<i>161</i>
<i>Table 4-11: Element concentrations in filtered sea water. Samples from 2003 taken in the German EEZ and stratified by salinity. All concentrations in ng/L, but mercury in pg/L.....</i>	<i>163</i>
<i>Table 4-12: Mean and standard deviation in 2003 of element content (mg/kg) in the fine grain fraction of surface sediment samples from the inner German Bight (mud area SE of Helgoland).....</i>	<i>169</i>
<i>Table 4-13: Concentration and specific activity of some natural radio nuclides for North Sea sea-water (at salinity 35) and sediments.....</i>	<i>173</i>

Autoren / Authors

Gerd Becker	+49-40-3190-3200	gerd.becker@bsh.de
Uwe Brockmann*	+49-40-42838-3989	brockmann@uni-hamburg.de
Stephan Dick	+49-40-3190-3130	stephan.dick@bsh.de
Clemens Engelke**	+49-4725-819246	cengelke@awi-bremerhaven.de
Alexander Frohse	+49-40-3190-3212	frohse@bsh.de
Wilfried Horn	+49-40-3190-3141	horn@bsh.de
Holger Klein	+49-40-3190-3220	holger.klein@bsh.de
Peter Loewe	+49-40-3190-3214	loewe@bsh.de
Sylvin Müller-Navarra	+49-40-3190-3110	mueller-navarra@bsh.de
Hartmut Nies	+49-40-3190-3300	nies@bsh.de
Natalija Schmelzer#	+49-381-4563-787	schmelzer@bsh.de
Stefan Schmolke	+49-40-3190-3330	schmolke@bsh.de
Dieter Schrader	+49-40-3190-3133	schrader@bsh.de
Achim Schulz	+49-40-3190-3213	achim.schulz@bsh.de
Norbert Theobald	+49-40-3190-3340	theobald@bsh.de
Sieglinde Weigelt	+49-40-3190-3310	sieglinde.weigelt@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

** Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung
Biologische Anstalt Helgoland
Postfach 180
27483 Helgoland

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Neptunallee 5
18057 Rostock

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
 - 34 (2004) Schulz, G. Geomagnetic Results Wingst 1996, 1997, 1998 and 1999 including the complete Wingst data set since 1939 on CDrom
 - 35 (2004) Gouretski, V. V., Koltermann, K. P. WOCE Global Hydrographic Climatology
 - 36 (2004) Gayer, G., Dick, S., Pleskachevsky, A., Rosenthal, W. Modellierung von Schwebstofftransporten in Nord- und Ostsee
 - 37 (2004) Schmelzer, N., Strübing, K., Stanisławczyk, I., Sztobryn, M. Die Eiswinter 1999/2000 bis 2003/2004 an der deutschen Nord- und Ostseeküste/ Ice Conditions in the Szczecin Lagoon and Pomeranian Bay During the Winters 1999 - 2002
 - 38 (2005) Loewe, P., Schmolke, S., Becker, G., Brockmann, U., Dick, S., Engelke, C., Frohse, A., Horn, W., Klein, H., Müller-Navarra, S., Nies, H., Schmelzer, N., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N., Weigelt, S. Nordseezustand 2003
-