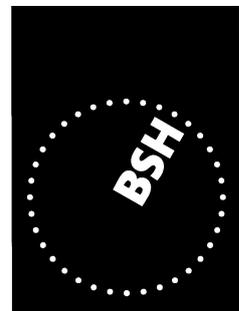


BUNDESAMT FÜR  
SEESCHIFFFAHRT  
UND  
HYDROGRAPHIE

# Nordseezustand 2004





BUNDESAMT FÜR  
SEESCHIFFFAHRT  
UND  
HYDROGRAPHIE

## **Nordseezustand 2004**

Autoren:

Peter Loewe

Gerd Becker

Uwe Brockmann

Stephan Dick

Alexander Frohse

Jürgen Herrmann

Birgit Klein

Holger Klein

Hartmut Nies

Stefan Schmolke

Dieter Schrader

Achim Schulz

Norbert Theobald

Sieglinde Weigelt

**Berichte des  
Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Nr. 40/2006**

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 2004* im Internet:

**[www.bsh.de](http://www.bsh.de)** (Menü: Produkte → Bücher → Berichte des BSH)

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)  
Hamburg und Rostock 2006  
[www.bsh.de](http://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 .....	19
1 Einführung .....	29
2 Atmosphärenphysik .....	31
2.1 Nordatlantische Oszillation .....	32
2.2 Großwetterlagen .....	35
2.2.1 Klassifizierung .....	35
2.2.2 Wetterlagenkalender .....	38
2.2.3 Wetterlagenstatistik .....	40
2.3 Luftdruckverteilung .....	45
2.4 Nordseewind .....	51
2.4.4 Saisonale Vektorwinde .....	51
2.4.5 Zeitliche Entwicklung .....	53
2.5 Lufttemperatur und Strahlung .....	57
2.6 Zusammenfassung .....	60
2.7 Referenzen .....	62
3 Physikalische Ozeanographie .....	63
3.1 Strömungen .....	64
3.1.1 Saisonale geographische Verteilungen .....	64
3.1.2 Einstrom .....	66
3.1.3 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht .....	67
3.1.4 Zusammenfassung .....	72
3.2 Seegang .....	74
3.2.1 Geographische Seegangsverteilungen .....	74
3.2.2 Modell vs. Beobachtung .....	77
3.2.3 Lokale Wind- und Windseeverteilungen .....	80
3.2.3.1 Deutsche Bucht .....	80
3.2.3.2 Zentrale Nordsee .....	83
3.2.4 Zusammenfassung .....	85
3.3 Wasserstand .....	87
3.3.1 Hoch- und Niedrigwasser .....	87
3.3.2 Wasserstandsentwicklung seit 1971 .....	89
3.3.3 Zusammenfassung .....	91
3.4 Temperatur .....	92
3.4.1 Oberflächentemperatur .....	92
3.4.2 Mischmasch-Klima .....	95
3.4.3 Temperaturschichtung .....	98
3.4.4 Meereis .....	102
3.4.5 Zusammenfassung .....	103

3.5	Salzgehalt	105
3.5.1	Salzgehaltsverteilungen	105
3.5.2	Nördliche Randbedingungen	108
3.5.3	Abfluss Elbe	111
3.5.4	Salzgehalt bei Helgoland Reede	113
3.5.5	Zusammenfassung	113
3.6	Referenzen	115
<b>4</b>	<b>Meereschemie</b>	<b>117</b>
4.1	Nährstoffe	118
4.1.1	Einführung	118
4.1.2	Winter 2004	120
4.1.2.1	Zentrale und nördliche Nordsee	120
4.1.2.2	Deutsche Bucht	123
4.1.3	Sommer 2004	127
4.1.3.1	Nährstoffe	127
4.1.3.2	Chlorophyll-a	130
4.1.3.3	Sauerstoff	131
4.1.3.4	Nährstofflimitierung	132
4.1.4	Nährstoffdynamik bei Helgoland	137
4.1.5	Zusammenfassung	139
4.2	Organische Stoffe	141
4.2.1	Einführung	141
4.2.2	Hexachlorcyclohexan-Isomere ( $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -HCH)	142
4.2.2.1	HCH-Gehalte des Meerwassers	143
4.2.2.2	Zeitliche Entwicklung der Meerwasserbelastung	147
4.2.2.3	HCH-Gehalte des Sediments	150
4.2.3	Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe (HCB, PCB, DDT)	150
4.2.3.1	CKW-Gehalte des Meerwassers	150
4.2.3.2	CKW-Gehalte des Sediments	152
4.2.4	Kohlenwasserstoffe	155
4.2.4.1	Akute Ölverschmutzungen	155
4.2.4.2	Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane	156
4.2.4.3	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	160
4.2.5	Polare Pestizide	165
4.2.5.1	Herbizidgehalte des Meerwassers	166
4.2.5.2	Zeitliche Variabilität der Herbizidgehalte	169
4.2.6	Zusammenfassung	171
4.3	Metalle	173
4.3.1	Einführung	173
4.3.2	Bewertungskriterien	175
4.3.3	Metallgehalte des Meerwassers	176
4.3.3.1	Quellen, Senken und Prozesse	176
4.3.3.2	Gelöste und partikuläre Metallgehalte	176
4.3.3.3	Metallgehalte im Jahr 2004	177
4.3.3.4	Zeitliche Entwicklung	179
4.3.4	Metallgehalte des Sediments	180
4.3.4.1	Merkmale des Feinkornanteils	181
4.3.4.2	Metallgehalte im Jahr 2004 (Trendmonitoringgebiete)	182
4.3.4.3	Räumliche Verteilung und Belastungsschwerpunkte	183
4.3.4.4	Zeitliche Entwicklung	185
4.3.5	Zusammenfassung	186

4.4	Radioaktive Stoffe.....	188
4.4.1	Einführung.....	188
4.4.2	Quellen künstlicher Radionuklide.....	190
4.4.3	Caesium und Strontium.....	191
4.4.4	Transurane.....	195
4.4.5	Zusammenfassung.....	196
4.5	Referenzen.....	197
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>199</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>205</b>
	<b>Tafelverzeichnis.....</b>	<b>207</b>
	<b>List of Figures.....</b>	<b>209</b>
	<b>List of Tables.....</b>	<b>215</b>
	<b>Autoren / Authors.....</b>	<b>217</b>



# Vorwort

Das Verständnis der Funktionalität des komplexen dynamischen Systems Nordsee ist eine wesentliche Grundlage für eine vorausschauende Strategie zur übergreifenden marinen Raumordnung der ausschließlichen Wirtschaftszone vor unseren Küsten – eine der zentralen Aufgaben des BSH.

Der nun vorgelegte Jahresbericht ›Nordseezustand 2004‹ leistet hierzu einen wichtigen Beitrag. Denn unser langfristiges und regelmäßiges Monitoring, die genaue Dokumentation der Daten und deren Interpretation ermöglichen letztlich erst die Bewertung des Zustandes der Meeresumwelt – eine elementare Voraussetzung für planvolle Entscheidungen im Rahmen einer zukunftsweisenden europäischen Meerespolitik, die die gesunde Balance zwischen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Interessen wahrt und damit eine nachhaltige Entwicklung der Lebensgrundlage »Meer« sichert.

Eine ganzheitliche Meerespolitik erfordert eine innovative, integrative und multisektorale Zusammenarbeit aller Beteiligten – vor allem um Synergien zu bilden. Darüber hinaus gewährleistet die neue holistische Perspektive aber auch, eine Vielzahl von Einzelergebnissen in ihrem komplexen Wirkungsgeflecht und damit als synoptisches Bild erfassen und verstehen zu können.

Mit der vorliegenden interdisziplinären Präsentation von atmosphärischen, ozeanographischen und chemischen Befunden, die die natürliche Variabilität und die anthropogenen Veränderungen der Nordsee systematisch dokumentiert und damit nachvollziehbar macht, geht das BSH einen wichtigen Schritt in Richtung einer synergetischen Gesamtschau als Grundvoraussetzung für belastbare Bewertungen.

Der ›Nordseezustand‹ erscheint als Periodikum und in dieser Form bereits im dritten Jahr. Er richtet sich als fundierte Informationsquelle gleichermaßen an Entscheider und Interessierte.



Prof. Dr. Peter Ehlers

Präsident des

Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie



# Zusammenfassung

Die Nordsee ist ein komplexes System, dessen Zustand und Zustandsänderungen natürlichen Prozessen und menschlichen Eingriffen unterworfen sind. Zu letzteren zählt die Beeinträchtigung des ökologischen Zustands durch Schad- und Nährstoffe, die bei den verschiedensten industriellen Aktivitäten der bevölkerungsreichen Anrainerstaaten anfallen und über belastete Fließgewässer und die Atmosphäre in die Nordsee eingetragen werden. Inzwischen zeichnet sich immer deutlicher ab, dass dieselben Aktivitäten nicht ohne Auswirkung auf Intensität und Verlaufsform der natürlichen Prozesse geblieben sind.

Beispielsweise wurde anhand von lokal bis ins 19. Jahrhundert zurückreichenden Oberflächentemperaturanalysen nachgewiesen, dass sich im Nordseeraum seit mindestens 130 Jahren Kalt- und Warmperioden, die jeweils etwa 5 – 15 Jahre andauerten, spontan ablösten. Diese natürlichen Regimes und Regimesprünge der Temperatur und entsprechende ursächliche Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation wurden als ›Mischmasch-Klima‹ bezeichnet. Dass die gegenwärtige, seit 1988 andauernde, längste und wärmste Temperaturperiode seit Beginn der Messungen im Jahr 1873 den Einfluss der anthropogenen Klimaerwärmung anzeigt, lässt sich kaum noch bestreiten.

Die Auswirkungen des Klimawandels betreffen nicht nur die Temperatur und temperaturabhängige Zustandsgrößen, sondern letztlich alle Systemvariablen der Nordsee, die vom Zustand der Atmosphäre abhängen. Zu den hier näher untersuchten Variablen zählen Wasserstand und Meereis; Regimeshifts und Klimawandel spiegeln sich jedoch auch in der Stärke der Primärproduktion, Artenzusammensetzung und Fischmigration wider.

Die »Wartung und Reparatur« von technischen Systemen wie Motorrädern oder biologischen Systemen wie dem Menschen setzen insbesondere ein ganzheitliches Verständnis des Systems, seiner Funktionalität und der ineinander verschränkten Prozesse beim Mechaniker oder Arzt voraus. Mit der gemeinsamen Darstellung des atmosphärischen, ozeanographischen und chemischen Zustands der Nordsee wird eine Integration der Ergebnisse aus den Teildisziplinen angestrebt, die auf ein verbessertes ganzheitliches Verständnis des Systems Nordsee abzielt. Dieses Verständnis ist Voraussetzung für eine nachhaltige Bewirtschaftung und wirksame Systemeingriffe zum Schutz der Meeresumwelt.

Die wichtigsten Ergebnisse zum Zustand der Nordsee im Jahr 2004 sind in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst.

## 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 von Wirkungsketten, die sich über ozeanographische Zustandsvariablen, Verteilungsmuster von Schad- und Nährstoffen bis hin zu biologischen Anomalien erstrecken.

Ein einfaches Maß für die Stärke der (breitenparallelen) Zonalzirkulation im Nordatlantik ist der Luftdruckunterschied zwischen den Azoren und Island. Zwar fällt der Luft-

druck im Mittel von Süden (Azorenhoch) nach Norden (Islandtief) ab (Westwind), auf kurzen Zeitskalen ist aber auch ein entgegengesetztes Gefälle möglich (Ostwind). Dieses Schwingungsverhalten des Luftdrucks heißt Nordatlantische Oszillation (NAO), der Index, der den Schwingungszustand anzeigt, NAO-Index. Mit dem NAO-Zustand konforme Verstärkungen (+) bzw. Abschwächungen (–) der Zonalzirkulation über der Nordsee traten im September (+), Oktober (–) und Dezember (+) ein. Extreme NAO-Zustände im April (+) und Juni (–) ereigneten sich hingegen gemeinsam mit entgegengesetzten Zirkulationsanomalien im Nordseeraum. Der Zusammenhang zwischen der Zirkulationsstärke in beiden Gebieten ist ein statistischer und auf das Winterhalbjahr beschränkt. Der Winter NAO-Index (DJF-Quartal) war mit –0.6 schwach negativ und weist auf eine relativ stark mäandrierende Zirkulation hin.

Der aus täglichen Luftdruckfeldern im Meeresniveau abgeleitete Wetterlagenkalendar für die Nordsee ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Interpretation von anomalen Zuständen und besonderen Ereignissen, die (un)mittelbar mit der atmosphärischen Zirkulation in Zusammenhang stehen. Bzgl. der Wetterlagen selbst wird festgehalten, dass antizyklonale Lagen A (Hochdruck), die unter den 27 Typen die stärkste Fraktion bilden, gegenüber dem Vorjahr (27 %) erheblich seltener auftraten (19 %). Der Anteil der NW, ANW und CNW-Lagen hat sich seit 2002 schrittweise auf insgesamt 15 % verdoppelt. Die Sturmfrequenz stieg von 16 (2003) auf 20 Tage an. Starke und sehr starke Stürme blieben jedoch aus.

Eine robuste Wetterlagenstatistik auf monatlichen und saisonalen Zeitskalen wurde mit den reduzierten Haupttypen A, C (Tiefdruck), NE, SE, SW und NW durchgeführt und anhand empirischer Verteilungen bewertet. Während übers Jahr nur NW- (80 Tage) und NE-Lagen (13 Tage) ungewöhnlich häufig bzw. selten auftraten, waren signifikante Abweichungen auf kürzeren Zeitskalen nicht auf diese Typen beschränkt. Besonders erwähnenswert erscheint das Alternieren teils extremer SE- und NW-Anomalien im April/Mai sowie von August (SE) bis November (NW). Während im relativ kalten Vorjahreswinter (JFM) A-Lagen mit 46 Tagen dominant waren, führte eine hohe Tiefdruckaktivität im Januar und Februar 2004 erheblich mildere Wintertemperaturen herbei.

Die Analyse saisonaler Luftdruckfelder ergab nur geringe Abweichungen von den klimatologischen Verteilungen (1971 – 2000) hinsichtlich Muster und Intensität, so dass die atmosphärische Zirkulation auf diesen Zeitskalen als »normal« zu bewerten ist. Diese Normalität resultierte jedoch aus der Balancierung und Nivellierung entgegengesetzter, teils erheblicher Anomalien auf kürzeren, monatlichen Zeitskalen. Die monatlichen Anomaliefelder wiesen drei wiederkehrende Grundmuster auf, nämlich N (2 = Feb, 5, 11), W (6, 9, 12) und SE (1, 4, 8, 10), die mehrheitlich die Meridional Komponente des Windfeldes betrafen und deshalb im Nordseesektor einen verstärkten Austausch thermischer Energie zwischen niederen und hohen Breiten anzeigen.

Anhand der klimatologischen Trajektorie des Nordseewindes wurde der jahreszeitlich wechselnde Einfluss von Islandtief und Azorenhoch verdeutlicht. Gleichförmig kräftige Winde aus WSW prägen von Oktober bis März die kalte Jahreshälfte, welche unvermittelt in eine Stagnationsperiode im April und Mai übergeht, für die sich keine bevorzugte Windrichtung angeben lässt (»der April macht, was er will«). Im Verlauf des Frühjahrs setzt sich der Einfluss des Azorenhochs durch. An dessen Nordrand auftretende schwache WNW-Winde sind ab Juni charakteristisch für den Durchschnittssommer im Nordseegebiet.

Im Jahr 2004 beschrieb die Trajektorie des Nordseewinds einen Torkelpfad um die Klimatologie. Die Querungen standen gewöhnlich mit monatlich alternierenden und sich dadurch annullierenden Anomalien der meridionalen Windkomponente in Verbindung. Die Gesamtwegstrecke entlang der aktuellen Trajektorie wurde mit einer mittleren Geschwindigkeit von 8.4 m/s zurückgelegt und blieb wie im Vorjahr (7.6 m/s) deutlich unter der klimatologischen Windgeschwindigkeit von 9.0 m/s. Die Nettoversetzung entsprach im Jahr 2004 einem mittleren Vektorwind von 4.0 m/s aus W (261°), der sich nur unwesentlich vom klimatologischen Vektorwind unterschied (3.7 m/s aus WSW, 256°).

Der Jahresgang der Globalstrahlung auf Norderney entsprach im Jahr 2004 insgesamt dem normalen klimatologischen Verlauf. Geringe Überschüsse im März, April und September kamen unter Hochdruckeinfluss zustande. Die jahreszeitliche Entwicklung der Lufttemperatur auf Norderney verlief ähnlich normal. Nennenswerte positive Abweichungen traten im April und August auf und wurden durch Zufuhr kontinentaler Warmluft aus SE erklärt. Die Mitteltemperatur des meteorologischen Sommers (JJA) blieb dennoch hinter den »mediterranen« Temperaturen der Sommer 2002 (17.9 °C) und 2003 (18.3 °C) klar zurück, war jedoch mit 16.7 °C aus statistischer Sicht durchaus normal.

## Physikalische Ozeanographie

Die atmosphärische Zirkulation über der Nordsee bildet sich in Muster und Intensität der Oberflächenströmungen ab. Das aufgrund vorherrschender Winde aus SW bis NW charakteristische zyklonale Strömungsmuster (großräumige Rotation im Gegenuhrzeigersinn) war im Jahr 2004 nicht auf Herbst und Winter beschränkt, sondern trat im Sommerquartal ebenfalls deutlich hervor. Der gegenüber dem Vorjahr stärkere Windantrieb schlug sich in höheren Stromstärken und einer reduzierten Richtungsvariabilität nieder. Ungewöhnlich häufige NW-Winde gingen mit einem starken nördlichen Einstrom salzreichen atlantischen Wassers einher. Die Nettotransporte durch Kanal und Kattegat lagen mit 0.015 bzw. 0.044 Sv/a im Normalbereich.

Der Strömungskalender dokumentiert die Abfolge täglicher Strömungsmuster in der Deutschen Bucht. Im Jahr 2004 (2003) stellten sich hier an 160 (150) Tagen zyklonale, an 71 (50) Tagen antizyklonale und an 77 (109) Tagen variable Zirkulationsmuster ein. Das vergleichsweise seltene Auftreten diffuser (variabler) Muster ergab sich aus einer entsprechenden Reduktion schwachwindiger Hochdruckwetterlagen gegenüber dem Vorjahr. Die Zunahme antizyklonaler Strömungsformen war Folge gehäufte NW-Wetterlagen. Weitere enge Zusammenhänge zwischen Strömungs- und Wetterlagenkalender wurden aufgezeigt. So generieren SW-Wetterlagen fast ausschließlich zyklonale Strömungsmuster. Beide Kalender stellen wichtige Hilfsmittel zur Interpretation anomaler Ereignisse in abhängigen Zustandsvariablen dar.

Seegang ist der winderzeugte Schwingungszustand der Meeresoberfläche. Das Seegangsklima im Jahr 2004 wurde durch saisonale geographische Verteilungen von signifikanter Wellenhöhe, Windsee- und Dünungsrichtung charakterisiert. Im Winter, Sommer und Herbst waren die mittleren Wellenhöhen um bis zu 0.5 m höher als in den entsprechenden Quartalen des windschwachen Vorjahres. An repräsentativen Positionen blieben die mittleren und maximalen Wellenhöhen jedoch unter den klimatologischen Vergleichswerten. Wind und Windsee kamen in diesen Jahreszeiten durchweg aus W-lichen Richtungen. Die Dünung hatte in allen Jahreszeiten NW-liche

Richtung. Im NW-Sturm ›Pia‹ kam es am 18. November in der zentralen und südlichen Nordsee zu signifikanten Wellenhöhen um 8 m.

Regionale Unterschiede in Windantrieb und Windsee wurden für zwei repräsentative Positionen in der Deutschen Bucht und der zentralen Nordsee aufgezeigt. In der Deutschen Bucht waren die Verteilungen der Wind- und Seegangsrichtung bimodal (zweigipflig); das Nebenmaximum im Sektor E bis SE war nur hier klar ausgeprägt; das Hauptmaximum variierte – wie in der zentralen Nordsee – saisonabhängig zwischen SW und NW und ging mit den höchsten Windgeschwindigkeiten und Windseen einher. Die mittlere Wellenhöhe war mit 1.4 m um 0.5 m geringer, Wellenhöhen über 2 m traten nur halb so oft auf wie in der zentralen Nordsee. Die maximalen Wellenhöhen in der Deutschen Bucht waren stets geringer, außer für Wind und Windsee aus NW.

Aufgrund der Lage von Cuxhaven am nach Nordwesten geöffneten Mündungstrichter der Elbe treten hier die höchsten Hochwasserstände und stärksten Sturmfluten in Verbindung mit NW-Winden und entsprechend niedrige Wasserstände bei entgegengesetztem Windstau (SE) ein. Das gehäufte Auftreten von NW-Wetterlagen im Berichtsjahr bildete sich in mehrheitlich überdurchschnittlichen Wasserständen ab. NW-Stürme verursachten auch die drei Sturmfluten des Jahres 2004, von denen die stärkste mit 3.54 m über NN am 18. November eintrat (Sturm ›Pia‹).

Die zeitliche Entwicklung der Hoch- und Niedrigwasser seit 1971 zeigt, dass windstaubedingte, außergewöhnlich hohe Wasserstände vor 1988 fast ausnahmslos im Herbst eintraten und seither bevorzugt auf die Wintermonate entfallen. Dieser Regimewechsel ereignete sich zeitgleich mit dem Regimeshift der Nordseetemperatur. Beide stehen in ursächlichem Zusammenhang mit Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation (Mischmasch-Klima).

Die aus den wöchentlichen Analysen der Oberflächentemperaturverteilung abgeleitete Nordseetemperatur lag im Jahresmittel nur 0.2 °C unter der Rekordtemperatur von 11.0 °C im Jahr 2002; nach der 1969 beginnenden Rangstatistik war 2004 das viertwärmste Jahr. Der deutlich zu warme Winter, der durch eine Rekordtemperatur von 9.1 °C im Dezember 2003 eingeleitet wurde, ließ an der deutschen Nordseeküste keine Meereisbildung zu. Einer langsamen Renormalisierung der Oberflächentemperaturen, die bis in den Juli (0.3 K) andauerte, folgten ein drastischer Temperaturanstieg im August (2.1 K über dem Klimanormalwert von 15 °C) und wiederum ein signifikant zu warmer Herbst. Während der Nordseegesamtaufnahme (August 2004) wurde eine stabile Temperaturschichtung mit vergleichsweise tiefer Sprungschicht festgestellt. Auch die Temperatur des Tiefenwassers lag infolge des vorangegangenen milden Winters sowie des starken Einstroms warmen atlantischen Wassers oberhalb langjähriger Mittelwerte. Im Zeitraum 1988 – 2004 war die Oberflächentemperatur der Nordsee für 78 % aller Monate wärmer als normal; 70 % der Winter waren eisfrei.

Das Warmregime, das im Herbst 1987 ein 10-jähriges Kaltregime ablöste, dauerte weiter an. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur ist an ein hybrides Windklima gekoppelt, dessen Eigenschaften monsunartigen jahreszeitlichen Wechseln unterliegen, die wiederum spontanen Umpolungen in Abständen von 5 bis 15 Jahren unterworfen sind; diese bi-stabilen, hybriden klimatischen Bedingungen wurden als Mischmasch-Klima bezeichnet. Für das rezente Warmregime (Kaltregime) ist ein Alternieren zwischen einem gehäuften Auftreten maritimer westlicher Winde im Winter (Sommer) und kontinentaler östlicher Winde im Sommer (Winter) charakteristisch. Dieser Befund wurde durch entsprechende Unterschiede in den saisonalen Luftdruck-

verteilungen über der Nordsee weiter belegt. Der letzte Phasensprung im Windregime (1988) ging nicht nur mit einem spontanen Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur (0.9 K), einem gehäuften Auftreten eisfreier bzw. dem Ausbleiben starker Eiswinter (Ausnahme 1996), höheren Salzgehalten und einer jahreszeitlichen Verschiebung hoher Wasserstände einher. Anderswo wurde gezeigt, dass es gleichzeitig zu dramatischen Veränderungen auf allen trophischen Ebenen (Plankton, Fisch, Benthos) des Ökosystems Nordsee kam.

Die beobachtete Zunahme des Salzgehalts steht in ursächlichem Zusammenhang mit andauernd erhöhten Salzgehalten im Nordostatlantik, einer starken Häufung von NW-Wetterlagen im Nordseeraum und einer prononcierten Zyklonalität des Strömungsfeldes. Die relative Nordseefläche mit bodennahen Salzgehalten  $> 35$  erreichte im Jahr 2004 eine Rekordausdehnung von 53 %. Der Salzgehalt im ›Fair-Isle Current‹ am NW-Rand zum Atlantik unterliegt quasizyklischen Veränderungen im Periodenbereich von 6 – 9 Jahren, der auch im Spektrum des NAO-Index hohe Varianzanteile enthält. Die Phasenlage dieses Quasizyklus befand sich im Jahr 2004 im Maximum.

Die Abflussraten der Elbe lagen weiterhin und in nahezu allen Monaten unter den klimatologischen Werten. Diese seit April 2003 andauernde geringe Wasserführung wird als Konsequenz des extremen Trockenjahres 2003 gewertet. Die im Einzugsgebiet der Elbe durchweg normalen Niederschlagsmengen wurden vermutlich verstärkt zur Grundwasserneubildung herangezogen. Die zeitliche Entwicklung des Salzgehalts bei Helgoland Reede verlief meist antiparallel zu der des Elbabflusses, so dass die monatlichen Salzgehalte hier mehrheitlich die klimatologischen Mittelwerte übertrafen.

## Meereschemie

Vom BSH wurden im Rahmen des chemischen Überwachungsprogramms fünf Messkampagnen in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) durchgeführt. Die entnommenen Meerwasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben wurden direkt an Bord auf verschiedenste Stoffgruppen analysiert oder für spätere Laboruntersuchungen konserviert. Untersuchungen außerhalb der AWZ, die geographisch im Wesentlichen mit der Deutschen Bucht übereinstimmt, waren im Jahr 2004 nur innerhalb der Nordsee gesamttaufnahme im Juli/August möglich und aus logistischen Gründen auf Nährstoffbeprobungen und in diesem Zusammenhang relevante Variablen wie Chlorophyll-a und Sauerstoff beschränkt.

Im Gebiet der Deutschen Bucht wurden umfangreiche Untersuchungen zum chemischen Belastungszustand des Meerwassers durch Nährstoffe, Spurenmetalle, künstliche Radionuklide, Pestizide und andere organischen Verunreinigungen angestellt, so dass sich hier ein guter räumlicher Überblick gewinnen ließ. Die Gehalte von Spurenmetallen und organischen Schadstoffen wurden darüber hinaus in Sedimentproben bestimmt.

Im Untersuchungsgebiet (AWZ) sind Flussfrachten, insbesondere die der Elbe, die Hauptquelle für die Mehrzahl der analysierten Stoffe und Verbindungen. Diese Stoffe breiten sich mit der gewöhnlich zyklonalen Zirkulation in der Deutschen Bucht nordwestwärts aus (Elbfahne), wobei sich die Stoffkonzentrationen durch Vermischung mit geringer belastetem Meerwasser fortwährend reduzieren. Die räumlichen Konzentrationenmuster sind der Salzgehaltsverteilung dabei umso ähnlicher, je dominanter der

Vermischungsprozess ist (z. B. Nährstoffverteilungen in Zeiten geringer biologischer Aktivität).

Abweichungen, die sich insbesondere in einem stärkeren Konzentrationsgefälle zur offenen See hin zeigen, als bei konservativer (d. h. weitgehend von den Strömungsbedingungen abhängiger) Ausbreitung zu erwarten wäre, sind oftmals Folge einer ausgeprägten Neigung des jeweiligen Stoffes, sich an Schwebstoffe anzulagern (Schwebstoffaffinität). Diese Eigenschaft hat eine relativ schnelle Abreicherung in der Wassersäule und Anreicherung im Sediment zur Folge (Sedimentation), so dass die Kontamination des Meeresbodens die des Meerwassers häufig erheblich übersteigt.

Hohe Schadstoffgehalte des Sediments belegen zwar, dass das Subsystem Meeresboden für viele Stoffe, die aus externen Quellen in das Subsystem Meerwasser eingetragen werden, eine Senke darstellt; andererseits ist das Sediment für dieselben Stoffe eine interne Quelle des Gesamtsystems Nordsee – denn sturm- und gezeitenbedingte starke Strömungen und Turbulenzen führen in den weitgehend flachen und sandigen Gebieten der Nordsee zu Sedimentverfrachtungen und Resuspension. So sind die gegenwärtigen Volumenaktivitäten radioaktiver Stoffe in der Deutschen Bucht nur zu einem Bruchteil durch (reduzierte) rezente Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlagen erklärbar; die Hauptquelle stellen reaktivierte Nuklide aus dem hochbelasteten Sediment der Irischen See dar.

Maßnahmen zur Reduktion externer Schad- und Nährstoffeinträge (Quellstärken) führen also nicht notwendig umgehend zu einem verbesserten chemischen Zustand der Nordsee. Denn gleichgerichtete oder entgegenwirkende natürliche Prozesse (z. B. Sturmfrequenzen, Niederschlagsraten, Wasserführung der Flüsse, Strömungsanomalien) bestimmen Quellstärke, Ausbreitung und Verteilung von Stoffen und Verbindungen in der Meeresumwelt wesentlich mit. Die Belastungsvariabilität setzt sich demnach aus natürlichen und anthropogenen Komponenten zusammen, deren Quantifizierung oft problematisch ist und deshalb die Beurteilung der Wirksamkeit und Effizienz ökologischer Maßnahmen erschwert. Eine zunehmende Einbeziehung der »physikalischen Anomalien« des Systems Nordsee ist darum essentiell für die Interpretation und Bewertung seines chemischen Zustands.

Die wichtigsten Ergebnisse zu Nährstoffen, organischen Stoffen, Metallen und Radionukliden sind den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

## Nährstoffe

Die räumlichen Verteilungsmuster des Phosphat- und Silikatgehalts sowie der Summenkonzentration von Nitrat und Nitrit im Meerwasser der Deutschen Bucht entsprechen im Winter denen der Salzgehaltsverteilung in hohem Maße, da in dieser Jahreszeit geringer biologischer Aktivität hydrodynamische Vermischung der dominante Prozess ist.

Die regressiv aus Salzgehalts- und Nährstoffanalysen abgeleiteten, für Küstenwasser (Salzgehalt 30) und Meerwasser der eigentlichen Deutschen Bucht ( $S = 33$ ) repräsentativen Nährstoffgehalte unterschieden sich im Winter 2004 wenig von denen des Vorjahreswinters. Die Phosphatgehalte lagen in der Deutschen Bucht wenig, im Küstenwasser deutlich über den Vergleichswerten von 1936. Hohe Konzentrationen der Stickstoffverbindungen zeigten eine nach wie vor erhebliche Nährstoffbelastung an.

Die durch industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten wenig beeinflussten Silikatkonzentrationen lagen im Bereich natürlicher Schwankungen.

Das stabil geschichtete Nordseewasser zeichnete sich im Sommer 2004 durch eine nährstoffarme Deckschicht aus, in der die Nährsalze, besonders Nitrat, das Algenwachstum limitierten. Chlorophyllmaxima befanden sich daher meistens im Bereich der Thermokline, da hier noch ausreichend Licht und Nährstoffe aus dem Bodenwasser für das Algenwachstum zur Verfügung standen. Die Limitierung spiegelte sich auch in der Zusammensetzung der partikulären Stoffe (C:N Verhältnisse) wider. Der sommerliche Nährsalzverbrauch wird zum großen Teil durch die Produktion gelöster organischer Stickstoff- und Phosphorverbindungen kompensiert, welche dann die in der Wassersäule vorhandenen Verbindungen dominieren.

Die Verteilung der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser war gegenüber derjenigen im Sommer 2003 recht ausgeglichen. Die stärksten Untersättigungen traten in der östlichen Nordsee auf, lagen bei 85 % und nur örtlich jenseits des Grenzwerts zwischen guter und mäßiger Sauerstoffversorgung (75 %).

Insgesamt entsprachen die monatlichen Konzentrationen der meisten Nährstoffe bei Helgoland Reede im Jahr 2004 den Mittelwerten der Periode 2000 – 2003 oder unterschritten diese sogar. Lediglich die Phosphatgehalte lagen fast ganzjährig nicht nur über diesen Vergleichswerten, sondern auch insgesamt leicht über den Mittelwerten der 1990er Jahre.

## Organische Schadstoffe

Im Jahr 2004 wurden in der Deutschen Bucht im Mai und Juli/August Meerwasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben entnommen und auf bis zu 120 verschiedene organische Verbindungen untersucht. Für die meisten Schadstoffe ist die Elbe die Haupteintragsquelle. Zur Zeit lassen sich die Konzentrationen des Meerwassers besser bewerten als die des Sediments. Für die Mehrzahl der organischen Stoffe sind robuste Trendangaben bislang nicht möglich, weil die Messreihen noch zu kurz und/oder die raumzeitliche Variabilität der Gehalte sehr groß ist.

Generell unterscheiden sich die räumlichen Verteilungen der diversen Stoffe vor allem hinsichtlich des Konzentrationsgefälles von der Küste zur offenen See hin. Für unpolare Schadstoffe – wie etwa die chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) HCB, PCB und DDT oder hochkondensierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) – ist dieses Gefälle aufgrund ihrer Schwebstoffaffinität und demzufolge Sedimentationsneigung erheblich steiler ausgeprägt als für polare organische Stoffe. Letztere sind im Meerwasser auch außerhalb der Elbfahne in höheren Konzentrationen anzutreffen.

Die Konzentrationen der relativ polaren Hexachlorcyclohexan-Isomere  $\alpha$ - und  $\gamma$ -HCH sind im Zeitraum 1989 – 2004 stark zurückgegangen. Die Gehalte an  $\alpha$ -HCH halbierten sich in der Deutschen Bucht alle 4 Jahre. Die  $\gamma$ -HCH-Gehalte waren zwar bis etwa 1998 nur schwach rückläufig, halbierten sich jedoch seither alle 2 Jahre. Die Konzentrationen beider Isomere liegen inzwischen weit unter 0.5 ng/L. Die langfristigen Abwärtstrends setzten sich auf den meisten Messstationen der Deutschen Bucht im Jahr 2004 fort, obgleich  $\alpha$ - und auch  $\beta$ -HCH in der Elbefracht in bis zu 10fach höheren Konzentrationen auftraten. Vor der nordfriesischen Küste (Elbfahne) wurden für  $\alpha$ -HCH folgerichtig stagnierende oder zunehmende Gehalte festgestellt.

Aufgrund von insgesamt 86 Meldungen akuter Ölverschmutzungen im Jahr 2004 war eine Grundbelastung durch aliphatische Kohlenwasserstoffe (Alkane, Reste von Erdölkohlenwasserstoffen) zu erwarten und nachweisbar. In weiten Teilen der Deutschen Bucht waren jedoch einzelne Alkane dominierend, die auf biogene Quellen (insbes. Algen) zurückzuführen sind.

Das Stoffspektrum der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK, z. B. Naphthalin, Anthracen, Benzo[a]pyren) weist Verbrennungsrückstände fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Holz) als Hauptquelle aus. Die PAK-Gehalte des Meerwassers zeigten ein mit der Molekülgröße zunehmendes Gefälle zur offenen See hin und lagen ohne erkennbare Trends im Variationsbereich der vorangegangenen Jahre.

Obwohl lipophile Schadstoffe im Sediment in ca.  $10^4$ - bis  $10^6$ -fach höheren Konzentrationen als im Meerwasser vorkommen, lassen sich Quellenkorrelationen oder zeitliche Trends kaum feststellen. Der Bezug auf organischen Kohlenstoff (TOC) statt Trockenmasse (DW) ergibt nur z. T. ein einfacher zu bewertendes Bild. Sowohl für CKW, als auch für PAK wurden die höchsten Konzentrationen auf Stationen mit relativ hohen Schlickanteilen im Bereich der Elbmündung und der Weißen Bank gemessen. In Gebieten mit hohem Sandanteil wurden dagegen nur sehr geringe Schadstoffkonzentrationen vorgefunden.

Durch verbesserte Analysemethoden ist inzwischen eine Vielzahl polarer Schadstoffe (insbesondere Pestizide) nachweisbar. Die seit dem Jahr 2000 regelmäßig untersuchten Verbindungen liegen im Meerwasser oft in erheblich höheren Konzentrationen vor als klassische, lipophile Schadstoffe. Sie unterliegen darüber hinaus meist einem ausgeprägten Jahresgang, der mit den Applikationszeiten der Pestizide in der Landwirtschaft in Verbindung steht. Das Herbizid Atrazin wurde in der Deutschen Bucht weiterhin in relativ hohen Konzentrationen nachgewiesen (Median: 3 ng/L), obwohl sein Einsatz in Deutschland nicht mehr zulässig ist. Auch die Gehalte der Herbizide Isoproturon und Diuron waren im Jahr 2004 relativ hoch (Mediane in Küstennähe: 1.2 und 5.0 ng/L).

## Metalle

Ebenso wie viele unpolare organische Stoffe zeigten die Elemente Quecksilber, Cadmium, Blei, Kupfer und Zink in der gelösten Phase ein starkes Konzentrationsgefälle von küstennahen Gebieten zur offenen See hin. Belastungsschwerpunkte waren die innere Deutsche Bucht und das Elbeästuar, aber auch in den Mündungsgebiete von Weser und Ems wurden erhöhte Konzentrationen nachgewiesen.

Die Konzentrationen der Elemente Cadmium, Blei und Zink im filtrierten Wasser und Quecksilber im unfiltrierten Wasser waren bis etwa 1990 rückläufig, stagnieren jedoch seither. Im Jahr 2004 lagen die gelösten Konzentrationen der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei und Zink in der äußeren Deutschen Bucht im Hintergrundbereich oder wenig oberhalb davon. In Küstennähe wurden die Hintergrundgehalte von Zink und Cadmium deutlich überschritten. Von den gemessenen Metallbelastungen des Meerwassers geht nach heutigem Kenntnisstand keine unmittelbare Gefahr für das marine Ökosystem aus.

Mit den Flussfrachten emittierte Metalle werden vorzugsweise im küstennahen Sediment angereichert. Vor allem Quecksilber, Silber, Zink, Cadmium, Blei und Kupfer wurden hier in erheblich höheren Konzentrationen angetroffen als weiter seewärts. Ent-

lang der schleswig-holsteinischen Küste waren insbesondere Silber und Quecksilber stark angereichert, was deutlich auf Emissionen aus der Elbe hinweist. Im Gegensatz zu den übrigen Elementen wurden für Blei in der äußeren Deutschen Bucht ähnlich hohe Gehalte festgestellt wie im küstennahen Sediment. Die Gehalte der Elemente Quecksilber, Zink und Blei lagen im gesamten Untersuchungsgebiet, die von Cadmium und Kupfer vor allem in Küstennähe über den Hintergrundwerten.

Seit Beginn der regelmäßigen Überwachung in den 1970er Jahren sind vor allem die Quecksilber-, Kupfer-, Cadmium- und Nickelgehalte in der Feinkornfraktion insbesondere der küstennahen Oberflächensedimente deutlich zurückgegangen. Zinkgehalte zeigten nur hier – speziell vor der niedersächsischen Küste – rückläufige, im übrigen Gebiet der Deutschen Bucht uneinheitliche Tendenzen. Eine langfristige zeitliche Entwicklung der Bleigehalte ist nicht feststellbar. Im ehemaligen Dünnsäureverklappungsgebiet nordwestlich von Helgoland wurden weiterhin vor allem für Eisen aber auch Zink, Blei und Arsen höhere Gehalte gemessen als in der Umgebung. Trotz der Beendigung der Verklappungsaktivität im Jahr 1989 sind rückläufige Konzentrationen hier bislang nicht erkennbar. Im Einflussbereich der Elbe wurde in letzter Zeit eine wieder stärkere Sedimentbelastung durch Quecksilber aber auch Blei und Zink festgestellt.

## Radioaktive Stoffe

Die Überwachung war im Jahr 2004 auf die dosisrelevanten Radionuklide  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und die Transurane  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$  in der Deutschen Bucht fokussiert. Die Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen der Radionuklide wiesen hier insgesamt nur noch geringe räumliche Unterschiede auf. Die Konzentrationen lagen wenig über denen im Oberflächenwasser des Nordatlantiks, die auf den globalen Fallout atmosphärischer Kernwaffentests zurückzuführen sind. Die gegenüber dem Küstenbereich leicht höheren Konzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  im nordwestlichen Seegebiet kamen insbesondere durch resuspendiertes Material aus dem hochbelasteten Sediment der Irischen See und rezente Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlage Sellafield zustande. In den Konzentrationsverteilungen von  $^{90}\text{Sr}$  war ein charakteristischer Süßwassereintrag erkennbar, der zeitgleich mit den Abflussraten der Elbe im März maximal war.

Die effektive Gesamtexposition beträgt in Deutschland durchschnittlich 4 mSv pro Jahr und Person, wovon die Hälfte auf medizinische, insbesondere röntgendiagnostische Maßnahmen zurückzuführen ist. Die Kontamination der Nordsee durch künstliche Radionuklide trägt zur Strahlenexposition der Bevölkerung nur über den Expositionspfad »Fisch- oder Meeresfrüchteverzehr« bei. Aus einem durchschnittlichen Konsum von 14 kg im Jahr resultiert eine effektive Dosis von maximal 0,2  $\mu\text{Sv/a}$ , die deutlich unter der laut Strahlenschutzverordnung »trivialen Dosis« (10  $\mu\text{Sv/a}$ ) bleibt. Da sich aus der Anreicherung von Radionukliden in der Nahrungskette kein signifikanter Dosisbeitrag für den Menschen ergibt, dürfte dies auch für Flora und Fauna der Nordsee zutreffen.



# Summary

The North Sea is a complex dynamic system whose state is changing subject to both, natural processes and environmental pollution due to a multitude of industrial activities in the densely populated riparian states. Contaminants and nutrients that enter the system through river discharge and atmospheric deposition are well-known to adversely effect its ecological state. Meanwhile, evidence has grown, however, that anthropogenic activities are interfering with the intensity and course of natural physical processes as well.

For example, analyses of sea surface temperature observations, which locally date back to the 19<sup>th</sup> century, revealed that cold and warm periods of 5 – 15 years in length have been alternating since at least the past 130 years in the North Sea region. These natural regimes and abrupt regime shifts of temperature together with the underlying changes in atmospheric circulation have been termed ›mishmash climate‹. The current warm regime that jumped into existence 1988 is the longest and warmest period on record since the beginning of measurements in 1873. There is no serious denying now of the impact of anthropogenic climate warming.

Not only temperatures and temperature-dependent variables of the North Sea are affected by climate change but ultimately all system variables coupled immediately or obliquely to the state of the atmosphere. Among the variables investigated more closely in this report are water level and sea ice. However, regime shifts and climate change are also reflected in phytoplankton biomass, community structure, and fish migration.

»Maintenance and repair« of technical systems such as motorcycles or biological systems, among them humans, are best performed by mechanics or physicians distinguished by their holistic understanding of the system at hand, in particular its functionality and the entanglement of interactive processes. The joint presentation of the atmospheric, oceanographic, and chemical state attempts to integrate the results from these disciplines and thus aims at a better, holistic understanding of the North Sea system. Such understanding is a key prerequisite for sustainable management and implementation of effective measures to protect the marine environment.

The main findings as to the state of the North Sea in 2004 are summarized below.

## Atmospheric Physics

The atmosphere is the motor, which substantially drives and controls the development of the oceanographic state of the North Sea. Characteristics and anomalies of the atmospheric circulation often mark the beginning of cause-effect chains extending from oceanographic state variables beyond distribution patterns of pollutants and nutrients down to biological anomalies.

The difference in atmospheric pressure between the Azores and Iceland is a simple measure of the strength of the zonal circulation over the North Atlantic. While, on average, pressure decreases from south (Azores High) to north (Icelandic Low) such that westerly winds prevail, short-term pressure gradients in the opposite direction are possible as well (easterly winds). This pressure see-saw is known as North Atlantic Oscillation (NAO), while the index characterizing the state of the oscillation is called NAO index. In accord with the state of the NAO, enhanced (+) and weakened (–) zonal cir-

ulation states occurred across the North Sea in September (+), October (-), and December (+). Extreme NAO states in April (+) and June (-), however, took place concurrently with opposing circulation anomalies in the North Sea region. The correspondence among the states of zonal circulation in both regions is statistical in nature and is limited to the winter half-year. The winter NAO index (DJF quarter), at  $-0.6$ , was weakly negative, pointing to a relatively strong meandering of the circulation.

The calendar of weather types for the North Sea region, which was derived from daily atmospheric sea level pressure fields, has proved useful a tool in the interpretation of anomalies and special events in variables (in)directly related to atmospheric circulation. As to the very weather types, it is worth noting that anticyclonic conditions A, which form the strongest fraction among the 27 different types, occurred much less frequently than in the preceding year (19% vs. 27%). With 15 % the proportion of circulation types NW, ANW, and CNW has about doubled since 2002. The frequency of storm events went up from 16 days in 2003 to 20 days. Severe and very severe storms did not occur, however.

Robust weather type statistics on monthly and seasonal time scales were performed on only the main types A, C (low pressure weather), NE, SE, SW, and NW, and were evaluated on the basis of empirical distributions. Over the year, only NW and NE types were unusually frequent (80 days) or rare (13 days), respectively, while on shorter time scales significant departures from normal also occurred with other circulation types. Particularly remarkable are alternations between SE and NW anomalies, some of them extreme, in April / May and from August (SE) through November (NW). While in the relative cold winter 2003 (JFM) A types had been dominant at 46 days, strong cyclonic activity in January and February 2004 led to considerably milder air temperatures.

The analysis of seasonal atmospheric pressure fields revealed only minor departures from climatological distributions (1971 – 2000) in terms of patterns and intensities. Atmospheric circulation on these time scales may thus be rated »normal«. This normalcy, however, resulted from mutual cancellation of complementary, in part, substantial anomalies on monthly time scales. The monthly anomaly fields had three basic recurrent patterns, viz. N (2 = Feb, 5, 11), W (6, 9, 12), and SE (1, 4, 8, 10). The majority of these affected the meridional component of the wind fields, indicating an enhanced exchange of thermal energy between higher and lower latitudes through the North Sea sector.

Seasonal shifts in the influence of the Icelandic Low and Azores High were apparent from the climatological trajectory of the North Sea wind. Uniformly strong WSW winds from October through March are typical of the cold season, which abruptly gives way to a period of stagnation in April and May when winds are changeable and may blow from any direction (»April does as it will«, German proverb). In the course of spring, the influence of the Azores High eventually prevails. Weak WNW winds at its northern edge from early June characterize typical North Sea summer weather.

In 2004, the trajectory of the North Sea wind undulated about the climatological path. The crossings were usually linked to monthly alternating anomalies of the meridional wind component, which tended to cancel out one another. The total distance along the current trajectory was covered at an average velocity of 8.4 m/s, which exceeded the annual mean velocity of 2003 (7.6 m/s) but clearly fell short of the climatological wind speed (9 m/s). The net displacement in 2004 corresponded to a mean vector wind of

4.0 m/s from W (261°), which hardly differed from the climatological vector wind (3.7 m/s from WSW, 256°).

The annual cycle of global radiation on the island of Norderney was generally in line with climatological data. Minor surplus radiation in March, April and September was attributed to high-pressure weather. The seasonal evolution of air temperature on Norderney was normal as well. Major positive departures occurred in April and August due to continental warm air advection from SE. At 16.7 °C, the mean temperature in summer (JJA) would appear cool in comparison to the »mediterranean« extremes of preceding years (2002: 17.9 °C; 2003: 18.3 °C), but in fact was close to normal, statistically.

## Physical Oceanography

The atmospheric circulation in the North Sea region imprints itself on patterns and intensities of surface currents. The characteristic current pattern is large scale cyclonic (counterclockwise) rotation due to prevailing winds from SW to NW. In 2004, this pattern was not restricted to winter and fall, but was a prominent feature of the summer circulation as well. Stronger wind forcing than in the preceding year led to enhanced current speeds and a reduced directional variability. Unusually frequent NW winds resulted in a strong northerly inflow of saline Atlantic water, while net transports through the Channel and the Kattegat, at 0.015 and 0.044 Sv/a, respectively, were in the normal range.

The sequence of daily current patterns in the German Bight is documented in the current calendar. In 2004 (2003), cyclonic circulation was recorded on 160 (150) days, anticyclonic states on 71 (50) days, and variable circulation patterns on 77 (109) days. The reduced frequency of variable (diffuse) circulation states resulted from a sharp fall in high-pressure weather types, usually associated with weak winds. The increase in anticyclonic current patterns, on the other hand, corresponded to an enhanced frequency of NW weather types. Other close associations between current and weather calendar were identified. SW weather types, for instance, almost exclusively generate cyclonic current states. Both calendars are important tools in the interpretation of anomalous events in dependent state variables.

Waves are wind-induced perturbations of the sea surface. The wave climate in 2004 was characterized by seasonal geographic distributions of significant wave height and direction of wind sea and swell. In winter, summer, and fall, mean wave heights were up to 0.5 m higher than in the same seasons of the preceding year, when weak winds prevailed. Nonetheless did mean and maximum wave heights at representative locations fall short of climatological reference values. Both, wind and wind sea, on average came from westerly directions, except in spring. Swell was directed NW in all seasons. During the NW storm »Pia« of November 18, significant wave heights of about 8 m occurred in the central and southern North Sea.

Regional differences in wind forcing and wind sea were pointed out for two representative positions in the German Bight and the central North Sea. In the German Bight, wind and wave direction were found to have bimodal distributions (double peak); a distinct secondary peak in the E-SE sector was observed only here. The main peak at either position varied seasonally between SW and NW and was associated with highest wind speeds and wind seas. The mean wave height, at 1.4 m, was 0.5 m lower than

in the central North Sea, and wave heights exceeding 2 m occurred only half as often. Maximum wave heights were always lower in the German Bight, except for winds and wind seas from NW.

Cuxhaven, located at the mouth of the Elbe River which opens toward NW, has recorded highest water levels and most severe storm surges in connection with NW winds, and lowest levels with winds from the opposite direction (SE). The unusually high frequency of NW weather types in 2004 was reflected in above-average water levels through large parts of the year. NW storms also accounted for the three storm surges in the year under review, with the highest water level of 3.54 m above MSL recorded on November 18 during storm ›Pia‹.

The temporal evolution of high and low water levels since 1971 shows that exceedingly high water levels occurred almost exclusively in autumn prior to 1988, but preferably during the winter months since then. This regime shift came about at the same time as the regime shift in North Sea SST, both of which relate to changes in atmospheric circulation (›mishmash climate‹).

The annual mean North Sea SST (derived from BSH's weekly geographical SST analyses) was just 0.2 K below the record temperature of 11 °C set in 2002; 2004 was the fourth warmest year on record dating back to 1969. With a record temperature of 9.1 °C in December 2003, winter turned out considerably too warm from the start. As a consequence, sea ice failed to form on the German North Sea coast. The gradual return to close to normal temperatures until July (0.3 K) was followed by a steep temperature rise of 2.1 K above normal (15 °C) in August and a significantly too warm fall. During the North Sea survey performed by BSH in August 2004, a stable thermal stratification together with a relatively deep thermocline were found. Deep-water temperatures also exceeded long-term means on account of both, the preceding mild winter and a strong northerly inflow of warm Atlantic water. In the period 1988 – 2004, North Sea surface temperatures in 78 % of all months were higher than normal, while 70 % of the winters were free of sea ice.

The warm regime, which ended a 10-year cold regime in fall 1987, has continued to this day. The regime character of North Sea SST is linked to a hybrid wind climate whose properties undergo monsoon-type seasonal shifts, which in turn are subject to spontaneous reversals at intervals of 5 to 15 years. The recent warm regime (preceding cold regime) is characterized by the alternation of enhanced frequencies of maritime westerly winds in winter (summer) and continental easterly winds in summer (winter); for brevity, these bi-stable, hybrid climatic conditions were termed ›mishmash climate‹. Further evidence for these findings is seen in corresponding differences in seasonal distributions of atmospheric sea level pressure over the North Sea.

The last sudden phase shift in the wind regime in 1988 was accompanied by a spontaneous increase in mean SST of 0.9 K, more frequent ice-free winters, a complete absence of severe ice winters (except in 1996), higher salinities, and a seasonal shift in the occurrence of wind-induced high sea levels. Moreover, as was shown elsewhere, the North Sea ecosystem underwent dramatic changes at all trophic levels (plankton, fish, benthos) at the same time.

The observed increase in North Sea salinity is causally related to persistently high salinities in the Northeast Atlantic, the enhanced frequency of NW weather types, and the pronounced cyclonicity of the current field. The relative area of the North Sea with near-bottom salinities exceeding 35 assumed a record extent of 53 % in 2004. Salinity

in the Fair Isle Current at the NW boundary to the North Atlantic undergoes quasi-cyclic variations at periods of 6 to 9 years, which stand out in the variance spectrum of the NAO-index as well. This quasi-cycle was at maximum in 2004.

The runoff rates of Elbe River remained below climate normals almost throughout the year. These low flow volumes, which persisted since April 2003, were continuing consequences of the extreme dry-year 2003. Precipitation, which was about normal for the catchment area of the Elbe River, probably was used foremost in replenishing groundwater reserves. The temporal course of salinity at Helgoland Roads was mostly anti-parallel to that of Elbe River runoff. Hence, monthly salinities exceeded climatological means here most of the time.

## Marine Chemistry

Within its chemical monitoring programme, BSH carried out five monitoring campaigns in the German Exclusive Economic Zone (EEZ), largely corresponding to the German Bight. Samples of sea water, suspended particulate matter, and sediment were either analyzed on board the vessel or preserved for laboratory analyses at a later date for a variety of substance groups. In 2004, monitoring activities outside the EEZ were only possible during the North Sea overall survey in July / August and, for logistical reasons, were limited to nutrient sampling and associated variables such as chlorophyll-a and oxygen.

Comprehensive monitoring of the chemical pollution of sea water with nutrients, trace metals, artificial radionuclides, pesticides, and other organic pollutants was carried out in the German Bight and provided a good spatial overview of the present situation. In addition, concentrations of trace metals and organic pollutants were determined in sediment samples.

The main source of most substances and compounds here is riverine inputs, especially by the Elbe River. Since the general circulation in the German Bight is cyclonic, substances tend to spread in northwesterly direction (Elbe River plume), while concentrations decrease through mixing with less polluted sea water. Spatial concentration patterns thus are the more similar to the salinity distribution the more dominant this mixing process is (e. g. nutrient distributions in times of low biological activity).

Deviations particularly show in stronger concentration gradients toward the open sea than would be expected with conservative dispersion. They often result from a strong tendency of some substances to attach to suspended particulate matter (SPM affinity). This property brings about a relatively fast decrease in substance concentration in the water column at the expense of substance enrichment in sediments through SPM precipitation. Hence, pollutant levels in sediments often considerably exceed those in sea water.

On the one hand, high sediment pollutant levels prove that the subsystem ›seabed‹ is a sink for many substances entering the subsystem ›sea water‹ from external sources. On the other hand, sediment also is an internal source of these same substances for the total system because strong, storm and tide induced currents and turbulence are causing continuous sediment transports and resuspension in the largely shallow and sandy regions of the North Sea. For instance, only a fraction of the current volume activities of radioactive substances in the German Bight is due to recent, reduced dis-

charges from reprocessing plants. The main source is reactivated radionuclides from highly polluted sediments in the Irish Sea.

Consequently, measures to reduce external pollutant and nutrient inputs may not immediately improve the chemical state of the North Sea. Natural processes, among them storm frequencies, precipitation rates, discharge volumes of rivers, and current anomalies, by reinforcing or counteracting such measures, exert considerable influence not only on source strengths, but also on the dispersion and distribution of substances and compounds in the marine environment. Pollution variability thus has natural and anthropogenic components whose quantification often poses problems, rendering an assessment of the effectiveness and efficiency of ecological measures difficult. Therefore, it is increasingly necessary to take into account »physical anomalies« of the North Sea system when interpreting and evaluating its chemical state.

The most important monitoring results as to nutrients, organic substances, metals, and radionuclides have been compiled in the following.

## Nutrients

Spatial distribution patterns of phosphate and silicate levels as well as the summary concentration of nitrate and nitrite in German Bight sea water in winter closely resemble those of salinity because the dominant process during this season of low biological activity is hydrodynamic mixing.

Nutrient levels representative of coastal water (salinity 30) and sea water in the German Bight proper ( $S = 33$ ) were derived by regression analysis from salinity and nutrient measurements. In the winter of 2004, these levels did not differ much from those of the preceding winter. Phosphate levels in the German Bight were slightly above, in coastal waters clearly above, reference values from 1936. High concentrations of nitrogen compounds indicated that major nutrient loads are still present in these waters. Silicate levels, which are hardly influenced by industrial and agricultural activities, were within the limits of natural fluctuations.

In summer 2004, the North Sea was stably stratified in the vertical. The surface layer was characterized by a dearth of nutrients and algal growth was limited here, especially by nitrate. Chlorophyll maxima, therefore, were found mostly in the depth range of the thermocline, where light conditions and nutrients from the bottom layer were still sufficient for algal growth. Nutrient limitation was also reflected in the composition of particulate matter (C:N ratios). Nutrient consumption in summer is largely compensated by the production of dissolved organic nitrogen and phosphorus compounds, which consequently are dominant among the compounds present in the water column.

The distribution of oxygen saturation levels in the bottom water was well-balanced compared to conditions in summer 2003. Strongest oxygen deficiencies occurred in the eastern North Sea, at around 85 %, and dropped but locally below the 75 % threshold separating good from moderate oxygen supply.

On the whole, monthly levels of most nutrients at Helgoland Roads in 2004 corresponded to the mean values of the period 2000 – 2003 or even fell short of them. Only phosphate was measured at concentrations, which not only exceeded these reference values throughout the year, but were even slightly above the mean values of the 1990s.

## Organic Pollutants

In May and July / August of 2004, samples of sea water, suspended particulate matter, and sediment were taken in the German Bight and analyzed for up to 120 different organic compounds. The main input source of most pollutants is the Elbe River. At present, assessments of pollutant levels in sea water are more easy than in sediments. Moreover, robust trends in concentration cannot currently be identified for the majority of organic substances as time series still are too short and/or spatiotemporal variabilities are very high.

The main difference in spatial distribution patterns of many substances is due to the degree of decline in concentrations from the coast towards the open sea. Concentration gradients of non-polar pollutants – such as chlorinated hydrocarbons (CHC), HCB, PCB, and DDT or polycondensed polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) – are considerably steeper than those of polar organic substances. The differences in slope arise from the affinity of the former to adsorb to suspended particulate matter, which in turn tends to precipitate to the sea floor at short distances along the path of spread. By contrast, polar organic substances are encountered at high concentrations in sea water beyond the Elbe River plume.

In the German Bight, concentrations of the (relatively polar) hexachlorocyclohexane isomers  $\alpha$ - and  $\gamma$ -HCH dropped strongly in the period 1989 – 2004. Levels of  $\alpha$ -HCH decreased by half every four years. Though  $\gamma$ -HCH levels had decreased very slowly until about 1998, they dropped by half every two years since then. Meanwhile, concentrations of both isomers are well below 0.5 ng/L. These long-term downtrends continued also in 2004 at the majority of monitoring stations in the German Bight, despite the fact that there were up to tenfold higher concentrations of  $\alpha$ - and  $\beta$ -HCH in the Elbe River load. Off the North Frisian coast (Elbe River plume), however, unchanged or increased concentrations of  $\alpha$ -HCH were found in 2004.

In view of 86 reported cases of oil pollution in 2004, the presence of a basic level of aliphatic hydrocarbon pollution (alkanes, residues of petroleum hydrocarbons) had been expected and was confirmed by measurements. However, in large parts of the German Bight, individual alkanes originating from biogenic sources, in particular algae, were found to predominate.

The spectrum of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH, e. g. naphthalene, anthracene, benzo[a]pyrene) showed combustion residues of fossil fuels (coal, oil, wood) as the main source. Concentration gradients of PAH in sea water were found to become steeper toward the open sea with increasing molecular size. PAH levels were in the range of variability of preceding years and showed no trends of note.

Although lipophilic pollutants occur in sediments at concentrations exceeding those in sea water about  $10^4$ - to  $10^6$ -fold, hardly any source correlations or temporal trends can be identified. Relating concentrations to total organic carbon (TOC) instead of dry weight (DW) did not, generally, yield a much better assessable picture. Highest levels of both, CHC and PAH, were measured at stations around the Elbe River estuary and the White Bank where sediments contain high proportions of mud. By contrast, concentrations at sites with an abundance of sand were found to be very low.

Thanks to improved analytical methods, a large number of polar pollutants, specifically pesticides, can now be detected. These compounds, which have been monitored routinely since the year 2000, often have substantially higher concentrations in sea water than conventional lipophilic pollutants. In addition, many of them undergo a marked

annual cycle linked to application periods of agricultural pesticides. The herbicide atrazine continues to be present in the German Bight at relatively high levels (median: 3 ng/L), although its use is no longer legal in Germany. The levels of herbicides isoproturone and diurone were relatively high in 2004 as well; median concentrations in coastal waters were at 1.2 and 5.0 ng/L, respectively.

## Metals

As with many non-polar organic substances, spatial distributions of dissolved mercury, cadmium, lead, copper, and zinc display strong concentration gradients from the coast towards the open sea. Highest concentrations were found in the inner German Bight and Elbe River estuary, but elevated levels also occurred in the Weser and Ems estuaries.

Cadmium, lead, and zinc levels in filtered water, as well as mercury in unfiltered water, had declined until about 1990, yet have varied without clear trend since then. In 2004, the dissolved fractions of cadmium, copper, lead and zinc in the outer German Bight were on the order of background levels or slightly higher, while, near the coast, background levels of zinc and cadmium were clearly exceeded. According to current knowledge, the metal levels found in sea water do not pose an immediate threat to the marine ecosystem.

Metals originating from riverine inputs mainly accumulate in near-shore sediments. Most notably, mercury, silver, zinc, cadmium, lead, and copper were found here at considerably higher concentrations than further seaward. Along the coast of Schleswig-Holstein, enrichments of silver and mercury were found, which clearly are indicative of Elbe River inputs. Unlike the other elements, lead occurred at high levels of similar magnitude in both, sediments in the outer German Bight and near-shore samples. While mercury, zinc and lead levels exceeded background values in the entire domain, excessive cadmium and copper levels mainly occurred near the coast.

Since the beginning of routine monitoring in the 1970s, concentrations of mercury, copper, cadmium, and nickel have clearly decreased in the silt/clay fraction, especially in near-shore surface sediments. Decreasing zinc levels were found only here – specifically off the coast of Lower Saxony, while no uniform trend was detectable in the remainder of the German Bight. As to lead concentrations, no long-term temporal trend has been identified either. In the former acid waste disposal area northwest of Helgoland, levels of iron in particular, and to a lesser extent zinc, lead, and arsenic, continued to be above ambient levels. Even though acid waste discharge discontinued in 1989, contamination levels have not decreased here as yet. In sediments influenced by the Elbe River plume, levels of mercury, as well as lead, and zinc were found to have increased again lately.

## Radioactive Substances

Monitoring in 2004 focused on dose-relevant radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , and transuranics  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ , and  $^{241}\text{Am}$  in the German Bight. Generally, distributions of volume activity displayed but minor spatial differences here. Concentrations hardly exceeded those in North Atlantic surface water due to global radioactive fallout from atmospheric nuclear weapons testing conducted in the 1950s and 1960s. Activity levels of  $^{137}\text{Cs}$  in northwestern parts were slightly elevated as compared to those in coastal

waters. These enhanced concentrations are attributable chiefly to the presence of re-suspended material from highly polluted sediments of the Irish Sea and recent discharges of the Sellafield nuclear reprocessing plant. Spatial distributions of  $^{90}\text{Sr}$  activity contained a characteristic riverine signal, which concurrently peaked with Elbe River discharge rates in March.

On average, the total effective dose per person and year in Germany is 4 mSv, half of which is attributable to medical treatments, especially x-ray diagnostics. Radioactive contamination of the North Sea may contribute to radiative exposure of the population but through the pathway consumption of fish and other seafood. An average consumption of 14 kg per year would result in an effective dose of at most 0.2  $\mu\text{Sv/a}$ , which is far below the 'trivial dose' of 10  $\mu\text{Sv/a}$  as defined in the German Radiation Protection Ordinance. As the enrichment of radionuclides in the food chain does not contribute significantly to the total exposure of humans, this is likely to apply to flora and fauna in the North Sea as well.



# 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 Verweizens 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. In den Unterkapiteln werden die Themen, wenn möglich und sinnvoll, vom Aktuellen zum Historischen und vom Groß- zum Kleinräumigen hin abgehandelt. 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 Wetterlagenstatistik und eine Analyse der Luftdruckfelder im Meeresniveau erweitert.

Im Abschnitt Meeresphysik werden die wichtigsten ozeanographischen Zustandsgrößen diskutiert. Er enthält Beiträge zu Meeresströmung, Seegang, Wasserstand und Salzgehalt. Da sich Meereis als negative Temperatur (bzw. Temperatur als negatives Eis) auffassen lässt, findet man Informationen zum Meereis abweichend vom Vorjahresbericht im Abschnitt Temperatur. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur, dem auch hinsichtlich der Artenzusammensetzung besondere Bedeutung zukommt, wird im Zusammenhang mit regimetypischen Windbedingungen diskutiert.

## 1 Einführung

Das Kapitel Meereschemie enthält neben einem um ›Nährstofflimitierung‹ erweiterten Nährstoffabschnitt 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 von Wirkungsketten, die sich über ozeanographische Zustandsvariablen, Verteilungsmuster von Schad- und Nährstoffen bis hin zu biologischen Phänomenen wie Planktonblüten oder Anomalien in der Artenzusammensetzung erstrecken.

Eine Interpretation ozeanographischer Zustandsanomalien setzt also Kenntnisse über den Zustand der Atmosphäre voraus. Ein wichtiger Zustandsindikator ist der Nordatlantische Oszillationsindex. Dessen Aussagekraft beschränkt sich jedoch auf die kalte Jahreszeit, wenn die atmosphärische Zirkulation hinreichend stark ist, um eine spürbare Fernwirkung in der Nordseeregion zu erzeugen (LOEWE ET AL. 2003). Eine differenziertere, zuverlässigere aber auch aufwendigere Analyse des Zirkulationszustands resultiert aus der Betrachtung der großräumigen Luftdruckverteilungen über der Nordsee selbst. Diese bilden die Basis für die Klassifizierung täglicher Großwetterlagen, die Identifizierung von Sturmereignissen, aber auch für die erstmals präsentierte monatliche und saisonale Wetterlagenstatistik. Für diese längeren Zeitskalen wurden darüber hinaus Luftdruckklimatologien bestimmt, welche die Identifizierung und Bewertung aktueller Zirkulationsanomalien ermöglichen.

Einen weiteren Schwerpunkt dieses Kapitels bildet die statistische Analyse des »Nordseewindes«, der für diese Region repräsentativ ist. Der Nutzen der über die allgemeine atmosphärische Zirkulation gewonnenen Kenntnisse wird schließlich im Rahmen der Interpretation von Jahrgängen der Lufttemperatur sowie der Sonneneinstrahlung auf Norderney demonstriert.

Weitere Beiträge zu Wind- und Zirkulationsbedingungen werden in den Abschnitten 3.1.3, S. 67 (DB-Zirkulation), 3.2, S. 74 (Seegang) und 3.4.2, S. 95 (Mischmasch-Klima) angeboten, wo sie im Zusammenhang mit Strömungsmustern in der Deutschen Bucht, Seegang und Meerestemperaturregimes diskutiert werden. Atmosphärischen Ursachen für Zustandsanomalien anderer physikalischer oder chemischer Variablen wird ggf. im Rahmen der Diskussion der jeweiligen Zustandsgröße Rechnung getragen (z. B. *Abschnitt 3.3.2, S. 89, Wasserstandsentwicklung*).

## 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 ozeanographischen Zustandsgrößen (Strömung, Temperatur, Salzgehalt) hinsichtlich Muster und Intensität vom atmosphärischen Antrieb zeigt sich folgerichtig im Winter in statistischen Zusammenhängen zwischen diesen Variablen und dem 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 nicht »den« NAO-Index sondern diverse NAO-Indizes, die sich hinsichtlich Stationswahl, Standardisierungszeitraum (Basisperiode), Saisonlänge und demzufolge im Zahlenwert unterscheiden. Eine Auswahl solcher Indizes bietet *Abb. 2-1*. Der monatlich im CLIMATE DIAGNOSTICS BULLETIN veröffentlichte »NAO Teleconnection Index« des CLIMATE PREDICTION CENTERS wird hier noch als 700-hPa-Index verwendet ([ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele\\_index.nh.old](ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh.old))<sup>1</sup>. Der in früheren Berichten angegebene »Hurrell-Index« ([www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatmon](http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatmon)) wird seit April 2003 nicht mehr fortgeführt, vermutlich weil die WMO-Station 08513 (Ponta Delgada / Observatory) im Juni 2003 geschlossen wurde.

Für diesen Bericht ist ein NAO-Index maßgebend, 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 – 2004. Das »Überleben« dieses Index ist CH. LEFEBVRE vom DEUTSCHEN WETTERDIENST zu verdanken, die keine Mühen scheute, Luftdruckdaten der Ersatzstation 08512 (Ponta Delgada / Airport) aus Portugal zu beschaffen.

Aus *Abb. 2-1* ist ersichtlich, dass die qualitative Zustandsentwicklung der NAO von allen Indizes richtig wiedergegeben wird. Danach unterlag der NAO-Index im Jahr 2004 relativ starken Schwankungen um das 0-Niveau, die ab Jahresmitte hinsichtlich Intensität und Frequenz deutlich zunahmen. Der meteorologische Winter (DJF-Quartal

1. Der CPCADB-Index wird seit Mai 2005 auf Basis der 500 hPa Höhenanomaliefelder angegeben und wurde inzwischen für die Zeit seit 1950 neu bestimmt ([ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele\\_index.nh](ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh))

2003/4) hingegen stellte eine Phase recht hoher Persistenz dar, die durch einen schwach negativen NAO-Index von  $-0.6$  charakterisiert war (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). Mit dem NAO-Zustand konforme Verstärkungen bzw. Abschwächungen der Zonalzirkulation über der Nordsee waren für die Monate September und Dezember bzw. Oktober nachweisbar (vgl. S. 48). Die relativ extremen Zustände im April und Juni waren hingegen nicht oder allenfalls mit antiparallelen Zirkulationsanomalien im Nordseeraum assoziiert. Grundsätzlich üben die NAO-Zustände im Sommerhalbjahr keine herausragende Fernwirkung auf die Nordsee aus.

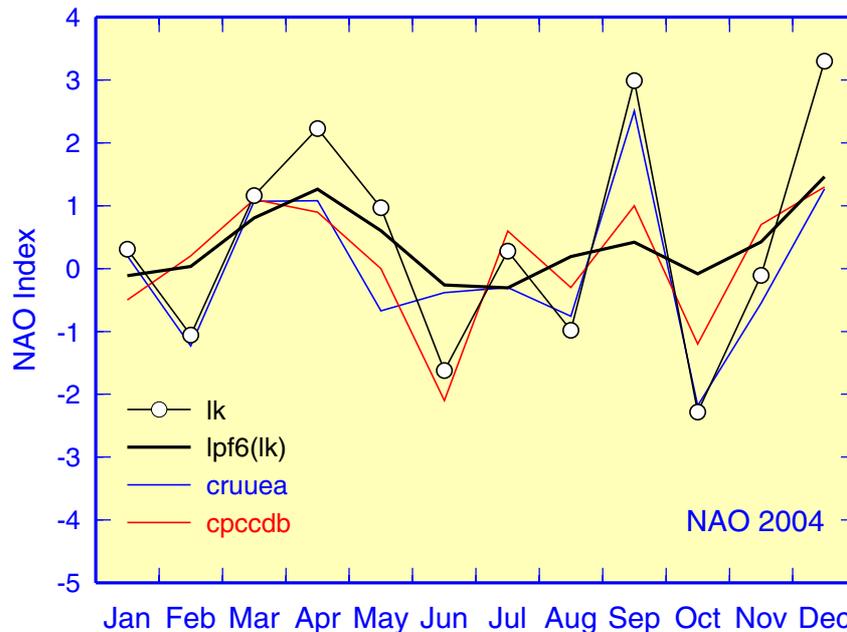


Abb. 2-1: NAO-Index 2004. lk: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998), lpf6(lk): tiefpassgefiltert über 6 Monate. cruuea: Gibraltar & Südwest Island ([www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao\\_update.htm](http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm)). cpccdb: Amplitude des NAO-Musters aus rotierter Hauptkomponentenanalyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes ([www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml)).

Fig. 2-1: NAO Index 2004. lk: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE AND KOSLOWSKI 1998), lpf6(lk): low-pass filtered (6 month). cruuea: Gibraltar & Southwest Island. cpccdb: Amplitude of NAO pattern from rotated principal component analysis of 700 hPa height anomalies.

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 dekadentlanger und dann spontan wechselnder Präferenzen der NAO für ihre negative bzw. positive Phase gedeutet, welche möglicherweise ursächlich mit den Temperaturregimes der Nordsee im Zusammenhang stehen (LOEWE ET AL. 2005).

Neben der relativen Häufigkeit der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879 zeigt Abb. 2-2 die dynamische Zustandsentwicklung der NAO von Januar bis Dezember 2004 (gelbe Kreise). Die Abfolge der ungefilterten Zustände ist scheinbar durch eine chaotische Sprunghaftigkeit um das 0-Niveau gekennzeichnet. Nur 3 der 12 Zustände entfallen auf die Attraktorregionen (rel. H.  $> 2\%$ ), während die Extremität der Zustände ab September durch ihre Randlage offensichtlich wird. Erst nach Filte-

rung des hochfrequenten Lärms treten elliptische Zyklen deutlicher hervor (Abb. 2-2, blaue Kreise), die im wellenförmigen Verlauf von  $\Delta \text{lpf6}$  in Abb. 2-1 eine Entsprechung haben. Besonders klar ist dieses oszillatorische Verhalten für das erste Halbjahr erkennbar, in welchem ein vollständiger Zyklus durchlaufen wurde.

Gegenüber dem Jahr 2003 hat sich die Dynamik der NAO etwas verstärkt (LOEWE ET AL. 2005), jedoch bei weitem nicht das Niveau des Jahres 2002 erreicht (LOEWE ET AL. 2003).

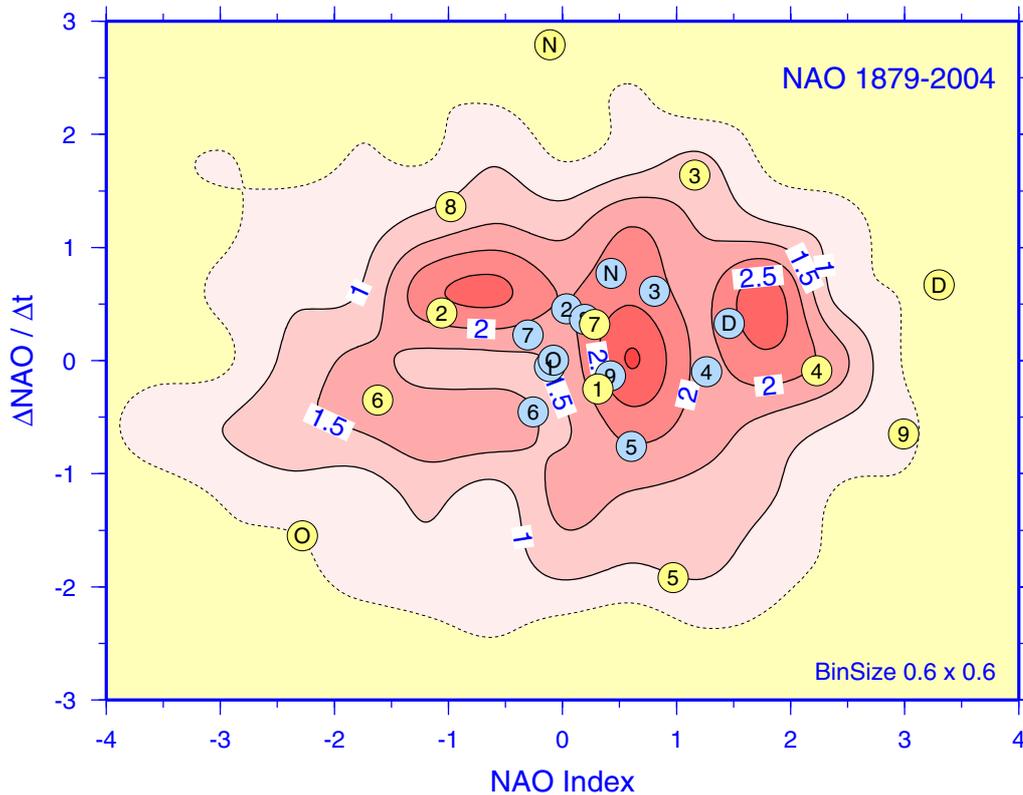


Abb. 2-2: Phasendiagramm der NAO als relative Häufigkeitsverteilung der monatlichen dynamischen NAO-Zustände seit 1879. Die Konturen 0,5, 1, 1,5 und 2 % sind Linien gleicher rel. Zustandsdichte (d.h. rel. Anzahl Zustände pro Klassenintervall, 0,6 x 0,6) und umhüllen 81, 62, 40 bzw. 18 % aller Zustände. 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 2004.

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 2004 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). Zur Objektivierung der ›Lamb Weather Types‹ wurde von JENKINSON UND COLLINSON (1977) ein automatisches Verfahren entwickelt, welches eine Klassifizierung der täglichen Großwetterlage ausschließlich auf Basis von Luftdruckdaten im Meeresniveau erlaubt. Auch durch seine Einfachheit ist diese Klassifizierungsmethode zu einem vielgenutzten Werkzeug z. B. bei der Analyse von regionalen Klimaänderungen avanciert (JONES ET AL. 1999, CHEN 2000, OMSTEDT ET AL. 2004).

Für diesen Bericht wurde das Verfahren 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](http://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 LOEWE ET AL. (2005).

Abb. 2-3 zeigt die Luftdruckverteilung für den stärksten SW-Sturm des Jahres am 4. Oktober 2004. Durch Auswertung des Luftdrucks an den gekennzeichneten 16 Gitterpositionen ergeben sich für den Wind- und Vorticity-Index 33.1 bzw. 15.8 hPa. Diese Werte entsprechen einer Windgeschwindigkeit von 20.5 m/s aus Kompassrichtung 204° und einer Wirbelstärke von 43°/Tag und gelten streng für die Position 55° N / 5° E. Die daraus abgeleitete Klassifizierung ›SW-Sturm‹ ist repräsentativ für das durch die Punkte 4–5–9–13–12–8 begrenzte Gebiet. Weitere Klassifizierungsbeispiele findet man in *Abschnitt 2.3, S. 45*.

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. Ferner ist der Lage der Verteilungsgipfel im negativen Vorticitybereich zu entnehmen, dass antizyklonale Rotationsformen häufiger auftreten als zyklonale.

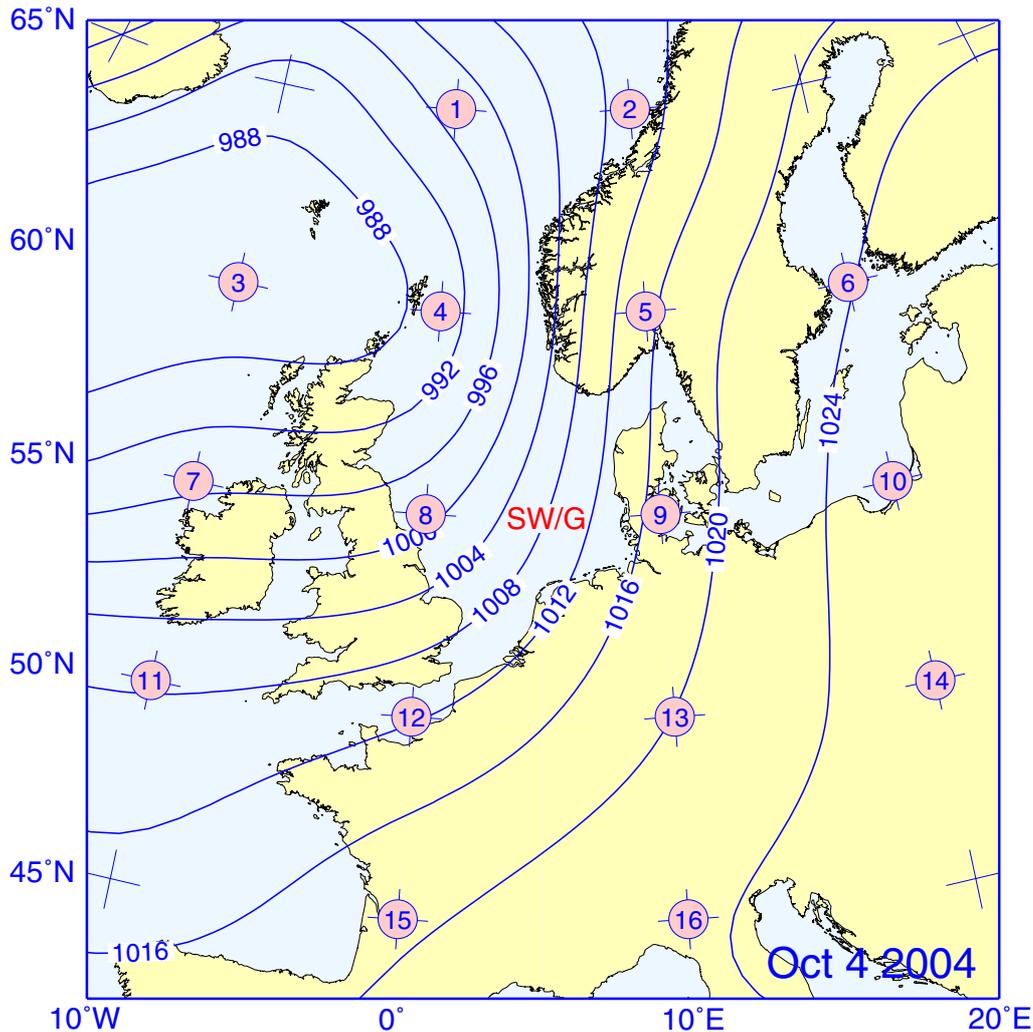


Abb. 2-3: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 4. Okt. 2004 (Sturmtief ›Uschi‹) mit Gitterpositionen zur Wetterlagenklassifizierung.

Fig. 2-3: Sea level pressure (hPa) for the SW-gale of Oct, 4 2004 together with grid positions of weather-typing scheme.

Die eigentliche Klassifizierung der täglichen Wetterlagen ergibt sich aus einfachen Relationen zwischen Wind- und Vorticity-Index (vgl. LOEWE ET AL. 2005), 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.

Die blauen Ellipsenschalen in Abb. 2-4 dienen der Klassifizierung von Sturmereignissen. Indexpaare innerhalb dieser drei Schalen stehen für Sturm (›GALE‹), starker Sturm (›SG‹) 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 Sturmtief, dessen Vorderseite die Nordsee erreicht hat, wurde als ›GALE‹ identifiziert. Aufgrund der dezentralen Lage des Tiefs dominiert der Wind-Index (33.1 hPa) nicht nur über den Vorticity-Index (15.8 hPa) sondern auch im Sturm-Index (34.0 hPa), welcher über die elliptische Beziehung  $(V^{*2} + 0.25\zeta^{*2})^{0.5}$  definiert ist.

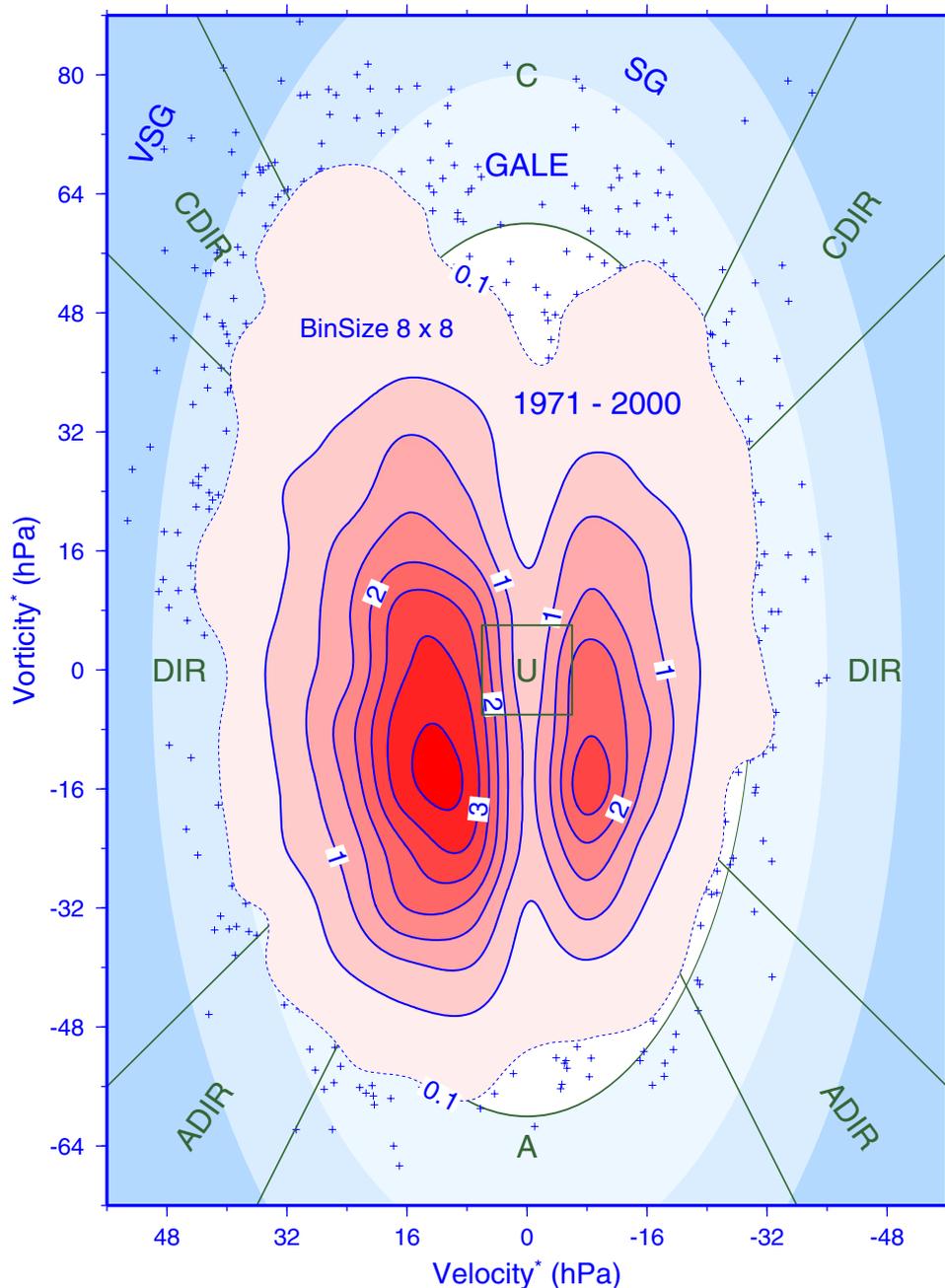


Abb. 2-4: Relative Häufigkeitsverteilung der täglichen Zirkulationszustände im Zeitraum 1971 – 2000 mit Klassifizierungskriterien.

Fig. 2-4: Percent frequency distribution of daily circulation states for the period 1971 – 2000 together with classification criteria.

## 2.2.2 Wetterlagenkalender

Dieser Abschnitt dokumentiert die Wetterentwicklung über der Nordsee im Jahr 2004 durch einen Jahreskalender der klassifizierten täglichen Wetterlagen (Tab. 2-1). Der Kalender ist speziell geeignet, Besonderheiten in physikalischen und chemischen Zustandsvariablen aufzuklären, sofern diese vom Zirkulationszustand der Atmosphäre maßgeblich beeinflusst werden.

Die zeitliche Abfolge der täglichen Luftdruckfelder wird mit etwas Übung filmhaft nachvollziehbar, wenn man sich den Rotationssinn von Hoch- und Tiefdruckzellen 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). 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.

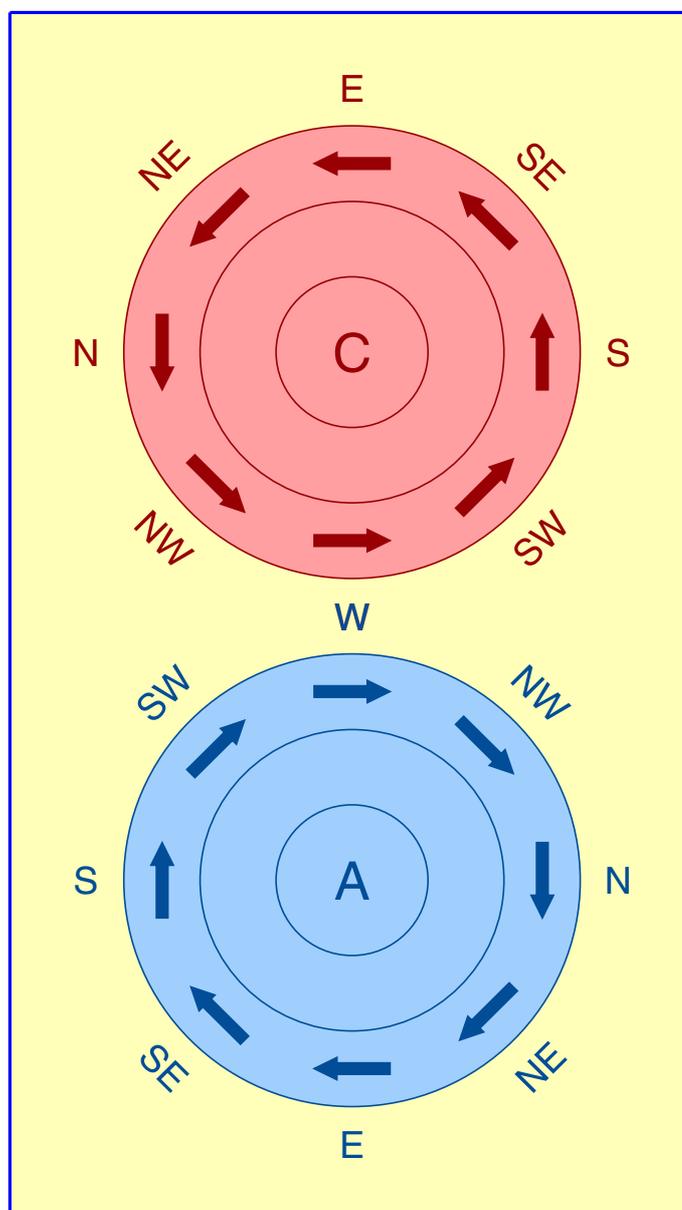


Abb. 2-5: Luftströmung um Hoch (A) und Tief (C).

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

2004	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	S	W	ANW	SE	CE	SE	CW	NE	W	AS	A	UNC
2	A	SW	NW	S	CNW	CNE	W	A	A	SW	S	NW
3	SW	W	AS	CSW	S	W	W	CE	ANE	SW	SW	AW
4	ASW	W	UNC	C	C	NW	NW	SE	A	SW	NW	W
5	SW	CW	C	N	C	W	A	A	CNW	CW	A	AW
6	W	C	NE	N	CN	A	C	SE	A	UNC	UNC	A
7	S	NW	AE	ANW	S	S	CNW	AS	SW	A	A	A
8	CS	W	E	N	N	W	CNW	SW	A	AE	C	A
9	ASW	ANE	SE	ANW	A	NW	UNC	W	SE	A	A	A
10	SW	A	CS	A	ANW	ANW	W	N	SW	S	A	ASW
11	CSW	ANW	SW	AS	NW	NW	NW	W	CNW	CSE	W	W
12	CNW	AN	W	AS	A	ANW	ANW	SW	A	C	ANW	SW
13	W	A	AW	S	A	C	S	CSW	ASW	C	W	SW
14	C	NW	A	S	ANW	CNW	CSW	S	SW	W	NW	NW
15	C	N	A	ANW	C	C	W	CSW	W	A	N	N
16	NE	A	SW	CS	NW	CW	A	SW	SW	S	NW	AW
17	A	ASE	W	UNC	ANW	SW	UNC	NW	CNW	CSW	A	SW
18	A	C	CW	A	N	W	A	ANW	NW	SW	C	W
19	ASW	N	C	AN	NW	CS	UNC	A	CNW	W	N	W
20	SW	W	NE	A	NW	C	ANW	C	NW	CSW	W	C
21	SW	CW	ANE	A	N	ANW	NW	W	W	W	CSW	UNC
22	CSE	C	A	CSE	AN	SW	A	SW	NW	A	NW	A
23	C	AW	SE	SE	A	NW	A	W	W	SE	C	SW
24	A	A	CSE	CSE	A	NW	SW	SW	CN	SE	A	AW
25	SW	./.	A	SE	S	AW	UNC	C	A	CE	A	W
26	CSW	./.	SE	./.	SE	./.	UNC	./.	A	./.	./.	W

Tab. 2-1: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2004. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-1: Calendar of daily weather types in 2004. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2004	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	1.1	0.8	0.5	0.3	1.6	1.6	3.3	3.8	18.6	31.7
C	0.8	0.3	0.8	1.1	1.1	3.0	2.7	2.7	10.4	23.0
U	3.6	1.4	0.3	5.2	4.1	8.5	11.5	8.2	2.7	45.4
Σ	5.5	2.5	1.6	6.6	6.8	13.1	17.5	14.8	31.7	100

Tab. 2-2: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2004 (%).

Table 2-2: Contingency table of weather types in 2004 (%).

Abb. 2-5 lässt sich auch als schematische Darstellung einer W-Wetterlage interpretieren, welche ein Beobachter (bei W) in der Frontalzone zwischen einem Tiefdruckwirbel im Norden und einer Hochdruckzelle südlich davon feststellt. Zur schematischen Approximation der räumlichen Luftdruckverteilung in Abb. 2-3 wären die SW-Markierungen der beiden Druckzellen in Abb. 2-5 zur Deckung zu bringen. Allgemein gilt: der hohe Druck befindet sich zur Rechten des Beobachters, sofern dieser dem Wind den Rücken kehrt.

A- & ADIR-Lagen (blau) herrschten an 116, C- & CDIR-Lagen (rot) an 84 Tagen des Jahres 2004 (Tab. 2-1). Die Anzahl der 1-tägigen Ereignisse war in beiden Gruppen mit 30 Tagen gleichgroß. 2- bis 4-tägige Episoden kamen in der antizyklonalen Gruppe 9, 9 und keinmal vor; entsprechend lang andauernde zyklonale Wetterlagen traten 5, 4 und 5mal und damit praktisch gleichhäufig auf. Persistenterere C- & CDIR-Sequenzen, wie sie sich im Mai (7 Tage) und Juli (5 Tage) ereigneten, sind aufgrund des gewöhnlich transienten Charakters von Tiefdrucksystemen selten. Demgegenüber traten insgesamt 6 stationäre Hochdrucklagen ein, welche 5 bis 9 Tage andauerten; die beiden längsten Episoden ereigneten sich in der ersten September- bzw. Dezemberhälfte.

Die Anzahl der Sturmtage von 20 hat gegenüber dem Vorjahreswert (16) etwas zugenommen. Davon traten jeweils 5 Sturmtage im Januar und Dezember ein. Wiederum jeweils 5 (der 20 Sturmtage) waren vom Typ C, W und SW. Da einige Stürme 2 Tage andauerten, ergeben sich nur 17 Sturmereignisse. Starke und sehr starke Stürme blieben im Jahr 2004 aus.

Die relativen Häufigkeiten aller Wetterlagentypen im Jahr 2004 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 von 1.6 % jede nur an sechs 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.

Die auffälligste Änderung gegenüber dem Vorjahr ist der Rückgang der A-Lagen von ungewöhnlichen 27.1 auf 18.6 %. Diese Normalisierung zeigt sich auch im Verhältnis A:C, welches von 3.1 (2003) auf 1.8 abfiel. Die Abnahme der A-Lagen ging mit einer etwa gleichstarken Zunahme von CDIR- und reinen Richtungslagen einher. Dessen ungeachtet blieb die antizyklonale Wetterlage die häufigste Zirkulationsform, gefolgt von W-, C-, SW- und NW-Lagen mit jeweils um 10%. Von den reinen Richtungswetterlagen traten W-Lagen mit 42 Tagen am häufigsten, die entgegengesetzten E-Lagen nur 1mal ein. Bzgl. der Hauptrichtungstypen (S bis NW) fällt im Vergleich zu den Vorjahren 2002 und 2003 eine schrittweise Verschiebung hin zu häufigeren W- und NW-Lagen auf Kosten von S- und SW-Lagen auf. Die Summe der Wetterlagen NW, ANW und CNW stieg seit 2002 von 8.2 über 10.4 auf 14.8 % (vgl. LOEWE ET AL. 2005).

### 2.2.3 Wetterlagenstatistik

Die Anzahl der hybriden Wetterlagen (16 von insgesamt 27) steht in einem Missverhältnis zu den Realisierungen dieser Typen übers Jahr: sie treten insgesamt an nur ca. 90 Tagen und damit durchschnittlich jeweils nur 5- bis 6mal im Jahr ein. Für eine robuste Statistik auf kürzeren, saisonalen und monatlichen Zeitskalen ist deshalb eine Reklassifizierung notwendig. Diese besteht einerseits darin, die hybriden Sektoren, welche durch Geraden mit Steigungen  $\pm 1$  und  $\pm 2$  begrenzt werden (vgl. Abb. 2-4,

S. 37), den Richtungs- und Rotationssektoren durch Einführung von Grenzgeraden mit Steigung  $\sqrt{2}$  zuzuschlagen. Schwach ausgeprägte Zirkulationsformen vom Typ U werden ebenfalls nicht mehr erfasst, sondern gleichermaßen auf die Richtungs- und Rotationstypen verteilt. Weiters werden die Windrichtungsklassen von 8 auf 4 reduziert, so dass sich die Anzahl der Wetterlagen von 27 auf 6 vermindert, nämlich A, C, NE, SE, SW, NW. Die natürlich ebenfalls möglichen Richtungsklassen N, E, S, W erscheinen weniger geeignet, wenn an einer Differenzierung kontinentaler und maritimer Luftmassentransporte gelegen ist (vgl. *Abschnitt 3.4.2, S. 95*).

Die saisonalen Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2004 sind in *Abb. 2-6* zusammengefasst. Zur Identifizierung nennenswerter Abweichungen von normalen Verhältnissen sind sie im Kontext empirischer Häufigkeitsverteilungen für den Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt. Die Eigenschaften der Verteilungen werden durch gestapelte Säulen skizziert, die sich über den Perzentilbereich 1 – 99 erstrecken. Weiße Säulenabschnitte kennzeichnen den durch das 25. und 75. Perzentil begrenzten Interquartilbereich, welcher durch den als Treppenlinie angegebenen Median ( $P_{50}$ ) unterteilt ist. Die Innengrenzen der blauen Säulensegmente bezeichnen das 5. bzw. 95. Perzentil der Verteilungen.

Zunächst erscheinen einige Bemerkungen zu den klimatologischen Verteilungen zweckmäßig (*Abb. 2-6*).

Die Verteilungen aller Wetterlagen zeigen erhebliche saisonale Schwankungen hinsichtlich ihrer Spannweite (Perzentilabstand  $P_{99} - P_1$ ). Ferner sind insbesondere die Verteilungen der weniger häufigen Richtungslagen vornehmlich rechtsschief (Modus < Median < Mittelwert), was in der größeren Breite des 3. Quartils  $Q_3$  gegenüber  $Q_2$  sowie durch  $Q_4 \gg Q_1$  zum Ausdruck kommt. Aufgrund dieser Asymmetrien, die noch deutlicher in den monatlichen Verteilungen der *Abb. 2-7* zu Tage treten, sind die üblichen 2 Standardabweichungen als Gaußsches Signifikanzmaß für Anomalien ungeeignet. U. a. würden sich für negative Anomalien vielfach negative Signifikanzgrenzen ergeben, welche mit positiven Zufallsvariablen nicht vereinbar sind.

Der Umstand, dass eine Wetterlage nicht seltener als gar nicht auftreten kann, führt vor allem im Fall der seltenen NE- und SE-Lagen zu einer Akkumulation von 0-Ereignissen. So traten z. B. in 12 Januar des Zeitraums 1971 – 2000 und demnach mit einer relativen Häufigkeit von 40 % keine SE-Lagen ein, so dass die Perzentile  $P_1$ ,  $P_5$ , und  $P_{25}$  alle den Ordinatenwert 0 haben und folglich nicht abbildbar sind (*Abb. 2-7*). Die Verteilung ist extrem rechtsschief; Verteilungsgipfel (Modus), Median und Mittelwert liegen bei 0, 1 und 2.6 Tagen. Die extremste Häufung von SE-Lagen trat mit 18 (Januar) bzw. 38 Tagen (JFM-Quartal) 1996 ein und führte zum bislang letzten sehr kalten Winter; beide Werte übersteigen das jeweilige  $P_{99}$ -Niveau.

Die Mediane der Rotationstypen unterliegen keinem erkennbaren Jahresgang (*Abb. 2-6*), sondern zeigen lediglich geringfügige Schwankungen um mittlere Werte von 26 (A) bzw. 14 Tagen pro Quartal (C). Dies trifft gleichermaßen für den Richtungstyp SE zu (8 Tage / Quartal), jedoch keineswegs für die verbleibenden Richtungswetterlagen. Das klar reduzierte Auftreten von SW-Lagen im Sommerhalbjahr geht offensichtlich einher mit gehäuften NE-Lagen im Frühjahr sowie einem vermehrten Vorkommen von NW-Lagen im Sommer. Dieser Zusammenhang ist Konsequenz der jahreszeitlich wechselnden Vorherrschaft von Islandtief und Azorenhoch (vgl. *Abschnitt 2.3, S. 45*).

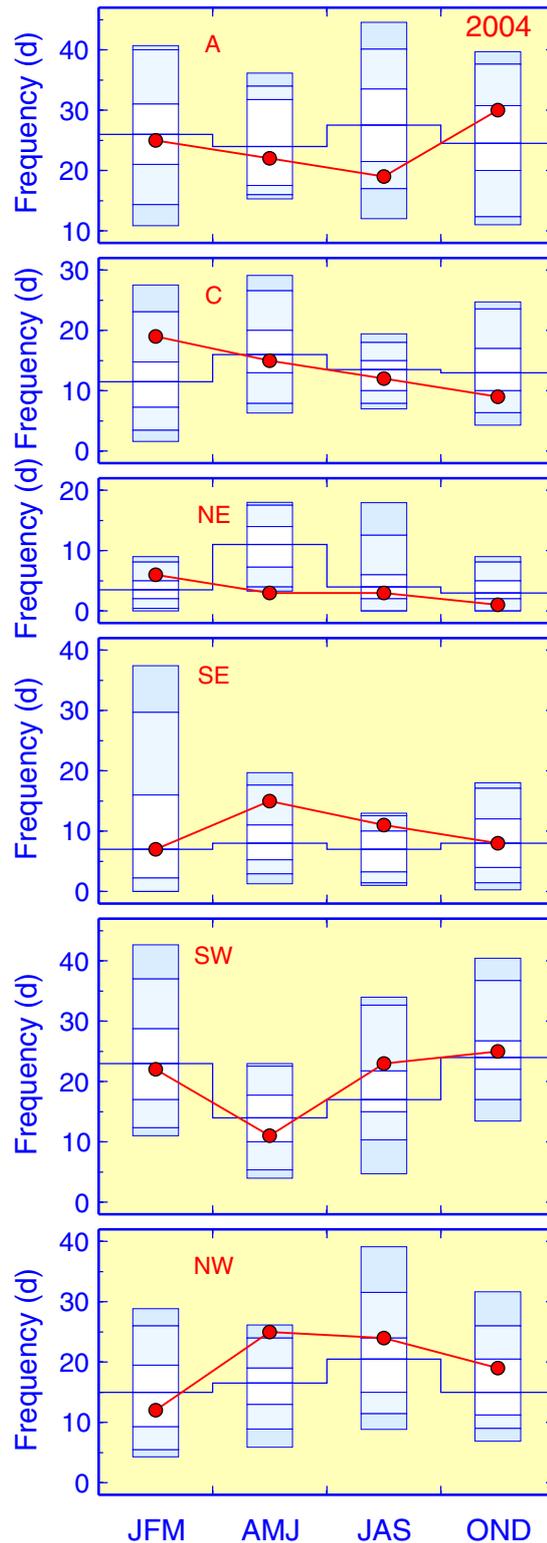


Abb. 2-6: Saisonale Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2004 mit Perzentilen der empirischen Verteilungen für 1971 – 2000 (Stapelsäulen); Perzentilbereich 1 – 99, Intervallgrenzen bei 5, 25, 50 (Median), 75, 95 %.

Fig. 2-6: Seasonal frequencies of reduced weather types in 2004 along with percentiles of empirical distributions for 1971 – 2000 (stacked columns); percentile range: 1 – 99, internal interval limits at 5, 25, 50 (median), 75, 95 %.

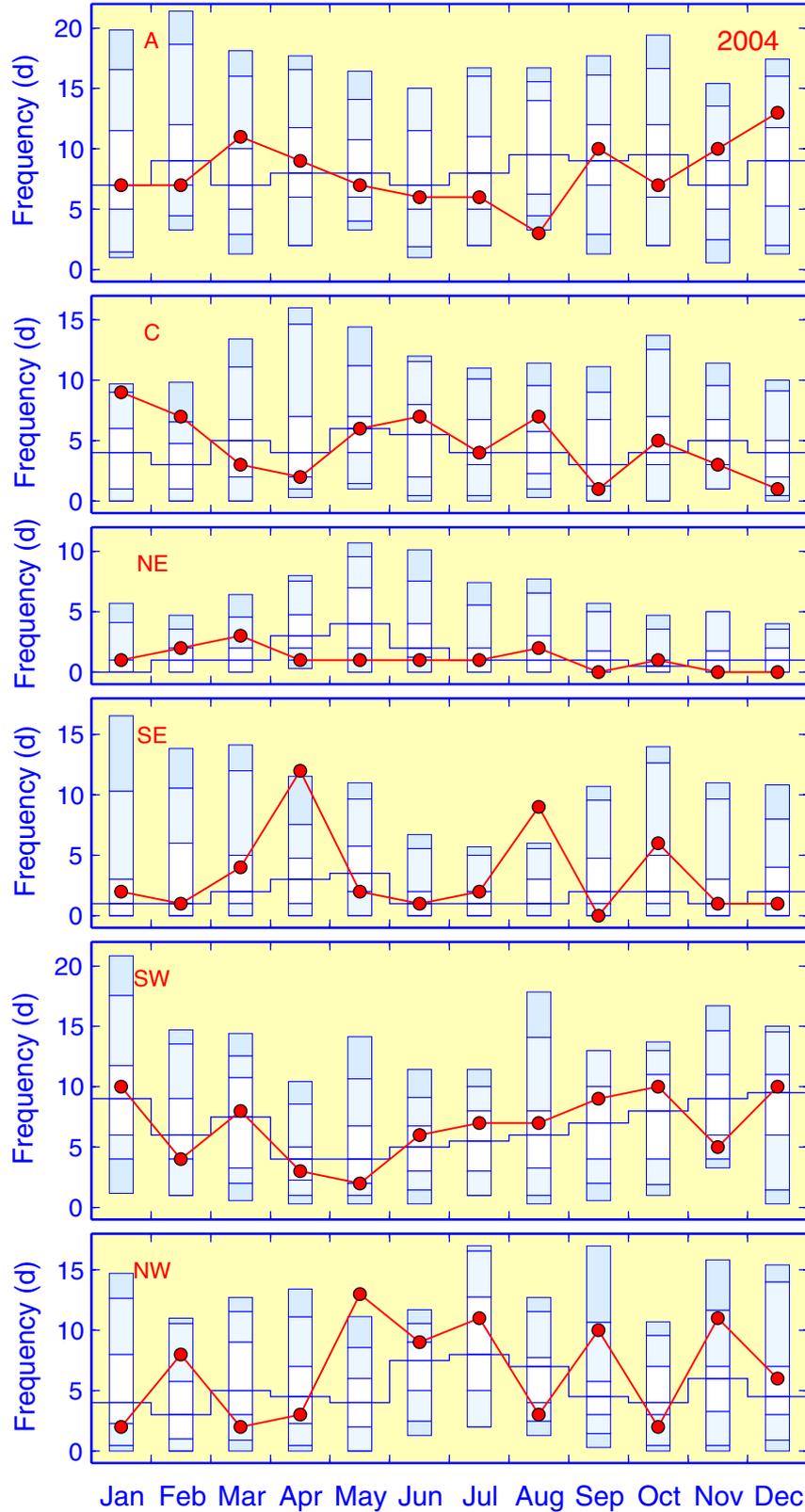


Abb. 2-7: Wie Abb. 2-6, jedoch für monatliche Häufigkeiten.

Fig. 2-7: As Fig. 2-6, except for monthly frequencies.

Im Jahr 2004 lagen die Gesamthäufigkeiten der Wetterlagen A, C, SE und SW mit 96 (P<sub>31</sub>), 55 (P<sub>55</sub>), 41 (P<sub>72</sub>) und 81 Tagen (P<sub>52</sub>) im Interquartilbereich (P<sub>25</sub> bis P<sub>75</sub>). Deut-

liche Abweichungen ergaben sich lediglich für die NW- (80 Tage,  $P_{93}$ ) sowie die NE-Lage (13 Tage,  $P_7$ ). Letztere blieb im Frühjahr und somit in der Jahreszeit, in der sie klimatologisch am häufigsten auftritt (Median 11 Tage), fast vollständig aus (3 Tage,  $< P_1$ ), vgl. *Abb. 2-6*. Ebenfalls im Frühjahr kam es zu einer signifikanten Häufung von NW-Lagen (25 Tage,  $> P_{95}$ ), die insbesondere im Mai dominierten (13 Tage,  $> P_{99}$ ) und damit die Vorherrschaft der entgegengesetzten SE-Lage im April (12 Tage,  $> P_{99}$ ) beendete. Dieser monatliche Rollenwechsel wiederholte sich im Zeitraum August bis November (*Abb. 2-7*).

Das ausgeglichenste Verhalten zeigte im Jahr 2004 die SW-Lage. Die monatlichen Häufigkeiten lagen fast ausnahmslos im Interquartilbereich. Erwähnenswert erscheint allenfalls die Persistenz leicht erhöhter Werte im Zeitraum Juni bis Oktober, die sich jedoch auch im Sommerquartal mit 23 Tagen ( $P_{81}$ ) nicht signifikant niederschlug (*Abb. 2-6*).

Das signifikant verstärkte Auftreten zyklonaler Wetterlagen im Januar und Februar ( $> P_{95}$ ) sorgte gemeinsam mit SW- und NW-Lagen für einen milden Winter. Auf monatlichen Zeitskalen zeigten die C-Lagen eine gegenüber den A-Lagen weitgehend inverse Entwicklung, saisonal einen linearen Rückgang von 19 auf 9 Tage / Quartal. Während sich das Vorjahr durch 46 antizyklonale Wintertage ( $> P_{99}$ ) auszeichnete und insgesamt antizyklonal geprägt war (137 Tage,  $P_{98}$ ), hat sich die Frequenz antizyklonaler Wetterlagen im Jahr 2004 normalisiert. Lediglich im Sommerquartal blieben A-Lagen mit 19 Tagen merklich unterhalb des Medians (28 Tage), im August mit 3 Tagen ( $< P_1$ ) fast völlig aus (*Abb. 2-7*). Das deutlich erhöhte Auftreten von SE-Lagen in Verbindung mit einem Hochdruckgebiet über Fennoskandien führte in der ersten Augushälfte dennoch zu einem ungewöhnlich kräftigen Anstieg der Luft- und Wassertemperaturen im Nordseegebiet (vgl. *Abschnitt 2.5, S. 57*).

## 2.3 Luftdruckverteilung

Aus den täglichen hemisphärischen Luftdruckfeldern im Meeresniveau des UK MET OFFICE, welche bereits als Datenbasis für die Analyse der Großwetterlagen dienten (*Abschnitt 2.2, S. 35*), wurden jahreszeitliche und monatliche Luftdruckverteilungen im Nordseeraum für das Jahr 2004 bestimmt. Diese geben gleichzeitig Aufschluss über die mittleren Windverhältnisse, welche sich wiederum in der Oberflächenzirkulation der Nordsee (*Abb. 3-1, S. 65*) oder der Wellenhöhenverteilung abbilden (*Abb. 3-9, S. 75*).

Die aktuellen saisonalen Luftdruckverteilungen sind in *Abb. 2-8* gemeinsam mit den klimatologischen Referenzzuständen des Zeitraums 1971 – 2000 sowie den Abweichungen von dieser Klimatologie (Anomalien) dargestellt. Alle Verteilungen zeichnen sich durch hohen Druck über Kontinentaleuropa aus, der nach NW oder N hin abnimmt. Die Drängung der Isobaren im Herbst und Winter macht deutlich, dass in diesen Jahreszeiten stärkere Winde vorherrschen als im Frühjahr-Sommer-Halbjahr. 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 vorherrschen.

Dieses Ergebnis liefert auch das früher beschriebene (vollständige) Klassifizierungsverfahren (vgl. *Abschnitt 2.2.1, S. 35*), welches auch auf die Anomalieverteilungen angewendet wurde (*Abb. 2-8*). Im Unterschied zur Klassifizierung täglicher Wetterlagen wurde in allen Fällen der Typ »U« nicht mehr erfasst, sondern in Abhängigkeit von den bis zum Koordinatenursprung ausgedehnten Sektorengrenzen den Richtungs-, Rotations- und Hybridtypen zugeordnet (vgl. *Abb. 2-4, S. 37*). Diese Maßnahme begründet sich aus dem Umstand, dass die zeitliche Mittelung der Druckfelder zu einer beträchtlichen Stauchung der Wertebereiche von Wind- und Vorticity-Index führt. So liegen die Vorticity-Indizes der saisonalen Klimatologie im (antizyklonalen) Intervall von  $-5.2$  bis  $-1.6$  hPa, die Wind-Indizes zwischen  $2.2$  und  $9.1$  hPa. Die klimatologische Frühjahrs- und Sommergebietverteilung, die Frühjahrsverteilung des Jahres 2004 und sämtliche Anomalieverteilungen wären ohne Unterdrückung des U-Typs als unklassifizierbar einzustufen.

Fast ausnahmslos identische Klassifizierungen der aktuellen und klimatologischen saisonalen Druckfelder belegen deren Übereinstimmung hinsichtlich des Verteilungsmusters (*Abb. 2-8*). Die schwach ausgeprägten Anomalieverteilungen für das Jahr 2004 zeigen darüber hinaus an, dass auch hinsichtlich der Intensität der Verteilungen nur geringfügige Unterschiede bestehen. Demzufolge sind die Druckverteilungen des Jahres 2004 auf der betrachteten Zeitskala »normal«.

Die Ergebnisse der »Wetterlagenstatistik« (vgl. *Abschnitt 2.2.3, S. 40*) oder auch die starken intermonatlichen Schwankungen des NAO-Index (*Abb. 2-1, S. 33*) liefern jedoch klare Hinweise, dass diese »Normalität« kaum Ausdruck intrasaisonal durchgängig normaler Bedingungen ist, sondern vielmehr aus der Balancierung oder Nivellierung teils erheblicher, entgegengesetzter Anomalien auf kürzeren Zeitskalen resultiert. Es erscheint daher konsequent, die vorstehende Untersuchung auf monatliche Druckfelder auszudehnen.

Die Monatsklimatologie der Luftdruckverteilung im Zeitraum 1971 – 2000 ist in *Abb. 2-9* dargestellt. Die gleichförmig starken Druckgradienten über der Nordsee im Herbst und Winter stehen in klarem Zusammenhang mit der Tiefdruckaktivität im Nordatlantik. Die durchweg W- und SW-lichen Verteilungsmuster bilden dabei NE-wärts wandernde Zyklonenfamilien ab, die in ihrer Gesamtheit bzw. im Zeitmittel als von der Labradorsee bis zum Karischen Meer ausgedehntes »Islandtief« in Erscheinung treten.

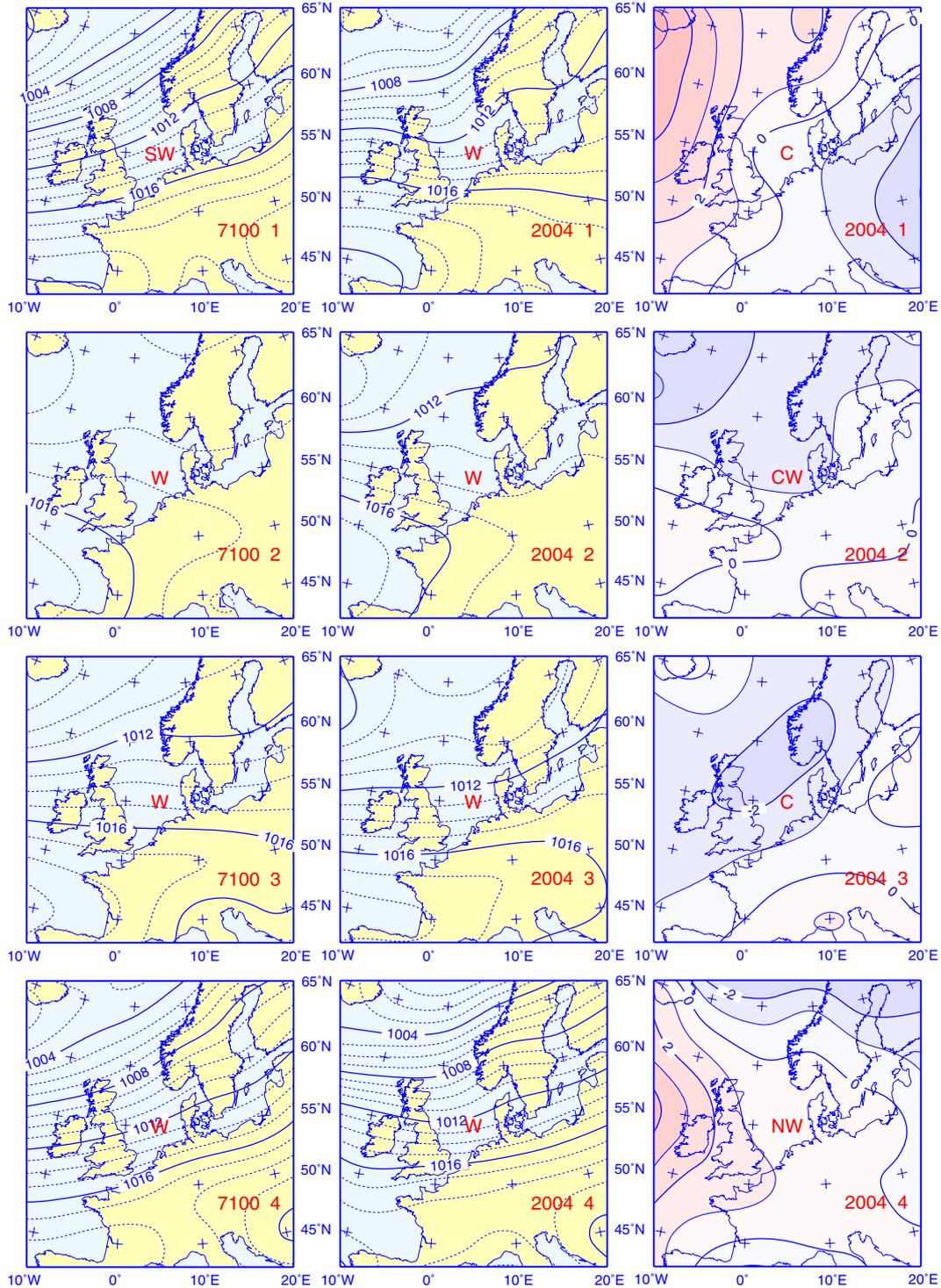


Abb. 2-8: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: Klimatologie (1971 – 2000), Mitte: 2004, rechts: Anomalien; 1 = Winter = Januar, Februar, März etc.

Fig. 2-8: Classified seasonal sea level pressure distributions (hPa). Left: climatology (1971 – 2000), middle: 2004, right: anomalies; 1 = Winter = January, February, March etc.

Zum Zeitpunkt des Frühlingsäquinoktiums kommt es gewöhnlich zu einer raschen und starken Abschwächung der Luftdruckgegensätze, die im April an der Spreizung der 1012 und 1016 hPa Isobaren ablesbar ist. Die im Frühsommer im Nordseeraum domi-

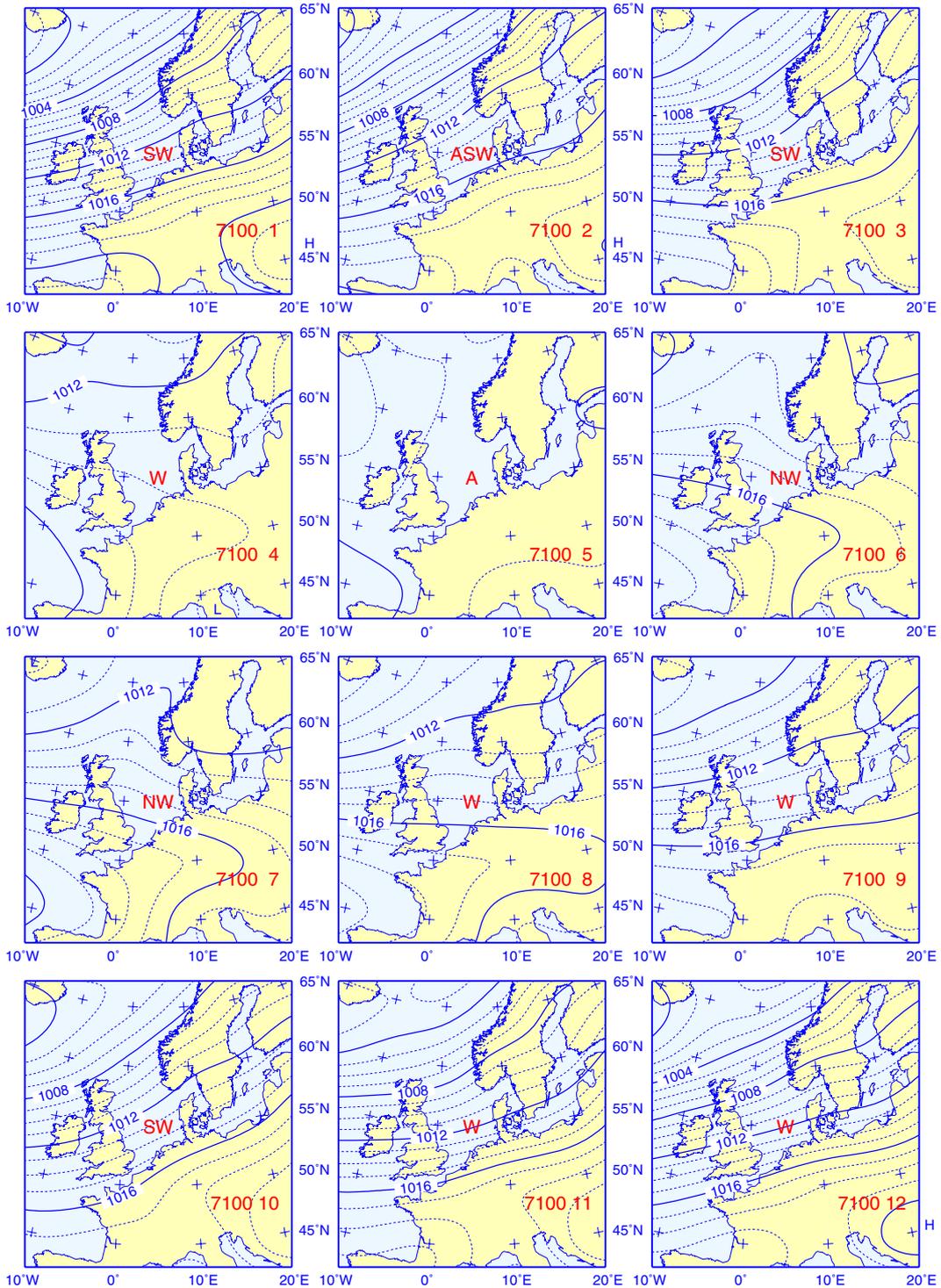


Abb. 2-9: Monatsklimatologie (1971 – 2000) der Luftdruckverteilung im Meeresniveau (hPa).  
 Fig. 2-9: Monthly climatology of sea level pressure (hPa), base period 1971 – 2000.

nante schwachwindige NW-Zirkulation ist an die Ausdehnung des ›Azorenhochs‹ nach Westeuropa gebunden. Der graduelle Übergang zu den starken W-Lagen des Herbstes geht mit der allmählichen Intensivierung der Tiefdruckaktivität im Nordatlantik und Südverlagerung der Polarfront ab Mitte August einher. Die saisonale Migration der Polarfront regelt den relativen Einfluss polarer und subtropischer Luftmassen, die sich in der klimatologischen Verteilung als quasipermanente Tief- und Hochdruckge-

biere abbilden. Die besondere geographische Lage der Nordsee im Übergangsbereich von Islandtief und Azorenhoch bedingt die Unterdrückung von hybriden und wirbelhaften Zirkulationsmustern, die auf kürzeren Zeitskalen für transiente Drucksysteme nicht nur charakteristisch sind, sondern auch vorherrschen (vgl. *Tab. 2-2, S. 39*).

Die aktuellen Druckverteilungsmuster (*Abb. 2-10*) stimmen qualitativ mit den klimatologischen Mustern (*Abb. 2-9*) in den Monaten 1 (Januar), 9, 11 und 12 überein, wie identische Klassifizierungen (SW, W, W, W) belegen. Anhand der Abweichungen von der Klimatologie, die in *Abb. 2-11* wiedergegeben sind, wird jedoch deutlich, dass etwa im September und Dezember des Jahres 2004 eine deutlich verstärkte W-Zirkulation herrschte. Diese Intensitätsanomalien bei »normaler« Zirkulationsform (W) illustrieren nebenbei die Wirkung des in beiden Monaten extrem positiven NAO-Index (*Abb. 2-1, S. 33*). In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass im April bei ähnlich hohem NAO-Index eine verstärkte W-Zirkulation über der Nordsee aufgrund des blockierenden Hochdrucks über Nordeuropa ausblieb. Stattdessen hatte die anomale Zirkulationskomponente SE-Charakter, der sich typischerweise – wie im Oktober 2004 – in Verbindung mit negativen NAO-Zuständen einstellt (*Abb. 2-11*).

An dieser Stelle scheint der Hinweis hilfreich, sich die aktuellen Druckverteilungsmuster als additive Überlagerungen der Klimatologie- und Anomaliekomponenten vorzustellen. Bei zugrunde liegenden Richtungsmustern ergibt sich danach die aktuelle Zirkulationsform als qualitative Vektorsumme; beispielsweise resultiert die S-Strömung im April 2004 aus W + SE. Ferner bewirken antizyklonale Anomalien eine Rechtsdrehung der gewöhnlich gerichteten klimatologischen Zirkulationsformen, zyklonale eine Linksdrehung; das CSW-Muster im August 2004 etwa ergibt sich aus W + C.

Wie bereits weiter oben vermutet, zeichnen sich die Anomalieverteilungen des Jahres 2004 durch eine erhebliche Variabilität von Monat zu Monat aus (*Abb. 2-11*). Lediglich zyklonale Muster zeigten eine nennenswerte Erhaltungsneigung im Sommerhalbjahr, wenn der marginal zyklonale Charakter der Verteilungen im Mai und September einbezogen wird. Immerhin lässt sich die scheinbare Vielfalt der Anomalieverteilungen mit etwas Mut zur Generalisierung auf drei Grundmuster reduzieren – nämlich N (2, 5, 11), W (6, 9, 12) und SE (1, 4, 8, 10) – welche in den in Klammern bezeichneten Monaten des Jahres 2004 wiederkehrten.

Hieraus ist ersichtlich, dass die Abweichungen von den klimatologischen Druckmustern mehrheitlich die Meridional Komponente des Windfeldes betrafen. Für Februar und November beinhaltet dies eine Invertierung der meridionalen Transporte (N statt S), in den übrigen Fällen eine verstärkte Meridionalzirkulation, die mit einem erhöhten Austausch thermischer Energie zwischen niederen und höheren Breiten verbunden war. Das alternierende Auftreten komplementärer meridionaler Grundmuster in den meisten Jahreszeiten erklärt darüber hinaus die schwache Ausprägung der saisonalen Druckanomalien (*Abb. 2-8*).

Das zeitliche Auftreten der N- und SE-Muster befindet sich in sehr guter Übereinstimmung mit den Verteilungsgipfeln der NW- und SE-Wetterlagen (vgl. *Abb. 2-7, S. 43*). Die Korrespondenz des W-Musters mit den Anomalien der monatlichen Wetterlagenstatistik ist hingegen weniger offensichtlich. Insbesondere scheint die Häufung antizyklonaler Wetterlagen im Dezember mit einer verstärkten Westzirkulation nicht vereinbar, denn diese Hochdrucklagen waren generell schwachwindig und bis zur Monatsmitte vorherrschend (vgl. *Tab. 2-1, S. 39*). Die anschließenden kräftigen W-Lagen, die nicht selten Sturmstärke erreichten, dominierten offenbar das Druckanomalienmuster im Dezember 2004.

Die augenscheinlich gravierendsten Unterschiede zur Klimatologie hinsichtlich des Zirkulationsmusters weisen die Druckverteilungen der Monate 2, 4, 5, 8 und 10 auf (Abb. 2-10). Auch die Intensität der Zirkulation und Zirkulationsanomalien ist anhand der jeweiligen Druckverteilungen abschätzbar. Einen effizienteren Zugang eröffnet je-

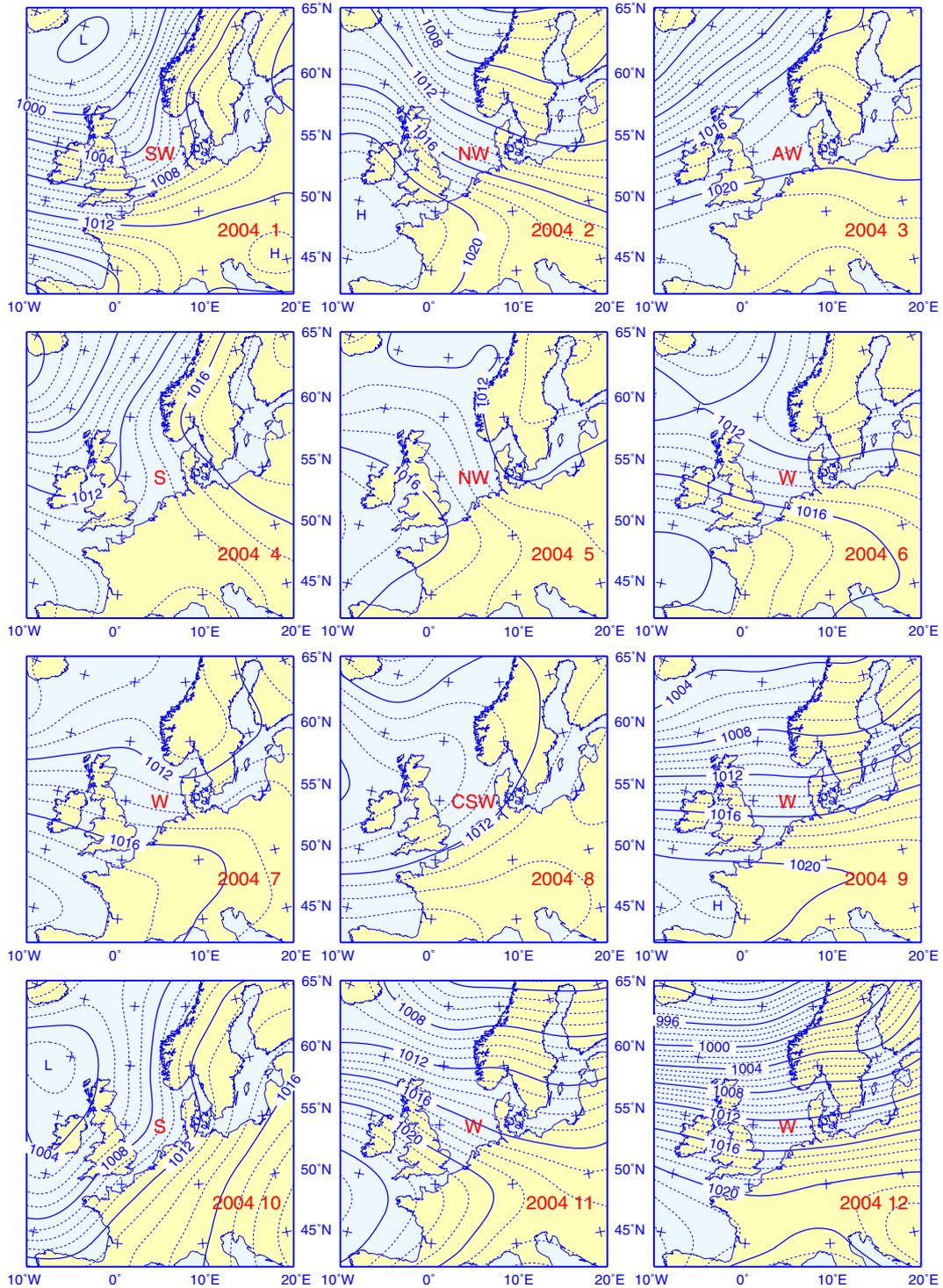


Abb. 2-10: Monatliche Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) im Jahr 2004.

Fig. 2-10: Monthly sea level pressure distributions (hPa) in 2004.

## 2 Atmosphärenphysik

doch die im nachfolgenden Kapitel präsentierte quantitative Analyse des gestrophischen »Nordseewindes«, der in direkt proportionaler Beziehung zum Druckgradienten steht.

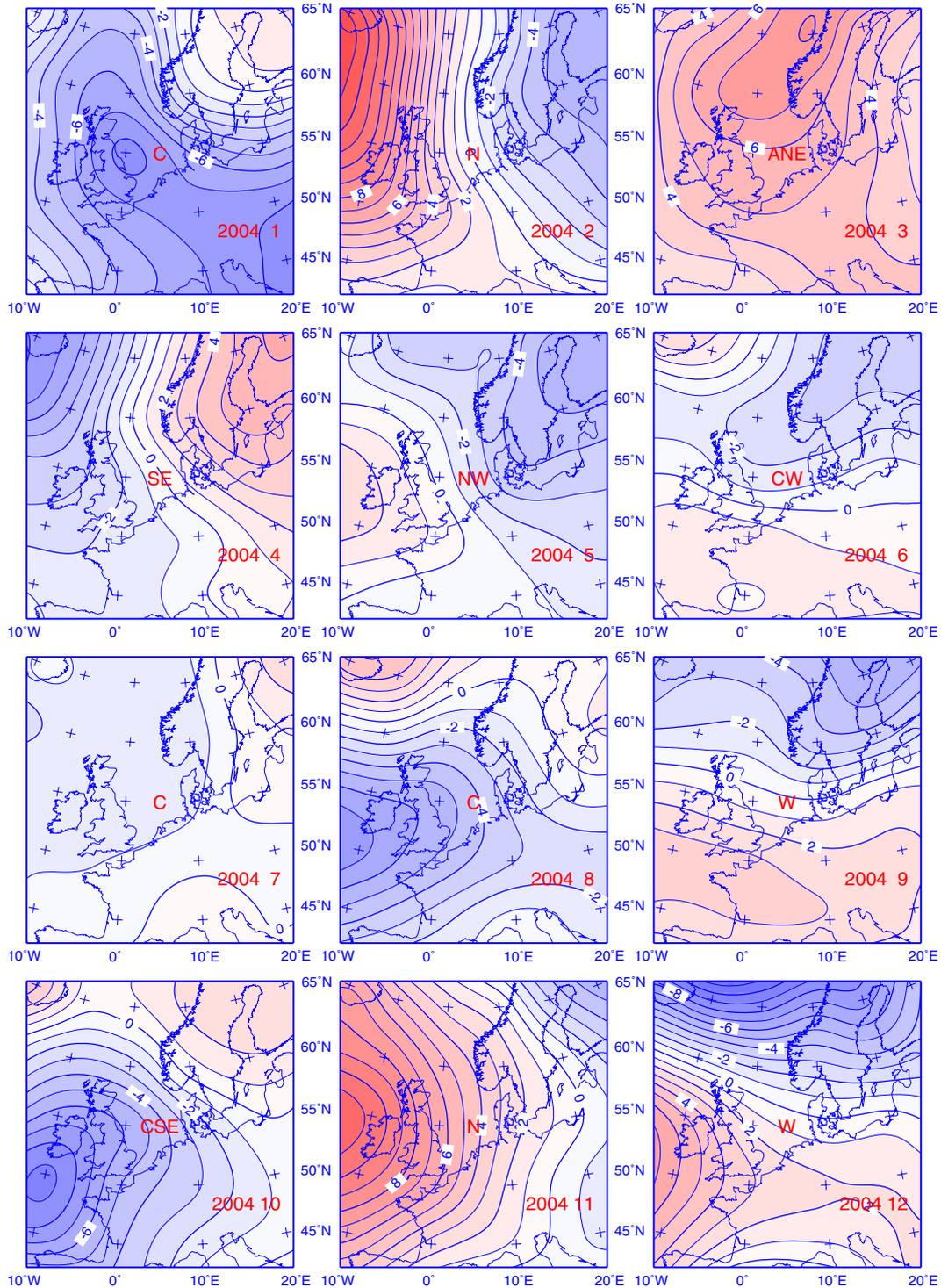


Abb. 2-11: Monatliche Anomalien des Luftdrucks im Meeresniveau (hPa) im Jahr 2004.

Fig. 2-11: Monthly SLP-anomalies (hPa) in 2004.

## 2.4 Nordseewind

Der »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 Gebiet zwischen 0° – 10° E und 50° – 60° N repräsentativ ist (vgl. *Abb. 2-3*, S. 36). Um einen Eindruck von der zwischenjährigen Variabilität der Windverhältnisse zu geben, wird hier zunächst ein Vergleich des saisonalen Nordseewindes für die Jahre 2003 und 2004 geboten. Anschließend wird die zeitliche Entwicklung des vektoriel- len Nordseewindes anhand von virtuellen Trajektorien diskutiert.

### 2.4.4 Saisonale Vektorwinde

*Abb. 2-12* zeigt saisonale Wahrscheinlichkeitsellipsen des täglichen vektoriel- len Nordseewindes für die Jahre 2003 und 2004, die unter der Annahme einer bivariaten Gauß- verteilung konstruiert wurden. Für eine detaillierte Beschreibung des statistischen Ver- fahrens wird auf LOEWE ET AL. (2005) verwiesen.

Im Zentrum der Ellipsen und in Richtung der großen Halbachse ist die jeweilige Jah- reszeit angegeben (1 = JFM = Winter, 2 = AMJ = Frühling, etc.). Der aus täglichen u- und v-Komponenten bestimmte mittlere Vektorwind ist vom Ellipsenzentrum zum Ur- sprung (0,0) gerichtet. Die Orientierung der Hauptachsen ist durch die Richtungen sta- tistisch unabhängiger (unkorrelierter) Windkomponenten festgelegt. Die Länge der El- lipsenhalbachsen beträgt 1.1774 Standardabweichungen dieser Windkomponenten, so dass theoretisch 50 % der täglichen Winde aus dem Ellipsengebiet zum Ursprung wehen. Die horizontalen und vertikalen Mittelpunktabstände zum Ellipsenrand ent- sprechen 1.1774 Standardabweichungen der zonalen (u) und meridionalen (v) Wind- komponenten. Winde außerhalb der Ellipsen sind durch Kreuze gekennzeichnet und lassen sich über die Farbe den Jahreszeiten zuordnen. Zur Unterstützung der nach- folgenden Diskussion wurden einige statistische Kenngrößen des Nordseewindes in *Tab. 2-3*, S. 53 zusammengestellt.

Die exzentrische Lage der Windellipsen im 2. und 3. Quadranten (*Abb. 2-12*) verdeut- licht, was bereits im Rahmen der Verteilung der Zirkulationszustände (*Abb. 2-4*, S. 37) angesprochen wurde: die Nordsee befindet sich in der Breitenzone ostwärts wandern- der Wellen und Wirbel. Diese bedingen eine Vorherrschaft von Winden aus der west- lichen Hemisphäre, wie relative Häufigkeiten von 72 % (2004) bzw. 65 % (2003) bele- gen. Die Vektorwindgeschwindigkeiten (V) sind von der zonalen Windkomponente (u) dominiert (*Tab. 2-3*), während die meridionalen Windkomponenten dazu neigen, sich im Mittel zu kompensieren ( $v \ll u$ ). Die Richtungsvariabilität hat dabei zur Folge, dass die saisonalen bzw. jährlichen Vektorwindstärken (V) deutlich geringer als entspre- chende Mittelwerte des Windbetrags (Vel) ausfallen. Die Richtungsstabilität oder Per- sistenz (V/Vel) liegt in der Größenordnung von 50 % und ist gewöhnlich im Frühjahr am geringsten (*Tab. 2-3*), wenn auch der 1. (NE) und 4. (SE) Quadrant eine relativ hohe Zustandsdichte aufweisen (*Abb. 2-12*).

Die Zustandsdichte im NW-Quadranten ist übers Jahr von 30 % (2003) auf 39 %, im Frühjahr sogar von 26 % (2003) auf 46 % angestiegen. Während der NW-Quadrant gewöhnlich im Herbst und Winter erheblich geringer und in den verbleibenden Jahres- zeiten etwa gleichstark besetzt ist wie der SW-Quadrant, ergaben sich im Jahr 2004 für alle Jahreszeiten fast gleiche Besetzungsdichten von etwa 37 %; eine Ausnahme

bildete wieder das Frühjahr, in dem mit 46 % zu 21 % (SW) ein starkes NW-Überge-  
wicht herrschte.

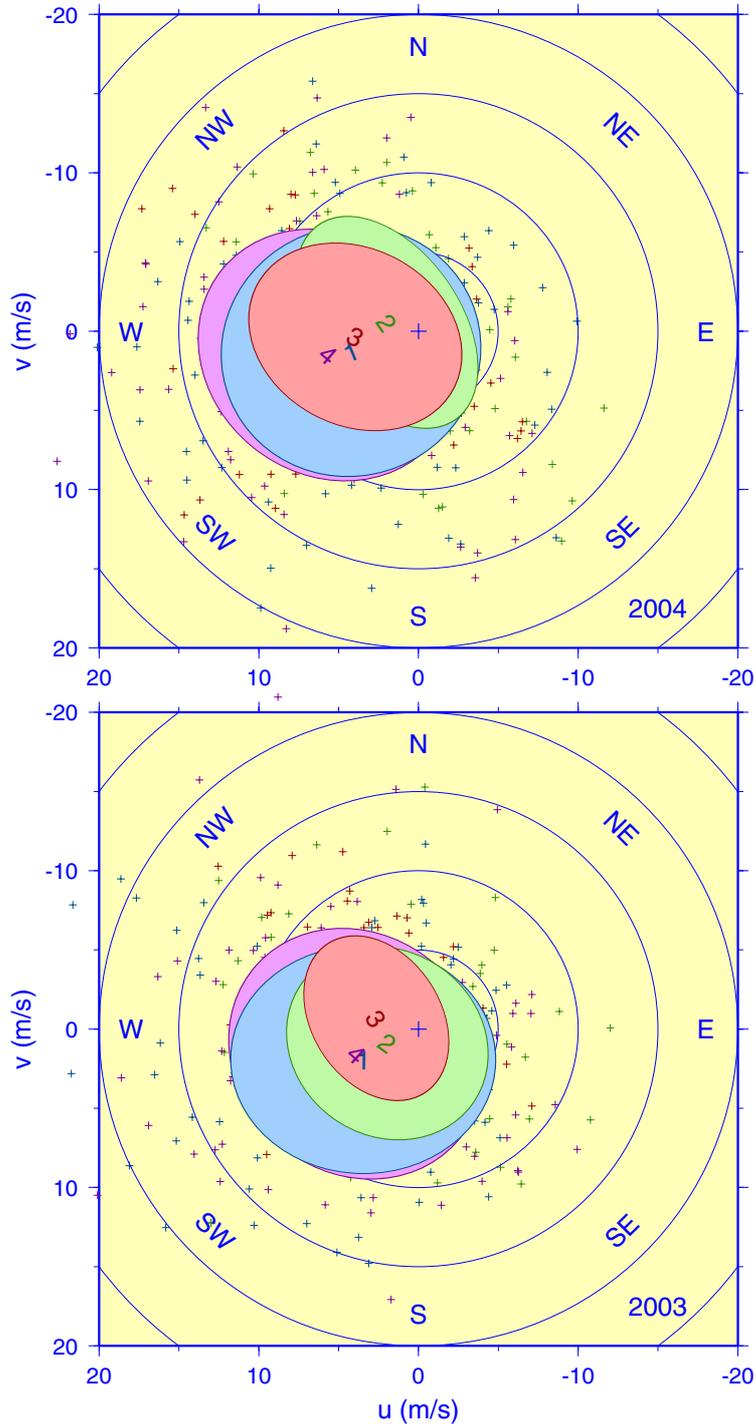


Abb. 2-12: Saisonale 50%-Wahrscheinlichkeitsellipsen des »Nordseewindes« (1=Winter=JFM, 2=Frühling, etc.); oben: 2004, unten: 2003.

Fig. 2-12: Seasonal 50%-probability ellipses for the »North Sea Wind« (1=winter=JFM, 2=spring, etc.); top: 2004, bottom: 2003.

Außer im Frühjahr übertrafen die Vektorwindstärken (V) und Geschwindigkeitsbeträge (Vel) im Jahr 2004 in allen Jahreszeiten sowie im Jahresmittel die des Vorjahres

(Tab. 2-3). Die diesbezüglich stärksten Unterschiede ergaben sich für das Sommerquartal (Abb. 2-12). Der Anteil von Starkwinden (Windstärken > 5 Bft oder 10 m/s) entsprach in dieser Jahreszeit mit 22 % dem 2.5-fachen des Wertes im Sommer 2003 (9 %). Übers Jahr ergab sich ein Anstieg von 24 auf 33 %. Starkwinde im NE- und SE-Quadranten blieben mit insgesamt 4 % bzw. 15 Ereignissen unverändert selten.

Gegenüber dem schwachwindigen Jahr 2003 waren die beschriebenen Windverhältnisse im Berichtsjahr eher normal.

WIND	U	S <sub>U</sub>	V	S <sub>V</sub>	V	V <sub>DIR</sub>	VEL	PERS	FE <sub>50</sub>
<b>2004</b>	4.0	6.3	0.6	6.1	4.0	W	8.4	48	166
<b>JFM</b>	4.2	6.9	1.3	6.7	4.4	WSW	9.4	47	202
<b>AMJ</b>	2.0	4.8	-0.6	5.7	2.1	WNW	7.0	29	108
<b>JAS</b>	4.0	5.7	0.4	5.0	4.0	W	7.4	54	122
<b>OND</b>	5.7	6.9	1.5	6.8	5.8	WSW	9.9	59	202
<b>2003</b>	3.0	5.9	0.9	5.7	3.1	WSW	7.6	41	148
<b>JFM</b>	3.5	7.1	1.9	6.1	4.0	WSW	8.5	46	188
<b>AMJ</b>	2.0	5.4	0.9	5.2	2.1	WSW	6.9	31	121
<b>JAS</b>	2.7	3.9	-0.7	4.4	2.7	WNW	5.7	48	71
<b>OND</b>	3.9	6.8	1.5	6.7	4.2	WSW	9.2	45	198

Tab. 2-3: Nordseewindstatistik. Mittelwerte und Standardabweichungen (m/s) für zonale ( $u, s_u$ ) und meridionale ( $v, s_v$ ) Windkomponenten, Vektorwind und -richtung ( $V, V_{dir}$ ), Geschwindigkeitsbetrag ( $Vel$ ), Persistenz ( $V/Vel$  in %) und »Fläche« der 50%-Wahrscheinlichkeitsellipse ( $FE_{50} = 1.3863 \pi s_a s_b$  in J/kg).

Table 2-3: North Sea Windstatistics. Means and standard deviations (m/s) for zonal ( $u, s_u$ ) and meridional wind components ( $v, s_v$ ), vector wind and direction ( $V, V_{dir}$ ), velocity ( $Vel$ ), persistence ( $V/Vel$  in %), and »area« of 50%-probability ellipse ( $FE_{50} = 1.3863 \pi s_a s_b$  in J/kg).

### 2.4.5 Zeitliche Entwicklung

Die zeitliche Entwicklung des Nordseewindes lässt sich in einem progressiven Vektordiagramm gut veranschaulichen. Abb. 2-13 zeigt die virtuelle Trajektorie für das Jahr 2004 gemeinsam mit dem Ensemble seit 1971. Diese Trajektorien 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. 2-13 tatsächlich die Dimension einer Länge haben. Die virtuellen Trajektorien lassen sich demnach als scheinbare Versetzungen 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 bezeichnen die Monatsanfänge (Januar, Februar, etc.). Der Abstand zwischen zwei konsekutiven Zeitmarken dividiert durch die Monatslänge in Tagen liefert den monatlichen Vektorwind in m/s. Die scheinbare Versetzung von etwa 24 900 km im Dezember 2004 beispielsweise entspricht einem Westwind der Stärke 9.3 m/s.

Für ein beliebiges Tagesdatum ergibt sich der klimatologische Vektorwind als resultierender Wind aus der mit dem Faktor 1/30 skalierten Vektorsumme der zum jeweiligen Datum gehörigen Winde des Zeitraums 1971 – 2000. Die klimatologische Trajektorie (grün) setzt sich sequentiell aus diesen täglichen Vektormitteln zusammen. Der End-

punkt jedes der 365 Teilstücke definiert den »Schwerpunkt« der Punktwolke des Ensembles am jeweiligen Tag, wie beispielhaft anhand der ausgezeichneten finalen Punkte der individuellen Trajektorien erahnbar ist (Abb. 2-13). Wie für die jährlichen Tra-

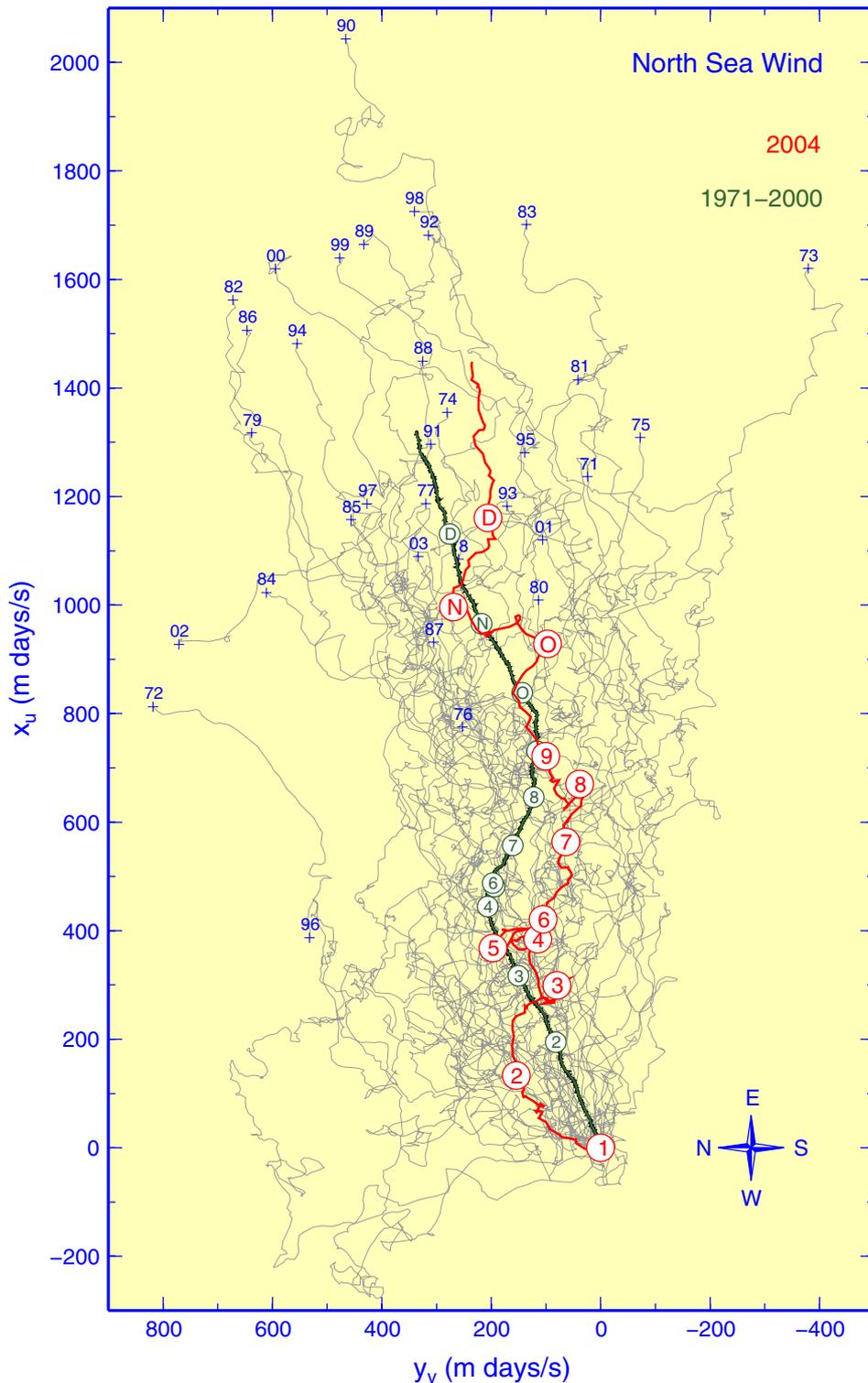


Abb. 2-13: Virtuelle Trajektorie des »Nordseewindes« mit Ensemble und Klimatologie. Zeitmarken kennzeichnen Monatsanfänge, Jahreszahlen die Endpunkte der Ensemblemitglieder.

Fig. 2-13: Progressive daily vectors of the »North Sea Wind« with ensemble and climatology. Markers indicate the first day in a month, years final points of ensemble members.

jektorien lassen sich mittlere Vektorwinde aus den (geradlinigen) Abständen zwischen beliebigen Zeitmarken ableiten. Während sich jedoch für jene aus der Weglänge entlang der Trajektorie (Linienintegral) auch die mittlere Windgeschwindigkeit ergibt, trifft dies für die klimatologische Trajektorie nicht zu. Bei einer Gesamtlänge von 1508 m/s x Tag ergäbe sich beispielsweise im Jahresmittel eine Windgeschwindigkeit von nur 4.1 m/s, welche die aus dem 30-jährigen Mittel der Weglängen der Einzeltrajektorien berechnete korrekte Geschwindigkeit von 9.0 m/s erheblich unterschreitet. Die Diskrepanz resultiert aus der »Unterschlagung« täglicher »Umwege«. Werden die täglichen Teilstücke durch die skalierten Sequenzen der jeweils 30 zugrunde liegenden Vektoren ersetzt, führt dies zu einer »Entglättung« der klimatologischen Trajektorie, deren Länge von 3299 m/s x Tag (schwarz) dann zur korrekten mittleren Windgeschwindigkeit passt.

Die Nettoversetzung im Jahr 2004 entspricht einem mittleren Vektorwind von 4.0 m/s aus W (261°) und Rang 21 im Gesamtensemble (34), welches den Wertebereich von 1.8 (1996) bis 5.7 m/s (1990) abdeckt. Der Endpunkt der Trajektorie befindet sich unweit des klimatologischen »Schwerpunkts« (3.7 m/s, 256°) und gleichzeitig im Mittelfeld der Punktwolke des Ensembles (*Abb. 2-13*). Das Jahresmittel des Betrags der Windgeschwindigkeit – das sich wie beschrieben aus der Weglänge der Trajektorie ableitet – lag im Jahr 2004 bei 8.4 m/s und nahm Rang 7 im Gesamtensemble ein. Die geringsten Windgeschwindigkeiten (Rang 1–3) traten mit 7.6, 8.0 und 8.3 m/s im Vorjahr (2003), 1987 und 1976 auf, die höchsten (Rang 32–34) 1986, 2000 (je 9.6) und 1990 (10.0 m/s). Das geringe Geschwindigkeitsmittel in Verbindung mit dem leicht überdurchschnittlichen Vektormittel deutet auf eine erhöhte Richtungsstabilität der u-Komponente des Windes hin, welche den Vektorwind gewöhnlich dominiert. Im Jahr 1976, das sich hinsichtlich des geringen Geschwindigkeitsmittels kaum von demjenigen im Jahr 2004 unterscheidet, bedingten hingegen häufige W/E-Richtungswechsel ein ebenfalls geringes Vektormittel von 2.2 m/s (Rang 2).

Die klimatologische Trajektorie bietet eine kompakte Zusammenschau der jahreszeitlichen Veränderungen der atmosphärischen Aktionszentren (Islandtief und Azorenhoch) im Nordatlantik. Die Variationen dieser quasipermanenten Druckgebilde bzgl. Lage und Intensität, die sich im Verlauf der Trajektorie spiegeln, wurden bereits im Rahmen der Diskussion der klimatologischen Luftdruckverteilungen erörtert (vgl. S. 45 und *Abb. 2-9, S. 47*). Die Trajektorie gliedert sich in drei Abschnitte. Gleichförmig kräftige Winde aus WSW prägen von Oktober bis März die kalte Jahreshälfte, die unvermittelt in die Stagnationsperiode im April und Mai übergeht, in deren Verlauf sich der Einfluss des Azorenhochs durchsetzt. An dessen Nordrand auftretende schwache WNW-Winde charakterisieren ab Juni den Durchschnittssommer.

Bei Interpretation und Einschätzung des Trajektorienverlaufs im Jahr 2004 ist zu beachten, dass Teilabschnitte dann gut mit dem klimatologischen Verlauf übereinstimmen, wenn sie sich durch Parallelverschiebung annähernd zur Deckung bringen lassen, also sowohl hinsichtlich Abschnittslänge als auch Richtung ähnlich sind. Dies trifft tatsächlich nur im Juli und mit Einschränkung im März und Dezember zu. Der grundsätzliche Verlauf stellt einen »Torkelpfad« um die Klimatologie herum dar, wie insgesamt 7 Querungen belegen (*Abb. 2-13*). Diese Querungen waren gewöhnlich mit Anomalien der meridionalen Windkomponente verbunden (vgl. *Abb. 2-11, S. 50*), deren Vorzeichen meist von Monat zu Monat (1&2, 4&5, O&N) oder sogar innerhalb eines Monats (9) wechselte. Die wechselseitige Annullierung der meridionalen Abweichungen (infolge des undulatorischen Fortschreitens der Trajektorie) in Verbindung mit meist geringen Anomalien der zonalen Windkomponente hatte zur Folge, dass eine

große räumliche Nähe zu zeitgleichen Punkten der Klimatrajektorie fast immer bestehen blieb. Diese intermonatliche Anomaliekompensation trat bereits in geringen saisonalen Druckanomalien (*Abb. 2-8, S. 46*) zu Tage, welche im klimatologieähnlichen Nettoversatz der saisonalen Trajektorienabschnitte eine Entsprechung haben.

## 2.5 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 Wärmeflüssen (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. Der Jahresgang 2004 der Globalstrahlung auf Norderney ist in Abb. 2-14 gemeinsam mit der Klimatologie des Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt.

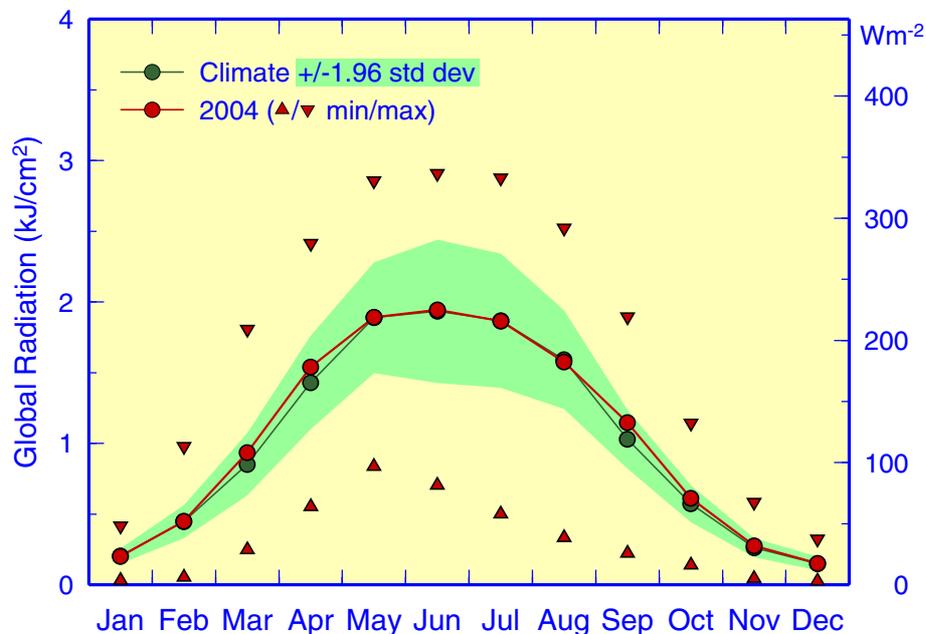


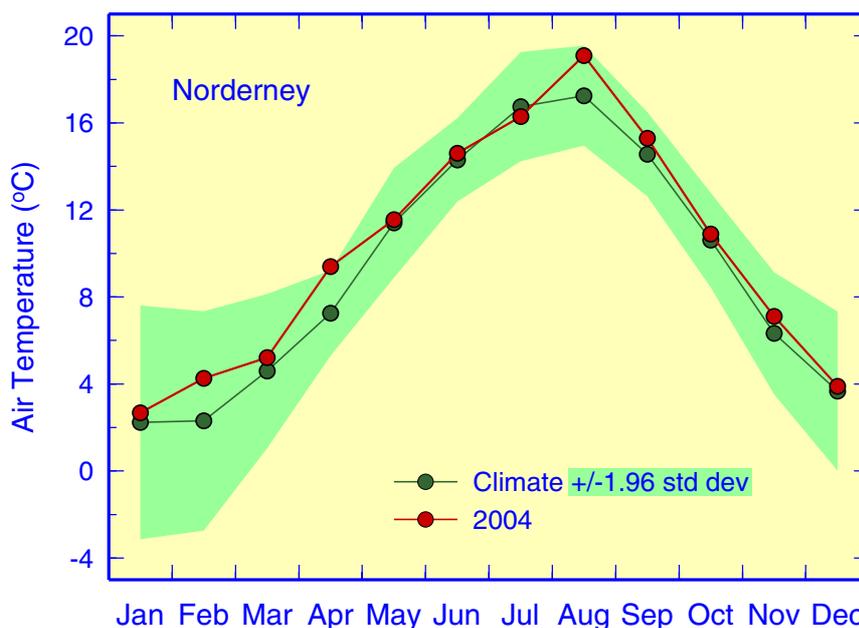
Abb. 2-14: Jahresgang 2004 der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971 – 2000) mit 95%-Band ( $\pm 1.96$  zwischenjährige Standardabweichungen).  $1 \text{ kJcm}^{-2}$  entspricht einer Strahlungsflussdichte von  $116 \text{ Wm}^{-2}$ .

Fig. 2-14: Seasonal cycle in 2004 of monthly averaged daily global radiation totals at Norderney together with intramonthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means, and 95%-band (climatology  $\pm 1.96$  standard deviations).  $1 \text{ kJcm}^{-2}$  is equivalent to a radiation flux density of  $116 \text{ Wm}^{-2}$ .

Gegenüber dem Jahr 2003, welches sich durch eine extreme Häufung von Hochdruckwetterlagen (vgl. S. 44) und demzufolge eine fast ganzjährig überdurchschnittliche Sonneneinstrahlung auszeichnete (LOEWE ET AL. 2005), verlief die aktuelle jahreszeitliche Entwicklung »normal«. Dies ist nicht allein dem Umstand zu entnehmen, dass alle Monatswerte des Jahres 2004 im »grünen Bereich« liegen, sondern auch

der Tatsache, dass diese mit den klimatologischen Strahlungsflussdichten mehrheitlich nahezu übereinstimmen. Die mäßigen Überschüsse im März dürften mit relativ häufigem Hochdruckwetter in Verbindung stehen (vgl. *Abb. 2-7, S. 43*), diejenigen im September auf solche sonnigen Wetterlagen in der ersten Monatshälfte zurückzuführen sein (vgl. *Tab. 2-1, S. 39*). Ähnliches gilt für die moderaten positiven Abweichungen im April, für den schwache SE-Winde im Randbereich hohen Drucks über Skandinavien charakteristisch waren.

Anhand von *Abb. 2-15* ist ein Vergleich der Lufttemperaturentwicklung im Jahr 2004 mit dem klimatologischen Jahresgang möglich. Nennenswerte Störungen des insgesamt normalen Temperaturgangs traten lediglich in den Monaten April und August auf. Erstere befindet sich qualitativ im Einklang mit der gleichzeitig moderat erhöhten Sonneneinstrahlung. Die signifikante Stärke von 2.1 K über dem Klimanormalwert (7.3 °C) erscheint jedoch erst in anbetracht kontinentaler Warmluftadvektion aus SE plausibel. Die hinsichtlich der zwischenjährlichen Variabilität mäßige, hinsichtlich des Betrags von 2.0 K gleichstarke Warmanomalie im Februar erklärt sich demgegenüber durch Zufuhr maritimer Luftmassen aus NW über die zu dieser Jahreszeit gegenüber den Landmassen relativ warme Nordsee (*Abb. 2-10, S. 49*). So lag die mittlere Oberflächentemperatur der Nordsee mit 6.6 °C im Februar 2004 nicht nur über dem Klimanormalwert (5.7 °C), sondern auch klar über den entsprechenden Lufttemperaturen auf Norderney (*Abb. 2-15*).



*Abb. 2-15: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney für 2004 mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima  $\pm 1.96$  zwischenjährige Standardabweichungen)*

*Fig. 2-15: Monthly air surface temperatures at Norderney for 2004 together with 1971 – 2000 base period means, and 95%-band (climatology  $\pm 1.96$  standard deviations).*

Die Lufttemperatur im August blieb mit 19.1 °C und einer Abweichung von 1.8 K unterhalb der Signifikanzgrenze von 19.6 °C. Diese Warmanomalie hat keine Entsprechung in der den gesamten Sommer über »ungewöhnlich normalen« Sonneneinstrahlung (*Abb. 2-14*). Auch angesichts der extrem geringen Anzahl von Hochdruckwetterlagen (*Abb. 2-7, S. 43*) erscheint sie unverständlich. Die »Rettung« des norddeutschen Som-

mers (Lefebvre 2005) bestand offenbar vor allem in der Zufuhr kontinentaler Warmluft aus SE, welche etwa bis zur Monatsmitte andauerte (*Tab. 2-1, S. 39*). Die Lufttemperatur im meteorologischen Sommerquartal (Juni bis August) blieb zwar dennoch mit 16.7 °C klar hinter den »mediterranen« Temperaturen der Jahre 2003 (18.3 °C) und 2002 (17.9 °C) zurück, war aus statistischer Sicht jedoch durchaus normal. Zur gleichen Bewertung des Sommers 2004 gelangen BISSOLLI UND MÜLLER-WESTERMEIER (2005) für Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer im deutschen Bundesgebiet.

## 2.6 Zusammenfassung

Mit dem NAO-Zustand konforme Verstärkungen bzw. Abschwächungen der Zonalzirkulation über der Nordsee traten im September (+), Oktober (–) und Dezember (+) ein. Extreme NAO-Zustände im April (+) und Juni (–) ereigneten sich hingegen gemeinsam mit entgegengesetzten Zirkulationsanomalien im Nordseeraum. Der Zusammenhang zwischen der Zirkulationsstärke über dem Nordatlantik und der Nordsee ist ein statistischer und auf das Winterhalbjahr beschränkt. Der Winter NAO-Index (DJF-Quartal) war mit  $-0.6$  schwach negativ.

Der aus täglichen Luftdruckfeldern im Meeresniveau abgeleitete Wetterlagenkalender für die Nordsee ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Interpretation von anomalen Zuständen und besonderen Ereignissen, die (un)mittelbar mit der atmosphärischen Zirkulation in Zusammenhang stehen. Bzgl. der Wetterlagen selbst wird festgehalten, dass antizyklonale Lagen A, die unter den 27 Typen die stärkste Fraktion bilden, gegenüber dem Vorjahr (27 %) erheblich seltener auftraten (19 %). Der Anteil der NW, ANW und CNW-Lagen hat sich seit 2002 schrittweise auf insgesamt 15 % erhöht und damit fast verdoppelt. Die Sturmfrequenz stieg von 16 (2003) auf 20 Tage an. Starke und sehr starke Stürme blieben jedoch aus.

Eine robuste Wetterlagenstatistik auf monatlichen und saisonalen Zeitskalen wurde mit den reduzierten Haupttypen A, C, NE, SE, SW und NW durchgeführt, indem die aktuellen Häufigkeiten im Kontext empirischer Verteilungen des Zeitraums 1971 – 2000 bewertet wurden. Während übers Jahr gesehen nur NW (80 Tage,  $P_{93}$ ) und NE-Lagen (13 Tage,  $P_7$ ) ungewöhnlich häufig bzw. selten auftraten, waren signifikante Abweichungen auf kürzeren Zeitskalen nicht auf diese Typen beschränkt. Besonders erwähnenswert erscheint das Alternieren teils extremer SE- und NW-Anomalien im April/Mai sowie von August (SE) bis November (NW). Während im Vorjahreswinter (JFM) A-Lagen mit 46 Tagen ( $> P_{99}$ ) dominant waren, führte eine hohe Tiefdruckaktivität im Januar und Februar 2004 (C,  $> P_{95}$ ) erheblich mildere Wintertemperaturen herbei.

Die Analyse saisonaler Luftdruckfelder ergab nur geringe Abweichungen von den klimatologischen Verteilungen (1971 – 2000) hinsichtlich Muster und Intensität, so dass die atmosphärische Zirkulation auf diesen Zeitskalen als »normal« zu bewerten ist. Diese Normalität resultierte jedoch aus der Balancierung und Nivellierung entgegengesetzter, teils erheblicher Anomalien auf kürzeren, monatlichen Zeitskalen. Die monatlichen Anomaliefelder wiesen drei wiederkehrende Grundmuster auf, nämlich N (2 = Feb, 5, 11), W (6, 9, 12) und SE (1, 4, 8, 10), die mehrheitlich die Meridionalkomponente des Windfeldes betrafen und deshalb im Nordseesektor einen verstärkten Austausch thermischer Energie zwischen niederen und hohen Breiten anzeigen.

Aufgrund der besonderen geographischen Lage der Nordsee im Übergangsbereich zwischen Islandtief und Azorenhoch werden hybride und wirbelhafte Zirkulationsmuster auf monatlichen und längeren Zeitskalen unterdrückt, so dass für die Klassifizierung entsprechender Luftdruckverteilungen i. d. R. der Windindex über den Vorticity-index dominiert und maßgebend ist. Der Nordseewind entspricht dem Windindex bis auf einen Proportionalitätsfaktor und ist darum ein quantitatives Maß für den Luftdruckgradienten im Nordseeraum. Die saisonale Vektorwindstatistik quantifiziert folglich die oben konstatierte Normalität der jahreszeitlichen Luftdruckverteilungen im Jahr 2004.

Anhand der virtuellen klimatologischen Trajektorie des Nordseewindes wurde der jahreszeitlich wechselnde Einfluss von Islandtief und Azorenhoch verdeutlicht. Gleichförmig kräftige Winde aus WSW prägen von Oktober bis März die kalte Jahreshälfte, welche unvermittelt in eine Stagnationsperiode im April und Mai übergeht, für die sich keine bevorzugte Windrichtung angeben lässt (»der April macht, was er will«). Im Verlauf des Frühjahrs setzt sich der Einfluss des Azorenhochs durch. An dessen Nordrand auftretende schwache WNW-Winde sind ab Juni charakteristisch für den Durchschnittssommer im Nordseegebiet.

Im Jahr 2004 beschrieb die Trajektorie des Nordseewinds einen Torkelpfad um die Klimatologie. Die Querungen standen gewöhnlich mit monatlich alternierenden und sich dadurch annullierenden Anomalien der meridionalen Windkomponente in Verbindung. Infolge dieses undulatorischen Fortschreitens blieb eine große räumliche Nähe zu zeitgleichen Punkten der Klimatrajektorie fast immer bestehen. Die Gesamtwegstrecke entlang der aktuellen Trajektorie war dennoch gering. Sie wurde mit einer mittleren Geschwindigkeit von 8.4 m/s zurückgelegt, welche wie im Vorjahr (7.6 m/s) deutlich unter dem klimatologischen Windgeschwindigkeitsbetrag von 9.0 m/s blieb. Die virtuelle Nettoversetzung entsprach im Jahr 2004 einem mittleren Vektorwind von 4.0 m/s aus W (261°), der sich nur unwesentlich vom klimatologischen Vektorwind unterschied (3.7 m/s aus WSW, 256°).

Der Jahresgang der Globalstrahlung auf Norderney entsprach im Jahr 2004 insgesamt dem normalen klimatologischen Verlauf. Geringe Überschüsse im März, April und September kamen unter Hochdruckeinfluss zustande. Die jahreszeitliche Entwicklung der Lufttemperatur auf Norderney verlief ähnlich normal. Nennenswerte positive Abweichungen traten im April und August auf und wurden durch Zufuhr kontinentaler Warmluft aus SE erklärt. Die Mitteltemperatur des meteorologischen Sommers (JJA) blieb dennoch hinter den »mediterranen« Temperaturen der Sommer 2002 (17.9 °C) und 2003 (18.3 °C) klar zurück, war jedoch mit 16.7 °C aus statistischer Sicht durchaus normal.

## 2.7 Referenzen

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

Bissolli, P. und G. Müller-Westermeier, Die Witterung der Sommermonate 2002 bis 2004, 159-162 in: Klimastatusbericht 2004, *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach, 220pp, 2005.

[www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html](http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html)

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.

Lefebvre, Ch., Das Klima in den deutschen Küstengebieten, 101-105 in: Klimastatusbericht 2004, *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach, 220pp, 2005.

[www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html](http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html)

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](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht33/index.jsp)

Loewe, P., S. Schmolke, G. Becker, U. Brockmann, S. Dick, C. Engelke, A. Frohse, W. Horn, H. Klein, S. Müller-Navarra, H. Nies, N. Schmelzer, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald, S. Weigelt, Nordseezustand 2003, *Berichte des BSH*, Nr. 38, 220pp, 2005.

[www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht38/index.jsp](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht38/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) komplementärer 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 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 2004 dokumentiert und eingeordnet. Ferner werden Seegangs- und Meereisverhältnisse, aber auch integrale Zustandsgrößen wie Volumentransporte durch die Nordseeingänge und Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht behandelt. Großer Wert wird dabei stets auf prozessorientierte Interpretationen gelegt, indem ursächliche Zusammenhänge sowohl zwischen den diversen ozeanographischen Zustandsanomalien selbst, als auch mit externen Anomalien des atmosphärischen Zustands aufgezeigt werden. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur, dem auch hinsichtlich der Artenzusammensetzung besondere Bedeutung zukommt, wird im Abschnitt Mischmasch-Klima im Zusammenhang mit regimetypischen Luftdruckverteilungen und Windbedingungen diskutiert, deren Charakter sich auch der Langzeitentwicklung des Wasserstands aufprägte.

## 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. 66*). Schließlich wird im *Abschnitt 3.1.3, S. 67* eine Klassifizierung der täglichen Reststrommuster in der Deutschen Bucht für das Jahr 2004 präsentiert, die in engem Zusammenhang zu den Wetterlagen über der Nordsee steht (*Abschnitt 2.2.2, S. 38*). Die Datenbasis für alle Beiträge bilden mit dem operationellen BSH-Modell ›BSHcmod‹ simulierte Strömungsfelder (DICK ET AL. 2001).

### 3.1.1 Saisonale geographische Verteilungen

Die Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2004 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 Windantrieb und Dichteverhältnisse generierten Restströme zeigen. Da eine Strömungsklimatologie für das BSH-Modell nicht vorliegt, wird ein Vergleich mit entsprechenden saisonalen Verteilungen des Jahres 2003 durchgeführt (LOEWE ET AL. 2005).

Das resultierende Strömungsfeld im Winter (JFM) 2004 zeigt ein für diese Jahreszeit typisches zyklonales Muster. Intensität und Richtungsstabilität der Strömungen waren dabei stärker ausgeprägt als im windschwachen Vorjahreszeitraum. Dies trifft insbesondere auf den atlantischen Einstrom im Nordwesten, aber auch die Strömungen in der westlichen Nordsee insgesamt zu. Dieser verstärkte südliche Ast des zyklonalen Strömungsmusters geht auf eine entsprechend ausgeprägte Nordanomalie des Windfeldes im Februar zurück, während der nördliche Ast den südlichen Windantrieb im Januar spiegelt (*Abb. 2-10, S. 49*). Das zyklonale Muster des winterlichen Strömungsfeldes im Jahr 2004 hat demnach Kompositcharakter, d. h. es tritt erst durch Mittelung asynchroner Teilmuster in Erscheinung. Die Transporte durch den Englischen Kanal waren ähnlich schwach ausgeprägt wie im Winter 2003.

Die Strömungsmuster im Frühjahr (AMJ) 2004 und 2003 zeigen in der südlichen Nordsee nur geringe Unterschiede. Die höchsten Reststromgeschwindigkeiten traten im Kanal, vor der britischen Südostküste sowie im Bereich des Ausstroms außerhalb der norwegischen Küste auf. Insgesamt waren Stromstärken und Stabilität für die Jahreszeit sehr schwach ausgeprägt. Ursache hierfür war der Kompensationseffekt infolge SE-licher Windanomalien im April und entgegengesetzter Anomalien im Windantrieb im Mai (vgl. *Abb. 2-11, S. 50*).

In den Sommermonaten Juli bis September (JAS) weist die Oberflächenzirkulation aufgrund des schwachen Windantriebs gewöhnlich kein großräumiges Muster auf, sondern lediglich kleinskalige diffuse Strukturen wie im Sommer 2003. Davon abweichend war das Strömungsmuster im Sommer 2004 klar zyklonal und spiegelt somit

den zyklonalen Charakter der großräumigen atmosphärischen Zirkulation (vgl. Abb. 2-8, S. 46). Der Einstrom von Atlantikwasser durch den Kanal und von Ostseewasser durch das Skagerrak sowie der Ausstrom über der Norwegischen Rinne waren jedoch gering.

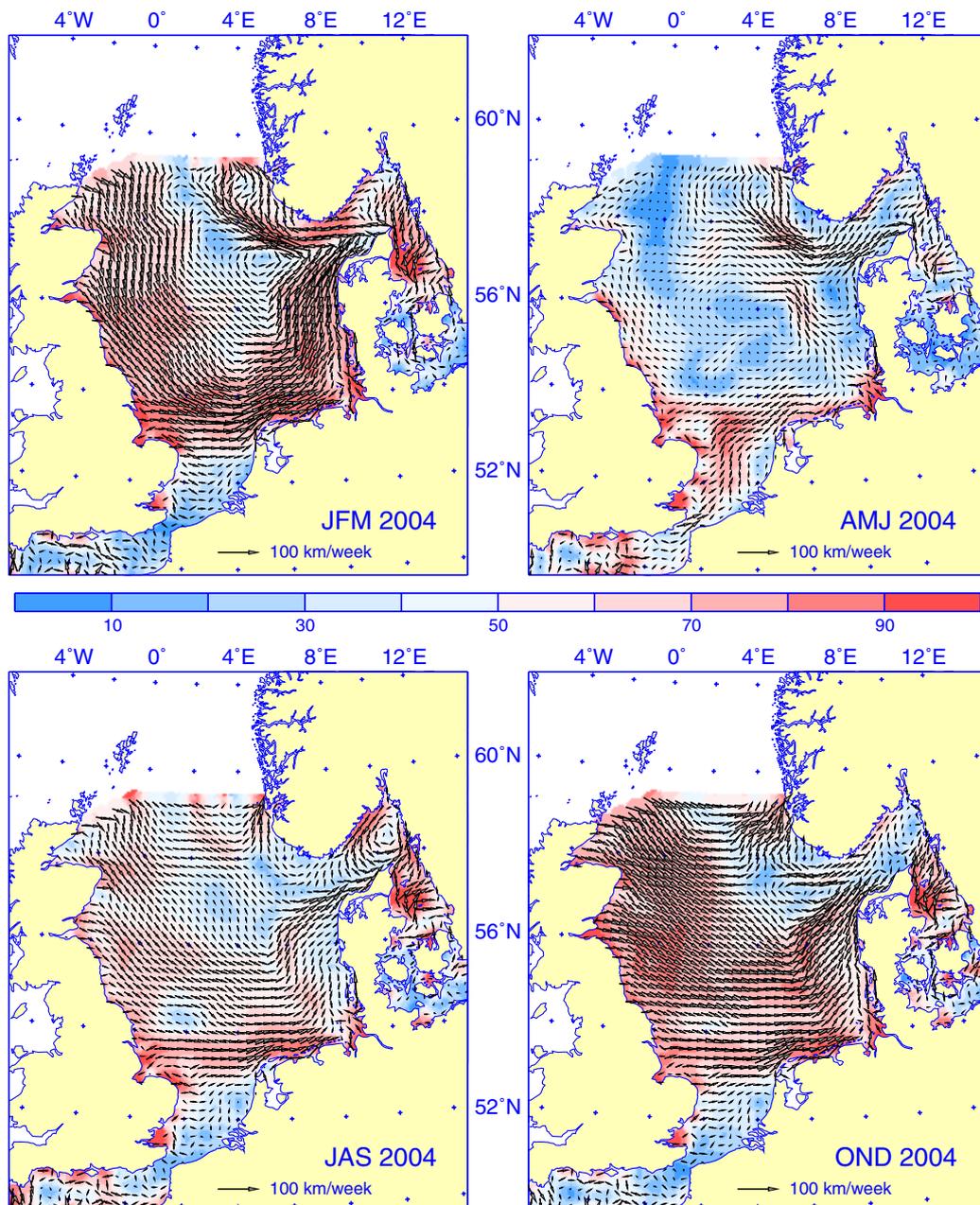


Abb. 3-1: Saisonale Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2004 (JFM = Januar-Februar-März, AMJ ...). Vektormittel aus Strömungsfeldern des »BSHcmod«. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.

Fig. 3-1: Seasonal surface circulation of the North Sea in 2004 (JFM = January-February-March, AMJ ...). Vector mean currents from »BSHcmod«. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

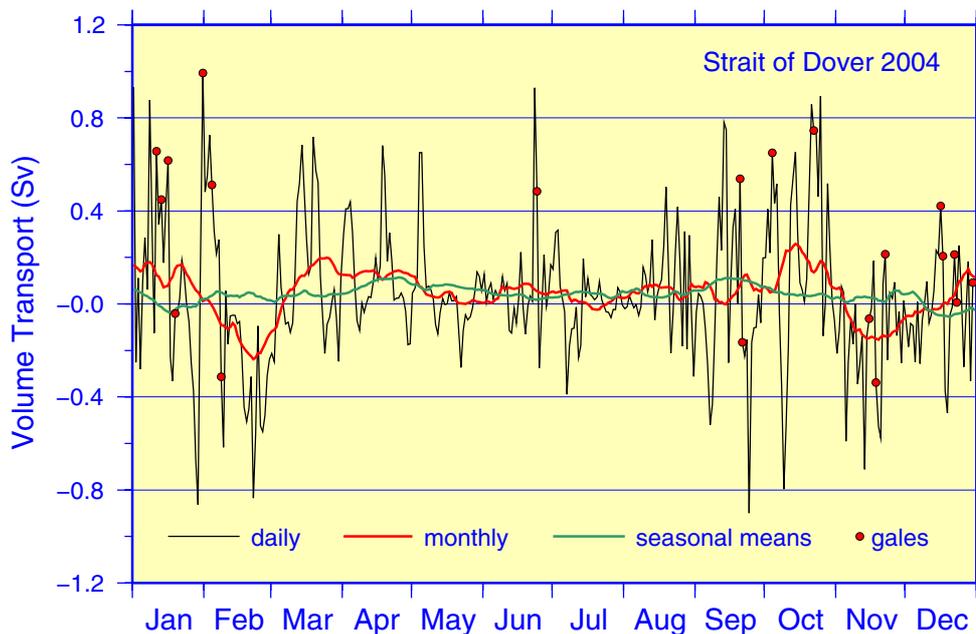
Das zyklonale Strömungsfeld im Herbst 2004 entsprach weitgehend dem des vorangegangenen Winters. Im Vergleich zu den Vorjahresverhältnissen traten stärkere und

richtungsstabilere Strömungen auf. Der Nettoeinstrom von Atlantikwasser durch den Kanal war erneut gering. Die Transporte im Skagerrak und über der Norwegischen Rinne unterschieden sich ebenfalls wenig von denjenigen im Vorjahreszeitraum.

Obgleich die Nordseezirkulation infolge vorherrschender Winde aus SW – NW im Langzeitmittel durch ein großräumiges zyklonales Muster charakterisiert ist, zeigen die hier präsentierten Strömungsfelder, dass erhebliche zwischenjährliche, saisonale, aber auch kurzfristige 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 simulierten Strömungen des operationellen Zirkulationsmodells des BSH. Diese Daten wurden zunächst über zwei Tideperioden von etwa 24.8 Stunden gemittelt, um Gezeiteneffekte zu eliminieren. Die Volumentransporte durch beide Querschnitte sind als Tagesmittel und übergreifende Monats- und Quartalsmittel für das Jahr 2004 in *Abb. 3-2* und *Abb. 3-3* dargestellt, wobei in die Nordsee gerichtete Transporte positives Vorzeichen haben. In der Zeitreihe der täglichen Transporte wurden Sturmereignisse markiert, deren Stärke und Typus dem Wetterlagenkalender entnommen werden können (vgl. *Tab. 2-1*, S. 39).



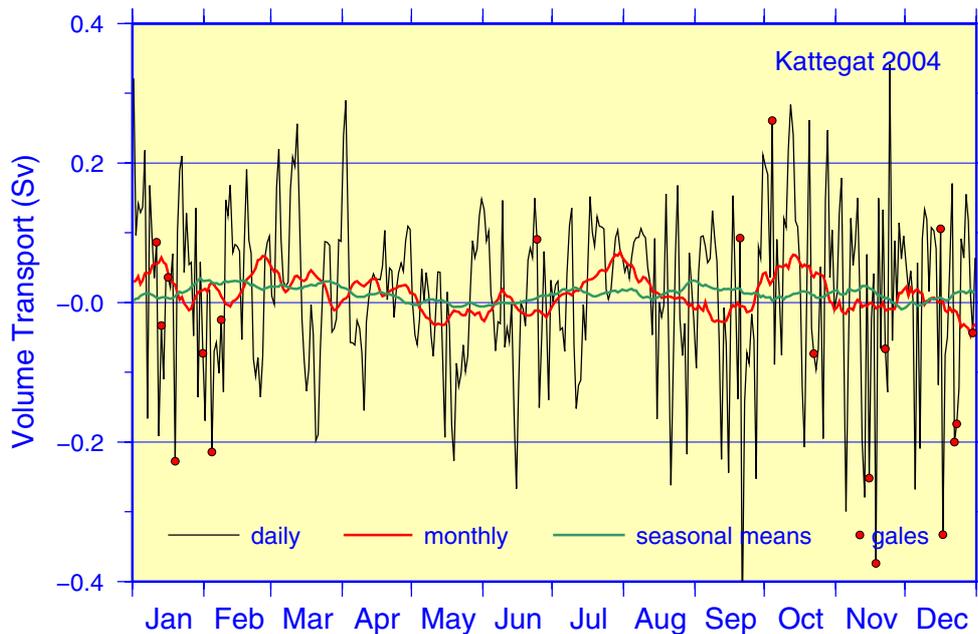
*Abb. 3-2: Wassertransport durch die Straße von Dover in 2004 (BSHcmod); 1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s.*

*Fig. 3-2: Volume transport through the Strait of Dover in 2004 (BSHcmod); 1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s.*

Im Jahr 2004 lag der Nettotransport durch den Englischen Kanal mit 0.044 Sv im Bereich langjähriger Mittel (SMITH ET AL. 1996). Auch im Vergleich mit den Vorjahreswerten von 0.025 Sv (2003) und 0.10 Sv (2002) belegt der aktuelle Jahresnettotransport eine mittlere Position. In den Monaten Januar, März, April und Oktober wurde bei vorherrschend S- bis SW-lichem Wind (vgl. *Abb. 2-10*, S. 49) Atlantikwasser durch den Kanal in die Nordsee transportiert. Im Februar und November hingegen bedingten N-

Anomalien im Luftdruck- bzw. Windfeld (z. B. *Abb. 2-11, S. 50*) hier einen starken Ausstrom von Nordseewasser. Insbesondere die schwachen saisonalen Transporte im Winter und Herbst resultierten demnach aus entgegengesetzten und nicht aus durchgängig schwachen Einstromverhältnissen innerhalb dieser Jahreszeiten.

Im Übergangsbereich Nordsee / Ostsee wechselten sich Ein- und Ausstromphasen ab (*Abb. 3-3*). Die Tagesmittelwerte schwankten zwischen  $\pm 0.4$  Sv. Der Jahresnettotransport betrug  $0.015$  Sv und entsprach damit dem langjährigen Mittel (ICES 1983). Generell überwog demnach der Einstrom von Ostseewasser in die Nordsee. Längere Perioden mit entgegengesetzten Transporten traten im Mai, Juni, September und Dezember auf.



*Abb. 3-3: Wassertransport durch das Kattegat in 2004 (BSHcmod); 1 Sv =  $10^6$  m<sup>3</sup>/s.*

*Fig. 3-3: Volume transport through the Kattegat in 2004 (BSHcmod); 1 Sv =  $10^6$  m<sup>3</sup>/s.*

### 3.1.3 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Klassifizierung der Oberflächenzirkulation in der Deutschen Bucht für das Jahr 2004 präsentiert. Die Klassifizierung der Strömungsverhältnisse ist ähnlich motiviert wie diejenige der Wetterlagen über der Nordsee (vgl. *Abschnitt 2.2, S. 35*): 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 4.3.3.4, S. 179*).

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. 64*) und hier als kartierte geographische Verteilungen der täglichen Restströme in der obersten Modellschicht (0 – 8 m) zur Verfügung standen. Diese Karten wurden im Gebiet zwi-

schen  $53^{\circ} 15' - 55^{\circ} 30' \text{ N}$  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)<sup>1</sup> für vorherrschende Strömungsrichtungen definiert (Abb. 3-4), welche in einigen Statistiken als Richtungstyp DIR zusammengefasst werden. Dabei ist wichtig, sich zu vergegenwärtigen, dass Strömungsrichtungen (im Gegensatz zu Windrichtungen) stets angeben, 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.

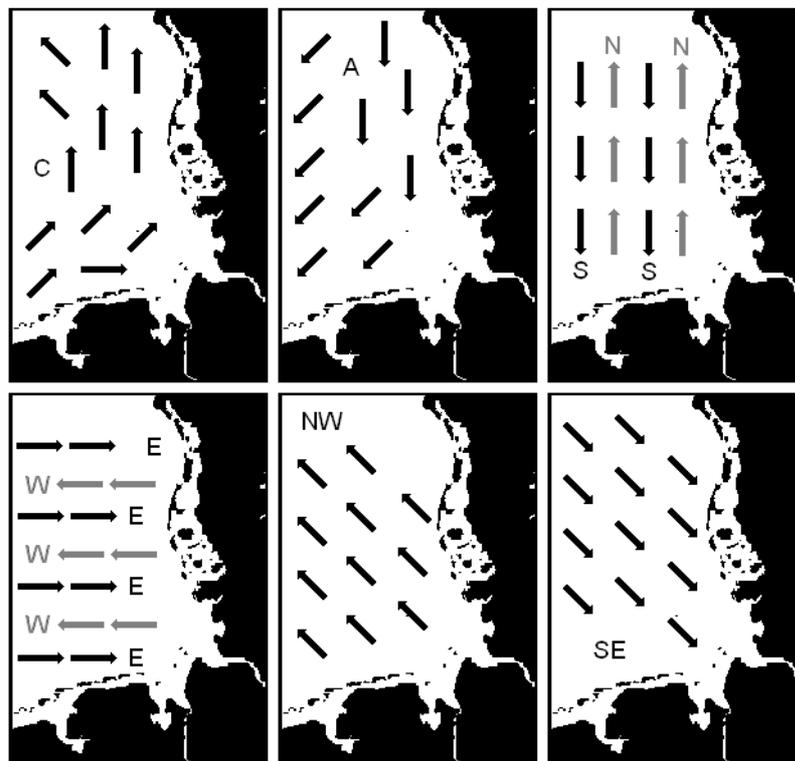


Abb. 3-4: Schematik der Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht.

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 2004 (2003) wurden an 160 (150) Tagen zyklonale, an 71 (50) Tagen antizyklonale, an 77 (109) Tagen variable und an 58 (56) Tagen gerichtete Zirkulationsmuster beobachtet. Diese Zahlen belegen klar die Dominanz zyklonaler Strömungsverhältnisse in der Deutschen Bucht (s. a. Abb. 3-1, S. 65). Darüber hinaus ergibt sich gegenüber dem windschwachen Vorjahr eine erhebliche Abnahme des diffusen V-Typs zugunsten der Rotationsmuster. Unter den Richtungsmustern traten N und NW mit 13 (17) und 21 (6) Tagen am häufigsten, E nur 1mal (7) ein. Mittelwerte und Standardabweichungen des »Durchschnittsmonats« lagen bei  $13 \pm 5$  Tagen für

1. 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.

zyklonale,  $6 \pm 4$  Tagen für antizyklonale,  $6 \pm 3$  Tagen für variable und  $5 \pm 3$  Tagen für gerichtete Zirkulationsmuster. Dass der mit dem Mittelwert assoziierte »Normalfall« eher die Ausnahme ist, machen neben den hohen Standardabweichungen auch die Spannweiten deutlich; C: 4 (Mai) – 22 (Jan); A: 1 (Jan/Aug) – 13 (Mai); V: 3 (März/Okt) – 14 (Sep); DIR: 0 (Sep) – 9 (Aug).

2004	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC					
1	NW	C	A	NW	V	C	C	V	A	N	V	V					
2	C		C	A	N	C		NW	C	W	C		A	A	V		
3					V			C		C		C		V		NW	V
4	N			C	C	V			NW				V		NW		
5							C	C		C		A		V		A	N
6	N			V	V	NW			C				A		N		
7							C			C		V		W		NW	NW
8	N			A	A	W			C				C		NW		
9		V					C					A		A		W	C
10	C		C	NW	A	A			C		C		C		C		
11		V										C		V		V	A
12	A			C	NW	V			W		A		S		V		
13		V						C						A		V	V
14	C				C	V			C		S		S		V		
15		NW								C				C		A	A
16	V					C			N		V		V		C		
17		C					C							C		SE	V
18	A		C						C		V		C		C		
19		V										C		V		C	A
20	S			C					A		V		A		C		
21		A						C						V		A	A
22	C				C				A		A		A		C		
23		V								C				A		V	A
24	C					C			A		W		V		A		
25		A					C							C		W	E
26	V		C						C		NW		V		V		
27		C										C		A		NW	N
28	A			C					NW		./.		C		./.		
29		./.						C						NW		./.	C
30	C				C				A		NW		N		C		
31		V								C				./.		NW	./.
31	V					C			NW		./.		C		./.		

Tab. 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht im Jahr 2004.

Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2004.

Ein Vergleich der saisonalen Häufigkeiten der Hauptzirkulationsmuster in den Jahren 2003/4 zeigt (Abb. 3-5), dass die starke Abnahme des V-Typs auf 71 % des Vorjahreswerts zeitlich auf Winter und Frühjahr beschränkt war und vor allem durch die gleichzeitige Zunahme des A-Musters kompensiert wurde. Ferner wäre der Zuwachs antizyklonaler Strömungsformen in der Jahresbilanz ohne das Defizit in den Sommermonaten deutlicher hervorgetreten. Die zwischenjährigen Unterschiede in den Häufigkeiten der Strömungsmuster waren im Herbst am geringsten.

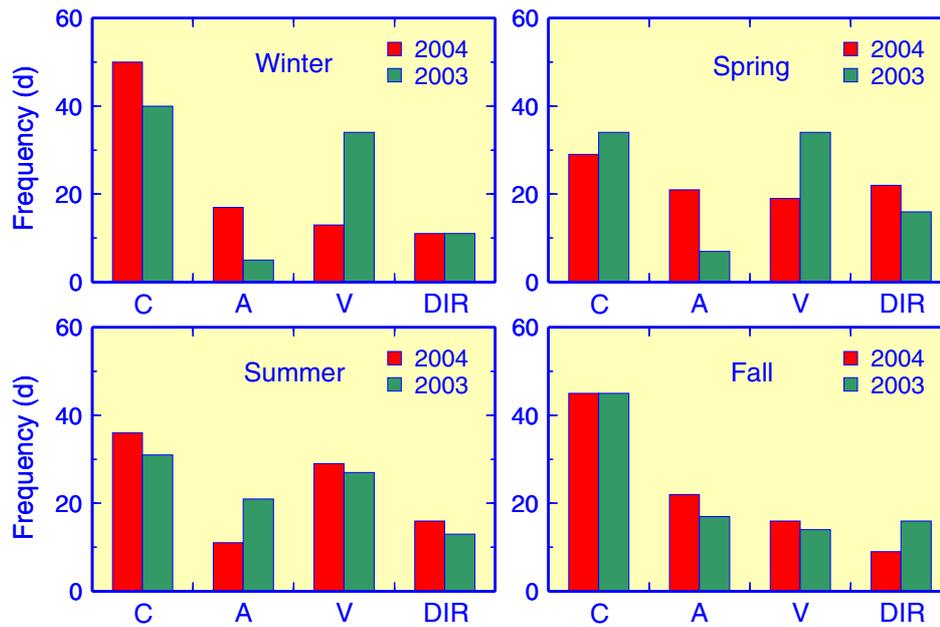


Abb. 3-5: Saisonale Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2003 und 2004.

Fig. 3-5: Seasonal frequencies of circulation patterns in the German Bight for 2003 and 2004.

Eine Auswertung von Häufigkeit und Andauer der Hauptzirkulationsformen C, V und A im Jahr 2004 bietet Abb. 3-6. 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.

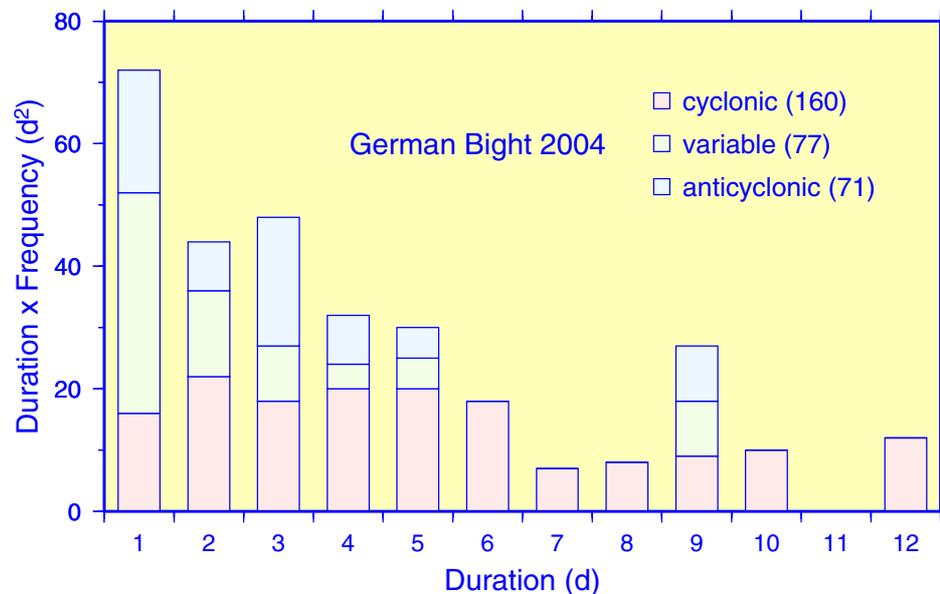


Abb. 3-6: Häufigkeit und Andauer der drei wichtigsten Zirkulationstypen.

Fig. 3-6: Frequency and duration of main circulation types.

Die längsten C-Runs mit einer Dauer von 10 und 12 Tagen wurden in den Wintermonaten beobachtet (Tab. 3-1), für welche bereits früher eine ungewöhnliche Häufung zyklonaler Wetterlagen festgestellt wurde (Abb. 2-6, S. 42). Ungewöhnlich beständige A- und V-Muster traten mit jeweils 9 Tagen lediglich in der letzten Mai- bzw. Septemberdekade ein. Insgesamt 16 Runs dauerten länger als 4 Tage an und deckten 112 Tage (31 %) des Jahres ab. Unter 72 »Eintagsfliegen« erweist sich der V-Typ mit 36 Ereignissen als typische Übergangsform. Bemerkenswert ist ferner, dass der Zirkulationstyp A ein sekundäres Maximum bei Run-Längen von 3 Tagen erreichte, während die Zirkulationsformen V und C mit zunehmender Run-Länge kürzere bzw. gleichbleibende Gesamtzeiten erzielten.

Abschließend erscheint eine Untersuchung der Abhängigkeit der Strömungsmuster von der Wetterlage instruktiv. Dazu wurde die gemeinsame Häufigkeitsverteilung der täglichen Strömungsformen und der reduzierten atmosphärischen Zirkulationstypen (vgl. Abschnitt 2.2.3, S. 40) analysiert. Die Säulenhöhen in Abb. 3-7 geben die absoluten Häufigkeiten der 6 Hauptwetterlagen im Jahr 2004 an, die farbigen Säulensegmente die Häufigkeiten der 4 Hauptströmungsmuster unter den jeweiligen atmosphärischen Bedingungen, d. h. die Anzahl der (insgesamt 24 möglichen) gemeinsamen Ereignisse AC, AV, AA, ADIR, CC, CV, CA etc. Daneben sind als Segmente der schmalen Säulen die theoretischen Häufigkeiten dargestellt, welche unter der Annahme berechnet wurden, dass diese Ereignisse unabhängig voneinander eintreten. Die relativen Häufigkeiten der verbundenen Ereignisse ergeben sich dann als Produkt der empirischen Wahrscheinlichkeiten bzw. relativen Häufigkeiten der beteiligten Ereignisse.  $H_{rel}(A) = 96/366$  und  $H_{rel}(C) = 160/366$  liefern beispielsweise  $H_{rel}(AC) = 0.115$ ; die dargestellten absoluten Häufigkeiten folgen nach Multiplikation mit 366 ( $H_{abs}(AC) = 42$  Tage).

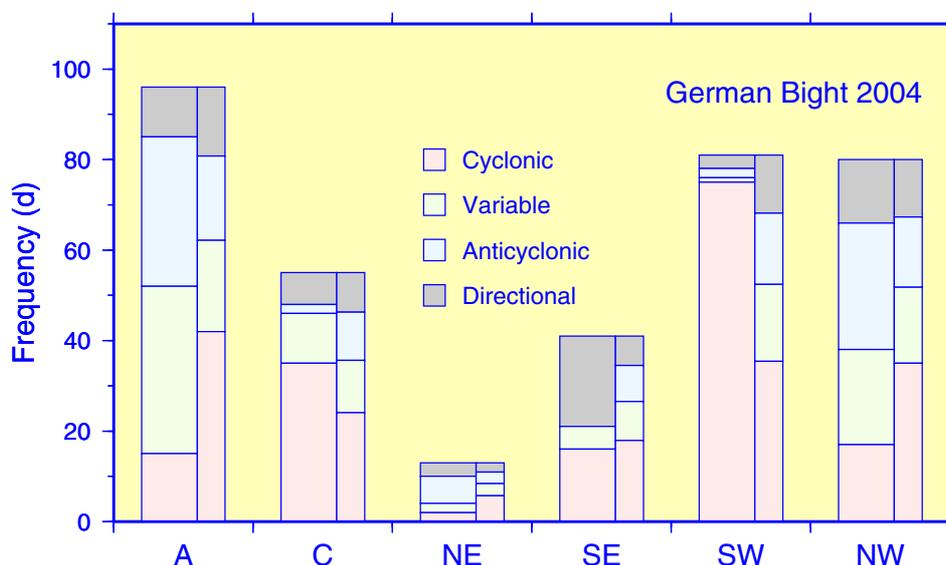


Abb. 3-7: Verteilung der täglichen Zirkulationsmuster auf die Wetterlagen im Jahr 2004. Schmale Säulen enthalten die erwarteten Häufigkeiten bei Unabhängigkeit.

Fig. 3-7: Distribution of daily circulation patterns on weather types in 2004. Narrow columns give expected frequencies for independence.

Die gravierenden Abweichungen zwischen tatsächlicher und theoretischer Verteilung sind ein klarer Beleg, dass die Strömungsmuster keineswegs unabhängig von den

Wetterlagen eintreten (Abb. 3-7). So ist die Masse der antizyklonen Strömungsmuster an Hochdruck- und NW-Wetterlagen gebunden. Gleiches gilt für den variablen Strömungstyp, der an die windschwächeren Ausprägungen dieser Wetterlagen gekoppelt ist. 69 % der zyklonalen Strömungsformen traten gemeinsam mit Tiefdruck- oder SW-Lagen ein, wobei letztere fast ausschließlich zyklonale Muster produzierten (93 %). Ein überzufälliger Anteil gerichteter Strömungen war im Jahr 2004 mit SE-Lagen verbunden; von den 20 SE-DIR Ereignissen entfielen 90 % auf NW- und N-Strömungsmuster. Die Robustheit der beschriebenen Zusammenhänge wird durch die Analyse der gemeinsamen Verteilung für das Jahr 2003 dokumentiert (Abb. 3-8).

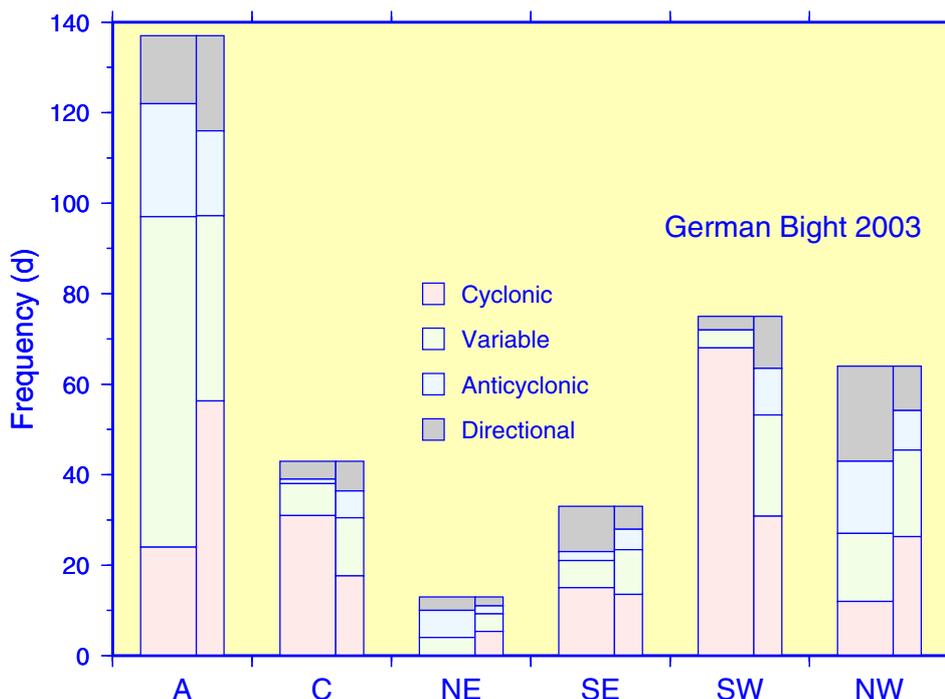


Abb. 3-8: Wie Abb. 3-7, jedoch für das Jahr 2003.

Fig. 3-8: Same as Fig. 3-7, except for 2003.

### 3.1.4 Zusammenfassung

Die atmosphärische Zirkulation über der Nordsee bildet sich in Muster und Intensität der Oberflächenströmungen ab. Infolge vorherrschender Winde aus SW bis NW resultiert dabei im Langzeitmittel ein zyklonales Strömungsmuster. Dieses auch auf saisonalen Zeitskalen für die kalte Jahreszeit charakteristische Muster war im Jahr 2004 nicht auf Herbst und Winter beschränkt, sondern trat im Sommerquartal ebenfalls deutlich hervor. Im Vergleich zum windschwachen Vorjahr ergaben sich bei insgesamt geringerer Richtungsvariabilität höhere Stromstärken. Die diesbezüglich stärksten Unterschiede traten in der westlichen Nordsee auf, waren an häufige NW-Anomalien des Windfeldes gekoppelt und mit einem starken Einstrom salzreichen atlantischen Wassers über den Fair-Isle Strom am nordwestlichen Rand verbunden. Der Jahresnetto-transport von Ostseewasser durch das Kattegat sowie von Atlantikwasser durch die Straße von Dover entsprach hingegen mit 0.015 bzw. 0.044 Sv langjährigen Mittelwerten.

Die klassifizierten täglichen Reststromfelder dokumentieren als Strömungskalender die zeitliche Abfolge von Strömungsmustern in der Deutschen Bucht. Im Jahr 2004 (2003) wurden hier an 160 (150) Tagen zyklonale, an 71 (50) Tagen antizyklonale und an 77 (109) Tagen variable Zirkulationsmuster beobachtet. Die starke Abnahme des variablen Typs war zeitlich auf Winter und Frühjahr beschränkt und ging mit einer gleichzeitigen Zunahme antizyklonaler Strömungsformen einher. Im Rahmen einer Kontingenzanalyse wurde die Abhängigkeit der Zirkulationsmuster von der aktuellen großräumigen Wetterlage aufgezeigt. Das antizyklonale Muster ist an Hochdruck- und NW-Lagen gebunden, das variable Muster an die windschwächeren Ausprägungen dieser Wetterlagen gekoppelt. SW-Lagen generieren fast ausschließlich zyklonale Strömungsmuster.

## 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 niedergelegten Ergebnisse bilden Seegangsdaten, die mit dem operationellen Wellenvorhersagemodell ›WAM‹ (WAMDI GROUP 1988) des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (DWD) generiert wurden. Zusätzlich zu den saisonal gemittelten geographischen Seegangsverteilungen im Berichtsjahr werden Momentaufnahmen für zwei Sturmereignisse präsentiert. Sodann wird die Güte der simulierten Seegangsvariablen und des Windantriebs für ausgewählte Positionen, an denen hinreichende Beobachtungen vorlagen, überprüft. Abschließend werden die Eigenschaften lokaler Häufigkeitsverteilungen für Wind- und Windsee in der zentralen Nordsee und der Deutschen Bucht diskutiert.

### 3.2.1 Geographische Seegangsverteilungen

Das saisonale Seegangsklima im Jahr 2004 wird durch die mittlere signifikante Wellenhöhe und die Hauptrichtung von Windsee und Dünung charakterisiert (*Abb. 3-9*). Die geographischen Verteilungen beruhen auf Auswertungen der Seegangsvorhersagen des DWD.

Die prinzipiellen saisonalen Unterschiede mit maximalen Wellenhöhen im Winterhalbjahr und geringsten Wellenhöhen im Frühjahr und Sommer erklären sich aus entsprechenden Intensitätsänderungen im Windantrieb (vgl. *Abschnitt 2.3, S. 45*). Die in allen Jahreszeiten ähnlichen Verteilungsmuster zeigen dabei von Norden nach Süden und zu den Küsten hin abnehmende Wellenhöhen. In dieser typischen Struktur des Wellenhöhenfeldes prägt sich die geographisch-bathymetrische Konfiguration der Nordsee aus, die nach Norden hin durch zunehmende Wassertiefen und eine weite Öffnung zum Nordatlantik wesentlich bestimmt ist. Die großräumigen Verteilungen der mittleren Wellenhöhe ähnelten denjenigen des Vorjahres (LOEWE ET AL. 2005). Insgesamt zeichneten sich die Verteilungen im Winter-, Sommer- und Herbstquartal des Jahres 2004 durch um bis zu 0.5 m höhere Wellen aus, während für das Frühjahrsquartal das Gegenteil zutrifft. Dieser Befund steht im Einklang mit einer ungewöhnlichen Häufung von NW-Wetterlagen (*Abschnitt 2.2.3, S. 40*) sowie der generellen Zunahme der Windstärke gegenüber derjenigen im windschwachen Jahr 2003 (vgl. *Abb. 2-13, S. 54*).

Die Dünung hatte in allen Jahreszeiten NW-liche Richtung, denn sie läuft zumeist aus dem Nordostatlantik heran. Im flacheren Wasser der westlichen Nordsee schwenkt sie infolge Refraktion auf die britische Küste zu. Die Richtung der Windsee stimmt generell mit der Windrichtung überein; demzufolge kam die Windsee im Jahr 2004 auf den betrachteten saisonalen Zeitskalen aus W (vgl. *Abb. 2-8, S. 46*). Lediglich im Frühjahr

traten erhebliche regionale Richtungsunterschiede ein, welche auf entgegengesetzte Luftdruckanomaliefelder im April (SE) und Mai (NW) zurückzuführen sein dürften (vgl. Abb. 2-11, S. 50).

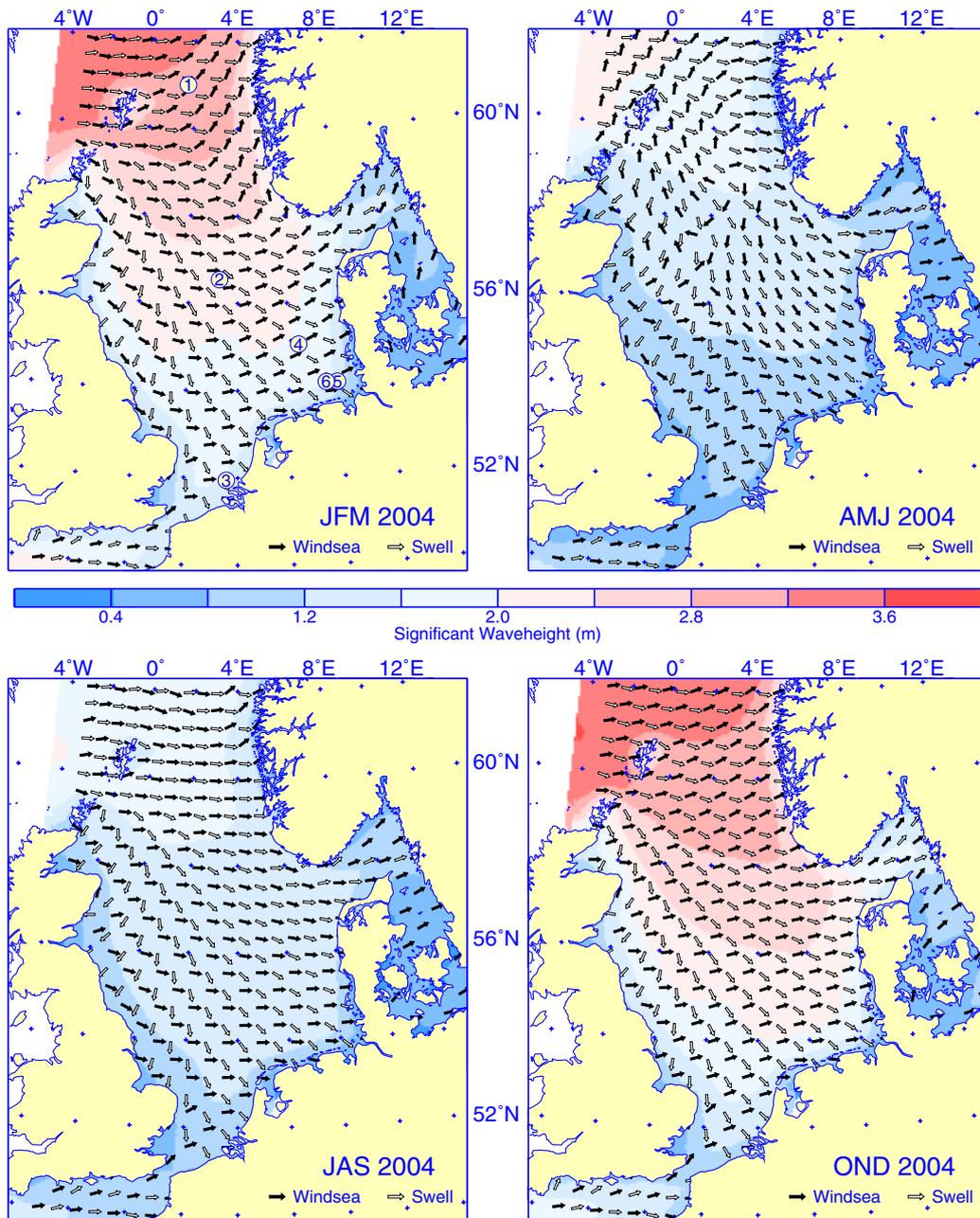


Abb. 3-9: Saisonale geographische Verteilungen von Wellenhöhe, Windsee und Dünung im Jahr 2004; JFM = Januar, Februar, März etc. Nummern kennzeichnen die Positionen der Stationen ›Brent‹ (1), ›Ekofisk‹ (2), ›Euro‹ (3), ›NSB-II‹ (4), ›Helgoland‹ (5) und ›UFS DB‹ (6).

Fig. 3-9: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2004; JFM = January, February, March etc. Figures stand for stations ›Brent‹ (1), ›Ekofisk‹ (2), ›Euro‹ (3), ›NSB-II‹ (4), ›Helgoland‹ (5), and ›UFS DB‹ (6).

Einen Eindruck von unter Sturmeinwirkung möglichen synoptischen Wellenhöhen bietet Abb. 3-10. Im SW-Sturm ›Uschi‹ vom 4. Oktober überschritten die Wellenhöhen vor der Südwestküste Norwegens 5 m. Der NW-Sturm ›Pia‹ am 18. November generierte

im Bereich der Kleinen Fischerbank und in der äußeren Deutschen Bucht sogar Wellenhöhen um 8 m. In Cuxhaven-Steubenhöft war dieses Sturmereignis mit einem Hochwasserstand von 3.54 m über NN und damit der stärksten Sturmflut des Jahres 2004 verbunden (s. a. Abschnitt 3.3, S. 87).

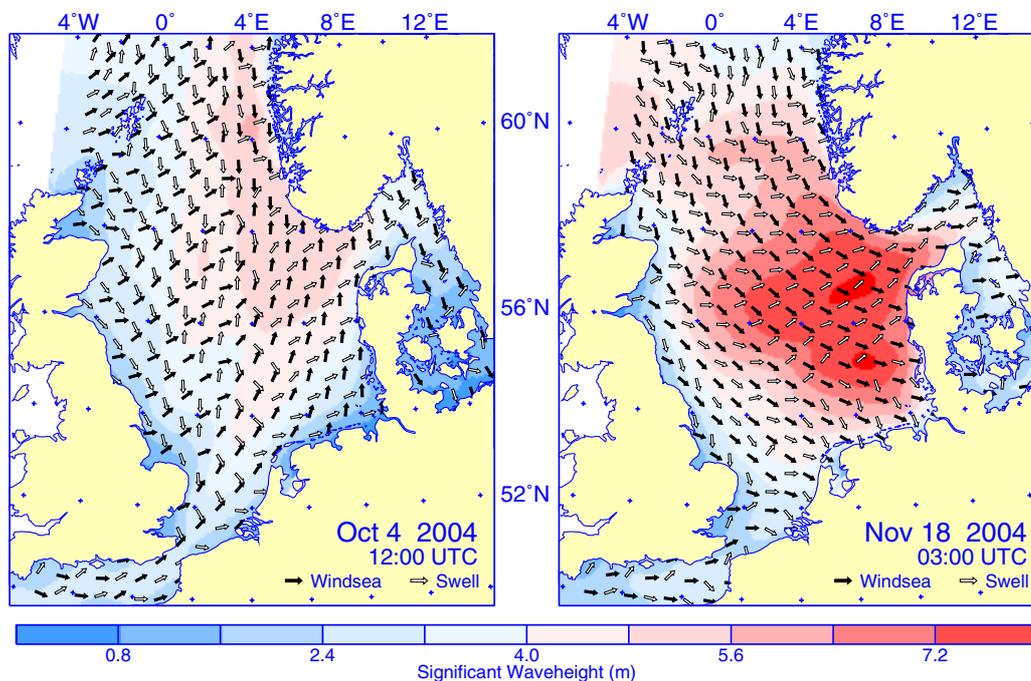


Abb. 3-10: Wellenhöhe, Windsee und Dünung während der Stürme ›Uschi‹ (Abb. 2-3, S. 36) und ›Pia‹ (Tab. 2-1, S. 39).

Fig. 3-10: Wave height, windsea and swell during the gales ›Uschi‹ (Fig. 2-3, p. 36) and ›Pia‹ (Table 2-1, p. 39).

Jahresstatistiken der Signifikanten Wellenhöhe werden für 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. 3-9, JFM-Quartal. Sowohl die mittleren Signifikanten Wellenhöhen, als auch die maximalen Wellenhöhen blieben in beiden Jahren und an allen drei Stationen unterhalb der klimatologischen Werte. Für die P<sub>90</sub> Zentile (Grenzwellenhöhen,

STATION	WASA (1954-1994)			WAM 2003			WAM 2004		
	MEAN	P <sub>90</sub>	MAX	MEAN	P <sub>90</sub>	MAX	MEAN	P <sub>90</sub>	MAX
<b>BRENT</b> 61.0°N, 1.5°E	3.24	5.59	12.87	2.29	4.03	8.45	2.44	4.32	10.79
<b>EKOFISK</b> 56.5°N, 3.2°E	2.32	4.11	10.45	1.72	3.27	8.85	1.91	3.63	7.80
<b>EURO</b> 51.0°N, 1.5°E	1.23	2.35	6.46	1.02	2.08	5.85	1.20	2.51	6.42

Tab. 3-2: Wellenhöhenstatistik (Modelldaten, alle Angaben in m). Das Zentil P<sub>90</sub> unterteilt die Menge der nach aufsteigendem Wert sortierten Wellenhöhen im Verhältnis 9:1. Zur Lage der Stationen s. Abb. 3-9, S. 75.

Table 3-2: Wave height statistics (model data, all entries in m). The 90th percentile divides the waveheight distribution 9:1. For a location map cf. Fig. 3-9, p. 75.

welche 90 % der Stichprobenwerte nicht überschritten) trifft dies lediglich an der Station Euro im Jahr 2004 nicht zu. Mit Ausnahme der max. Wellenhöhe bei Ekofisk übertrafen alle angegebenen statistischen Maßzahlen im Berichtsjahr diejenigen im wind-schwachen Jahr 2003. Die Extremwerte an der Euro- und Ekofiskplattform traten am 18. November während des NW-Sturms ›Pia‹ ein. Die max. Wellenhöhe von 10.8 m bei Brent ereignete sich am Neujahrstag 2004 als Folge einer S-Wetterlage, die sich in der nördlichen Nordsee zu einem schweren Sturm (10 Bft) mit Windgeschwindigkeiten um 25 m/s auswuchs.

### 3.2.2 Modell vs. Beobachtung

Dieser Abschnitt bietet eine beschränkte lokale Validierung der Modellergebnisse, denn Seegangsmessungen werden nur an wenigen Positionen, selten für alle relevanten Variablen und aufgrund technischer Probleme kaum kontinuierlich durchgeführt. Wind- und Seegangdaten des WAM-Modells werden mit zeitgleichen Messungen an den Positionen Ekofisk, NSB-II und Helgoland verglichen. Ekofisk ist eine norwegische Ölplattform in der zentralen Nordsee, für die nur recht grob aufgelöste Messungen der Signifikanten Wellenhöhe (0.5 m) und der Windgeschwindigkeit (1 m/s) zur Verfügung standen. An der vom BSH in der äußeren Deutschen Bucht verankerten Nordseeboje II werden keine Windmessungen durchgeführt. Der Waverider des BSH südlich Helgoland misst nur die Wellenhöhe, nicht die Seegangsrichtung; an der meteorologischen Station Helgoland gemessene Windgeschwindigkeiten wurden vom DWD bereitgestellt.

Die Übereinstimmung zwischen Modell- und Messdaten ist bei den Stationen NSB-II (Abb. 3-11) und Ekofisk (Abb. 3-12) bemerkenswert gut. Der mittlere Modellfehler – die mittlere Abweichung der simulierten von den beobachteten Werten bzw. die Differenz

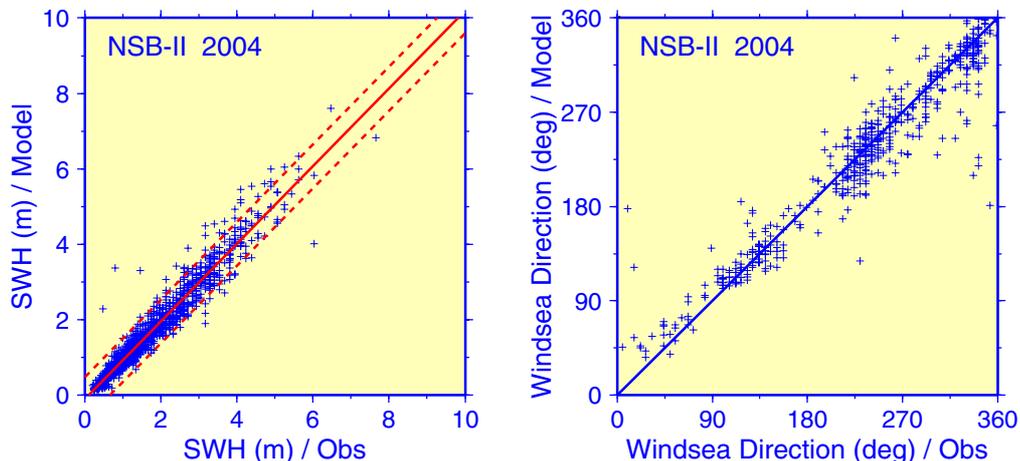


Abb. 3-11: Streudiagramm für simulierte und beobachtete Wellenhöhen und -richtungen an der Station NSB-II. Für weitere Erklärungen s. Abb. 3-12.

Fig. 3-11: Scatter plot of simulated versus observed wave height and direction at Station NSB-II. For additional explanations cf. Fig. 3-12.

der jeweiligen Mittelwerte – deutet eine marginale Überschätzung der Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten im cm-Bereich an. Der sog. RMS-Fehler (Wurzel des mittleren quadrierten Modellfehlers, vgl. Tab. 3-3) liegt für die Wellenhöhen bei wenigen

dm, für die Windgeschwindigkeit um 2 m/s (Ekofisk). Auch die simulierte Richtung der Windsee, für welche nur an der Station NSB-II Vergleichsmessungen vorlagen, stimmt mit diesen im Mittel überein (Abb. 3-11). Da eine eindeutige Unterscheidung hinsichtlich Windsee- und Dünungsrichtung für die Bojendaten nicht immer möglich ist, erscheinen differenziertere Statistiken nicht sinnvoll.

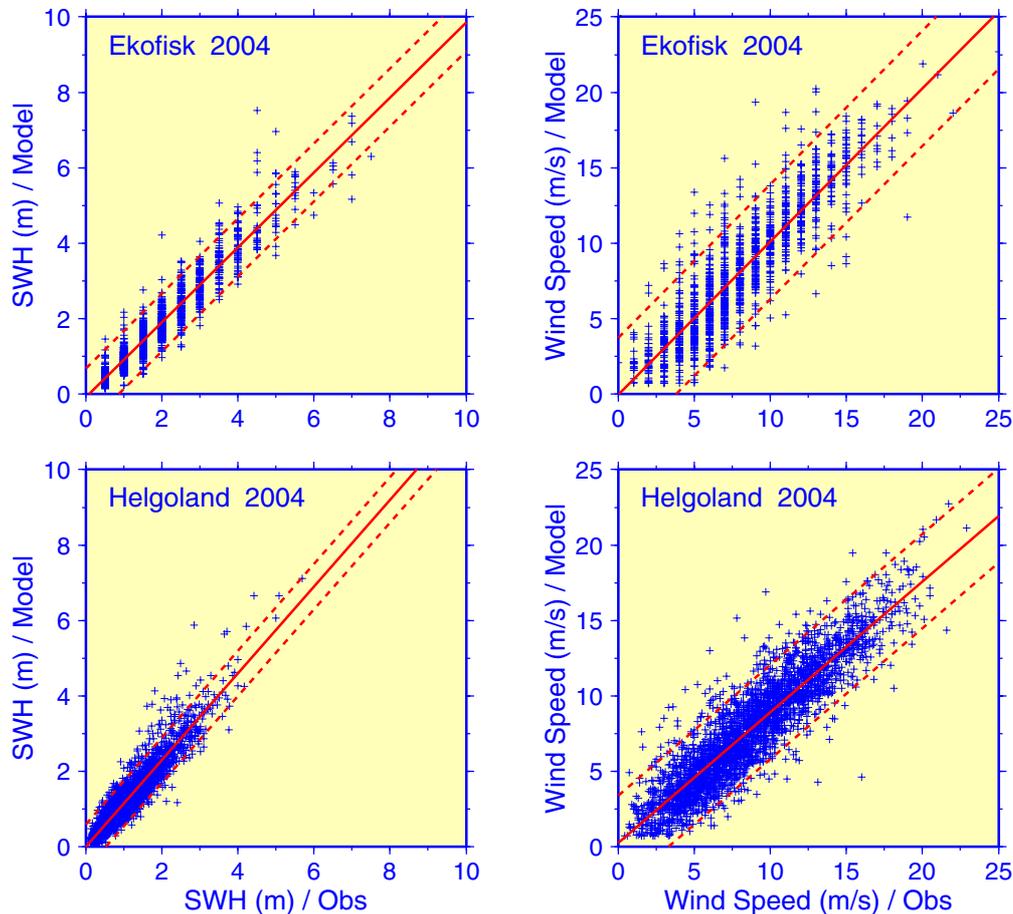


Abb. 3-12: Streudiagramm für simulierte und beobachtete Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten bei Ekofisk und Helgoland. Die Parallelen (mit vertikalem Abstand von  $\pm 1.96$  Standardschätzfehlern) zur Regressionsgeraden begrenzen das Gebiet, welches theoretisch 95 % der Datenwolke enthält. Für statistische Maßzahlen s. Tab. 3-3.

Fig. 3-12: Scatter plot of simulated versus observed waveheight and windspeed at Ekofisk and Helgoland. The lines parallel to the regression line have vertical distances of  $\pm 1.96$  standard errors of estimate from it, such that 95 % of the sample points should be included between them. For supplementary statistics cf. Table 3-3.

Im Gegensatz zu den beiden küstenfernen Stationen weisen die Vergleichsdaten bei Helgoland recht deutliche Unterschiede auf. Trotz der Unterschätzung der mittleren Windgeschwindigkeit um fast 1 m liefert das Seegangmodell hier Wellenhöhen, die im Mittel um knapp 0.2 m über den Messungen liegen (Tab. 3-3). Für hohen Seegang fällt der ›Bias‹ noch erheblich größer aus. Diese systematischen Abweichungen dürften großteils dem Störeinfluss der Insel zuzuschreiben sein, denn Umströmungs- und Düseneffekte beim Wind sowie die Abschirmung der Messboje bei Seegang aus NW-licher Richtung werden im Modell aufgrund der zu groben horizontalen Maschenweite des Rechengitters nicht erfasst. Die Modellergebnisse sind deshalb als repräsentativ

für das Helgoland umgebende, aber von der Insel kaum noch beeinflusste Seegebiet anzusehen. Die 2 km südlich von Helgoland verankerte Messboje registriert hingegen den lokalen Seegang im Inselschatten.

STATISTICS <sup>1</sup>	HELGOLAND		NSB-II		EKOFISK	
	SWH	WIND	SWH	WIND	SWH	WIND
SAMPLE SIZE	2589	2898	1328	./.	1412	1428
MEAN <sup>2</sup>	1.27	7.74	1.77	./.	1.91	8.08
STD DEV <sup>2</sup>	0.88	3.77	1.17	./.	1.24	4.25
MEAN ERR <sup>3</sup>	0.16	-0.87	-0.05	./.	-0.10	0.07
RMSE <sup>4</sup>	0.33	1.68	0.30	./.	0.39	1.94
CORR COEFF	0.94	0.91	0.97	./.	0.95	0.89
SLOPE	1.15	0.87	1.03	./.	0.99	1.02
INTERCEPT	-0.00	0.27	-0.10	./.	-0.09	-0.06
STD ERR OF EST <sup>5</sup>	0.31	1.59	0.30	./.	0.39	1.94

1) units in m, respectively m/s, except for sample size, correl. coefficient (r), and slope of regression line 2) refers to model data 3)  $\bar{e} = \text{mod} - \text{obs}$   
4) root mean squared error =  $\sqrt{\bar{e}^2}$  5) =  $\sqrt{(1 - r^2)}\text{stddev}^2$

Tab. 3-3: Ergänzende lokale Statistik für Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit zu Abb. 3-11 und Abb. 3-12. Zur Lage der Stationen s. Abb. 3-9, S. 75.

Table 3-3: Local wave height and wind speed statistics supplementary to Fig. 3-11 and Fig. 3-12. For a location map cf. Fig. 3-9, p. 75.

Die Seegangsboje bei Helgoland lieferte auch im Jahr 2004 fast kontinuierlich Messdaten und damit in hinreichend hoher zeitlicher Dichte zur Bestimmung einer robusten Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe im Berichtsjahr. Diese wurde entsprechenden Statistiken für die Jahre 2002 und 2003 in Tab. 3-4 gegenübergestellt. Der relative Anteil von Wellenhöhen > 2 m stieg auf 11.5 %, lag damit 62 % höher als im windschwachen Vorjahreszeitraum (7.1 %) und etwas oberhalb des Niveaus von 10.5 % im sturmreichen Jahr 2002. Umgekehrt war der Anteil geringer Wellenhöhen < 1 m im 3-Jahresvergleich mit 53 % minimal.

YEAR	SIGNIFICANT WAVE HEIGHT [M], OBS @HELGOLAND							
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
2004	52.7	35.7	9.5	1.7	0.2	0.1		
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. 3-4: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (SWH) bei Helgoland (Waverider-Daten, keine Seegangsrichtung).

Table 3-4: Percent frequency distribution of significant wave height (SWH) near Helgoland (waverider data, no wave direction).

### 3.2.3 Lokale Wind- und Windseeverteilungen

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. In Ermangelung hinreichender Beobachtungen wird deshalb hier für eine tiefergehende Charakterisierung der Wind- und Seegangsverhältnisse in der Deutschen Bucht und der zentralen Nordsee auf für die genannten Seegebiete repräsentative lokale Modelldaten an den Positionen »UFS DB« und »Ekofisk« zurückgegriffen (s. *Abb. 3-9, S. 75*). Zu diesem Ende wurden zweidimensionale relative Häufigkeitsverteilungen für Wind- und Windsee für beide Positionen als Jahres- und Saisonstatistiken produziert.

#### 3.2.3.1 Deutsche Bucht

Die Verteilungen für Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Wellenhöhe und -richtung im Jahr 2004 sind für die Position UFS DB in *Tab. 3-5* und *Tab. 3-6* niedergelegt; entsprechende, saisonal differenzierte Verteilungen sind in *Abb. 3-13* gebündelt dargestellt. In diesen zensierten 2D-Verteilungen wurden nur Windgeschwindigkeiten bzw. Wellenhöhen  $> 0$  berücksichtigt, denn nur solchen lässt sich auch eine Richtung zuordnen. Im Unterschied zu Strömungsrichtungen bezeichnen Richtungsangaben für Wind und Seegang deren Herkunft.

Die Randverteilungen für Wind- und Windseerichtung (Zeilensummen) sind bimodal und ähnlich (*Tab. 3-5, Tab. 3-6*). Beide Verteilungen zeigen ein breites Maximum in den Sektoren SW – NW und ein Nebenmaximum in den Sektoren E – SE. Diese Zweigipfligkeit ist charakteristisch für die Windverteilung in der Deutschen Bucht (LOEWE ET AL. 2005). Hohe und extreme Windgeschwindigkeiten gingen mit SW- bis NW-lichen Richtungen einher. Die größten Wellenhöhen traten mit bis zu 8 m am häufigsten 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. Gegenüber dem Vorjahreszeitraum stieg der relative Anteil von Wellenhöhen  $> 2$  m um 42 %; ein ähnlich starker Zuwachs von Windstärken jenseits 6 Bft oder 12 m/s liefert den ursächlichen Zusammenhang.

Die saisonalen Wind- und Windseeverteilungen an der Position UFS DB (*Abb. 3-13*) machen deutlich, dass die vermerkte Bimodalität der Jahresverteilungen wiederum in allen Jahreszeiten präsent war, wenn auch Intensität und Ausdehnung des Nebenmaximums im E-Sektor weniger stark ausgeprägt waren als im Vorjahr. Während das Nebenmaximum in Hinsicht auf die Richtung kaum saisonalen Schwankungen unterlag, verlagerte sich der Verteilungsgipfel mit den Jahreszeiten von SW im Winter über NW nach W und schließlich wiederum SW im Herbst. Diese zyklische Wanderung steht im Zusammenhang mit Änderungen der relativen Stärke der atmosphärischen Aktionszentren im Nordatlantik (Islandtief und Azorenhoch), auf welche bereits früher, etwa im Rahmen der Diskussion des »Nordseewindes« (*Abb. 2-13, S. 54*), hingewiesen wurde.

Der Hauptgipfel der Windseeverteilungen vollführte auch in Hinsicht auf die Wellenhöhe einen jahreszeitlichen Gang, welcher mit entsprechenden Änderungen in der Windstärke korrespondierte. Im Winter und Herbst lagen die Modalwerte bei etwa 2 m, im Frühjahr und Sommer bei 1 m bzw. 1.5 m. Die mit dem Nebenmaximum verbundenen Wellenhöhen fielen mit etwa 1 m fast grundsätzlich geringer aus, weil die Wirklänge von Ostwinden an der Position UFS DB vergleichsweise gering ist. Eine bemerkens-

werte Abweichung hiervon stellte sich im Frühjahr ein, als die Wellenhöhe im Nebenmaximum mit etwa 2 m den Modalwert deutlich übertraf. Als Ursache kommt die SE-Anomalie des Luftdruck- bzw. Windfeldes im April in Betracht (Abb. 2-11, S. 50), welche wesentlich durch zwei stationäre Ereignisse zu Beginn und Ende dieses Monats zustande kam (Tab. 2-1, S. 39). Die ungewöhnlichen Wellenhöhen wären demnach der Wirkdauer des SE-lichen Windantriebs zuzuschreiben.

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	1.2	2.4	2.2	1.4	0.7	0.1	<0.1			8.0
NE	1.0	2.3	1.3	0.9	0.2	0.1				5.9
E	1.1	3.3	2.4	2.3	0.7					9.8
SE	1.2	3.7	2.7	2.4	1.1	0.2				11.4
S	0.7	2.6	2.1	2.5	1.0	0.2				9.1
SW	1.9	3.9	4.3	4.8	4.0	1.3	0.3			20.5
W	1.1	4.9	6.1	3.8	2.1	0.9	0.1	0.1		19.1
NW	1.3	4.2	4.7	3.4	2.2	0.4		<0.1		16.2
COLTOTALS	9.6	27.3	25.8	21.6	11.9	3.2	0.4	0.1		100

Tab. 3-5: Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Feuerschiff ›Deutsche Bucht‹ im Jahr 2004 (WAM-Antriebsdaten, DWD).

Table 3-5: Censored percent frequency distribution of wind speed and direction at light vessel ›Deutsche Bucht‹ in 2004 (WAM-Forcing, DWD).

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	4.6	1.4	0.7	0.3	<0.1					7.1
NE	3.0	1.1	0.1							4.2
E	6.5	3.5	0.4							10.4
SE	7.2	2.7	0.6							10.5
S	4.0	1.7	0.2							5.9
SW	9.5	6.5	3.7	1.3	0.3	<0.1				21.3
W	11.3	5.8	2.7	1.6	0.6	0.2	0.1			22.3
NW	8.1	5.2	2.4	1.7	0.7	0.1	<0.1	<0.1		18.3
COLTOTALS	54.2	27.9	10.8	4.9	1.7	0.3	0.1	<0.1		100

Tab. 3-6: Wie Tab. 3-5, jedoch für Windsee (WAM-Modell, DWD).

Table 3-6: Same as Table 3-5, but for windsea (WAM-Model, DWD).

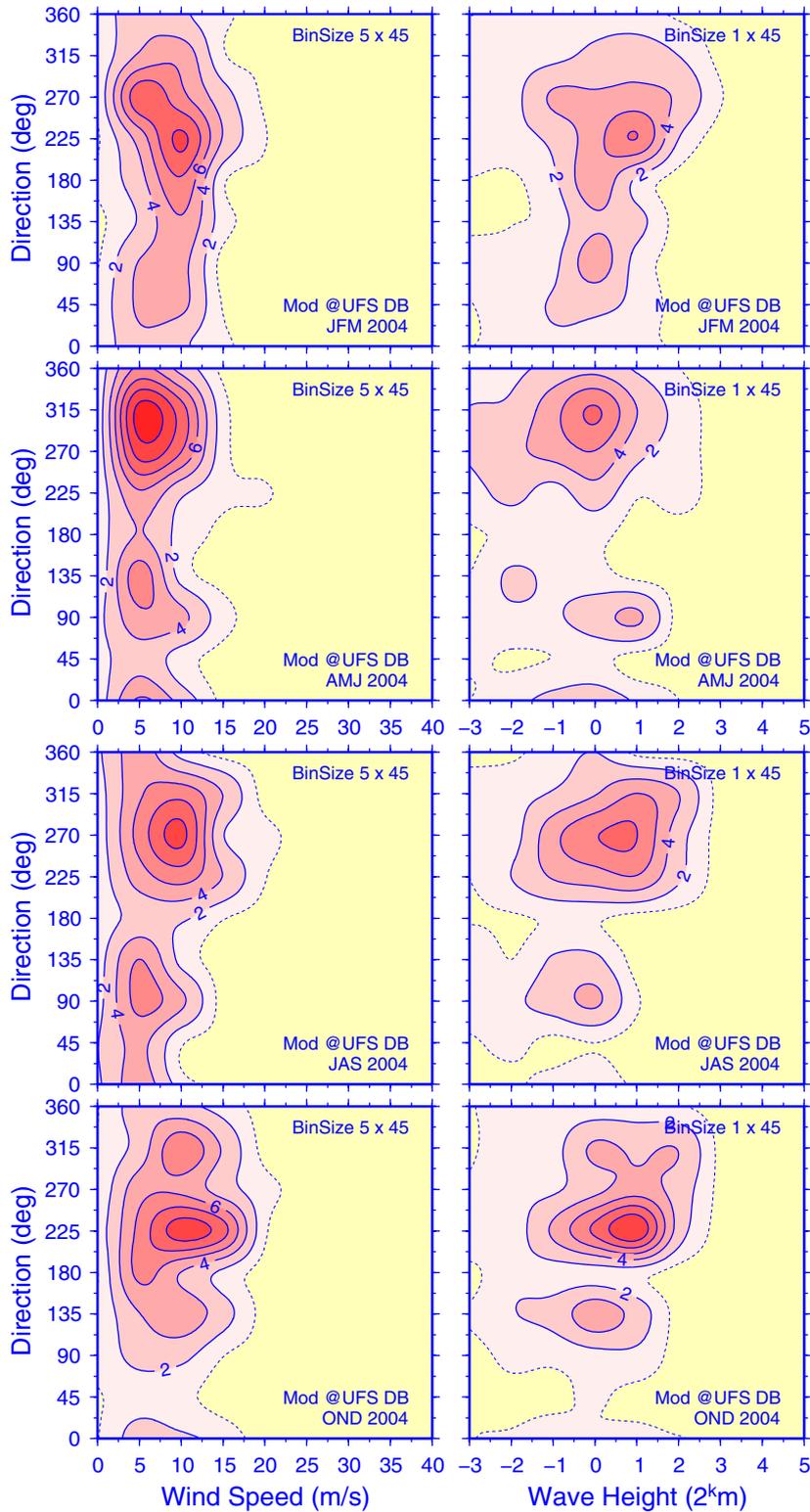


Abb. 3-13: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für Windgeschwindigkeit (links) sowie Wellenhöhe und -richtung (rechts) an der Position ›UFS DB‹ im Jahr 2004. Wellenhöhen sind  $\log_2$ -skaliert. Datenbasis DWD-Modelle.

Fig. 3-13: Seasonal percent frequency distributions of wind speed as well as wave height and direction at position ›UFS DB‹ in 2004. Note  $\log_2$ -scaling of wave height. Model data courtesy DWD.

## 3.2.3.2 Zentrale Nordsee

Wind- und Windseeverteilungen an der Position Ekofisk charakterisieren die Verhältnisse in der zentralen Nordsee (Tab. 3-7, Tab. 3-8, Abb. 3-14).

Die Jahresstatistiken weisen in Hinsicht auf die Richtungsverteilung (Zeilensummen) hier keine bimodale Struktur auf, sondern sind durch ein breites Plateau gekennzeichnet, das sich über 270° von SE bis N erstreckt und in den Sektoren SW und NW Spitzenwerte um 18 % erreicht. Die mittlere Windgeschwindigkeit lag mit 8.0 m/s nur unwesentlich höher als an der Position UFS DB (7.8 m/s). Ein deutlicher Unterschied ist hingegen für die Besetzungsdichte der Geschwindigkeitsklassen jenseits 12 m/s feststellbar, welche mit 19 % diejenige in der Deutschen Bucht um 22 % übertraf. Die kumulierte Häufigkeit von Wellenhöhen > 2 m fiel mit 26 % sogar um 47 % höher aus. Dieser Umstand spiegelt sich in der mittleren Wellenhöhe bei Ekofisk, die mit 1.9 m diejenige am UFS DB um 0.5 m überstieg. Die Disparität der vermerkten Abweichungen hinsichtlich Windstärke und Wellenhöhe macht deutlich, dass die geringeren Wel-

WIND DIRECTION	WIND SPEED [M/S], MOD @EKOFISK									Row TOTALS
	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	
N	1.1	2.9	3.4	3.1	1.0	0.6	0.2			12.3
NE	1.3	1.9	1.1	0.6	0.1	0.1	0.1			5.3
E	0.8	2.1	1.5	1.5	0.8	0.3				7.0
SE	1.2	3.8	2.6	2.4	2.2	0.6	0.2			12.9
S	1.1	3.7	3.1	2.3	0.8	0.2	0.1	<0.1		11.5
SW	2.5	5.0	3.6	3.3	2.8	1.1	0.3			18.6
W	1.2	4.1	3.2	2.3	2.3	1.0	0.3	<0.1		14.4
NW	1.5	3.8	4.4	4.3	3.0	0.9	0.1	<0.1		18.0
COLTOTALS	10.6	27.4	22.9	19.9	12.9	4.9	1.2	0.1		100

Tab. 3-7: Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für Windgeschwindigkeit und Windrichtung an der Position ›Ekofisk‹ im Jahr 2004 (WAM-Antriebsdaten, DWD).

Table 3-7: Censored percent frequency distribution of wind speed and direction at ›Ekofisk‹ in 2004 (WAM-Forcing, DWD).

WAVE DIRECTION	SIGNIFICANT WAVE HEIGHT [M], WAM @EKOFISK									Row TOTALS
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	
N	6.2	3.5	1.5	0.8	0.3	0.4	0.1			12.8
NE	2.8	0.7	0.2	0.1	0.2	<0.1				4.0
E	3.2	1.8	0.7	0.3	0.1					6.1
SE	6.6	2.7	2.2	0.8	0.5	<0.1				12.9
S	7.3	3.1	0.8	0.4	0.2	0.2				12.0
SW	8.4	4.3	2.6	1.9	0.5	0.2	<0.1			17.9
W	8.0	2.5	2.6	1.8	0.7	0.2		<0.1		15.8
NW	8.6	3.9	3.3	1.4	0.9	0.2	<0.1	<0.1		18.5
COLTOTALS	51.1	22.5	13.9	7.5	3.4	1.3	0.2	0.1		100

Tab. 3-8: Wie Tab. 3-7, jedoch für Windsee (WAM-Modell, DWD).

Table 3-8: Same as Table 3-7, but for windsea (WAM-Model, DWD).

### 3 Physikalische Ozeanographie

lenhöhen in der Deutschen Bucht durch insgesamt kürzere Windstreichlängen und nur nachrangig durch geringere Windgeschwindigkeiten verursacht werden.

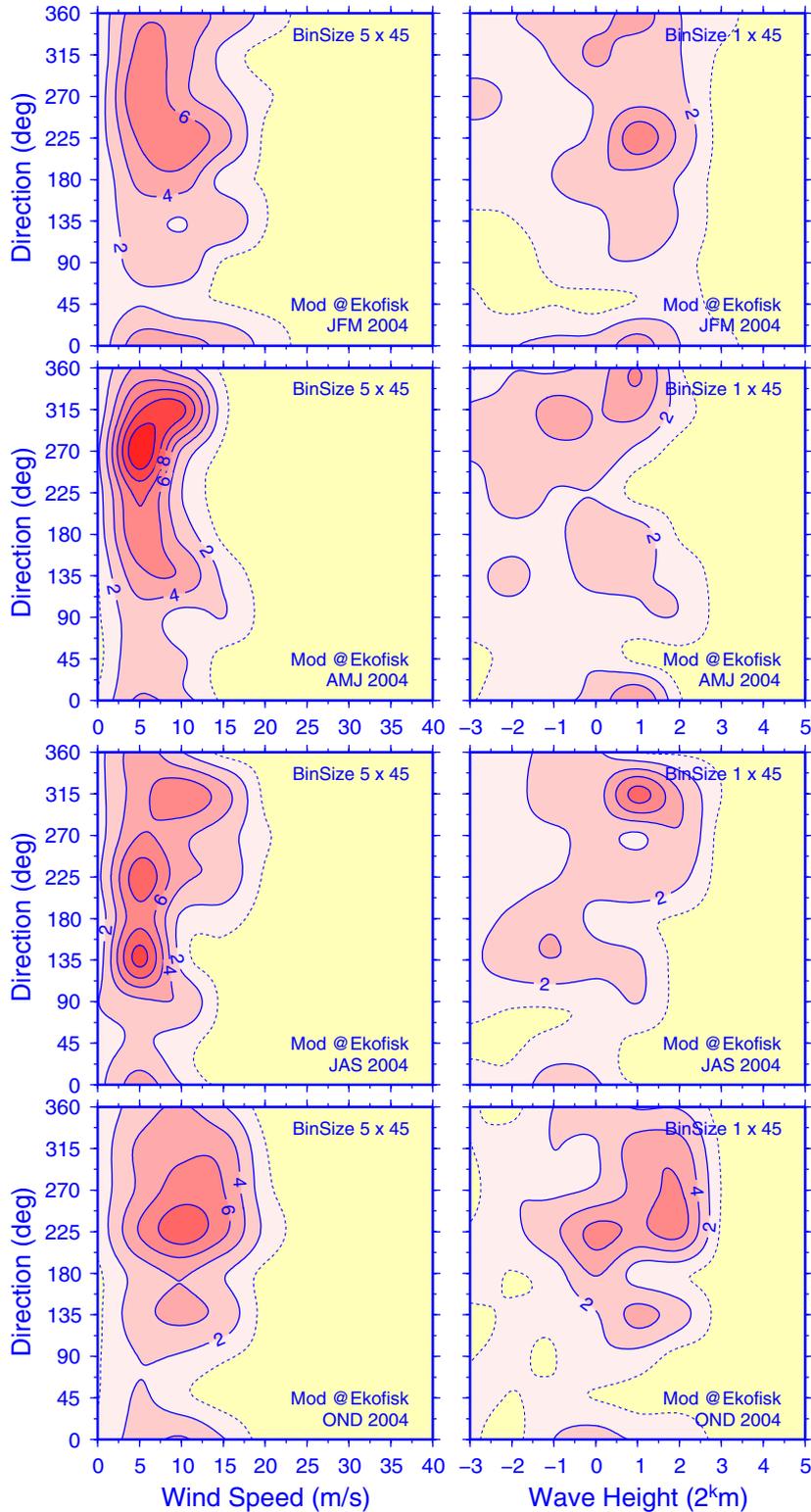


Abb. 3-14: Wie Abb. 3-13, jedoch für Position ›Ekofisk‹.

Fig. 3-14: Same as Fig. 3-13, except for position ›Ekofisk‹.

Die durch die zentrale Lage bedingte geringe Richtungsabhängigkeit der Wellenhöhen an der Position Ekofisk hinsichtlich der Windstreichlänge zeigt sich auch in den stärker »verschmierten« saisonalen Verteilungen und vergleichsweise flachen, diffusen Verteilungsgipfeln (Abb. 3-14). Letztere waren im Frühjahr und Sommer an NW-Winde gekoppelt, im Winterhalbjahr an SW-Winde gebunden. Die zugehörigen Modalwellenhöhen lagen in den ersten drei Quartalen bei 2 m, im 4. bei 3.5 m. Der im saisonalen Vergleich des Jahres 2004 extreme Modalwert im Herbst befindet sich im Einklang mit einem entsprechend extremen Vektormittel des »Nordseewindes« von 5.8 m aus WSW, welches jedoch anhand der Windklimatologie als für die Jahreszeit »normal« qualifiziert wurde (Abb. 2-12, S. 52). Entsprechendes dürfte von daher für die Modalwellenhöhe im Herbst gelten, während diejenige im Winter (2 m) als unterdurchschnittlich eingeschätzt wird.

Schließlich scheint die gute Korrespondenz zwischen den Mustern der lokalen Windverteilungen in der zentralen Nordsee und Häufigkeitsverteilungen der reduzierten Wetterlagen durchaus erwähnenswert (s. Abb. 2-6, S. 42). So stimmen die drei separaten Moden der Windverteilung im Sommer mit dem gehäuften Auftreten von NW-, SW- und SE-Lagen überein und lassen sich deshalb anhand der Monatsstatistik (Abb. 2-7, S. 43) zeitlich genauer zuordnen. Weiter scheint der recht breite und flache Mode der Winterverteilung die starke Tiefdruckaktivität (C-Lagen) zu spiegeln, denn transiente Zyklonen gehen in der zentralen Nordsee in dieser Jahreszeit gewöhnlich mit einer schnellen Abfolge von Winden aus S, SW, W, NW und N einher (s. Abb. 2-5, S. 38). Auch die extrem häufigen SE- und NW-Lagen im April bzw. Mai und Juni (vgl. Abb. 2-7, S. 43) bildeten sich im Muster der Frühlingsverteilung der Winde an der Position Ekofisk ab.

### 3.2.4 Zusammenfassung

Seegang ist der winderzeugte Schwingungszustand der Meeresoberfläche. Das Seegangsklima im Jahr 2004 wurde durch saisonale geographische Verteilungen von signifikanter Wellenhöhe, Windsee- und Dünungsrichtung charakterisiert. Die typischen Verteilungsmuster sind von den vorherrschenden Windverhältnissen und der geographisch-bathymetrischen Gestalt der Nordsee geprägt. Im Winter, Sommer und Herbst waren die mittleren Wellenhöhen um bis zu 0.5 m höher als in den entsprechenden Quartalen des windschwachen Vorjahres. Wind und Windsee kamen in diesen Jahreszeiten durchweg aus W-lichen Richtungen. Erhebliche regionale Richtungsunterschiede und geringere Wellenhöhen als im Vorjahreszeitraum traten im Frühjahr auf und wurden als Ergebnis (auf monatlichen Zeitskalen) entgegengesetzter Windanomalien interpretiert. Die Dünung hatte in allen Jahreszeiten NW-liche Richtung. Mittlere und maximale Wellenhöhen überschritten an repräsentativen Positionen zwar die Vorjahreswerte, blieben jedoch unter den klimatologischen Wellenhöhen. Im NW-Sturm »Pia« kam es am 18. November in der zentralen und südlichen Nordsee zu signifikanten Wellenhöhen um 8 m. In der nördlichen Nordsee traten in einem S-Sturm am 1. Januar sogar Wellenhöhen von fast 11 m auf.

Anhand von Häufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeit und Richtung des Windes sowie der Höhe und Richtung der Windsee wurden charakteristische regionale Unterschiede aufgezeigt. Die Richtungsverteilungen in der Deutschen Bucht sind bimodal. Das Häufigkeitsmaximum liegt saisonabhängig zwischen SW und NW, ein Nebenmaximum im E- oder SE-Sektor. Diese Bimodalität war weniger stark ausgeprägt als im Vorjahr, jedoch auch im Jahr 2004 in allen Jahreszeiten präsent. Demgegenüber wiesen die Verteilungen der Wind- und Seegangsrichtung in der zentralen Nordsee im

Jahr 2004 ein breites Maximum auf, das sich von SE über W bis N erstreckte. Die mittlere Windgeschwindigkeit war mit 8.0 m/s nur unwesentlich höher als in der Deutschen Bucht, während hohe Windgeschwindigkeiten um etwa 20 % häufiger vorkamen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten und Windseen gingen mit den Richtungen SW und NW einher. Die mittlere Wellenhöhe lag mit 1.9 m um etwa 0.5 m höher als in der Deutschen Bucht; Seegangshöhen über 2 m traten fast doppelt so häufig auf. Die maximalen Wellenhöhen in der Deutschen Bucht blieben für alle Richtungen geringer als in der zentralen Nordsee – außer für Seegang aus NW. Ursache hierfür sind vor allem kürzere Windstreichlängen und nur z. T. niedrigere Windgeschwindigkeiten.

## 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«, »Schifffahrt & Meer«), stellen aber auch bei hydrographisch-klimatologischen und nautischen Fragestellungen eine relevante Information dar.

Die Zeitskalen der Analyse reichen von Nahe-Echtzeit im operationellen Vorhersagebetrieb und in der hydrodynamischen Modellierung des Wasserstandes bis hin zu Jahren und Jahrzehnten. Für die Gezeitenvoraberechnungen beispielsweise sind aufgrund der Periodizität (19 a) der lunaren Nodaltide lange Zeitreihen von Bedeutung. Die an einzelnen Pegelorten seit über 100 Jahren durchgeführten Wasserstandsmessungen ermöglichen darüber hinaus Untersuchungen langfristiger Änderungen des Wasserstandes an der deutschen Nordseeküste. 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 von Hoch- und Niedrigwasserständen im Jahr 2004 herangezogen.

### 3.3.1 Hoch- und Niedrigwasser

Die Monatsklimatologie der Hochwasserstände bei Cuxhaven für den Zeitraum 1971 – 2000 ist in *Abb. 3-15* zusammen mit einem Variabilitätsband (grün) dargestellt, innerhalb dessen 95 % der individuellen Monatsmittelwerte anzutreffen sein sollten. Ein ausgeprägter klimatologischer Jahresgang um den als »Mittleres Hochwasser« bezeichneten Referenzwert von 150 cm ist nicht erkennbar. 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 einnimmt. Bei im Frühjahr und Sommer grundsätzlich schwächeren Luftdruckgegensätzen über der Nordsee und demzufolge häufig schwachwindigen Wetterlagen (vgl. *Abb. 2-9, S. 47*) sind die Gezeitenkräfte wesentlich »ungestörter am Werk«.

Im Jahr 2004 ergaben sich nennenswerte Abweichungen von der Klimatologie im Februar, Mai, Juni und September, welche jedoch die Signifikanzschwellen<sup>1</sup> nicht überschritten (»alles im grünen Bereich«). 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 (SE) ein. Dieser Zusammenhang wurde anderswo ausführlich erörtert (LOEWE ET AL. 2005) und zeigt sich hier im parallelen Auftreten von Hochwasseranomalien und gehäuften bzw. reduzierten NW-Wetterlagen (s. *Abb. 2-7, S. 43*).

---

1. Die intramonatliche Variabilität im Jahr 2004, die als 90%-Quantil durch rote Triangeln kenntlich gemacht ist, ist lediglich eine Zusatzinformation, die für die hier analysierte zwischenjährige Variabilität der Monatsmittel keine Bedeutung hat.

Die numerisch kleinen, aber statistisch bedeutenden, positiven Abweichungen vom Langzeitmittel im Mai und Juni traten bereits im Vorjahr auf. Sie erklären sich aus der extremen Häufung (13) von NW-Lagen im Mai, die sich gleichzeitig in der Dominanz des antizyklonalen Strömungsmusters in der Deutschen Bucht niederschlug (s. Tab. 3-1, S. 69), der Stärke des Vektorwindes im Juni<sup>1</sup> (Abb. 2-13, S. 54) und singulären Ereignissen wie dem Sturmtief vom 24. Juni (Tab. 2-1, S. 39), das einen für die Jahreszeit ungewöhnlich hohen Hochwasserstand von 229 cm zur Folge hatte.

Sturmfluten (Hochwasserstand > 300 cm) ereigneten sich in den Nachtstunden zum 9. Feb. (326 cm), 18. Nov. (354 cm) und 18. Dez. (306 cm). Wie dem Wetterlagenkalender (Tab. 2-1, S. 39) zu entnehmen ist, traten alle drei Sturmfluten in Verbindung mit NW-Stürmen (>Pia< 18. Nov., s. a. Abb. 3-10, S. 76) oder unter starken NW-Winden abziehender Sturmtiefs ein.

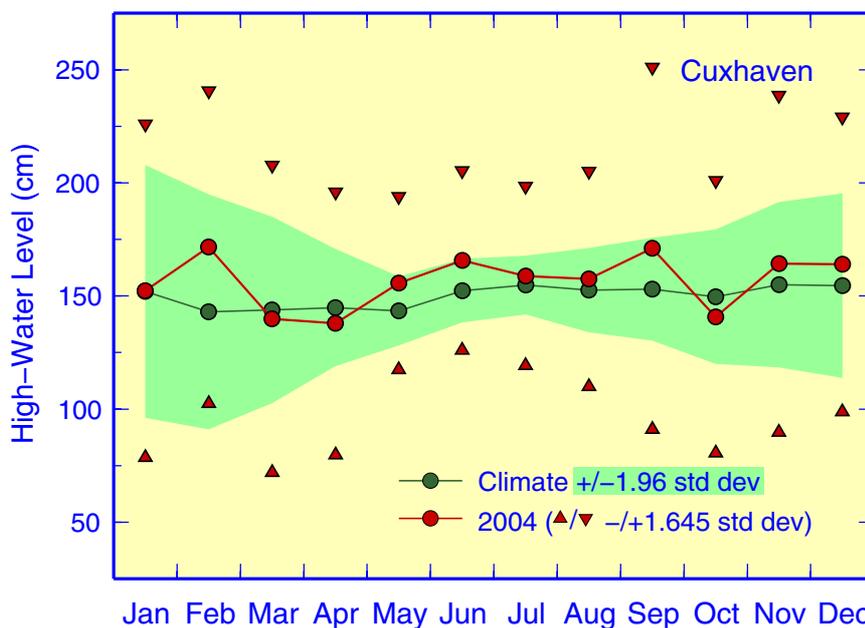


Abb. 3-15: Hochwasserstände bei Cuxhaven im Jahr 2004 (bezogen auf NN) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band sowie intramontatlichen 90%-Grenzen.

Fig. 3-15: 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.

Eine Abb. 3-15 entsprechende Darstellung für die Niedrigwasserstände bietet Abb. 3-16. Einem Vergleich beider Abbn. ist zu entnehmen, dass der mittlere Tidenhub bei Cuxhaven etwa 3 m beträgt. In Hinsicht auf die natürliche Schwankungsbreite (grün) und die Stärke der Abweichungen von klimatologischen Mittelwerten besteht erwartungsgemäß Übereinstimmung – auch bzgl. der Ursachen – mit denjenigen der Hochwasserstände. Ein auffälliger Unterschied betrifft die Klimatologie selbst, welche im Fall der Niedrigwasser einem ausgeprägten Jahrgang unterliegt. Höchste Niedrigwasserstände treten dabei im Zeitraum November bis Januar auf, geringste ereignen sich normalerweise im Mai. Dieser Jahrgang spiegelt offenbar saisonale Intensitätsänderungen der klimatologischen Luftdruckgegensätze (vgl. Abb. 2-9, S. 47) und damit der Windstärke (Abb. 2-13, S. 54). Diese Erklärung erscheint physikalisch plausibel, das

1. Im Mai und Juni hatte der »Nordseewind« Windstärken von 3.4 bzw. 5.0 m/s aus NNW (330°) bzw. WNW (286°). Die Angaben beziehen sich auf Vektormittel, d. h. die mittleren resultierenden Winde.

Ausbleiben eines entsprechenden Windstaueffektes bei den Hochwasserständen zunächst nicht. Es lässt sich jedoch zeigen, dass winderzeugte Wasserstandserhöhungen im flachen küstennahen Meer umgekehrt proportional zur Wassertiefe sind (ERTEL UND MAUERSBERGER 1973). Für eine der windinduzierten, küstengerichteten Oberflächenströmung entgegengesetzte untere Kompensationsströmung bieten geringere Wassertiefen weniger Raum, woraus unter sonst identischen Bedingungen ein höherer Windstau resultiert.

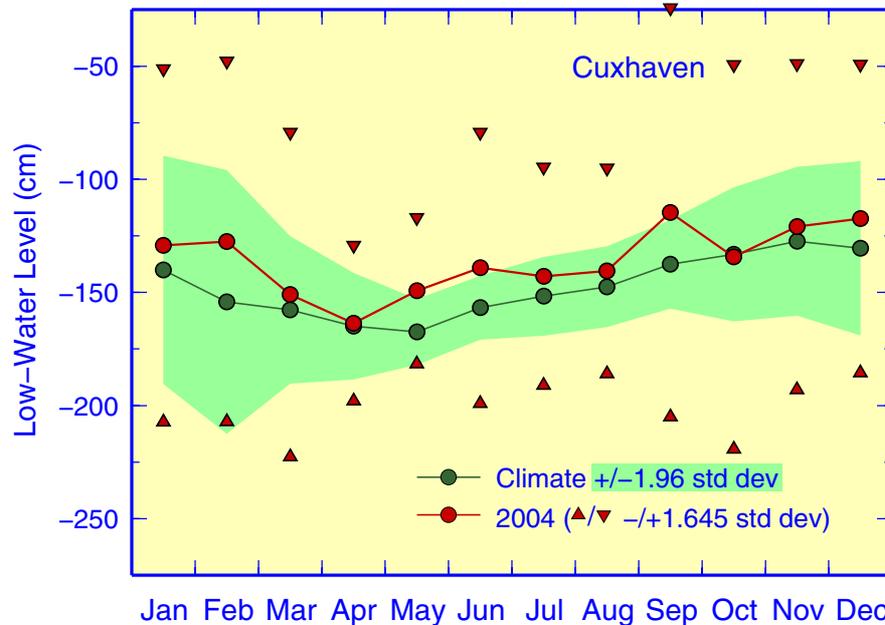


Abb. 3-16: Niedrigwasserstände bei Cuxhaven im Jahr 2004 (bezogen auf NN) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band sowie intramonatlichen 90%-Grenzen.

Fig. 3-16: Low-water levels at Cuxhaven in 2004 (rel. to ordnance datum) together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band as well as intramonthly 90%-limits.

### 3.3.2 Wasserstandsentwicklung seit 1971

Mit Ausnahme der Bemerkungen zum Jahresgang sind die folgenden Erörterungen, die auf Niedrigwasserstände (NWS) beschränkt bleiben, aufgrund des parallelen Verhaltens auf Hochwasserstände übertragbar. Abb. 3-17 bietet eine 2D-Darstellung der Zeitserie der monatlichen NWS (LWL) im Zeitraum 1971 – 2004. In gleicher Weise sind dort die monatlichen Abweichungen ( $\Delta$  LWL) von den klimatologischen Mittelwerten (1971 – 2000) und Gaußsche Perzentile<sup>1</sup> zu standardisierten Anomalien abgebildet.

Der Jahresgang der NWS mit Wasserständen  $> -150$  cm von Juli bis Januar und geringeren Wasserständen in der übrigen Zeit des Jahres tritt farblich deutlich hervor (LWL). Dieser Zeitabschnitt hat sich etwa Ende der 1980er Jahre – und damit zeitgleich mit Einsetzen des rezenten Warmregimes (vgl. Mischmasch-Klima, S. 95) – auffällig eingengt (mehr rot). Ferner ist erkennbar, dass außergewöhnlich hohe NWS,

1. Die Glättung (Tiefpassfilterbreite 3 Monate) aller Monatsmittel bedingt auch eine leichte Verschmierung oder Dämpfung der Perzentile und damit eine Unterschätzung der statistischen Signifikanz insbesondere singulärer Anomalien.

die bis dahin fast ausnahmslos im Herbst eintraten, seither bevorzugt auf die Wintermonate entfallen. Diese Veränderung ist konsistent mit einer moderaten Abschwächung der atmosphärischen Zonalzirkulation im Herbstquartal und einer deutlich intensiveren Westzirkulation im Winter der gegenwärtigen Warmphase (s. Abb. 3-23, S. 97). Erwähnenswert sind hier die signifikanten NWS-Anomalien in den Wintern der Jahre 1989 (Regimewechsel), 1990, 1995, 2000 und 2002. Sehr kalte Winter, die ja durch ein Vorherrschen östlicher Wetterlagen zustande kommen, bildeten sich in ungewöhnlich niedrigen Wasserständen ab (1977 – 1980 und 1985 – 1987 (Kaltregime), 1996).

Die ungewöhnlich starken NWS-Anomalien im Mai und Juni, die sich seit der Jahrtausendwende häufen, erreichten im Jahr 2004 Rekordhöhen von jeweils 18 cm ( $> P_{99}$ ).

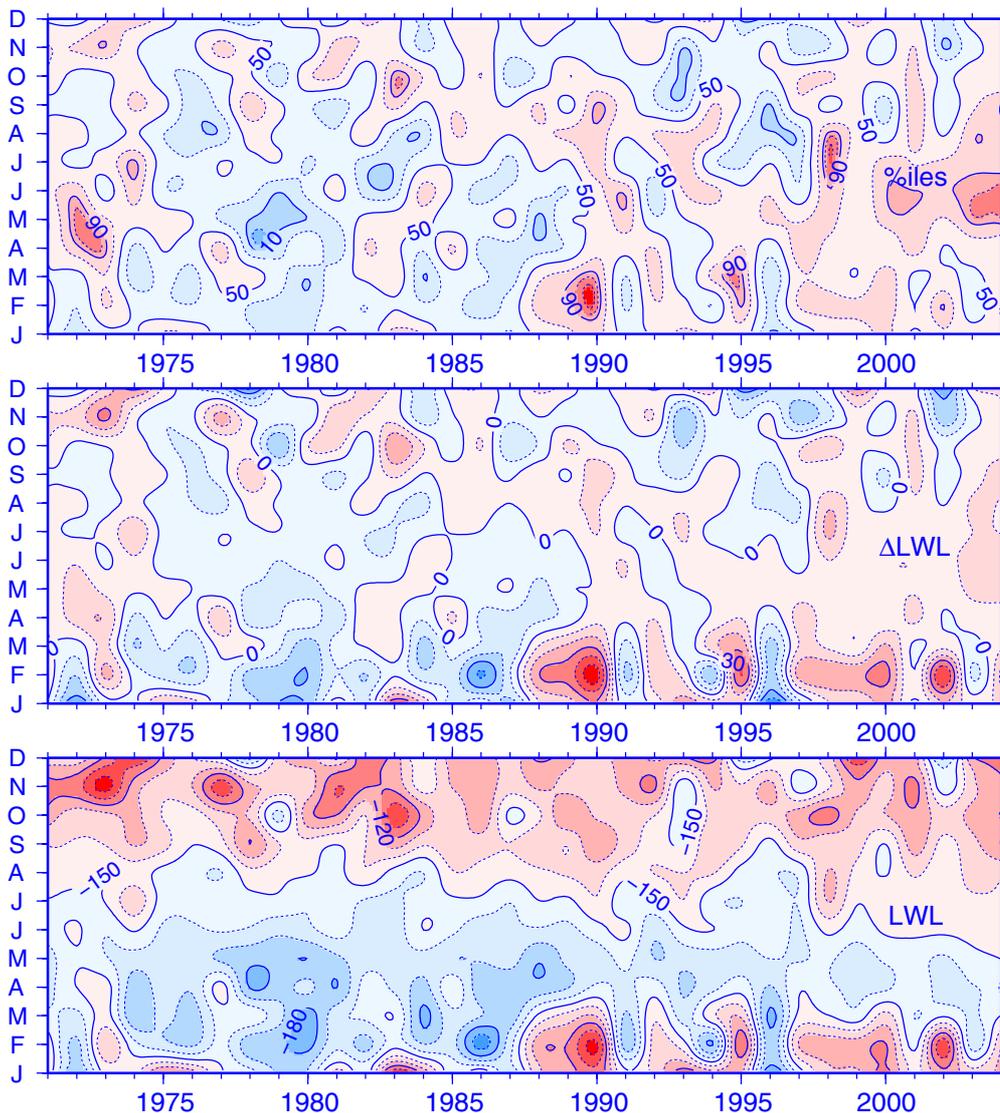


Abb. 3-17: Monatsmittel der Niedrigwasserstände (cm) bei Cuxhaven mit Anomalien und Perzentilen (%). Tiefpassfilterbreite 3 Monate. Farbstufen für Perzentile: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %.

Fig. 3-17: Monthly mean low-water levels (cm) at Cuxhaven with anomalies and percentiles (%). Low-pass filter width 3 months. Color-steps for percentiles: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %.

### 3.3.3 Zusammenfassung

Aufgrund der geographischen Lage von Cuxhaven am nach Nordwesten geöffneten Mündungstrichter der Elbe treten hier die höchsten Hochwasserstände und stärksten Sturmfluten in Verbindung mit NW-Winden und entsprechend niedrige Wasserstände bei entgegengesetztem Windstau (SE) ein. Die monatlichen Abweichungen der Hoch- und Niedrigwasserstände von der Klimatologie stehen deshalb in engem Zusammenhang mit Häufungsanomalien von NW-Wetterlagen. Das gehäufte Auftreten solcher Wetterlagen im Berichtsjahr bildete sich in mehrheitlich überdurchschnittlichen Wasserständen ab. Auch die 3 Sturmfluten des Jahres 2004 waren entweder mit NW-Stürmen oder starken NW-Winden abziehender Sturmtiefs assoziiert.

Die zeitliche Entwicklung der Hoch- und Niedrigwasser seit 1971 zeigt, dass staubedingte, außergewöhnlich hohe Wasserstände vor 1988 fast ausnahmslos im Herbst eintraten und seither bevorzugt auf die Wintermonate entfallen. Dieser Regimewechsel ereignete sich zeitgleich mit dem Regimeshift der Nordseetemperatur. Beide stehen in ursächlichem Zusammenhang mit Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation (vgl. Mischmasch-Klima, S. 95).

## 3.4 Temperatur

Zunächst werden die Oberflächentemperaturen der Nordsee im Jahr 2004 dokumentiert und statistisch eingeordnet. Im *Abschnitt 3.4.2, S. 95* wird der Regimecharakter der Oberflächentemperaturen (LOEWE ET AL. 2003, 2005) erneut aufgegriffen und im Kontext atmosphärischer Zirkulationsänderungen diskutiert. Im Anschluss wird die Temperaturschichtung der Nordsee anhand von Beobachtungen analysiert, die während der Gesamtaufnahme der Nordsee mit FS Gauß im August 2004 angestellt wurden. Der Abschnitt wird beschlossen mit einigen Bemerkungen zum Meereis an der deutschen Nordseeküste.

### 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 1900 digitale Temperaturfelder, die auf einem flächentreuen 20 sm-Gitter vorliegen. Der Datensatz dokumentiert nicht nur die raumzeitliche Entwicklung eines Schlüsselparameters des physikalischen Meereszustands in den vergangenen 36 Jahren; als Integrator des meteorologischen Antriebs lässt sich die Meeresoberflächentemperatur auch zur Feststellung von Klimaänderungen in der Nordseeregion nutzen.

Einen regional differenzierten Einblick in die monatlichen Abweichungen der Oberflächentemperaturen der Nordsee von den klimatologischen Verteilungen des Zeitraums 1971 – 1993 bietet *Abb. 3-18*. Offensichtlich war die Nordsee das ganze Jahr über wärmer als normal. Muster und Intensität der Temperaturabweichungen waren von Januar bis April recht stationär; die lokalen Temperaturanomalien überschritten in durchschnittlich 3/4 des Seegebiets 0.67 Standardabweichungen, d. h. die obere Quartilsgrenze der Gaußverteilung (75 % Perzentil). Diese relative Fläche reduzierte sich bis Juli graduell auf 32 % und lag ab August für den Rest des Jahres 2004 bei durchschnittlich 92 %. Die extremsten Abweichungen von der Klimatologie traten im August und September ein, als die Temperaturanomalien großräumig (88 % des Seegebiets) jenseits des 95 % Perzentils lagen. Anomalien unterhalb der lokalen Mittelwerte erreichten im Juli eine maximale relative Ausdehnung von 22 % in der östlichen Nordsee, traten im Jahresdurchschnitt jedoch lediglich in 6 % des Nordseegebiets ein.

Aus den digitalen Analysen des Oberflächentemperaturfeldes wurde die Zeitserie der Nordsee SST abgeleitet, die heute einen Beobachtungszeitraum von 37 Jahren abdeckt. Das Jahr 2004 war mit 10.8 °C nach 2002, 2003 und 1990 das viertwärmste seit 1968. Eine Rekordtemperatur von 9.1 °C im Dezember 2003 leitete einen deutlich zu warmen Winter ein, dem sich ein mäßig zu warmes Frühjahr anschloss (*Abb. 3-19*). Die Abweichung der Monatsmitteltemperatur vom Klimanormalwert war mit 0.3 K im Juli am geringsten, wuchs sich jedoch bereits im Folgemonat zu einer hochsignifikanten Warmanomalie von 2.1 K aus. Mit einer Mitteltemperatur von 17.1 °C belegte der August nicht nur Platz 5 in der Rangstatistik, sondern war auch zum dritten Mal in Folge erheblich zu warm. Obgleich auch im weiteren jahreszeitlichen Verlauf keine neuen Rekorde gesetzt wurden, dauerte die signifikante Warmanomalie bis zum Jahresende an. Aus den geographischen Verteilungen der monatlichen Anomalien in *Abb. 3-18* ist ersichtlich, dass die Oberflächentemperaturen nicht nur ganzjährig, sondern auch nahezu im gesamten Seegebiet über der Klimanorm lagen. Im Zeitraum 1988 – 2004 waren 78 %, seit 1997 sogar 90 % aller Monate wärmer als normal. Die bislang läng-

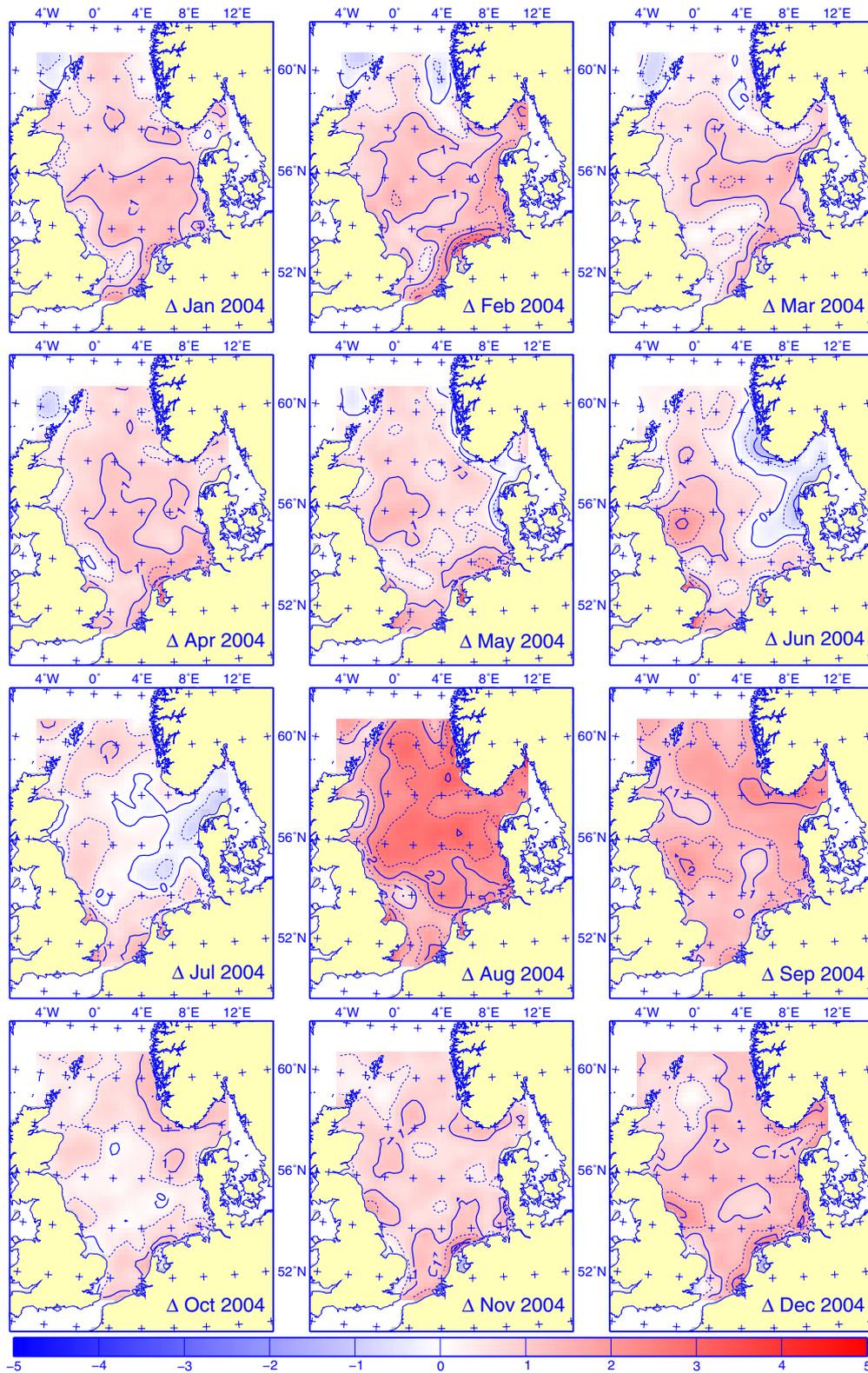


Abb. 3-18: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2004 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K.

Fig. 3-18: Monthly SST anomalies in 2004 as departures from the 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K.

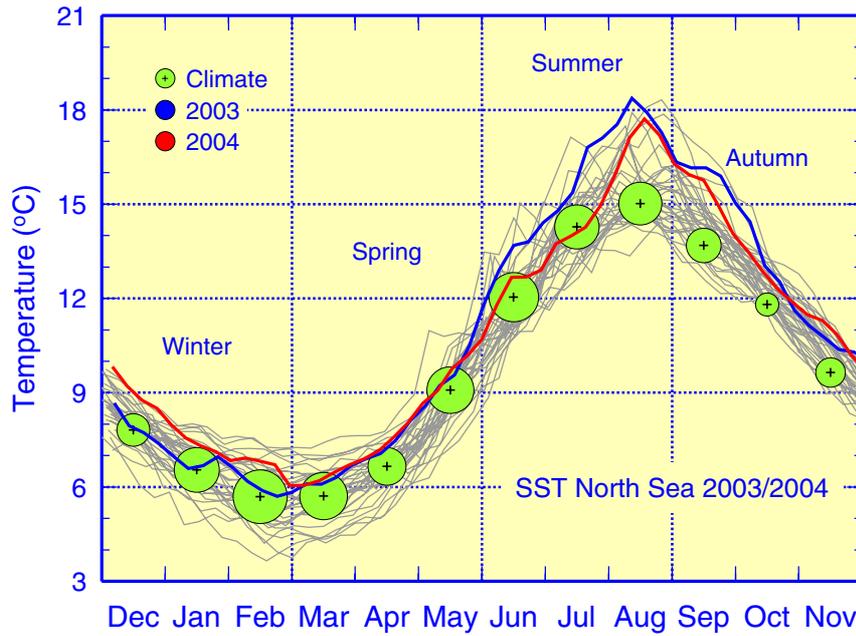


Abb. 3-19: Jahresgang der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen im Jahr 2004 mit Ensemble der Jahresgänge seit 1968 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971 – 1993) und zwischenjährigen Standardabweichungen (Kreisradius).

Fig. 3-19: Seasonal cycle of areal mean weekly SST of the North Sea from December 2003 through November 2004 and ensemble of corresponding cycles since 1968. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971 – 1993.

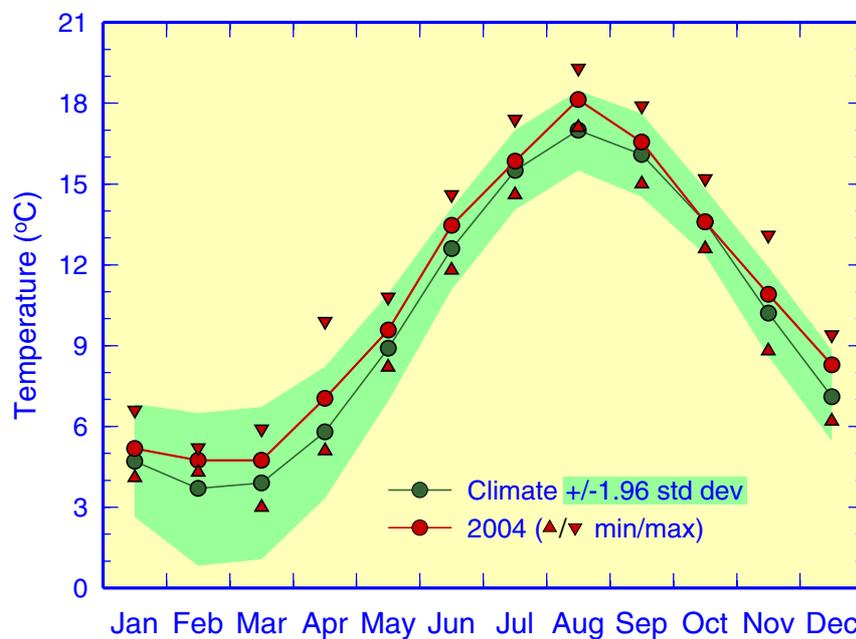


Abb. 3-20: Jahresgang 2004 der monatlichen Oberflächentemperatur bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima  $\pm 1.96$  Standardabweichungen).

Fig. 3-20: Seasonal cycle 2004 of monthly mean SST at Helgoland Reede together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology  $\pm 1.96$  standard deviations).

ste ununterbrochene Folge positiver Abweichungen setzte im Juli 2001 ein und dauerte bis Mai 2005 an.

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 2004 ist in Abb. 3-20 dargestellt. Die Temperatur lag außer im Oktober ständig oberhalb der klimatologischen Mittelwerte. Der jahreszeitliche Verlauf unterscheidet sich kaum vom Jahresgang der Mitteltemperatur für die gesamte Nordsee. Die Jahresmitteltemperatur bei Helgoland stimmt mit 10.7 °C fast mit derjenigen für die Nordsee (10.8 °C) überein. Das Jahr 2004 war damit für Helgoland das neuntwärmste Jahr seit Beginn der Messungen vor 132 Jahren.

### 3.4.2 Mischmasch-Klima

Das Temperaturklima der Nordsee zeichnet sich durch langlebige quasi-stabile Kalt- und Warmregimes aus, die durch scharfe Übergänge voneinander getrennt sind (LOEWE ET AL. 2005, ABB. 3-18 A.A.O.). Auch aus der Rangstatistik der Jahresmitteltemperaturen der Nordsee, die sich durch Sortierung dieser Temperaturen nach fallendem Wert ergibt, ist dieser Regimecharakter klar ersichtlich (Abb. 3-21). Unter Voraussetzung eines hypergeometrischen Zufallsprozesses liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit der beobachteten Verteilung bei 0.02 % (LOEWE ET AL. 2003). Die erhebliche Abweichung von einer Gleichverteilung der Ränge über die vier Quadranten illustriert nicht

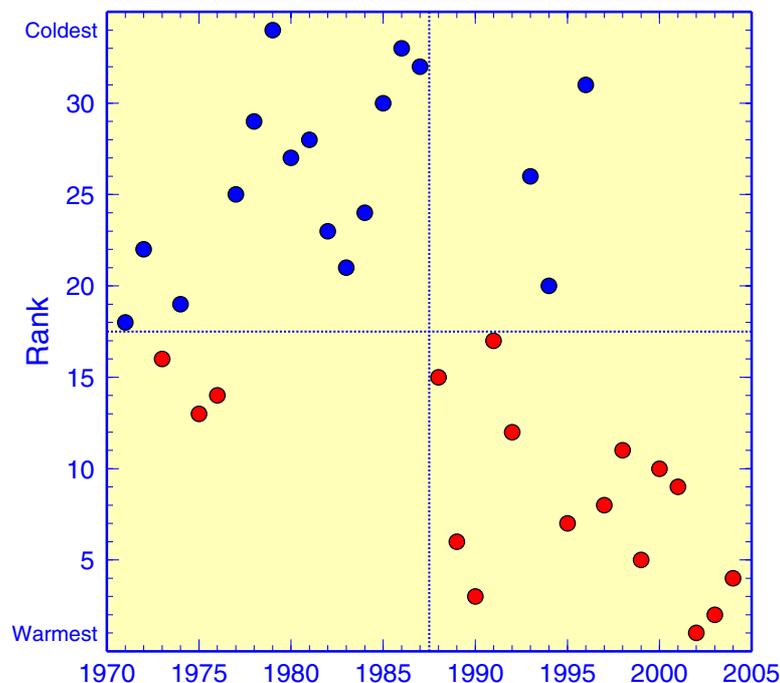


Abb. 3-21: Rangstatistik der Jahresmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee.

Fig. 3-21: Ranked annual mean North Sea SST.

nur die Realität des rezenten Warmregimes, welches das frühere Kaltregime 1988 ablöste und seither andauert, sondern auch die ›Überzufälligkeit‹ der Entwicklung der Oberflächentemperatur seit 1971.

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 – 1987) 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 (LOEWE ET AL. 2005, ABB. 3-19 A.A.O.).

Diese bi-stabilen und hybriden klimatischen Verhältnisse bezeichnen wir als ›Mischmasch-Klima‹. Eine schematische Illustration der Temperaturverhältnisse in solchen Klimata bietet Abb. 3-22.

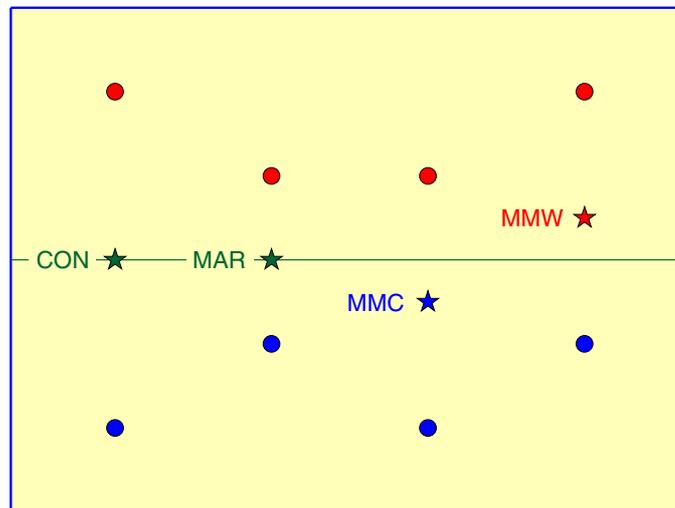


Abb. 3-22: Schematik des jährlichen Temperaturgangs (Mittel und saisonale Extrema) für kontinentales und maritimes Klima (CON & MAR) sowie kühles und warmes Mischmasch-Klima (MMC / Kaltregime & MMW / Warmregime).

Fig. 3-22: 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).

Zur Untermauerung der vorstehenden Bemerkungen und früheren Ergebnisse (LOEWE ET AL. 2003, 2005) wurden aus täglichen Luftdruckfeldern im Meeressniveau des UK MET OFFICE (vgl. Abschnitt 2.3, S. 45) saisonale Druckverteilungen für die Zeitfenster 1978 – 1987 und 1991 – 2000 bestimmt. Diese Verteilungen sind in Abb. 3-23 gemeinsam mit den Differenzenfeldern (Warm- minus Kaltregime) dargestellt. Auf den betrachteten jahreszeitlichen Zeitskalen zeichnet sich das Warmregime gegenüber dem Kaltregime durch eine verstärkte Westzirkulation im Winter und abgeschwächte Westwinde im Sommer aus. An anderer Stelle ist bereits gezeigt worden (LOEWE ET AL. 2005), dass diese Intensitätsunterschiede keineswegs allein auf entsprechenden Stärkeänderungen der Westwinde beruhen, sondern auch durch ein reduziertes (Winter) bzw. gehäuftes Auftreten (Sommer) von »kontinentalen« Ostwinden zustande kommen (ABB. 3-19 A.A.O.). Dass die warmen Sommer der 1990er Jahre mit blockie-

rendem Hochdruck über Skandinavien in Verbindung standen, läßt sich allerdings auch der Luftdruckdifferenzenverteilung für diese Jahreszeit entnehmen (Abb. 3-23).

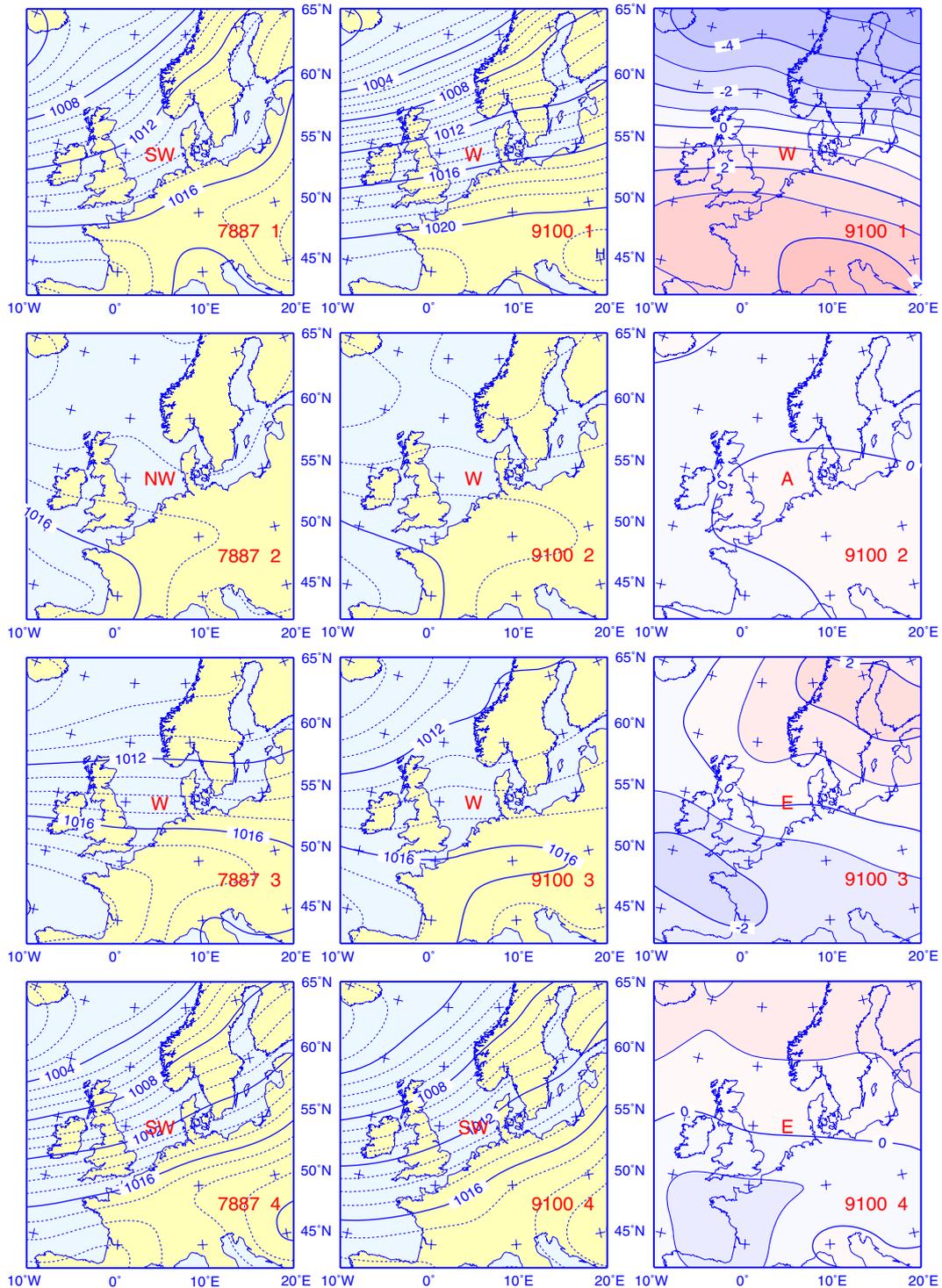


Abb. 3-23: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: 1978 – 1987, Mitte: 1991 – 2000, rechts: Differenzen; 1 = Winter = Januar, Februar, März etc.

Fig. 3-23: Classified seasonal SLP distributions (hPa). Left: 1978 – 1987, middle: 1991 – 2000, right: middle minus left; 1 = Winter = January, February, March etc.

### 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 cm gemessen. Die 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. Vertikale Temperaturgradienten können auch durch starke vertikale Salzgehaltsgradienten, wie sie in Flussmündungen oder im Bereich des baltischen Ausstroms auftreten, forciert werden.

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 Delphin-System gewonnenen Messdaten erlauben inzwischen jedoch eine grobe Klassifizierung der Nordsee zu einer Jahreszeit, in der die stärksten vertikalen Temperaturgradienten auftreten.

Im Sommer 2004 war die gut durchmischte Deckschicht (*Abb. 3-24*) ähnlich warm wie im vorangegangenen Jahr und damit erheblich wärmer als im langjährigen Mittel (vgl. *Abb. 3-18, S. 93*). Sie erstreckte sich über die gesamte Breite der Nordsee von der britischen bis zur kontinentalen Küste. Die Thermokline lag mit 20 – 30 m in vergleichsweise großer Tiefe und wies einen kräftigen vertikalen Gradienten auf. Sie 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).

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 ausgebildet. Die häufig geäußerte Ansicht, »über der Doggerbank tritt nie Schichtung auf«, erwies sich erneut als unzutreffend.

Die während der großräumigen Nordsee-Aufnahmen im Zeitraum 1998 – 2004 auf den Breitenparallelen erfassten Vertikalschnitte (z. B. auf 56 °N) zeigen erhebliche zwischenjährige Unterschiede sowohl in der Intensität der Schichtung (Gradienten), als auch in der Tiefenlage der Sprungschicht (*Abb. 3-25*). Während sich etwa im Sommer 1998 nur eine schwache Thermokline ausbildete, fiel die Temperaturschichtung in den Sommern der Jahre 2003 und 2004 sehr kräftig aus.

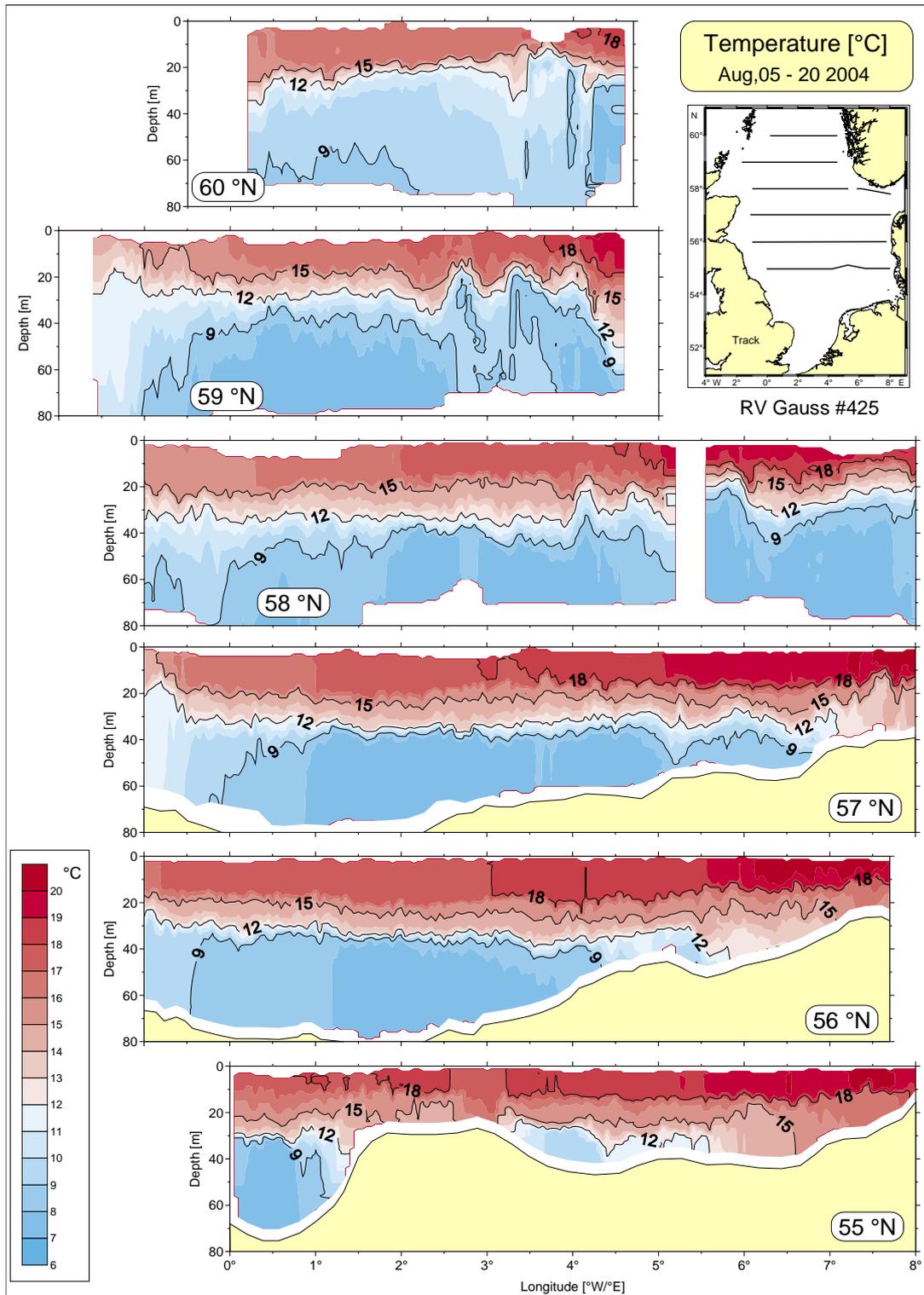


Abb. 3-24: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2004 (FS Gauß, Reise #425).

Fig. 3-24: Temperature stratification (°C) in summer 2004 (RV Gauß, Reise #425).

### 3 Physikalische Ozeanographie

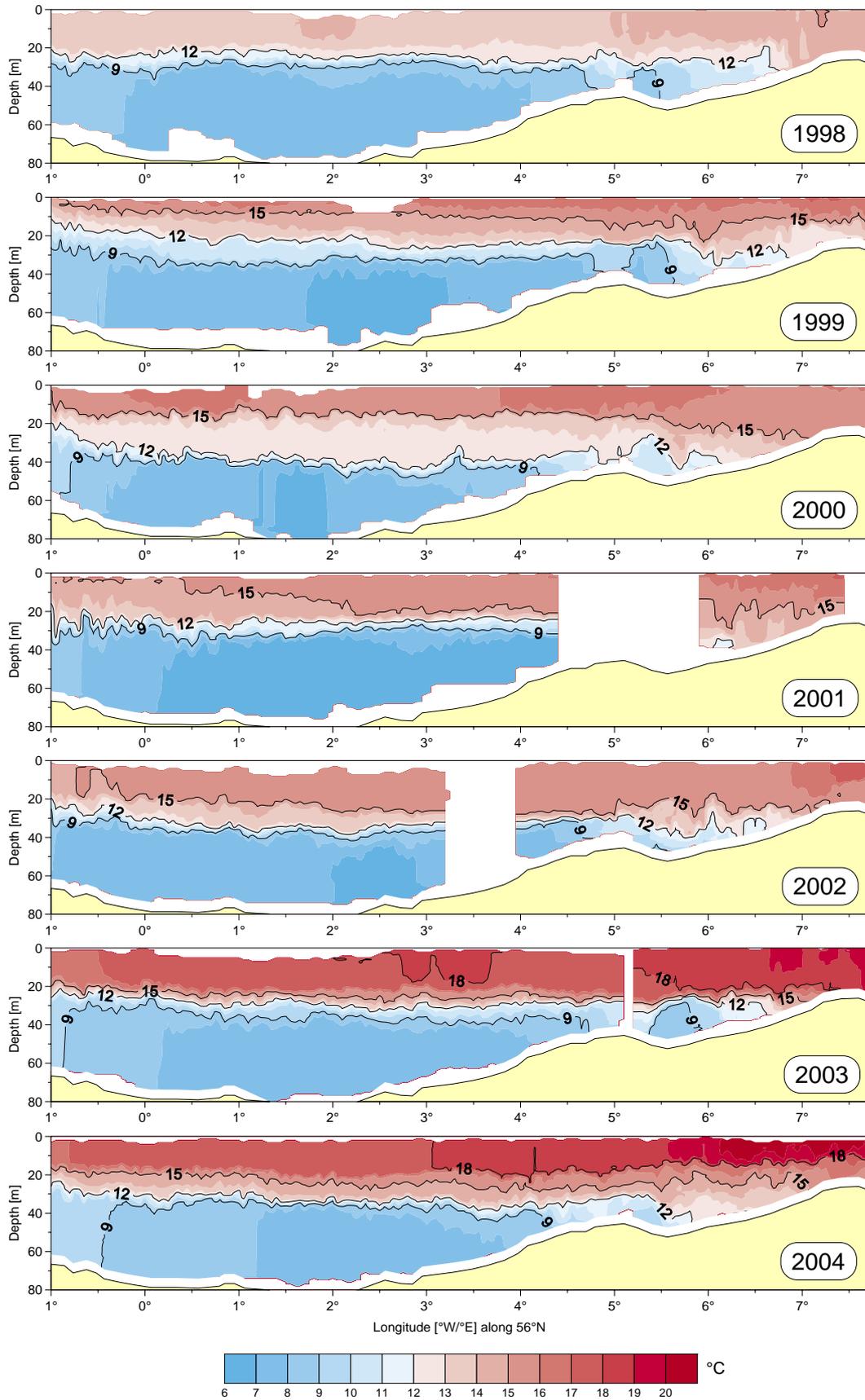


Abb. 3-25: Temperaturschichtung (°C) entlang 56°N im Sommer der Jahre 1998 bis 2004.

Fig. 3-25: Summery temperature stratification (°C) along 56°N for years 1998 through 2004.

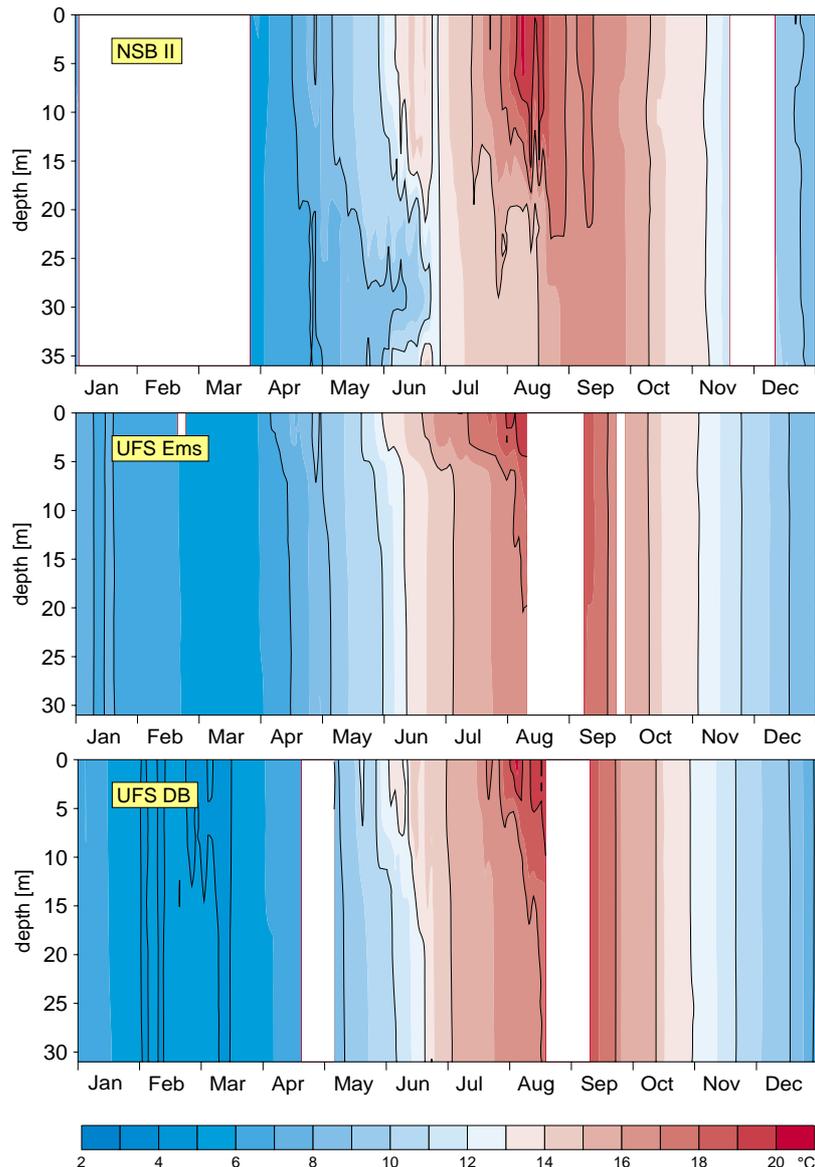


Abb. 3-26: Temperaturschichtung (°C) im Jahr 2004 an den MARNET-Stationen ›Deutsche Bucht‹, ›Ems‹ und ›NSB II‹. Sensortiefen: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.

Fig. 3-26: Temperature stratification (°C) in 2004 at MARNET stations ›Deutsche Bucht‹, ›Ems‹ and ›NSB II‹. Sensor depths: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m.

Die aus den Daten des Schleppfisches ›Delphin‹ abgeleiteten Wärmeinhalte der Einheitswassersäule entlang 56° N sind für die Sommer 1998 bis 2004 in Tab. 3-9 wiedergegeben. Danach trat der bisher höchste Wärmeinhalt hier im Berichtsjahr auf, während der niedrigste im Sommer 1998 um knapp 20 % geringer ausfiel. Unterschiede in den quasisynoptischen Wärmeinhalten sind allerdings nicht notwendig indikativ für zwischenjährige Abweichungen, weil die (angegebenen) mittleren Zeitpunkte der mehrwöchigen Vermessungsreisen stark streuen und der saisonale Anstieg des Wärmeinhalts gewöhnlich erst im September abgeschlossen ist. Anhand von Modellrechnungen wurde die Differenz zwischen den im März und September eintretenden saisonalen Extrema des Wärmeinhalts der Nordsee mit  $0.8 \times 10^{21}$  J abgeschätzt (LOEWE ET AL. 2005). Der halbjährliche Anstieg im Wärmeinhalt entspricht demnach einer

Leistung von  $0.05 \times 10^{15}$  W oder 10 % der Transportleistung des Nordatlantischen Stroms (0.5 PW).

CRUISE	TIME	HEAT CONTENT [J]
G 317	Jul 2 1998	$1.436 \times 10^{15}$
G 335	Jul 9 1999	$1.466 \times 10^{15}$
G 553	Aug 16 2000	$1.615 \times 10^{15}$
G 370	Jul 27 2001	$1.506 \times 10^{15}$
G 385	Jul 25 2002	$1.607 \times 10^{15}$
G 405	Aug 4 2003	$1.716 \times 10^{15}$
G 425	Aug 12 2004	$1.769 \times 10^{15}$

Tab. 3-9: Wärmehalt entlang 56 °N im Zeitraum 1998 – 2004.

Table 3-9: Heat content along 56 °N during 1998 – 2004.

Einen Einblick in die jahreszeitliche Entwicklung der Temperaturschichtung in der Deutschen Bucht bieten die Messdaten der MARNET-Stationen (Abb. 3-26, S. 101). Infolge des im Frühjahr relativ hohen, durchmischend wirkenden kinetischen Energieeintrags (z. B. Abb. 2-13, S. 54) setzte der Aufbau vertikaler Schichtung erst Anfang Juni ein. Die Sprungschicht vertiefte sich an der Station ›NSB II‹ in der nördlichen Deutschen Bucht beständig, bis Mitte September die gesamte Wassersäule von der sommerlichen Erwärmung erfasst war; die anschließende Abkühlung setzte wiederum verspätet zum Monatsende ein.

### 3.4.4 Meereis

Es ist weithin bekannt, dass Auftreten, Wachstum und Schmelze von Meereis entscheidend von der örtlichen Lufttemperatur abhängen. Im Winterquartal (DJF) des Jahres 2003/4 lag diese auf Norderney mit 3.8 °C fast 3 K über derjenigen des Vorjahreswinters (vgl. Abb. 2-15, S. 58). Das deutsche Küstengebiet der Nordsee war durchgängig eisfrei.

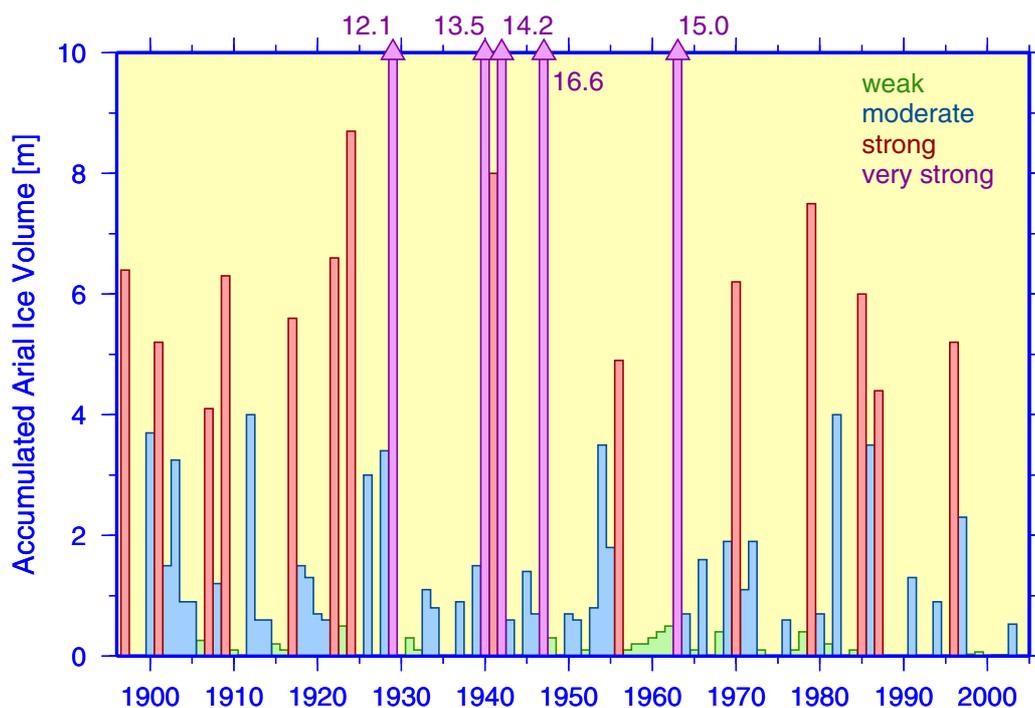
Der maximale Vereisungsstand ist in deutschen Küstengewässern schlecht definiert, weil gewöhnlich Frost- und Tauwetterperioden wechseln und keine kontinuierliche Eisentwicklung zulassen. Die Bewertung der Eiswinterstärke richtet sich deshalb nach der mittleren ›flächenbezogenen Eisvolumensumme‹ für 13 Eisklimastationen (LOEWE ET AL. 2005).

Dieses von KOSLOWSKI (1989) eingeführte Maß basiert auf täglichen Beobachtungen der Eisdicke  $h$  und des Bedeckungsgrads  $N$ . Da sich  $N$  als Verhältnis von tatsächlich eisbedeckter Fläche  $A$  zur durch Eisrand und ggf. Küste begrenzten Eisausdehnung  $E$  auffassen lässt, hat der Begriff ›flächenbezogenes Eisvolumen‹ für das Produkt  $hN$  Berechtigung. Würde das verfügbare Eisvolumen  $hA$  innerhalb der Eisgrenzen gleichmäßig als Eisbrei verteilt, hätte diese Schicht die effektive Dicke  $hA/E = hN$ .

Die eigentliche Maßzahl zur Charakterisierung der Stärke der Eiswinter – die flächenbezogene Eisvolumensumme – ergibt sich durch Summation der täglichen  $hN$ -Produkte über die Eissaison und bezieht somit die Dauer der Vereisung ein. Zur Erleichterung der Interpretation wurde eine Klassifizierung vorgenommen, die schwache

(< 0.5 m), mäßige (< 4 m), starke (< 9 m) und sehr starke Eiswinter unterscheidet. Die diesen Klassengrenzen entsprechenden Eiswinterlängen liegen bei etwa 1 Woche, 1 und 2 Monaten.

Die historische Entwicklung der Stärke der Eiswinter ist in *Abb. 3-27* dargestellt. Seit Beginn der gegenwärtigen Warmphase im Jahr 1988 (vgl. Mischmasch-Klima, S. 95) waren 70 % der Winter eisfrei. Eine hinsichtlich des geringen Eisvorkommens vergleichbare Periode stellt allenfalls diejenige der 1930er Jahre dar, welche durch die sehr starken Kriegswinter, die sich zeitgleich mit einer extremen ENSO Warmepisode ereigneten (KOSLOWSKI UND LOEWE 1994), ein abruptes Ende fand. Der einzige starke Eiswinter der rezenten Warmphase trat im Jahr 1996 ein, als die Zonalzirkulation über dem Nordatlantik klar abgeschwächt war (NAO-Index  $-1.56$ , LOEWE UND KOSLOWSKI 1998), die Nordsee unter dem Einfluss kontinentaler Kaltluftadvektion aus Südost stark abkühlte (s. S. 41) und bis in den Juli hinein anomal kalt blieb (LOEWE 1996). Das Auftreten dieses starken Eiswinters entsprach der statistischen Erwartung, die sich auf eine signifikante Quasiperiodizität von 7 – 9 Jahren gründete (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). Dieser Quasizyklus, der 1947 einsetzte, ist offenbar abgebrochen, denn auch der Eiswinter 2004/5 war mit einer Eisvolumensumme von lediglich 0.03 m praktisch eisfrei.



*Abb. 3-27: Flächenbezogene Eisvolumensumme für die deutsche Nordseeküste im Zeitraum 1897 – 2004.*

*Fig. 3-27: Accumulated areal ice volume for the German North Sea coast during 1897 – 2004.*

### 3.4.5 Zusammenfassung

Die aus den wöchentlichen Analysen der Oberflächentemperaturverteilung abgeleitete Nordseetemperatur lag im Jahresmittel nur 0.2 °C unter der Rekordtemperatur von 11.0 °C im Jahr 2002; nach der 1969 beginnenden Rangstatistik war 2004 das viertwärmste Jahr. Der deutlich zu warme Winter, der durch eine Rekordtemperatur von

9.1 °C im Dezember 2003 eingeleitet wurde, ließ an der deutschen Nordseeküste keine Meereisbildung zu. Einer langsamen Renormalisierung der Oberflächentemperaturen, die bis in den Juli (0.3 K) andauerte, folgten ein drastischer Temperaturanstieg im August (2.1 K über dem Klimanormalwert von 15 °C) und wiederum ein signifikant zu warmer Herbst. Während der Nordseeegesamtaufnahme (August 2004) wurde eine stabile Temperaturschichtung mit vergleichsweise tiefer Sprungschicht festgestellt. Auch die Temperatur des Tiefenwassers lag infolge des vorangegangenen milden Winters sowie des starken Einstroms warmen atlantischen Wassers oberhalb langjähriger Mittelwerte. Im Zeitraum 1988 – 2004 war die Oberflächentemperatur der Nordsee für 78 % aller Monate wärmer als normal; 70 % der Winter waren eisfrei.

Das Warmregime, das im Herbst 1987 ein 10-jähriges Kaltregime ablöste, dauerte weiter an. Der Regimecharakter der Nordseetemperatur ist an ein hybrides Windklima gekoppelt, dessen Eigenschaften monsunartigen jahreszeitlichen Wechseln unterliegen, die wiederum spontanen Umpolungen in Abständen von 5 bis 15 Jahren unterworfen sind; diese bi-stabilen, hybriden klimatischen Bedingungen wurden als Mischmasch-Klima bezeichnet. Für das rezente Warmregime (Kaltregime) ist ein Alternieren zwischen einem gehäuften Auftreten maritimer westlicher Winde im Winter (Sommer) und kontinentaler östlicher Winde im Sommer (Winter) charakteristisch. Dieser Befund wurde durch entsprechende Unterschiede in den saisonalen Luftdruckverteilungen über der Nordsee weiter belegt.

Der letzte Phasensprung im Windregime (1988) ging nicht nur mit einem spontanen Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur (0.9 K), einem gehäuften Auftreten eisfreier bzw. dem Ausbleiben starker Eiswinter (Ausnahme 1996), höheren Salzgehalten und einer jahreszeitlichen Verschiebung hoher Wasserstände einher. Anderswo wurde gezeigt (ALHEIT ET AL. 2005, EDWARDS ET AL. 2002, REID UND BEAUGRAND 2002), dass es gleichzeitig zu dramatischen Veränderungen auf allen trophischen Ebenen (Plankton, Fisch, Benthos) des Ökosystems Nordsee kam.

## 3.5 Salzgehalt

Der Salzgehalt der Nordsee ist abhängig vom Einstrom salzreichen atlantischen Wassers mit Salzgehalten über 35 (Practical Salinity Units) sowie von erheblichen Süßwassereinträgen der Flüsse. 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 2004 gemeinsam mit der sommerlichen Salzgehaltsschichtung der Nordsee diskutiert. Besonderheiten in den nördlichen Randbedingungen zum Atlantik werden im anschließenden Unterkapitel anhand von Zeitserien und Messungen autonomer Treibkörper des ARGO-Programms erörtert ([www.argo.net](http://www.argo.net)). Schließlich werden die wiederum ungewöhnlich geringe Wasserführung der Elbe und der Jahresgang des Salzgehalts bei Helgoland Reede untersucht.

### 3.5.1 Salzgehaltsverteilungen

Für die Analyse der Salzgehaltsbedingungen der Nordsee im Jahr 2004 lagen Daten aus dem Winter (ICES / INTERNATIONAL BOTTOM TRAWL SURVEY, FS Gauß / Reisen #412 & #414) und aus dem Sommer (FS Gauß / Reise #425) vor. Die geographischen Verteilungen des Salzgehaltes in Oberflächen- und Bodennähe sind für beide Jahreszeiten in *Abb. 3-28* dargestellt. Sowohl im Winter, als auch im Sommer 2004 war die nördliche und zentrale Nordsee großräumig mit Wasser atlantischen Ursprungs gefüllt (Salzgehalte > 35), dessen Salzgehalt nördlich 58° N im Gegensatz zum Vorjahr sogar 35.25 überstieg.

Der auf das Nordseegebiet bezogene prozentuale Flächenanteil von Atlantikwasser in Bodennähe ist in *Tab. 3-10* für den Zeitraum 1998 – 2004 gemeinsam mit dem Winter NAO-Index zusammengestellt. Danach hat sich der Einfluss des Atlantik nach einem Minimum im Winter 2002 erheblich verstärkt. Der Einfluss der NAO auf die Stärke des atlantischen Einstroms scheint nach der Datenlage weniger klar, als 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 (LOEWE ET AL. 2005), so dass ein weiterhin starker Zusammenhang für andere geophysikalische Variablen aus der gleichen Region eher erstaunlich wäre. Die starke Häufung von NW-Wetterlagen über dem Nordseeraum (vgl. *Abschnitt 2.2.3, S. 40*), fast unverändert hohe Salzgehalte im ›Fair-Isle Current‹ (s. u. *Abschnitt 3.5.2, S. 108*) und die prononcierte Zyklonalität der Strömungsfelder (*Abb. 3-1, S. 65*) stehen hingegen in direktem ursächlichen Zusammenhang zur beobachteten Zunahme des Salzgehalts in der Nordsee.

Außer in den durch Süß- oder Brackwassereinträge beeinflussten Seegebieten – also vor den Mündungen großer Flüsse sowie über der Norwegischen Rinne infolge des Baltischen Ausstroms (*Abb. 3-28*) – bilden sich ausgeprägte Salzgehaltsschichtungen in der Nordsee kaum aus (*Abb. 3-29*). Die Bodenwasserschicht ist durch die saisonale Thermokline von der Deckschicht entkoppelt, so dass sowohl die winterlichen Bodentemperaturen, als auch die bodennahen Salzgehaltsbedingungen bis in den Sommer nur geringen Änderungen unterworfen sind (*Abb. 3-28, rechts*).

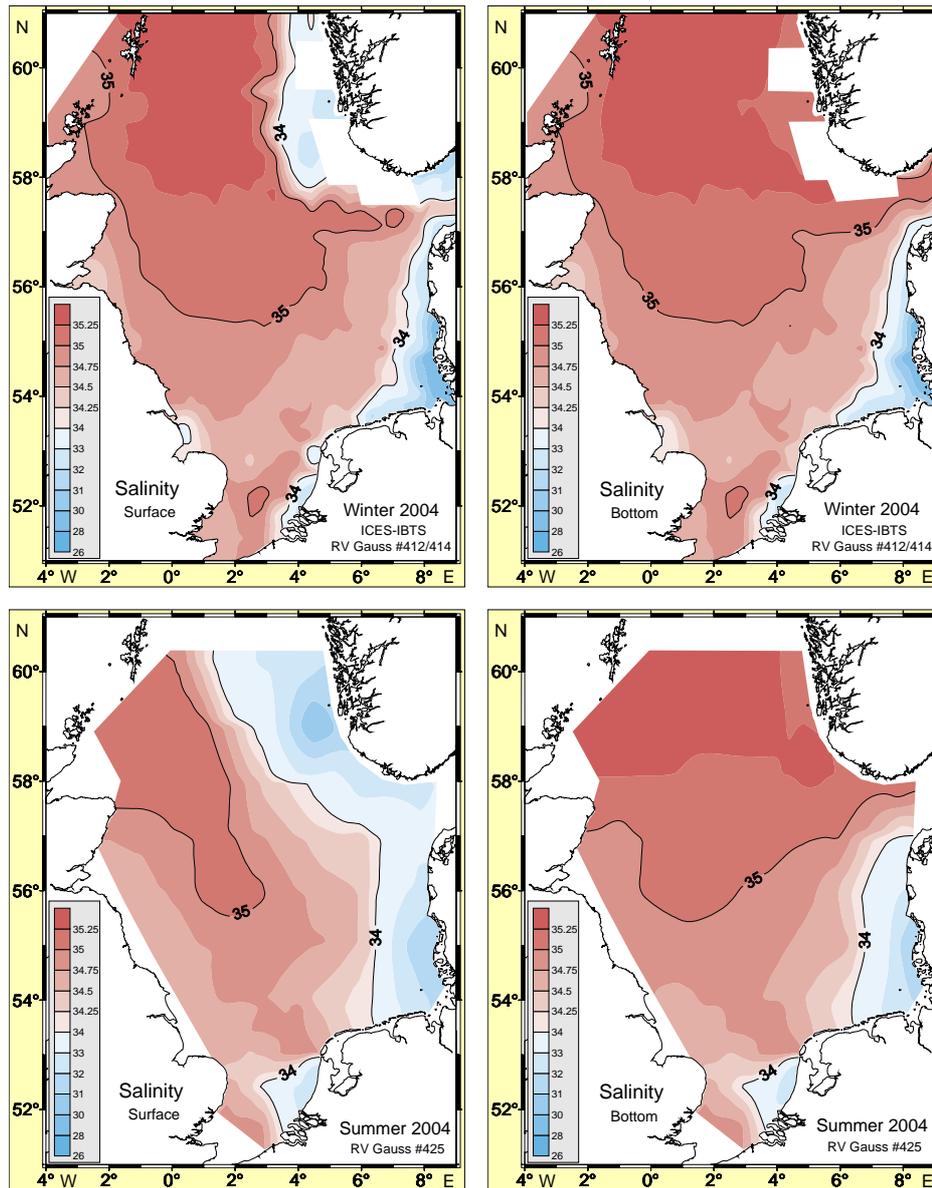


Abb. 3-28: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2004.

Fig. 3-28: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2004.

YEARS	FRACTIONAL AREA ( $S > 35$ ) AND WINTER NAO-INDEX						
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
WINTER	./.	34	39	31	23	37	53
NAO <sub>DJF</sub>	-0.31	2.71	2.29	-0.89	-0.25	0.08	-0.60

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).

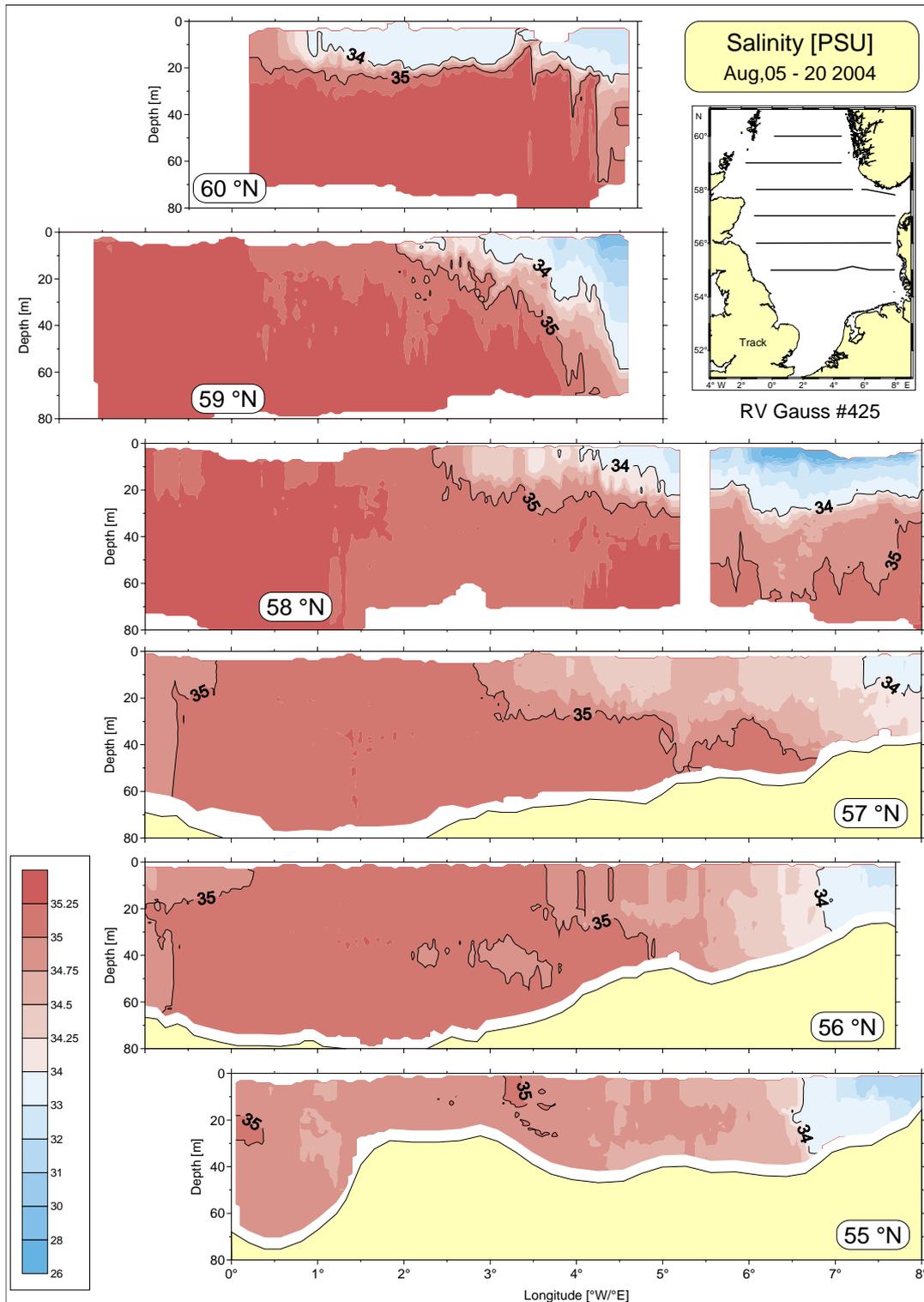


Abb. 3-29: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2004 (FS Gauß, Reise #425).

Fig. 3-29: Salinity stratification in summer 2004 (RV Gauß, Cruise #425).

Die mit dem oszillierenden Schleppsystem ›Delphin‹ gemessenen Salzgehaltsprofile zeigen vor allem auf den Schnitten entlang 57°– 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

ve Mächtigkeit nördlich 59° N und die gegenüber dem Vorjahr extensivere Westausdehnung der salzärmeren Wasserschicht, die entlang 60° N bis 1° E vordrang. Im Einklang mit diesem Befund stehen die erhöhte Tiefdruckaktivität in den Sommermonaten (*Abb. 2-11, S. 50*), die stationäre SE-Wetterlage in der ersten Augushälfte (*Tab. 2-1, S. 39*) und ein starker Ausstrom von Ostseewasser im Juli und August (*Abb. 3-3, S. 67*).

Entlang 57° N und südwärts erstreckte sich die Wassermasse mit Salzgehalten > 35 fast bis zur britischen Küste, während sie östlich etwa 4° E in den oberen Dekametern stark erodierte. Diese scheinbare Westverlagerung salzreichen Wasser, welches im Sommer 2003 die zentrale Nordsee ausfüllte, könnte eine Konsequenz der auf monatlichen Zeitskalen wechselnden Anomalien des meridionalen Windantriebs sein (vgl. *S. 55, S. 64*).

Aufgrund der insgesamt eher dürftigen Datenlagen sind Aussagen zu den Auswirkungen des wechselnden Atlantikeinflusses auf Primärproduktion oder Artenzusammensetzung schwierig. Mit dem beobachteten verstärkten atlantischen Einstrom dürften jedoch mehr Nährstoffe in die Nordsee transportiert worden sein, so dass in der nördlichen und westlichen Nordsee eine intensivere Primärproduktion möglich gewesen sein sollte.

#### 3.5.2 Nördliche Randbedingungen

Analyse und Bewertung, aber auch die Modellierung raumzeitlicher Veränderungen der Nordsee setzen Kenntnisse der hydrographischen Bedingungen an den Systemgrenzen zum Nordatlantik voraus, die sich aus Langzeitbeobachtungen an festen Stationen und neuerdings aus Messprofilen autonomer Treibkörper gewinnen lassen. An dieser Stelle werden deshalb zunächst die Salzgehaltskonditionen im Jahr 2004 an repräsentativen Positionen im Einstrombereich der nördlichen Nordsee im Kontext der langfristigen Entwicklung betrachtet. Anschließend wird beispielhaft anhand von Salzgehaltsprofilen, die im Herbst 2003 mit einem norwegischen Argo-Float am Nordrand zum Atlantik gemessen wurden, die hohe Variabilität des Salzgehalts in diesem Seegebiet illustriert. Die Drifftrajektorie dieses Treibkörpers sowie die Positionen britischer CTD-Stationen im ›Fair-Isle Current‹ (FIC) und ›Faroe-Shetland Channel‹ (FSC) sind *Abb. 3-30* zu entnehmen.

*Abb. 3-31* zeigt die zeitliche Entwicklung des oberflächennahen Salzgehalts im FIC gemeinsam mit derjenigen im salzreichen Kern des FSC als Abweichungen von klimatologischen Mittelwerten des Zeitraums 1971 – 2000; zur besseren Vergleichbarkeit wurden die FSC-Anomalien um einen Faktor 3 überhöht dargestellt.

Charakteristisch für beide Zeitreihen sind quasizyklische Variationen im Periodenbereich von 6 – 9 Jahren, der bekanntlich hohe Varianzanteile im Spektrum des NAO-Index oder auch des Kerndrucks des Islandtiefs enthält (z. B. LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). Ähnlichkeit und Eintrittszeitverschiebung der Salzgehaltssignale lassen auf eine hohe Lag-Korrelation schließen. Im Gegensatz zu den Salzgehalten im FIC befinden sich diejenigen im Nordatlantikwasser des FSC seit Mitte der 1990er Jahre in einem signifikanten Aufwärtstrend, der im Jahr 2004 zur stärksten positiven Anomalie im betrachteten Zeitbereich führte. Der im Rahmen des gegenwärtigen Zyklus seit 2001/2 wieder zunehmende Salzgehalt an beiden Positionen befindet sich im Einklang mit der Ausbreitung atlantischen Bodenwassers in der Nordsee (vgl. *Tab. 3-10, S. 106*). Besonders die für das Haupteinstromgebiet von Atlantikwasser repräsentativen Salz-

gehalte im FIC könnten sich zur Abschätzung historischer Salzgehaltsbedingungen in der Nordsee eignen.

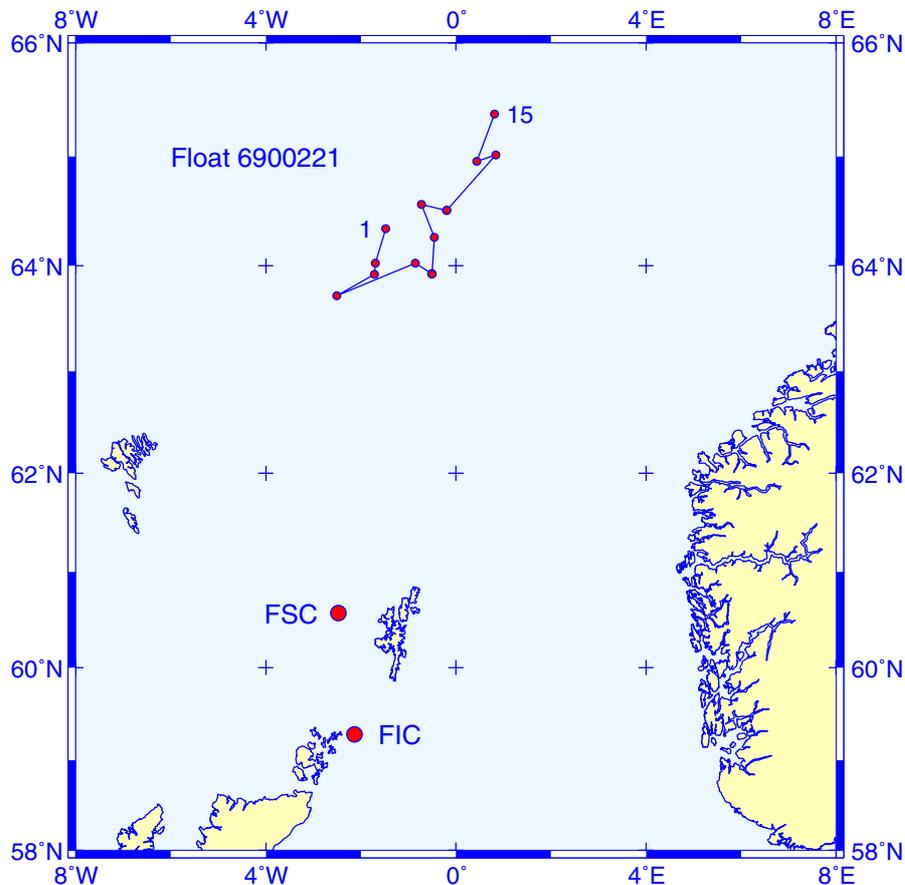


Abb. 3-30: Driftpfad eines profilierenden Treibkörpers im Übergangsbereich zum Nordatlantik. Die im Zeitabstand von etwa 10 Tagen markierten Auftauchpositionen des norwegischen Argo-Floats zeigen die geographische Lage der im Zeitraum vom 13. Aug. bis 1. Dez. 2003 aufgezeichneten Profile (s. Abb. 3-32). FIC und FSC bezeichnen britische CTD-Stationen im Fair-Isle Current und Faroe-Shetland Channel (s. Abb. 3-31).

Fig. 3-30: Trajectory of a Norwegian profiling Argo-float drifting about the transition zone towards the North Atlantic. Marked positions are about 10 days apart in time and refer to the profiles recorded during ascents from Aug, 13 to Dec, 1 2003 (cf. Fig. 3-32). FIC and FSC denote British CTD stations in the Fair-Isle Current and Faroe-Shetland Channel (cf. Fig. 3-31).

Argo leistet als internationales Beobachtungsprogramm für Salzgehalt, Temperatur und Strömungen im Inneren des Weltozeans einen wesentlichen Beitrag zur globalen Überwachung des Systems Erde (GEOSS/GMES). Die angestrebte flächendeckende operationelle Observierung des physikalischen Zustands der eisfreien Weltmeere bis in Tiefen von 2000 m erfordert eine Armada von 3000 profilierenden Treibkörpern und wird voraussichtlich bis Jahresende 2006 realisiert sein (ARGO 2006).

Einer dieser autonomen Treibkörper driftete im Herbst 2003 im nördlichen Randbereich der Nordsee nordostwärts (Abb. 3-30) und zeichnete im Zeitabstand von etwa 10 Tagen an den jeweiligen Auftauchpositionen die in Abb. 3-32, S. 111 bis 600 m Tiefe dargestellten Salzgehaltsprofile auf.

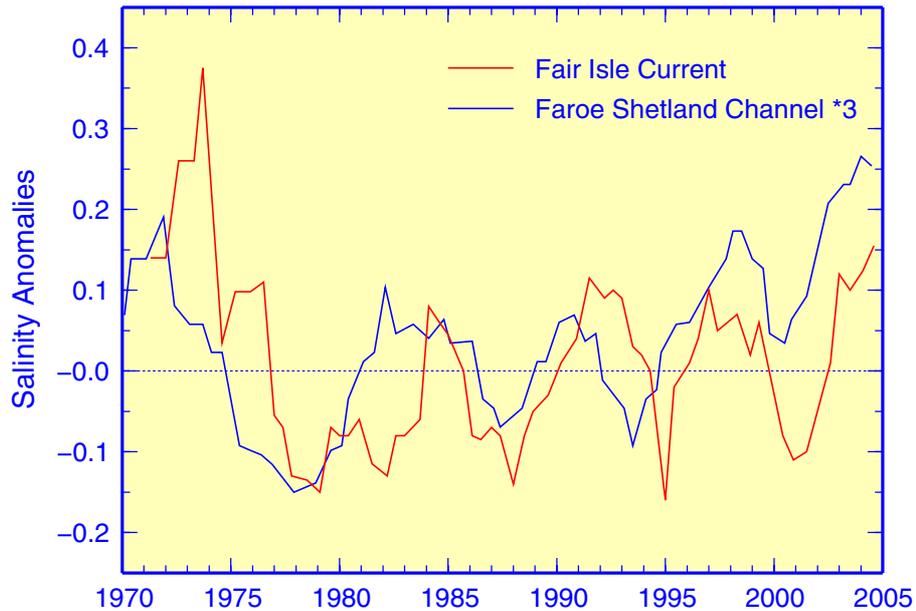


Abb. 3-31: Salzgehaltsanomalien im »Faroe Shetland Channel« und »Fair Isle Current«. Basisperiode 1971 – 2000; FSC-Anomalien sind mit Faktor 3 skaliert. Zur Lage der Messpositionen s. Abb. 3-30, S. 109. (Reproduziert nach Abbn. 32 & 36, ICES 2005).

Fig. 3-31: Salinity anomalies in the »Faroe Shetland Channel« and »Fair Isle Current«. Departures from 1971 – 2000 base period means; FSC-anomalies are scaled by factor 3. For a location map cf. Fig. 3-30, p. 109. (Redrawn from Figs. 32 & 36, ICES 2005.)

Die hohe Variabilität der Profile entlang des Driftpfades spiegelt erhebliche Unterschiede in Mächtigkeit und Vermischungsgrad der Wassermassen. Unterhalb der wenige Dekameter dicken, homogenen und zumeist salzärmeren Oberflächenschicht steigen die Salzgehalte kräftig an und erreichen in etwa 100 m Tiefe unterschiedlich stark ausgeprägte Extremwerte. Diese Maxima identifizieren die subtropische Wassermasse des Golfstroms, der später als Nordatlantikstrom und schließlich Norwegischer Strom nordwärts bis zum Arktischen Ozean setzt. Durch Vermischung mit anderen Wassermassen entlang dieses langen Transportwegs – im betrachteten Seegebiet etwa mit rezirkulierenden Wassermassen des Ostgrönlandstroms – wird das »Golfwasser« zum »modifizierten Nordatlantikwasser« (MNAW, BECKER UND HANSEN 1998).

Der frühere Befund deutlich erhöhter Salzgehalte an den Stationen FIC und FSC trifft offensichtlich für das vermessene Seegebiet bis in 200 m Tiefe gleichermaßen zu. In größeren Tiefen hingegen lagen im Vergleich zur Klimatologie etwas frischere Verhältnisse vor.

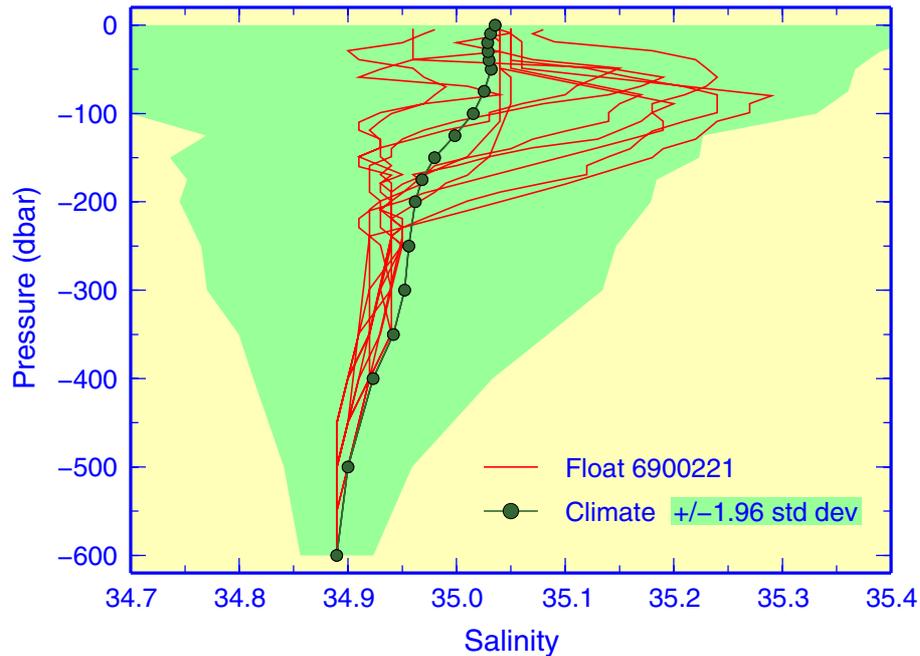


Abb. 3-32: Salzgehaltsprofile im Herbst 2003 entlang der Trajektorie eines norwegischen Treibkörpers (s. Abb. 3-30, S. 109). Klimatologie (1900 – 1998) mit 95%-Band nach GOURETSKI UND KOLTERMANN (2004).

Fig. 3-32: Salinity profiles as recorded during fall 2003 by a Norwegian float drifting about the transition zone towards the North Atlantic (cf. Fig. 3-30, p. 109). Climatology (1900 – 1998) and 95%-band after GOURETSKI AND KOLTERMANN (2004).

### 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  $16 \text{ km}^3/\text{a}$  im Jahr 2004 erweist sich im Vergleich zum langjährigen Mittel als unterdurchschnittlich (Abb. 3-33). Anhand des in Abb. 3-34 illustrierten Jahresgangs der Abflussraten ist ersichtlich, dass diese praktisch ausnahmslos unterhalb der Monatsklimatologie lagen; selbst für die in diesen Monaten gemessenen maximalen Wassertransporte trifft dies mehrheitlich zu. Die durchgängig geringe Wasserführung der Elbe im Jahr 2004, die bereits im April 2003 einsetzte, wird als Konsequenz des extremen Trockenjahrs 2003 interpretiert (LOEWE ET AL. 2005). Die im Berichtsjahr durchweg normalen Niederschlagsmengen im Elbeinzugsgebiet (MÜLLER-WESTERMEIER UND RIEKE 2005) spiegeln sich nicht in den Abflussraten, sondern wurden vermutlich verstärkt zur Grundwasserneubildung herangezogen.

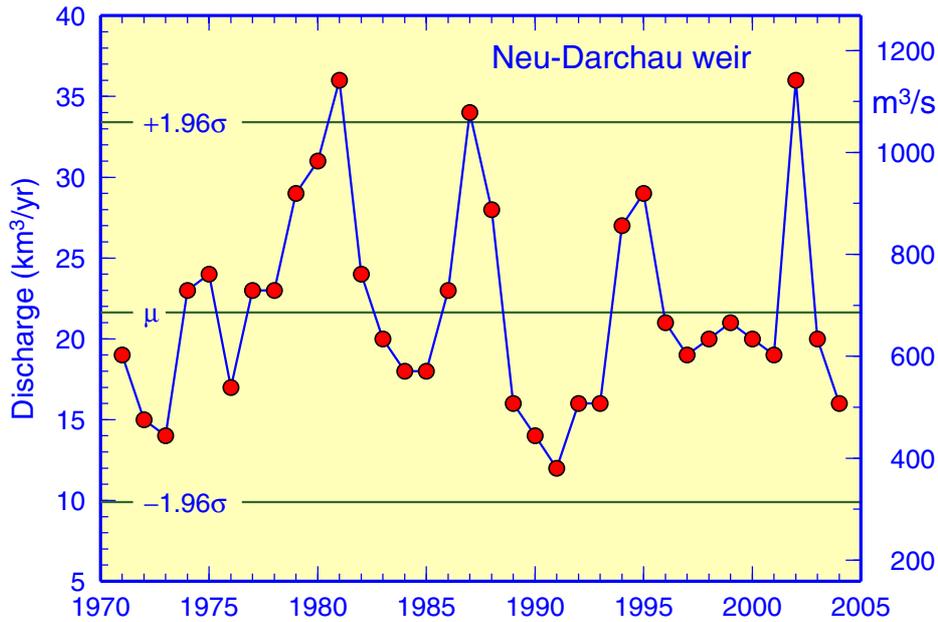


Abb. 3-33: Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Langzeitmittel (1971 – 2000) und 95 %-Grenzen. 1 km<sup>3</sup>/a entspricht 31.7 m<sup>3</sup>/s. (Quelle: WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-33: Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971 – 2000) and 95 %-limits. 1 km<sup>3</sup>/a is equivalent to 31.7 m<sup>3</sup>/s. (Data courtesy WSA-Lauenburg.)

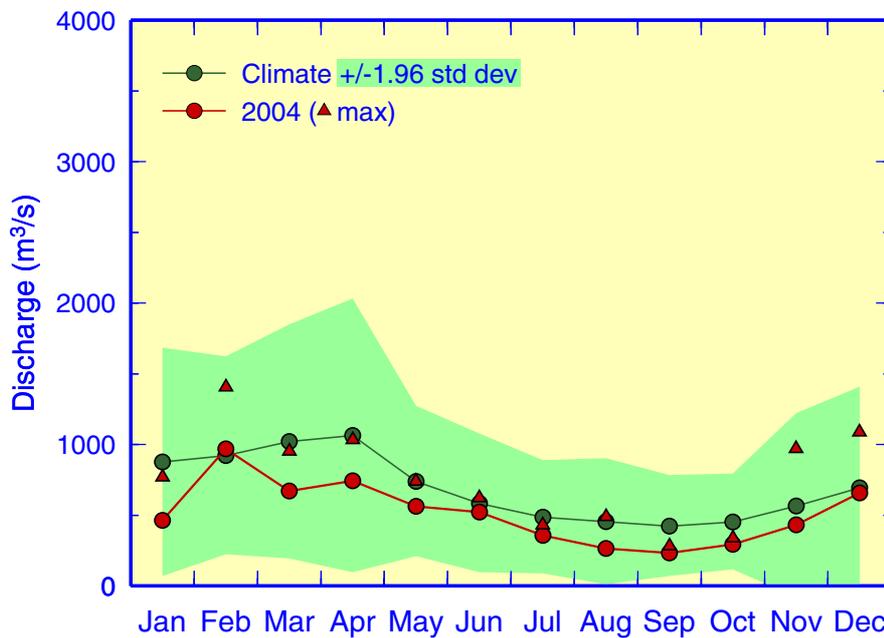


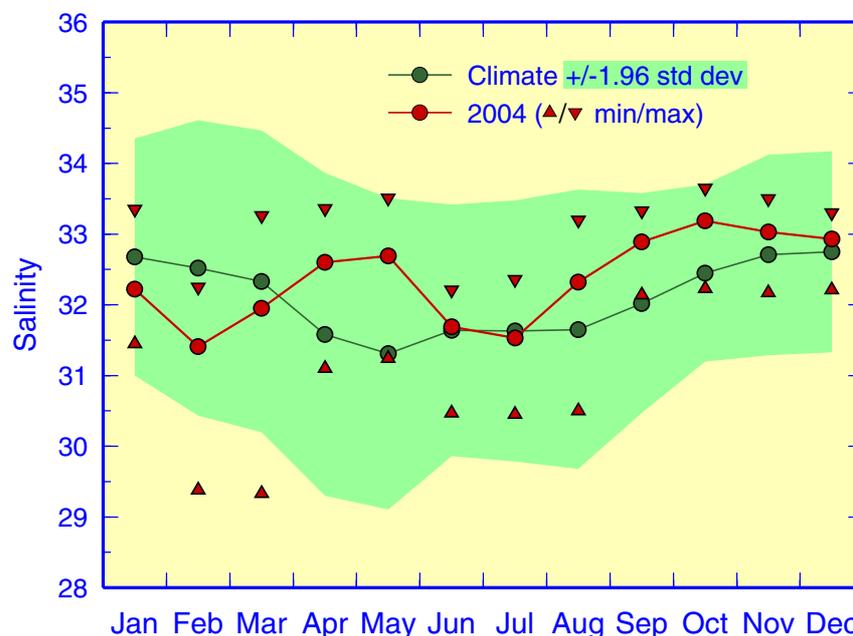
Abb. 3-34: Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe in Jahr 2004 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95 %-Band (Klima ±1.96 Standardabweichungen). 1000 m<sup>3</sup>/s entsprechen 2.592 km<sup>3</sup>/Monat. (Quelle: WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-34: Monthly mean and maximum runoff of Elbe River in 2004 at Neu-Darchau weir together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95 %-band (climatology ±1.96 standard deviations). 1000 m<sup>3</sup>/s are equivalent to 2.592 km<sup>3</sup>/month. (Data courtesy of WSA-Lauenburg.)

### 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 2004 ist in *Abb. 3-35* gemeinsam mit der Monatsklimatologie für den Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt.

Signifikante Anomalien traten im Berichtsjahr nicht auf. Die grundsätzlich gute inverse Korrelation des Salzgehalts mit den Abflussraten der Elbe (*Abb. 3-34*, S. 112) ist nicht nur aus den mehrheitlich überdurchschnittlichen Konzentrationen ersichtlich. Auch die saisonalen Extrema im Februar belegen diesen Zusammenhang. In welchem Umfang der verstärkte Transport salzreichen Nordatlantikwassers in die Nordsee (vgl. *Abschnitt 3.5.2*, S. 108) an der Produktion der zumeist positiven Salzgehaltsanomalien beteiligt war, ist schwer abzuschätzen.



*Abb. 3-35: Jahresgang 2004 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima  $\pm 1.96$  Standardabweichungen).*

*Fig. 3-35: Seasonal cycle 2004 of monthly mean SSS at Helgoland Roads together with monthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology  $\pm 1.96$  standard deviations).*

### 3.5.5 Zusammenfassung

Im Jahr 2004 hat sich der Einfluss atlantischen Wassers in der zentralen und nördlichen Nordsee weiter verstärkt. Die relative Nordseefläche mit bodennahen Salzgehalten  $> 35$  erreichte eine Rekordausdehnung von 53 % in der 1999 beginnenden Zeitreihe. Die beobachtete Zunahme des Salzgehalts steht in ursächlichem Zusammenhang mit andauernd erhöhten Salzgehalten im Nordostatlantik, einer starken Häufung von NW-Wetterlagen im Nordseeraum und einer prononcierten Zyklonalität des Strömungsfeldes. Der Salzgehalt im ›Fair-Isle Current‹ am NW-Rand zum Atlantik unter-

liegt quasizyklischen Variationen im Periodenbereich von 6 – 9 Jahren, der auch im Spektrum des NAO-Index hohe Varianzanteile enthält. Dieser Quasizyklus, der sich zuletzt im Jahr 2001 in einer Troglage befand, erreichte im Berichtsjahr die Phasenlage maximaler positiver Salzgehaltsanomalien.

Die Abflussraten der Elbe lagen im Jahr 2004 weiterhin und in nahezu allen Monaten unter den klimatologischen Werten. Diese seit April 2003 andauernde geringe Wasserführung wird als Konsequenz des extremen Trockenjahres 2003 gewertet. Die im Einzugsgebiet der Elbe durchweg normalen Niederschlagsmengen im Berichtsjahr wurden vermutlich verstärkt zur Grundwasserneubildung herangezogen. Die Salzgehaltsentwicklung bei Helgoland Reede verlief weitgehend antiparallel zu derjenigen des Elbabflusses und war demnach durch meist positive Anomalien gekennzeichnet.

## 3.6 Referenzen

Alheit J., C. Möllmann, J. Dutz, G. Kornilovs, P. Loewe, V. Mohrholz und N. Wasmund, Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s, *ICES Journal of Marine Science*, 62, 1205-1215, 2005.

Argo Project Office, Argo, an array of profiling floats observing the ocean in realtime, 8pp, 2006. [www-argo.ucsd.edu/Argo\\_new\\_brochure.pdf](http://www-argo.ucsd.edu/Argo_new_brochure.pdf)

Becker, G., A. Frohse, P. Damm, The northwest European shelf temperature and salinity variability, *Dt. Hydrogr. Z.*, 49, 145-161, 1997.

Becker, G. und B. Hansen, Modified North Atlantic Water, 96-111 in: Hansen, B. und S. Oesterhus (eds.), North Atlantic – Norwegian Sea Exchanges: The ICES NANSEN Project, *ICES Cooperative Research Report*, No. 225, 246pp, 1998.

Dick, S., E. Kleine, S. H. Müller-Navarra, H. Klein, H. Komo, The operational circulation model of BSH (BSHcmod) – model description and validation, *Berichte des BSH*, Nr. 29, 49pp, 2001.

Edwards, M., G. Beaugrand, P. C. Reid, A. A. Rowden, M. B. Jones, Ocean climate anomalies and the ecology of the North Sea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 239, 2002.

Ertel, H. und P. Mauersberger, Eine Ungleichung für den Windstau an Flachküsten, *Acta Hydrophysica*, 17, 77-83, 1973.

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

Gouretski, V. V., und K. P. Koltermann, WOCE, Global hydrographic climatology, *Berichte des BSH*, Nr. 35, 54pp, 2004.

[www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht35/index.jsp](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht35/index.jsp)

ICES, Flushing times of the North Sea, *ICES Cooperative Research Report*, No. 123, 159pp, 1983.

ICES, The Annual ICES Ocean Climate Status Summary 2004/2005, *ICES Cooperative Research Report*, No. 275, 39pp, 2005.

[www.soc.soton.ac.uk/JRD/ICES\\_WGOH/iaocss.php](http://www.soc.soton.ac.uk/JRD/ICES_WGOH/iaocss.php)

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

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

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 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.

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](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht33/index.jsp)

Loewe, P., S. Schmolke, G. Becker, U. Brockmann, S. Dick, C. Engelke, A. Frohse, W. Horn, H. Klein, S. Müller-Navarra, H. Nies, N. Schmelzer, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald, S. Weigelt, Nordseezustand 2003, *Berichte des BSH*, Nr. 38, 220pp, 2005.

[www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht38/index.jsp](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht38/index.jsp)

Müller-Navarra, S. H. und E. Mittelstaedt, Schadstoffausbreitung und Schadstoffbelastung in der Nordsee – Eine Modellstudie. *Dt. hydrogr. Z. Erg.*, B. 18, 51pp, 1987.

Müller-Westermeier, G. und W. Riecke, Die Witterung in Deutschland 2004, 93-100 in: Klimastatusbericht 2004, *Deutscher Wetterdienst*, Offenbach, 220pp, 2005.

[www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html](http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/index.html)

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.

Reid, P. C. und G. Beaugrand, Interregional biological responses in the North Atlantic to hydrometeorological forcing, 27-48 in: Sherman, K. und H. R. Skoldal (eds.), Large marine ecosystems of the North Atlantic, *Elsevier Science*, 464pp, 2002.

Smith, J. A., P. E. Damm, M. D. Skogen, R. A. Flather, J. Pätsch, An Investigation into the variability of circulation and transport on the north-west European shelf using three hydrodynamic models, *Dt. hydrogr. Z.*, 48, 325-348, 1996.

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 Elemente und Verbindungen werden nur schwer abgebaut und daher langsam aus der marinen Umwelt entfernt. Hieraus ergibt sich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für die Anreicherung dieser Stoffe in marinen Lebewesen, welche sich durch Akkumulationprozesse in der Nahrungskette potenziert. Zu den möglichen Folgen zählen Beeinträchtigungen des Immunsystems, der Reproduktionsfähigkeit und des Stoffwechsel.

Neben den toxikologischen Aspekten der chemischen Belastung des marinen Ökosystems kommt dem Nährstoffhaushalt des Meeres besondere Bedeutung 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, die Sauerstoffmangelsituationen und Veränderungen im Artenspektrum zur Folge haben kann.

Voraussetzung für die Beurteilung des ökologischen Zustandes der Nordsee ist eine möglichst genaue Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der chemischen Variablen. Die Auswertung der analysierten Elemente und Verbindungen gliedert sich in Unterkapitel über Nährstoffe, organische Stoffe, Spurenmetalle und radioaktive Stoffe, die den chemischen Zustand der Nordsee im Jahr 2004 charakterisieren.

## 4.1 Nährstoffe

### 4.1.1 Einführung

Nährstoffe wie Phosphor- und Stickstoffverbindungen sowie Silikat sind für das Leben im Meer von grundlegender Bedeutung. Die Nährstoffzufuhr über Flusssysteme und die Atmosphäre ist zunächst ein natürlicher Prozess. Seit den 1950er Jahren sind die Nährstoffkonzentrationen im Meer jedoch als Folge der Intensivierung von Landwirtschaft, Industrie und Verkehr erheblich angestiegen.

Veränderungen in der Meeresumwelt, wie das Auftreten von starkem Algenwachstum (Planktonblüten) und von Sauerstoffdefiziten, wurden mit erhöhten Nährstoffkonzentrationen in Verbindung gebracht. Überschüssige Nährstoffe begünstigen möglicherweise auch das Wachstum toxischer Phytoplanktonarten, die beispielsweise erhebliche Schäden in Fischfarmen verursachen können. Starke Phytoplanktonblüten führten u. a. in den 1980er Jahren zu ausgedehnten Schaumteppichen (Phaeocystisblüten) an den Stränden.

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 immer noch hoch. Um die Entwicklung von Ausmaß und Wirkung des anthropogenen Nährstoffeintrags zu erfassen und das Greifen von Maßnahmen zur Verringerung der Einträge zu kontrollieren, werden sowohl Nährstoff-, als auch Sauerstoffgehalte regelmäßig überwacht.

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.

Mit zunehmender Sonneneinstrahlung im Frühjahr beginnt die Primärproduktion und die gelösten Nährstoffe werden aus der Wassersäule 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.

### Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar

Nährsalze wie **Phosphat** und anorganische **Stickstoffverbindungen** (Nitrat, Nitrit, Ammonium) sowie **Silikat** 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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  oder (ausnahmsweise)  $\text{CO}_3^{2-}$  benötigt. Da  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) oder organischer Verbindungen aufgenommen. So werden Harnstoff und Aminosäuren als bevorzugte Stickstoffquelle genutzt. 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.

**Phosphor** wird meistens als Orthophosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 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 ( $\text{Si}_x\text{O}_y$ ), 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.

Im Wasser gelöster **Sauerstoff** ist die Voraussetzung für alles höhere Leben im Meer. 1 Liter Wasser enthält dabei nur ca. 1/20 der Sauerstoffmenge, die im gleichen Volumen Luft enthalten ist. Das Oberflächenwasser steht in direktem Kontakt zur Atmosphäre und ist i. d. R. gut mit Sauerstoff versorgt. Während des Algenwachstums (Photosynthese) kann hier sogar Sauerstoffübersättigung eintreten. Remineralisierungsprozesse zehren hingegen den Sauerstoffvorrat im Bodenwasser auf. Sauerstoffmangel ist hier insbesondere im Sommer möglich, wenn vertikale Austauschprozesse durch Schichtung des Meerwassers unterbunden sind.

**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](http://www.ospar.org))).

## 4.1.2 Winter 2004

## 4.1.2.1 Zentrale und nördliche Nordsee

Die Nährstoffmessungen in der zentralen und nördlichen Nordsee wurden auch im Winter 2004 im Rahmen des internationalen Verbundprogramms zur winterlichen Bestandsaufnahme von Jungfischbeständen (ICES/YFS) mit FS Walther Herwig im Zeitraum 22. Jan. bis 16. Feb. durchgeführt. Dieser Datensatz wurde in den geographischen Darstellungen der Nährstoffverteilungen durch Ergebnisse etwa gleichzeitiger Überwachungsfahrten des BSH in der Deutschen Bucht ergänzt, die im nachfolgenden Abschnitt 4.1.2.2, S. 123 ausführlich erörtert werden.

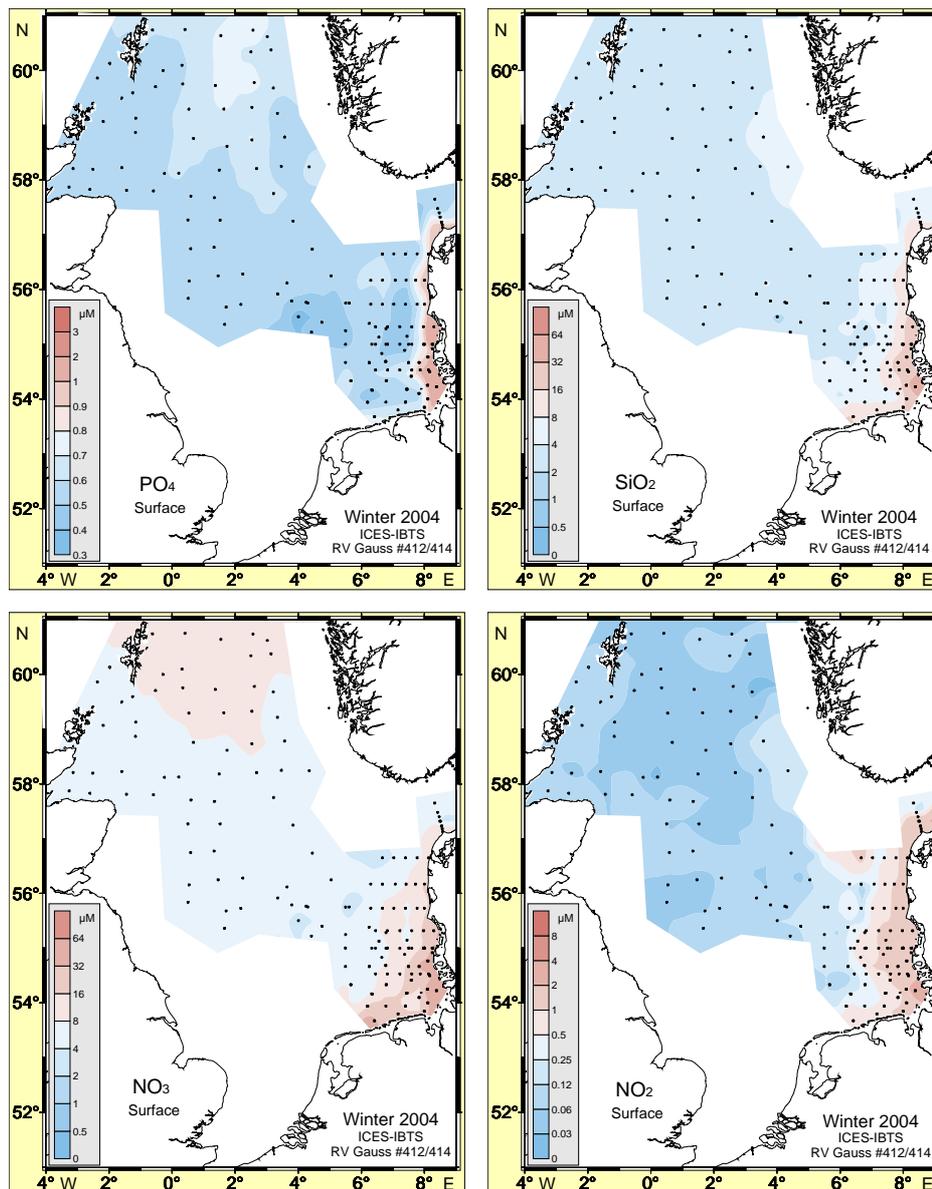
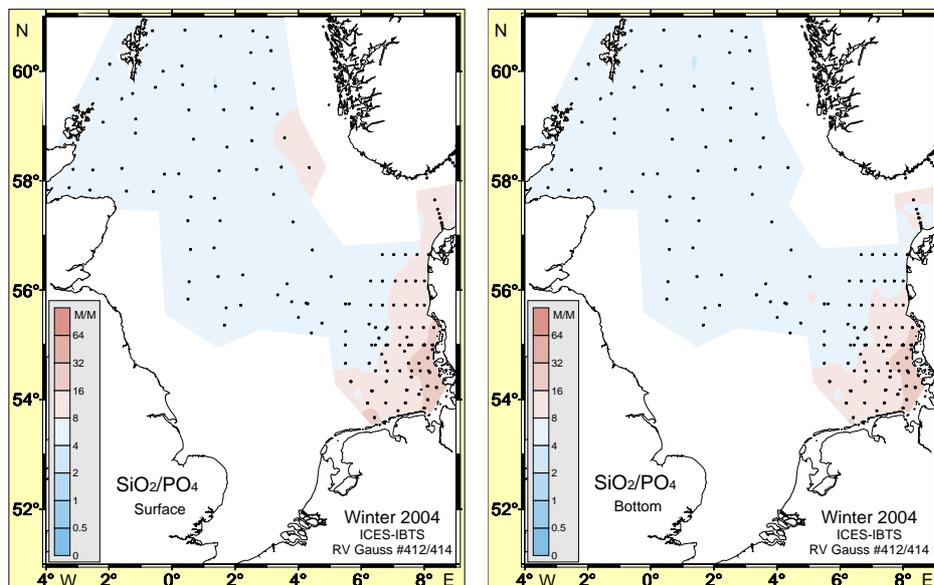


Abb. 4-1: Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit Verteilungen ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächenwasser im Winter 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten (außer für  $\text{PO}_4$ ).

Fig. 4-1: Phosphate, Silicate, Nitrate, and Nitrite distributions ( $\mu\text{mol/L}$ ) in surface water in winter 2004. Note  $\log_2$  color scale (except for  $\text{PO}_4$ ).

Für Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit sind die räumlichen Konzentrationsverteilungen im Oberflächenwasser der Nordsee *Abb. 4-1, S. 120* dargestellt. Die logarithmische Abstufung der Farbskalen beinhaltet, dass sich die Konzentrationen schrittweise verdoppeln bzw. halbieren. Aufgrund der winterlichen vertikalen Durchmischung sind die Oberflächenverteilungen repräsentativ für die gesamte Wassersäule.

Die Phosphatkonzentrationen lagen in weiten Teilen der zentralen Nordsee zwischen 0.5 und 0.6  $\mu\text{mol/L}$  und überschritten im Bereich der Norwegischen Rinne 0.7  $\mu\text{mol/L}$ , wo es unter Auftriebsbedingungen zu erhöhten Konzentrationen im Oberflächenwasser kommen kann. Die Silikatgehalte, die ansonsten zwischen 2 und 4  $\mu\text{mol/L}$  variierten, waren in dieser Region ebenfalls erhöht und lagen darüber hinaus mit 5 bis 6  $\mu\text{mol/L}$  deutlich über denen im Bodenwasser (um 3.5  $\mu\text{mol/L}$ ). Im Gegensatz zu den übrigen Nährsalzen werden die Silikatgehalte anthropogen kaum beeinflusst, so dass die Silikatverteilung in der winterlichen Nordsee natürliche Prozesse und Veränderungen reflektiert. Hohe Silikatkonzentration, wie sie auch in der Deutschen Bucht angetroffen wurden, zeigen beispielsweise die Temperatur- und Lichtlimitierung der schnellwüchsigen Kieselalgen in den Wintermonaten an. Die geringsten Silikatkonzentrationen von  $< 3 \mu\text{mol/L}$  wurden in der zentralen Nordsee gemessen.



*Abb. 4-2: Verhältnis Silikat zu Phosphat (M/M) im Oberflächen- und Bodenwasser im Winter 2004; log<sub>2</sub>-Farbskala beachten.*

*Fig. 4-2: Silicate to phosphate ratio (M/M) in near-surface and -bottom water in winter 2004 (note log<sub>2</sub> color scale).*

In hohen Silikat:Phosphat Verhältnissen spiegelt sich der terrestrische Silikateintrag wider. Im norwegischen Küstenwasser und in der flachen südöstlichen Nordsee, wo das Wasser in intensivem Austausch mit dem Sediment steht, wurden Verhältnisse  $> 10$  (M/M) angetroffen (*Abb. 4-2*). Geringere Verhältniswerte in der zentralen Nordsee zeigen hingegen an, dass ein großer Teil des Silikats im Februar in sedimentierten, noch nicht wieder aufgeschlossenen Schalen der Kieselalgen festgelegt war (BROCKMANN & TOPCU 2001).

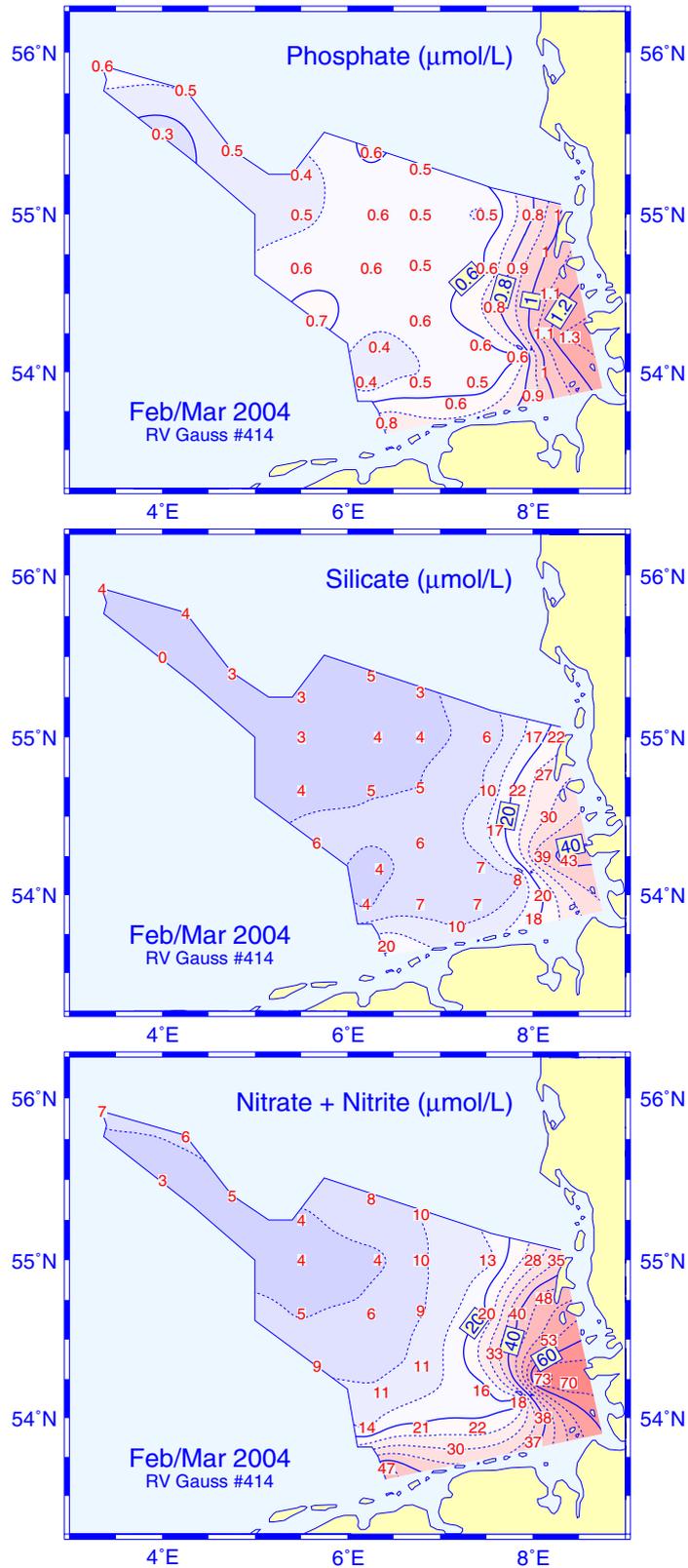


Abb. 4-3: Verteilungsmuster ( $\mu\text{mol/L}$ ) für Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit in der Deutschen Bucht im März 2004.

Fig. 4-3: Geographical distributions ( $\mu\text{mol/L}$ ) of phosphate, silicate, nitrate and nitrite in the German Bight in March 2004.

Infolge des im Jahr 2004 weiterhin verstärkten Einstroms von Atlantikwasser (vgl. *Abschnitt 3.5.2, S. 108*) traten nördlich 58° N höchste Nitratgehalte von 7 – 10  $\mu\text{mol/L}$  auf (*Abb. 4-1*). In der südlichen Nordsee war Nitrat hingegen infolge andauernder Denitrifizierungsprozesse teilweise bis unter 4  $\mu\text{mol/L}$  abgebaut worden. Hohe Nitritgehalte belegen den Umsatz von Stickstoffverbindungen. Als Zwischenprodukt der Nitrifizierung und Denitrifizierung wird Nitrit wegen des im Winter verlangsamten bakteriologischen Stoffwechsels insbesondere im Küstenwasser angereichert, wo die höchsten Stickstoffeinträge anfallen.

#### 4.1.2.2 Deutsche Bucht

Die Nährstoffkonzentrationen im Meerwasser unterliegen einem ausgeprägten Jahresgang. Maximale Konzentrationen treten im Winter auf, wenn die biologische Aktivität am geringsten und die Remineralisierung weit fortgeschritten ist. Im Küstenwasser erreichen die Phosphatgehalte allerdings bereits im Herbst Höchstwerte, da zu dieser Zeit große Mengen dieses Nährstoffes aus dem Watt freigesetzt werden. Dieser Effekt zeigte sich in den 1950er Jahren zuerst vor der niederländischen Küste und dann auch im ost- und nordfriesischen Wattenmeer. Die Konzentrationen des gebundenen Stickstoffs steigen über den gesamten Winter u. a. durch Remineralisierungsprozesse an und fallen mit Beginn der ersten Phytoplanktonblüte im Frühjahr steil ab.

Die jährliche Nährstoffüberwachung in der Deutschen Bucht wurde vom BSH mit FS Gauß (Reise #412) vom 27. Januar bis zum 4. Februar durchgeführt. Eine weitere Reise wurde vom 29. Februar bis zum 10. März unternommen (FS Gauß #414), um die saisonalen Höchstkonzentrationen der anorganischen Stickstoffverbindungen zu bestimmen. Der Jahreszeit entsprechend war das Seewasser gut durchmischt; Schichtung trat nur im Mündungsbereich von Elbe und Weser auf.

Die räumlichen Verteilungsmuster der in der zweiten Messkampagne beobachteten Konzentrationen sind in *Abb. 4-3* für Phosphat, Silikat und Nitrit + Nitrat wiedergegeben. Im Küstenbereich lagen die Nährstoffkonzentrationen auch im Winter 2004 deutlich höher als weiter außerhalb. Ursache hierfür sind erhebliche Nährstofffrachten vor allem der Elbe und Weser, die sich bei auflandigen Winden über weite Strecken direkt im Wattenmeer und im küstennahen Wasser ausbreiten.

Die beobachteten Verteilungsmuster (*Abb. 4-3*) ergeben sich aus dem Zusammenspiel von Eintragsstärke der Flüsse, Richtung des Nettotransports und fortschreitender Verdünnung. Diese hochvariablen Einflussgrößen integrieren sich auch in der Salzgehaltsverteilung, wie ähnliche räumliche Strukturen belegen (*Abb. 4-4*). Die beobachteten Nährstoffkonzentrationen (wie der Salzgehalt selbst auch) stellen sich in hohem Maße durch Vermischung von Fluss- und Meerwasser ein (*s. Fußnote, S. 146*). Dieser Prozess äußert sich in starken inversen linearen Korrelationen zwischen Salz- und Nährstoffgehalten (um  $-0.95$ ), welche sich für zwischenjährige Vergleiche und Trend-schätzungen nutzen lassen (KÖRNER UND WEICHART 1991).

Dazu werden die auf den Überwachungsfahrten bestimmten Nährstoffkonzentrationen auf den Salzgehalt regressiert. Für durch den Salzgehalt  $S_w$  charakterisierte Wassermassen lassen sich dann typische Nährstoffkonzentrationen aus den jeweiligen Regressionsgeraden als Ordinatenwerte zu  $S_w$  abschätzen. Diese Schätzwerte werden hier gemeinsam mit Vertrauensbereichen angegeben, welche so konstruiert sind, dass sie Nährstoffkonzentrationen, die sich bei (praktisch nicht durchführbaren) Messungen in Proben mit Salzgehalt  $S_w$  ergeben würden, mit einer Wahrscheinlichkeit von

95 % enthielten<sup>1</sup>. Dieser manchmal als ›Vorhersageintervall‹ bezeichnete Bereich ist demnach ein Maß für die Streuung oder Spannweite der »virtuellen« Messungen bei  $S_w$ .

Mit Hilfe der beschriebenen Methode wurden Nährstoffkonzentrationen für Salzgehalte von 30 und 33 abgeschätzt, welche charakteristisch für das Küstenwasser ( $S_{30}$ ) und die Wassermassen der eigentlichen Deutschen Bucht ( $S_{33}$ ) sind (vgl. Abb. 4-4). Für Küstenwasser ergab sich Ende Januar 2004 (FS Gauß #412) eine Phosphatkonzentration von  $1.15 \mu\text{mol/L}$  mit einem Vertrauensbereich von  $\pm 0.21 \mu\text{mol/L}$ . Die entsprechende Silikatkonzentration betrug  $23.4 \pm 4.9 \mu\text{mol/L}$ , während die Summenkonzentration der gelösten anorganischen Stickstoffverbindungen Nitrat und Nitrit  $31.4 \pm 9.2 \mu\text{mol/L}$  erreichte. Für küstenfernes Meerwasser ( $S_{33}$ ) wurde der Phosphatgehalt auf  $0.69 \pm 0.20 \mu\text{mol/L}$ , die Silikatkonzentration auf  $9.5 \pm 4.8 \mu\text{mol/L}$  und die Summenkonzentration der Stickstoffverbindungen auf  $13.7 \pm 8.9 \mu\text{mol/L}$  geschätzt.

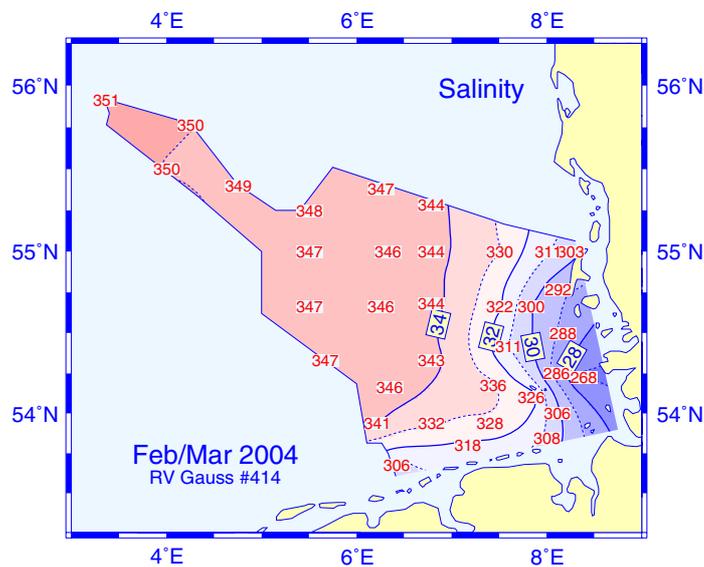


Abb. 4-4: Salzgehaltsverteilung im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2004.

Fig. 4-4: Salinity distribution in near-surface sea water of the German Bight in March 2004.

Tab. 4-1 ermöglicht einen Vergleich der genannten Gehalte mit denen, die aus dem Datensatz der zweiten Überwachungsfahrt Anfang März abgeleitet wurden. Die Summenkonzentration der löslichen Stickstoffverbindungen stieg im Küstenwasser innerhalb eines Monats um etwa  $11 \mu\text{mol/L}$  an. Die Silikatgehalte veränderten sich nicht, die Phosphatgehalte gingen geringfügig zurück. Auch in der eigentlichen Deutschen Bucht nahm die Konzentration der Stickstoffverbindungen zu, während die Phosphat- und Silikatgehalte praktisch gleich blieben. Diese Veränderungen befinden sich im Einklang mit früheren Ergebnissen zur winterlichen Nährstoffdynamik (MURSYS 1997). Im Küstenwasser der Deutschen Bucht treten danach maximale Phosphatge-

1. In LOEWE ET AL. (2005) wurde irrtümlich angegeben, dieses Intervall sei durch  $\pm 2$  Standardschätzfehler (SSF) definiert, wobei  $SSF^2$  die durch Regression nicht erklärte Varianz oder Restvarianz ist. Die Vertrauensbereiche wurden jedoch hier wie dort als Produkt von  $t(n-2; 0.95)$  und  $SSF \sqrt{1 + 1/n + (S_w - \bar{S})^2 / (n-1) \text{Var}(S)}$  bestimmt. Allerdings nähern sich die Zentile der t-Verteilung für große Stichproben ( $n > 30$ ) denen der Gaußverteilung an, so dass der erste Faktor gegen 1.96 oder 2 geht. Ferner wird für große  $n$  und Schätzungen in der Nähe des mittleren Salzgehalts  $\bar{S}$  die Wurzel 1, so dass  $\pm 2$  SSF näherungsweise gilt. Das Vertrauensintervall ist umso schmäler je geringer die Restvarianz bzw. je höher die durch Regression erklärte Varianz. Die auf die Gesamtvarianz bezogene relative erklärte Varianz heißt Bestimmtheitsmaß und ist durch das Quadrat des Korrelationskoeffizienten gegeben.

halte Ende Oktober ein, maximale Silikatwerte im Dezember. Die Konzentrationen des gebundenen Stickstoffs steigen den gesamten Winter über an und fallen mit Beginn der ersten Planktonblüte steil ab (vgl. *Abb. 4-16, S. 138*).

2004	Time	$S_{30}$	$S_{33}$	Correlation
Phosphate	Jan/Feb	$1.15 \pm 0.21$	$0.69 \pm 0.20$	- 0.94
	Feb/Mar	$0.91 \pm 0.18$	$0.63 \pm 0.18$	- 0.91
$NO_3 + NO_2$	Jan/Feb	$31.4 \pm 9.2$	$13.7 \pm 8.9$	- 0.93
	Feb/Mar	$42.6 \pm 6.5$	$19.4 \pm 6.4$	- 0.98
Silicate	Jan/Feb	$23.4 \pm 4.9$	$9.5 \pm 4.8$	- 0.96
	Feb/Mar	$23.0 \pm 4.8$	$9.9 \pm 4.7$	- 0.97

Tab. 4-1: Geschätzte Nährstoffkonzentrationen mit 95%-Vertrauensbereich ( $\mu\text{mol/L}$ ) für Küstenwasser ( $S_{30}$ ) und Meerwasser der eigentlichen Deutschen Bucht ( $S_{33}$ ).

Table 4-1: Estimated nutrient concentrations with 95% prediction limits ( $\mu\text{mol/L}$ ) for coastal water ( $S_{30}$ ) and sea water of the German Bight proper ( $S_{33}$ ).

Die langzeitliche Entwicklung der Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht ist aus *Abb. 4-5* ersichtlich. Sie zeigt für den Salzgehalt 30 geschätzte winterliche Konzentrationen von Phosphat, Silikat sowie Nitrit und Nitrat im Zeitraum 1978 – 2004. 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 Phosphatkonzentration ist trotz zeitweilig starker zwischenjähriger Schwankungen zu Beginn der 1990er Jahre deutlich zurückgegangen. Dieser rückläufige Trend hat sich jedoch in den vergangenen 10 Jahren nicht fortgesetzt. Im Winter 1978 war die Konzentration noch 4mal so hoch wie im Jahr 1936 ( $0.56 \pm 0.14 \mu\text{mol/L}$ ), im Winter 2004 nur noch doppelt so hoch wie die Referenzkonzentration (*Abb. 4-5*).

Die Konzentration der löslichen Stickstoffverbindungen (Nitrat und Nitrit) im Küstenwasser unterlag starken zwischenjährigen Schwankungen und gegenläufigen Trends. Seit 1999 zeichnet sich eine verstärkte Reduktion von etwa  $3 \mu\text{mol/L}$  und Jahr ab, die im Winter 2004 zur vorläufig geringsten Konzentration der Zeitreihe führte. Der aktuelle Wert entspricht etwa einer Halbierung des Gehaltes von 1978. Referenzwerte für das Jahr 1936 liegen nicht vor.

Auch die winterlichen Silikatkonzentrationen unterlagen starken Änderungen von Jahr zu Jahr. Während die geschätzten Konzentrationen von 1993 bis 1996 im Bereich des Referenzwertes für 1936 ( $18.5 \pm 2.9 \mu\text{mol/L}$ ) lagen, wurde dieser Vergleichswert in den Folgejahren um etwa 35 % überschritten.

Im Gegensatz zu den Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser sind die Phosphat- und Silikatkonzentrationen im Wasser der eigentlichen Deutschen Bucht ( $S_{33}$ ) inzwischen von den zugehörigen Referenzwerten nicht mehr signifikant verschieden. Für die Konzentration der löslichen Stickstoffverbindungen liegt auch für  $S_{33}$  kein Referenzwert aus dem Jahr 1936 vor.

Infolge des andauernd verstärkten Einstroms salzreichen Atlantikwassers, das sich bis in die Deutsche Bucht auswirkte (vgl. *Abschnitt 3.5.1, S. 105*), wurden hier im Winter 2004 höhere Salzgehalte beobachtet als im Vorjahreszeitraum. Die Vermischung die-

ser vergleichsweise nährstoffarmen Wassermassen mit hochbelastetem Flusswasser führte im Küstenbereich zu einer Verringerung bzw. Verdünnung der Summenkonzentrationen von Nitrat und Nitrit sowie der Silikatgehalte gegenüber denen des Vorjahreswinters (vgl. Abb. 4-5, S. 126). Insgesamt hat sich die Nährstoffsituation jedoch wenig

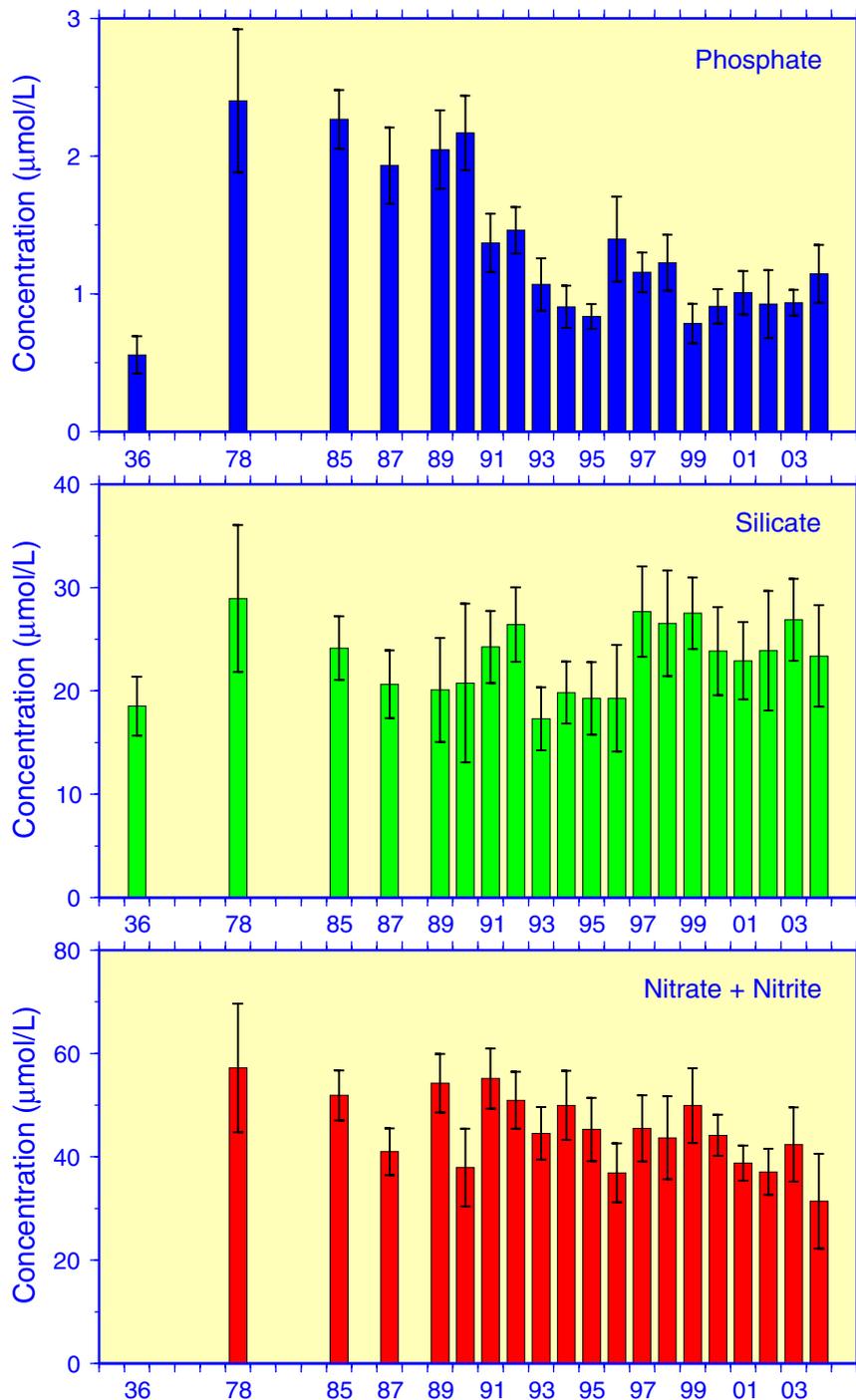


Abb. 4-5: Zeitserien der geschätzten winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (Salzgehalt 30) mit 95%-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Referenzwerten von 1936, soweit verfügbar.

Fig. 4-5: Time series of wintry nutrient concentrations estimated for salinity 30, typical of coastal waters in the German Bight. Prediction limits are depicted as 95% bars. Reference concentrations from 1936 shown where available.

verändert. Die im Winter durch Algenwachstum wenig beeinflussten Phosphatgehalte lagen in der zentralen Nordsee weiterhin auf dem Referenzniveau von 1936, in der Deutschen Bucht wenig, im Küstenbereich deutlich darüber. Die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen sind zwar seit einigen Jahren rückläufig, diese Verbindungen leisten jedoch nach wie vor den höchsten Beitrag zur Gesamtnährstoffbelastung. Silikatkonzentrationen sind durch industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten wenig beeinflusst, so dass zwischenjährige Schwankungen natürliche, auch biologische Veränderungen anzeigen. Im Wattenmeer waren Indikatoren für Eutrophierung erkennbar. Eine Differenzierung zwischen anthropogenen Einflüssen und höheren Stoffumständen im Wattenmeer ist jedoch nicht möglich.

### 4.1.3 Sommer 2004

Auch im Sommer 2004 wurde mit FS Gauß (Reise #425: 27. 7. – 25. 8. 2004) eine flächendeckende Gesamtaufnahme der Nordsee durchgeführt und ein umfangreicher Datensatz gewonnen. Dieser enthält u. a. Messwerte zu den anorganischen Nährsalzen, zu gelöstem Sauerstoff und Chlorophyll-a. Nachfolgend werden zunächst geographische Verteilungen dieser Variablen präsentiert und diskutiert. Im Anschluss wird die Fragestellung ›Nährstofflimitierung‹ näher beleuchtet.

#### 4.1.3.1 Nährstoffe

Landseitige Einflüsse waren im Oberflächenwasser nahezu der gesamten östlichen Nordsee durch Salzgehalte unter 34 erkennbar (s. *Abb. 3-28, S. 106*). In der südlichen Nordsee, der Deutschen Bucht und vor der dänischen Küste setzten sich diese Einflüsse aufgrund der geringen Wassertiefe bis ins Bodenwasser durch (s. *Abb. 3-29, S. 107*). Infolge des Temperaturkontrastes zwischen Oberflächen- ( $> 16\text{ °C}$ ) und Bodenwasser (um  $9\text{ °C}$ , s. *Abb. 3-19, S. 94*) war die Deckschicht in den tieferen Gebieten der Nordsee sehr stabil (s. *Abb. 3-24, S. 99*). Die dadurch ermöglichte lange Aufenthaltszeit des Phytoplanktons im Oberflächenwasser führte dazu, dass hier unter optimalen Lichtbedingungen alle Nährstoffe bis in 20 m Tiefe fast vollständig verbraucht worden waren. Die Netto-Phytoplanktonproduktion war hier also weitestgehend abgeschlossen.

Phosphat war im Oberflächenwasser der zentralen und nördlichen Nordsee bis unter  $0.05\text{ }\mu\text{mol/L}$  abgebaut worden, erreichte aber in der flachen südlichen Nordsee bereits wieder Gehalte über  $0.1\text{ }\mu\text{mol/L}$ , denn remineralisiertes Phosphat aus dem Bodenwasser wurde hier durch vertikale Vermischung nachgeliefert (*Abb. 4-6*).

Da die Nitratkonzentrationen auch im Bodenwasser unter  $1\text{ }\mu\text{mol/L}$  gesunken waren, aber auch weil das wesentliche Remineralisierungsprodukt von Stickstoffverbindungen Ammonium ist, war eine entsprechende Anreicherung von Nitrat im Oberflächenwasser der südlichen Nordsee nicht möglich. In der tieferen, zentralen Nordsee hingegen verhinderte die stabile Schichtung die Zufuhr von Nitrat aus dem Bodenwasser, das Konzentrationen  $> 7\text{ }\mu\text{mol/L}$  aufwies (*Abb. 4-7*). Der Nitratgehalt war in weiten Teilen der Nordsee innerhalb der Deckschicht unter  $0.2\text{ }\mu\text{mol/L}$  gesunken und lag nur in der Deutschen Bucht im Bereich der Flussfahnen über  $1\text{ }\mu\text{mol/L}$ .

Die Silikatkonzentrationen in der zentralen Nordsee waren in der Deckschicht unter  $0.5\text{ }\mu\text{mol/L}$  abgebaut worden, während die Gehalte des Bodenwassers bereits über denen des vorausgegangenen Winters lagen (*Abb. 4-8, S. 129*). Der relativ langwierige Abbau- und Freisetzungsprozess von Silikat aus sedimentierten Kieselalgen der Früh-

#### 4 Meereschemie

jahrsplanktonblüte war demnach schon weit fortgeschritten. Im Verlauf des Herbstes fallen die Bodenwassergehalte durch Verdünnung mit dem nährstoffarmen Deckschichtwasser wieder auf Winterniveau zurück. Ähnliches trifft für die Phosphat- und

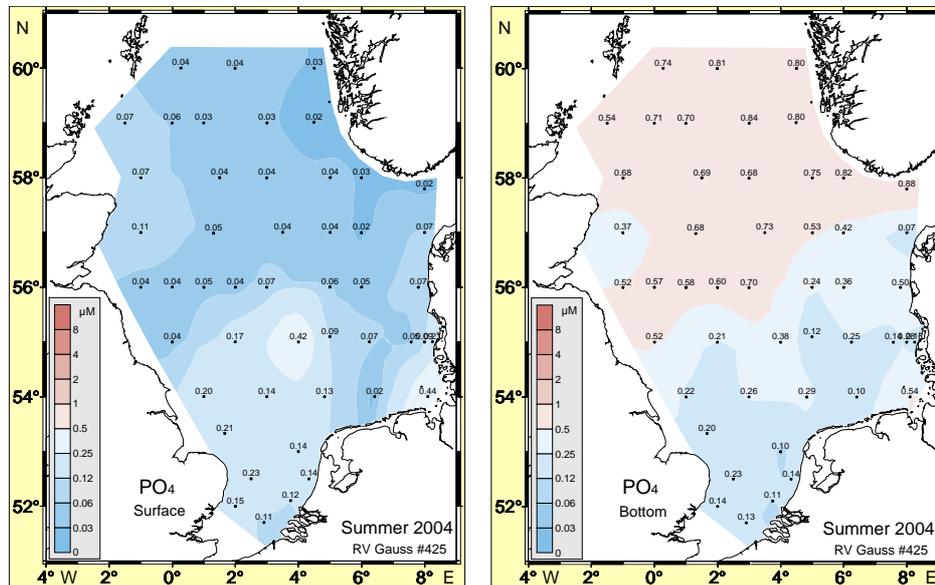


Abb. 4-6: Phosphatkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten.

Fig. 4-6: Phosphate concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note  $\log_2$  color scale).

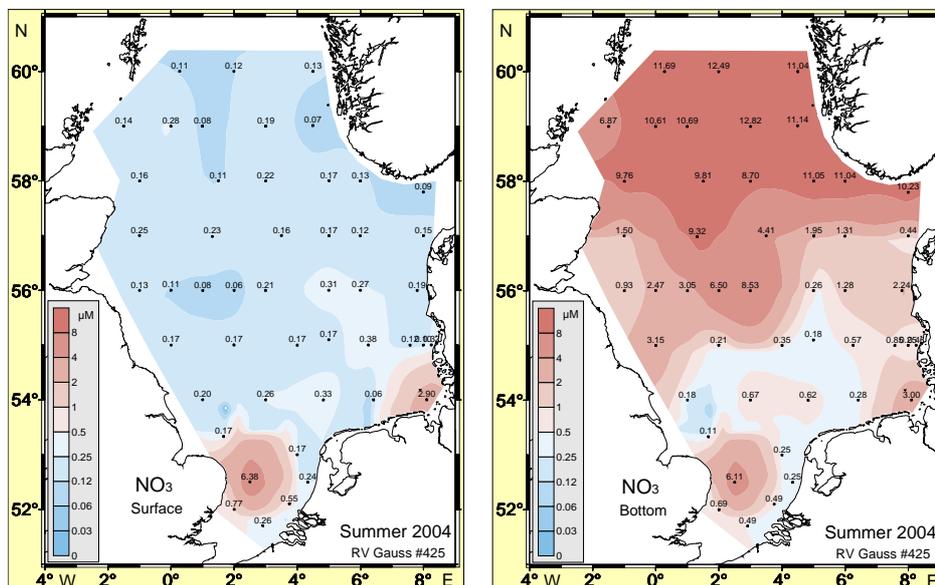


Abb. 4-7: Nitratkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten.

Fig. 4-7: Nitrate concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note  $\log_2$  color scale).

Nitratgehalte zu. Allerdings kann es bei der Nitratrückbildung regional zu Verzögerungen kommen, weil beispielsweise die Nitrifizierung im Bodenwasser bei Sauerstoffmangel verlangsamt abläuft.

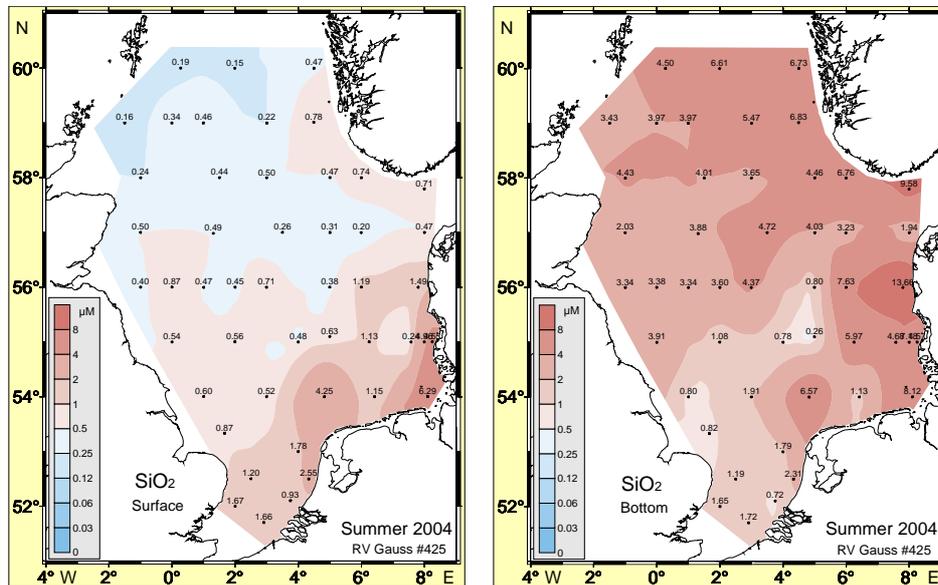


Abb. 4-8: Silikatkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten

Fig. 4-8: Silicate concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note  $\log_2$  color scale).

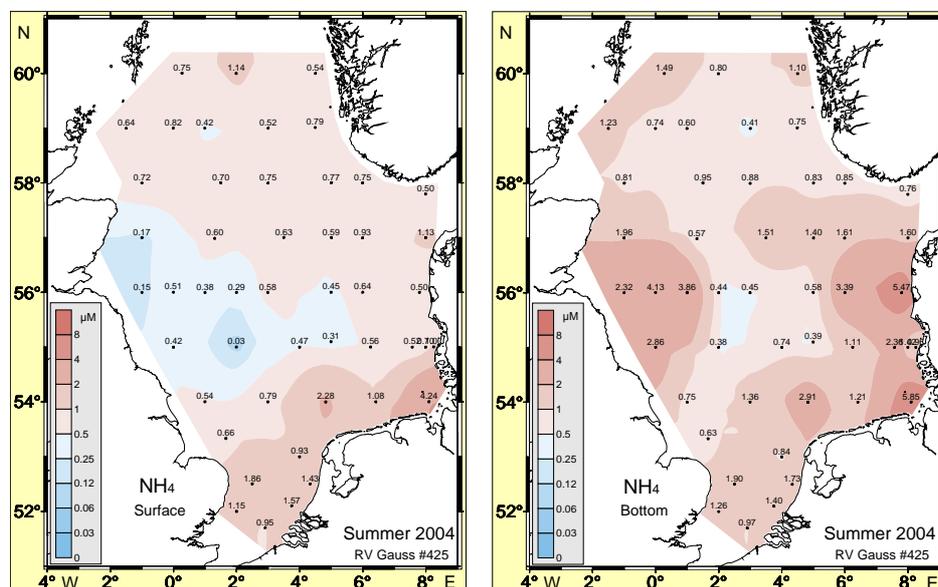


Abb. 4-9: Ammoniumkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten.

Fig. 4-9: Ammonium concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note  $\log_2$  color scale).

Ammonium erreichte nur im Oberflächenwasser der südlichen Nordsee Konzentrationen  $> 1 \mu\text{mol/L}$  (Abb. 4-9), denn es wird vom Phytoplankton als Stickstoffquelle bevorzugt und schnell wieder aufgenommen. Die im Bodenwasser ablaufende Remineralisierung sedimentierter Biomasse bildete sich in Konzentrationen  $> 2 \mu\text{mol/L}$  ab. Allerdings wird Ammonium hier durch nitrifizierende Bakterien über Nitrit zu Nitrat oxidiert. Die Oxidation der organischen Kohlenstoffverbindungen in der sedimentierten Biomasse ist ebenfalls mit Sauerstoffverbrauch verbunden, so dass in geschichteten Gebieten eine Sauerstoffuntersättigung des Tiefenwassers eintreten kann.

Nitrit lag im Oberflächenwasser nur in geringen Konzentrationen von meist unter  $0.05 \mu\text{mol/L}$  vor und stellte damit unter den anorganischen Stickstoffverbindungen wie gewöhnlich die anteilig kleinste Komponente dar (Abb. 4-10). Wo hohe Ammoniumgehalte auftreten, sind häufig auch die Nitritgehalte erhöht, denn Nitrit ist ein Zwischenprodukt der Nitrifizierung. Dies gilt insbesondere im Bodenwasser, wie ein Vergleich mit dem Verteilungsmuster der Ammoniumgehalte belegt (Abb. 4-9). Abweichungen resultieren u. a. aus dem Umstand, dass hier auch die Einflüsse der Denitrifizierung besonders stark sind (LAW UND OWENS 1990).

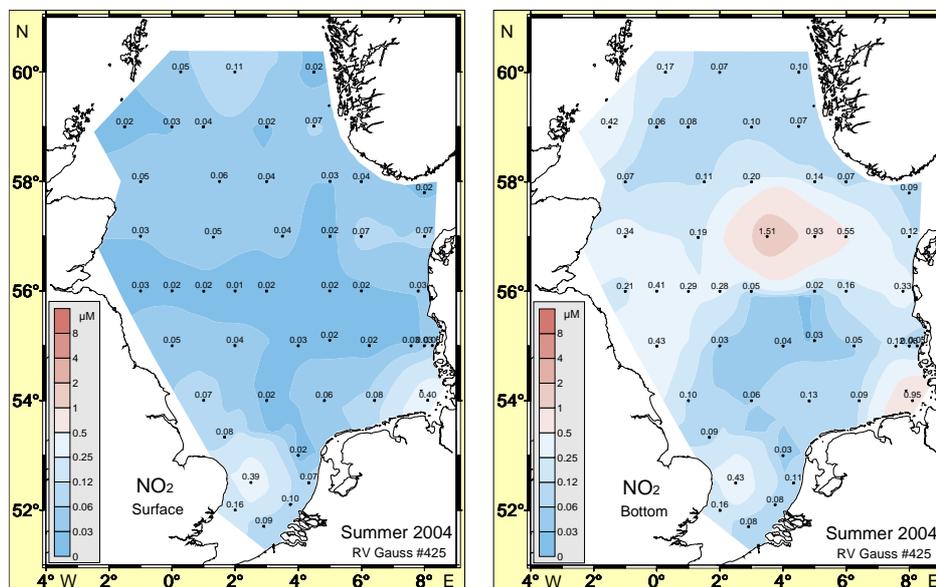


Abb. 4-10: Nitritkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten.

Fig. 4-10: Nitrite concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note  $\log_2$  color scale).

#### 4.1.3.2 Chlorophyll-a

Die stabile thermohaline Schichtung der zentralen Nordsee (Abb. 3-24, S. 99, Abb. 3-29, S. 107) hatte zu einer Nährsalzerschöpfung des Oberflächenwassers geführt (Abb. 4-6, S. 128, Abb. 4-7, S. 128). Als Folge der Nährstofflimitierung waren hier die Chlorophyllkonzentrationen unter  $0.1 \mu\text{g/L}$  gesunken (Abb. 4-11). Lediglich in flachen Gebieten und Küstengewässern, wo Nährstoffe aus dem Sediment oder aus Flüssen eingetragen werden, wurden noch Biomassebestände in Höhe von  $0.5$  bis  $2 \mu\text{g/L}$  Chlorophyll angetroffen, die sich infolge vertikaler Vermischung von den bodennahen Konzentrationen wenig unterschieden.

In den geschichteten Gebieten war die Nährstoffarmut nicht auf das oberflächennahe Wasser beschränkt, sondern reichte bis etwa 20 m Tiefe, wie der Vertikalschnitt entlang 56 °N exemplarisch illustriert (Abb. 4-15, S. 136). Eine nennenswerte Produktion von Phytoplanktonbiomasse war hier nicht mehr möglich. Die Primärproduktion hatte sich darum in den Grenzbereich zwischen Deck- und Bodenschicht verlagert, in dem u. a. durch Diffusion von Nährstoffen aus der Bodenschicht noch günstige Bedingungen herrschten (Abb. 4-15, S. 136). Da die Sichttiefe in diesen Bereichen etwa 13 m betrug, reichte die euphotische Zone (1 % der Oberflächenlichtstärke) bis in 26 m Tiefe und damit teilweise über die Sprungschicht hinaus. Relativ hohe bodennahe Konzentrationen von  $> 0.5 \mu\text{g/L}$  in zentralen Bereichen der Nordsee (Abb. 4-11) kamen durch die dort bis ca. 30 m Wassertiefe mögliche Primärproduktion und vertikale Vermischung unterhalb der Sprungschicht zustande.

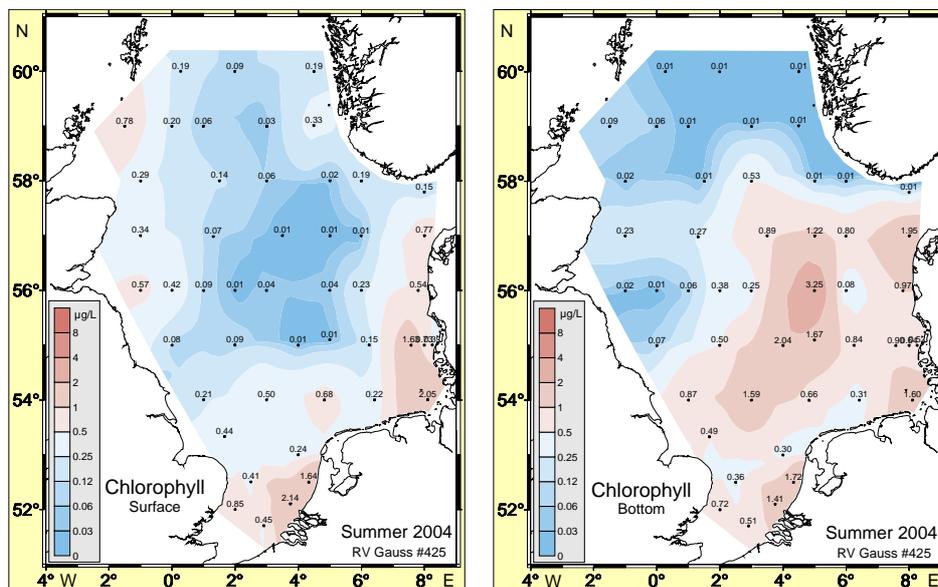


Abb. 4-11: Chlorophyllkonzentration ( $\mu\text{g/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004;  $\log_2$ -Farbskala beachten.

Fig. 4-11: Chlorophyll concentration ( $\mu\text{g/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note  $\log_2$  color scale).

#### 4.1.3.3 Sauerstoff

Die Verteilung der Sauerstoffsättigung war gegenüber derjenigen im Sommer 2003 recht ausgeglichen. Die niedrigsten Konzentrationen traten erneut in der östlichen Nordsee auf (Abb. 4-12). Infolge des Abbaus der ständig aus der Produktion im Küstenwasser sedimentierenden Biomasse lag die Sauerstoffsättigung hier im abgeschlossenen Bodenwasser unter 85 % (7 mg/L), südlich der Fischerbänke unter 70 % (ca. 5.7 mg/L). In geschichteten Gebieten mit geringer Wassertiefe kann es – sofern die Sprungschicht stabil bleibt – wegen des geringen Volumens des Bodenwasserkörpers eher zu einer Untersättigung als in tiefen Gebieten der zentralen Nordsee kommen, da die produktive Deckschicht in beiden Gebieten etwa gleich stark ist.

Eine Sauerstoffsättigung von 75 % (6 mg/L) gilt im Bodenwasser als Grenzwert zwischen guter und mäßiger Sauerstoffversorgung. Bei Gehalten unter 6 mg/L ist eine Beeinträchtigung des Wachstums der Fische möglich, bei Gehalten unter 4 mg/L wird der Stoffwechsel am Boden lebender Fische negativ beeinflusst (DIAZ UND ROSENBERG

1985). Sauerstoffkonzentrationen unter 2 mg/L können eine Abwanderung bzw. ein Massensterben der am Boden lebenden Tiere zur Folge haben. Auch die Dauer des Sauerstoffdefizits und das Ausmaß der Mangelsituation spielen dabei im Benthos eine entscheidende Rolle.

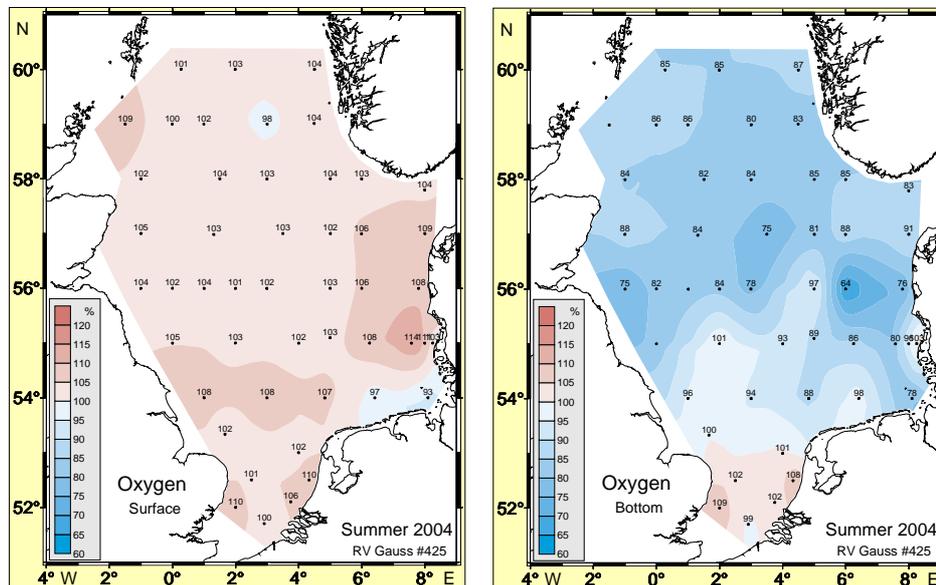


Abb. 4-12: Sauerstoffsättigung (%) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004.

Fig. 4-12: Oxygen saturation (%) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004.

Abbauprozesse im Bodenwasser werden nicht nur durch Sauerstoffuntersättigungen, sondern auch durch erhöhte Ammoniumkonzentrationen angezeigt. Dies betrifft nicht nur Wassermassen im Einflussbereich des kontinentalen Küstenwassers, sondern auch das Küstenwasser an der englischen Ostküste und Bereiche der zentralen Nordsee. Grundsätzlich steigen die Ammoniumkonzentrationen im Bodenwasser der Nordsee im Sommer als Folge des Abbaus sedimentierter Biomasse an (BROCKMANN UND TOPCU 2001).

#### 4.1.3.4 Nährstofflimitierung

Phytoplankton enthält die Elemente Stickstoff (N) und Phosphor (P) in einem mittleren Atomverhältnis von 16:1 (vgl. *Tafel 4-1, S. 119*). Abweichungen im Verhältnis N:P deuten auf mögliche Produktionsbegrenzung durch das jeweils im Minimum befindliche Element hin: auf Nährstofflimitierung. Veränderungen der N:P Verhältnisse im Meerwasser können darüber hinaus zu vermindertem Phytoplanktonwachstum, Verschiebungen in der Phytoplanktonpopulation (Artenzusammensetzung) und eventuell zu einer erhöhten Toxizität bei einigen Algen führen.

Die früher diskutierten Verteilungen der Nährsalz- und Chlorophyllgehalte sowie die Verhältnisse der verschiedenen Nährsalzgehalte zueinander geben Aufschluss über die Nährstofflimitierung der Primärproduktion in der Nordsee.

Aus den geringen Nitratgehalten des Oberflächenwassers von unter  $< 0.2 \mu\text{mol/L}$  (*Abb. 4-7, S. 128* und *Abb. 4-15, S. 136*) lässt sich folgern, dass Nitrat allein für viele Phytoplanktonarten limitierend war, denn die Halbsättigungskonstante – die Hälfte der

Konzentration bei maximaler Nährstoffaufnahme – liegt generell zwischen 0.3 und 3  $\mu\text{mol/L}$  (SOMMER 1994). In der Deckschicht lag das Verhältnis Nitrat zu Phosphat meist mit 1 – 6 (M/M) weit unter der physiologischen Rate von 16, was diese Schlussfolgerung erhärtet. Auch im Bodenwasser der flachen südlichen Nordsee, wo sich im Sommer keine dauerhafte Schichtung ausbildet, lag das Verhältnis Nitrat zu Phosphat unter 4.

In der nordöstlichen Nordsee aber auch außerhalb der ostfriesischen Küste stand DIN – die Summenkonzentration der gelösten anorganischen Stickstoffverbindungen (Nitrat, Nitrit und Ammonium) – zum Phosphatgehalt im Verhältnis  $> 40$ . Die in diesen Gebieten sehr niedrigen Phosphatgehalte von unter 0.05  $\mu\text{mol/L}$  (Abb. 4-6, S. 128) dürften hier ebenfalls eine limitierende Funktion gehabt haben.

Ammonium, das in der Deckschicht vor allem durch Ausscheidungen des Zooplanktons und Zerfallsprozesse freigesetzt wird, war mit Gehalten oberhalb 0.5  $\mu\text{mol/L}$  in weiten Gebieten der Nordsee eher nicht limitierend.

#### *a) Nutzung gelöster organischer Nährstoffe*

Da gelöste organische Stickstoffverbindungen (DON) als Harnstoff und in Form von freien Aminosäuren für mixo- und heterotrophe Arten direkt zur Verfügung stehen oder nach bakteriellen Umsetzungsprozessen wieder zu Nährsalzen abgebaut werden, sollen sie gemeinsam mit gelösten organischen Phosphorverbindungen (DOP) in die Betrachtung einbezogen werden.

Die Analysen ergaben für DON im Oberflächenwasser stets Gehalte  $> 3 \mu\text{mol/L}$ . In weiten Teilen der Nordsee überschritt die Konzentration sogar 8  $\mu\text{mol/L}$  (Abb. 4-13). Damit stellte die DON-Fraktion unter den Stickstoffverbindungen die dominante Komponente dar. Allerdings ist der Anteil der schnell vom Phytoplankton verwertbaren DON sehr gering. Der Pool der DON und die diversen Umsetzungsprozesse sind bislang wenig erforscht. Bekannt ist aber, dass das im Verlauf der Primär- und Folgeproduktion verbrauchte »Frühjahrsreservoir« anorganischer Stickstoffverbindungen überwiegend als DON wieder auftritt (BUTLER ET AL. 1979, BROCKMANN ET AL. 1999A). Durch bakteriellen Abbau und Zerfallsprozesse werden die DON allmählich wieder in anorganische Verbindungen gewandelt und damit dem Phytoplankton als Nährstoffquelle erneut zur Verfügung gestellt.

Auch im Bodenwasser trat DON in hohen Konzentrationen von über 3  $\mu\text{mol/L}$  auf, stellte aber nicht in allen Gebieten die dominante Komponente. Im atlantischen Einstrombereich der nördlichen Nordsee etwa wurden erheblich höhere Nitratgehalte festgestellt (Abb. 4-7, S. 128), die jedoch tiefenbedingt für die Primärproduktion nicht verfügbar waren.

Die Konzentration der gelösten organischen Phosphorverbindungen (DOP) wurde als Differenz aus den Messungen von Gesamtphosphor (TP) und Phosphat (DIP) errechnet<sup>1</sup>. Die DOP- (Abb. 4-13) und Phosphatgehalte (Abb. 4-6, S. 128) hatten im Oberflächenwasser meist gleiche Größenordnung, so dass DOP ein relevantes Nährstoffreservoir darstellte. Maximale DOP- und DON-Gehalte traten in der Deutschen Bucht auf und zeigten damit auch landseitige Einträge als Quelle an.

---

1. Die im Bodenwasser auftretenden negativen DOP-Konzentrationen (Abb. 4-13) sind Artefakte. Sie ergeben sich aus dem Umstand, dass die zur TP-Bestimmung angewendete Nassmethode nicht immer sämtliche Phosphorverbindungen aufschließt.

## b) C:N Verhältnis als Limitierungsindikator

Die Untersuchung der partikulären Verbindungen lieferte weitere Hinweise zur Nährstofflimitierung. Aus Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten von 10 – 50 bzw. 1 – 5  $\mu\text{mol/L}$  des Oberflächenwassers ergaben sich meist C:N Verhältnisse von  $> 9$  (Abb. 4-14), während das physiologische Verhältnis für nicht nährstofflimitiertes Phytoplankton bei 106:16 bzw. 7 liegt (REDFIELD ET AL. 1963).

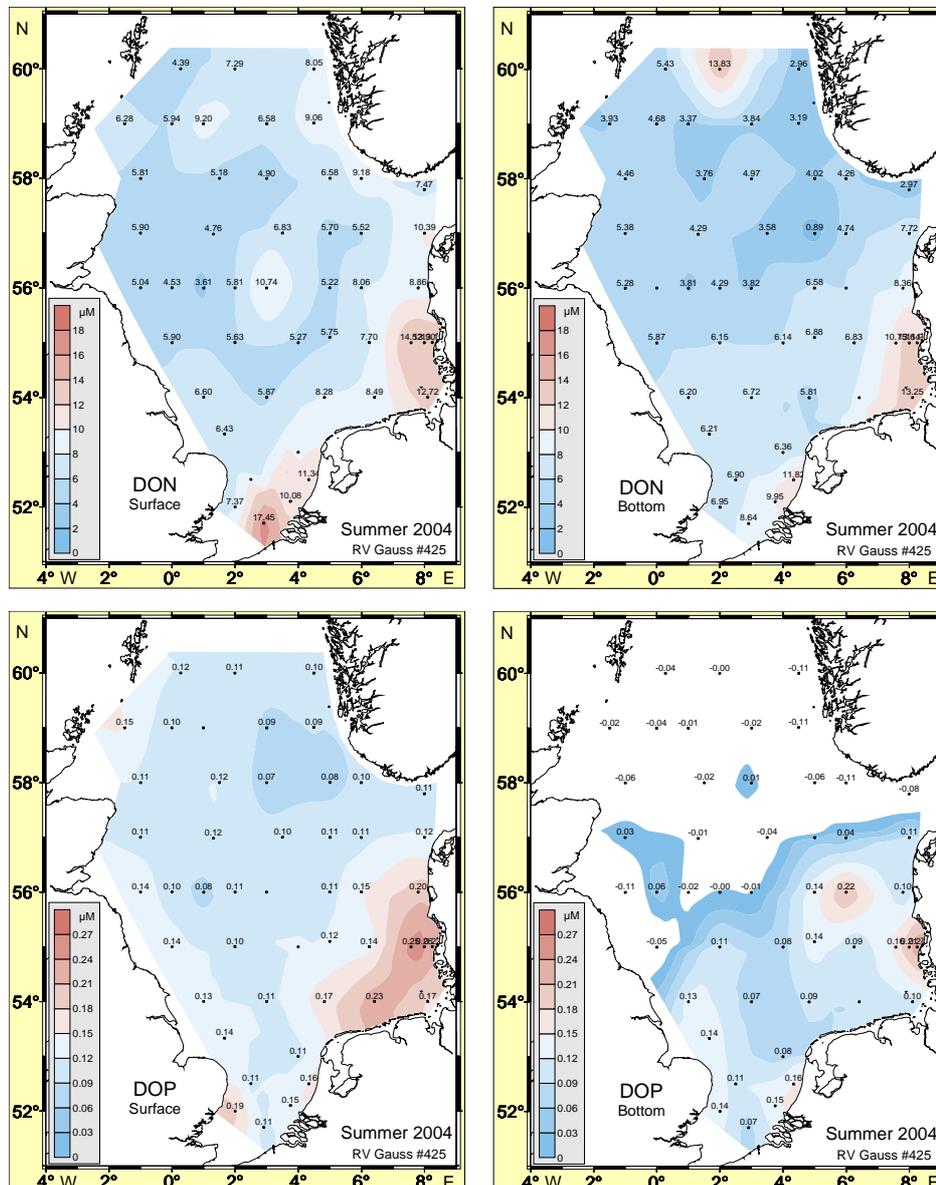


Abb. 4-13: DON- und DOP-Konzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004.

Fig. 4-13: DON and DOP concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004.

Ein hohes C:N Verhältnis entsteht entweder dadurch, dass Phytoplankton aufgrund von Nährstoffmangel bereits verstärkt Speicherstoffe (z. B. Zuckerverbindungen) synthetisiert (BROCKMANN ET AL. 1999B), oder als Folge eines bevorzugten Abbaus stickstoffhaltiger Verbindungen in der sedimentierenden Biomasse. Besonders hohe C:N

Verhältnisse wurden im Bodenwasser der tiefen nördlichen Nordsee beobachtet, wo im Jahresmittel Nettosedimentation stattfindet (PULS 1987) und das sedimentierte Material durch Abbauprozesse besonders intensiv umgesetzt wird. Ein Vergleich der Chlorophyllgehalte im Bodenwasser (Abb. 4-11, S. 131) mit den entsprechenden C:N Verhältnissen (Abb. 4-14) legt den reziproken Zusammenhang zwischen beiden Verteilungen offen, d. h. geringe (hohe) Chlorophyllkonzentrationen gehen mit hohen (niedrigen) C:N Verhältnissen einher.

Vertikalschnitte durch die Wassersäule entlang 56 °N (Abb. 4-15) illustrieren und belegen diesen Zusammenhang weiter. Relativ geringe C:N Verhältnisse treten im Bereich der Thermokline gemeinsam mit hohen Chlorophyllkonzentrationen auf und zeigen frisch synthetisierte Biomasse aufgrund des ausreichenden Nährstoffangebots im Tiefenwasser an. In der flachen südlichen Nordsee gilt der beschriebene Zusammenhang meist nicht, weil sich hier terrestrische Einträge organischen Kohlenstoffs dem Einfluss der lokalen Primärproduktion auf das C:N Verhältnis überlagern.

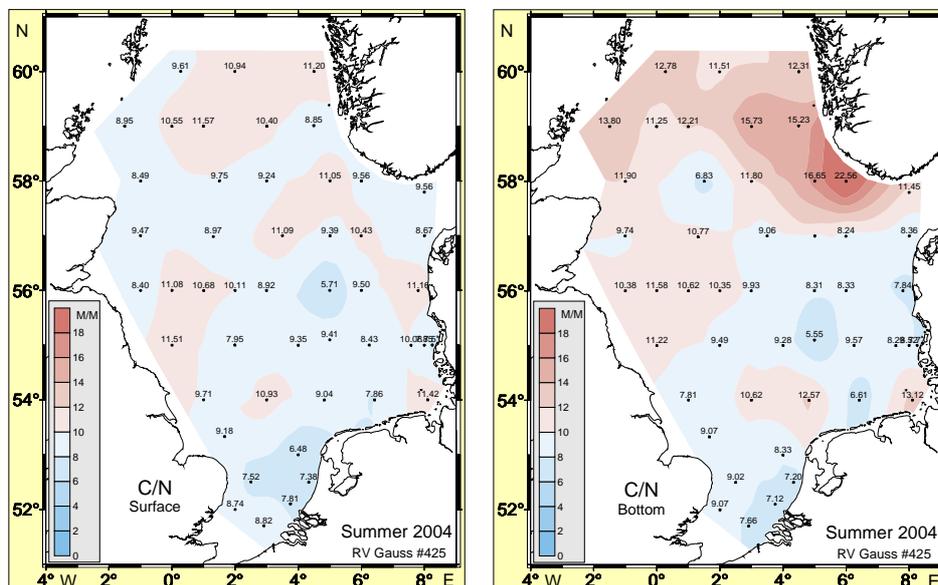


Abb. 4-14: Verhältnis C zu N (M/M) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004.

Fig. 4-14: C:N ratio (M/M) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004.

Die Konzentrationen von partikulärem Kohlenstoff und Stickstoff repräsentieren generell die dominante Biomasse des Phytoplanktons, so dass diese drei Variablen signifikant miteinander korreliert sind. Aus der linearen Regressionsbeziehung zwischen partikulärem Kohlenstoff und Chlorophyll (für den diskutierten Datensatz entspricht 1 µg Chlorophyll etwa 85 µg Kohlenstoff) lassen sich zu den gemessenen Chlorophyllgehalten partikuläre Kohlenstoffgehalte (als Ordinatenwerte der Regressionsgeraden) angeben. Da der gemessene partikuläre Kohlenstoff ( $C_g$ ) kaum überall ausschließlich frische und unter optimalen Sauerstoffbedingungen synthetisierte Phytoplanktonbiomasse repräsentiert, wurden zur Identifizierung biogeochemischer Unterschiede die Abweichungen ( $C_g - C_r$ ) der gemessenen von den regressiv bestimmten Kohlenstoffgehalten berechnet.

Regionen, in denen partikulärer Kohlenstoff seinen unmittelbaren Ursprung in der Phytoplanktonbiosynthese hat, treten in Abb. 4-15 als negative Differenzen ( $\Delta$ Diff Part C) in

Erscheinung. Der Vergleich mit dem Muster der vertikalen Chlorophyllgehalte entlang 56° N (Abb. 4-15) untermauert diese Aussage. Ferner ist aus Abb. 3-24, S. 99 ersichtlich,

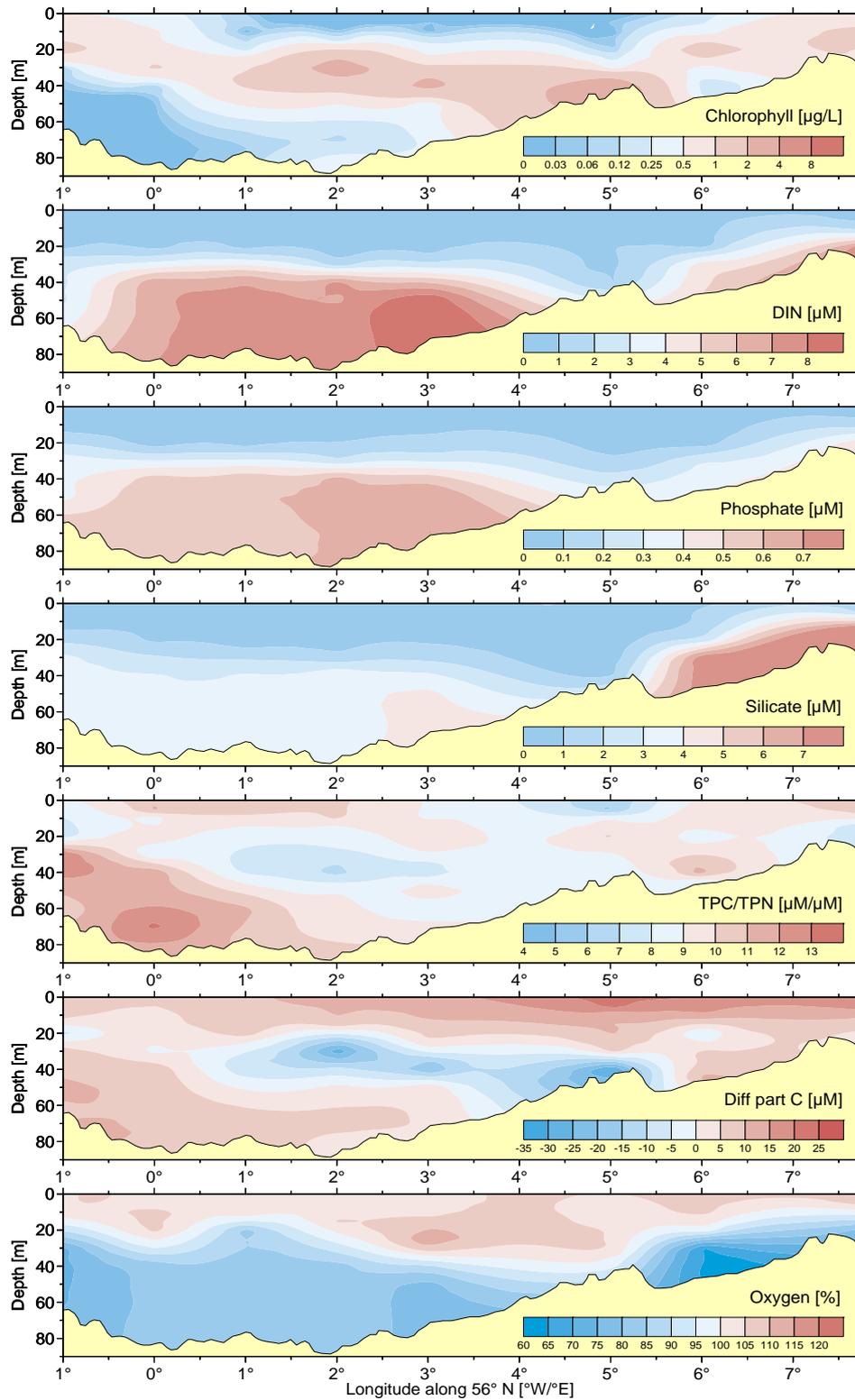


Abb. 4-15: Vertikalverteilungen entlang 56° N im Sommer 2004 (FS Gauß, Reise #425) für Chlorophyll, produktionsrelevante Nährstoffe und Sauerstoff.

Fig. 4-15: Vertical profiles along 56° N in summer 2004 (RV Gauß, cruise #425) of chlorophyll, various nutrients, and oxygen.

dass dieser Bereich in der Umgebung der Thermokline lag, wo bei ausreichend hohen Nährstoffkonzentrationen und unter hinreichenden Lichtverhältnissen der Aufbau frischer Biomasse noch möglich war.

Hohe, positive Differenzen charakterisieren dagegen Biomasse, die nicht unmittelbar aus einer ausgewogenen Biosynthese des Phytoplanktons stammt. Dies war insbesondere in der östlichen Deutschen Bucht der Fall, wo mit den Flussfrachten auch partikuläre organische Substanz eingetragen wird, die sich im Umfeld des Elbe- und Weserästuars ausbreitet; die Quellstärke der Elbe wurde auf ca. 100 t C/Tag geschätzt (BROCKMANN ET AL. 2003). Im Ostteil des Profils entlang 56° N traten solche »Kohlenstoffüberschüsse« im Deckschichtwasser ebenfalls auf (Abb. 4-15). Daraus kann auf eine überproportionale Produktion des Phytoplanktons von Kohlenstoffverbindungen (meistens Kohlenhydraten) geschlossen werden, die bei Nährstofflimitierung einsetzt (BROCKMANN ET AL. 1999B). Die durch permanente – auch geringe Nährstoffeinträge – angeregte, hohe Biomasseproduktion im Übergangsbereich zwischen Flussfahnen und thermohalin geschichteten Wassermassen wird durch diesen Prozess um 30 – 50 % verstärkt.

#### 4.1.4 Nährstoffdynamik bei Helgoland

Die Konzentrationen der Nährstoffe Silikat, Phosphat, Ammonium, Nitrat und Nitrit werden bei Helgoland Reede an jedem Werktag nasschemisch bestimmt, so dass inzwischen lange, hochaufgelöste Zeitserien vorliegen. In diesem Abschnitt wird die saisonale Entwicklung der Konzentrationen für die genannten Stoffe im Jahr 2004 dokumentiert und mit mittleren Jahresgängen für die Zeiträume 1990 – 1999 sowie 2000 – 2003 verglichen (Abb. 4-16).

Eine Reduktion der mittleren Phosphatkonzentrationen im Zeitraum 2000 – 2003 gegenüber denjenigen der 1990er Jahre ist insbesondere ab Mai erkennbar (Abb. 4-16). Im Gegensatz dazu lagen die Monatskonzentrationen im Jahr 2004 fast ausnahmslos oberhalb des Niveaus der 1990er Jahre. Die jahreszeitliche Entwicklung der Phosphatkonzentration entsprach jedoch insgesamt dem typischen Verlauf. Mit Beginn der ersten Phytoplanktonblüte fiel der Phosphatgehalt bis in den Mai hinein schnell ab, kehrte jedoch bereits im Juni auf ein für die Sommermonate vergleichsweise hohes Niveau zurück. Durch Remineralisierungsprozesse wurde das in der sedimentierten, abgestorbenen Biomasse gebundene Phosphat ab September wieder in die Wassersäule freigesetzt. Während der Phosphatgehalt hier gewöhnlich bereits im Oktober sein Herbst/Winterplateau erreicht, setzte sich der Anstieg im Herbst 2004 bis zum Jahresende fort. Im Dezember lag die Phosphatkonzentration mit knapp 1.6 µmol/L etwa doppelt so hoch wie im langjährigen Mittel.

Für die Summenkonzentration von Nitrat und Nitrit ist ein deutlicher Rückgang gegenüber entsprechenden Konzentrationen der 1990er Jahre eingetreten. Diese durch Mittelwerte des Zeitraums 2000 – 2003 belegte Entwicklung setzte sich auch im Jahr 2004 fort (Abb. 4-16). Saisonale Extremwerte wurden mit ca. 28 µmol/L und 1 µmol/L im März und August erreicht. Die jahreszeitliche Entwicklung wies keine Besonderheiten auf.

Auch die mittleren Ammoniumkonzentrationen der 1990er Jahre lagen in allen Jahreszeiten deutlich über denen des Zeitraums 2000 – 2003 (Abb. 4-16). Der ungewöhnlich hohen Konzentration von 3.4 µmol/L im Februar 2004 ging ein steiler Anstieg um 2.9 µmol/L voraus, der im November des Vorjahres einsetzte. Von März bis Oktober

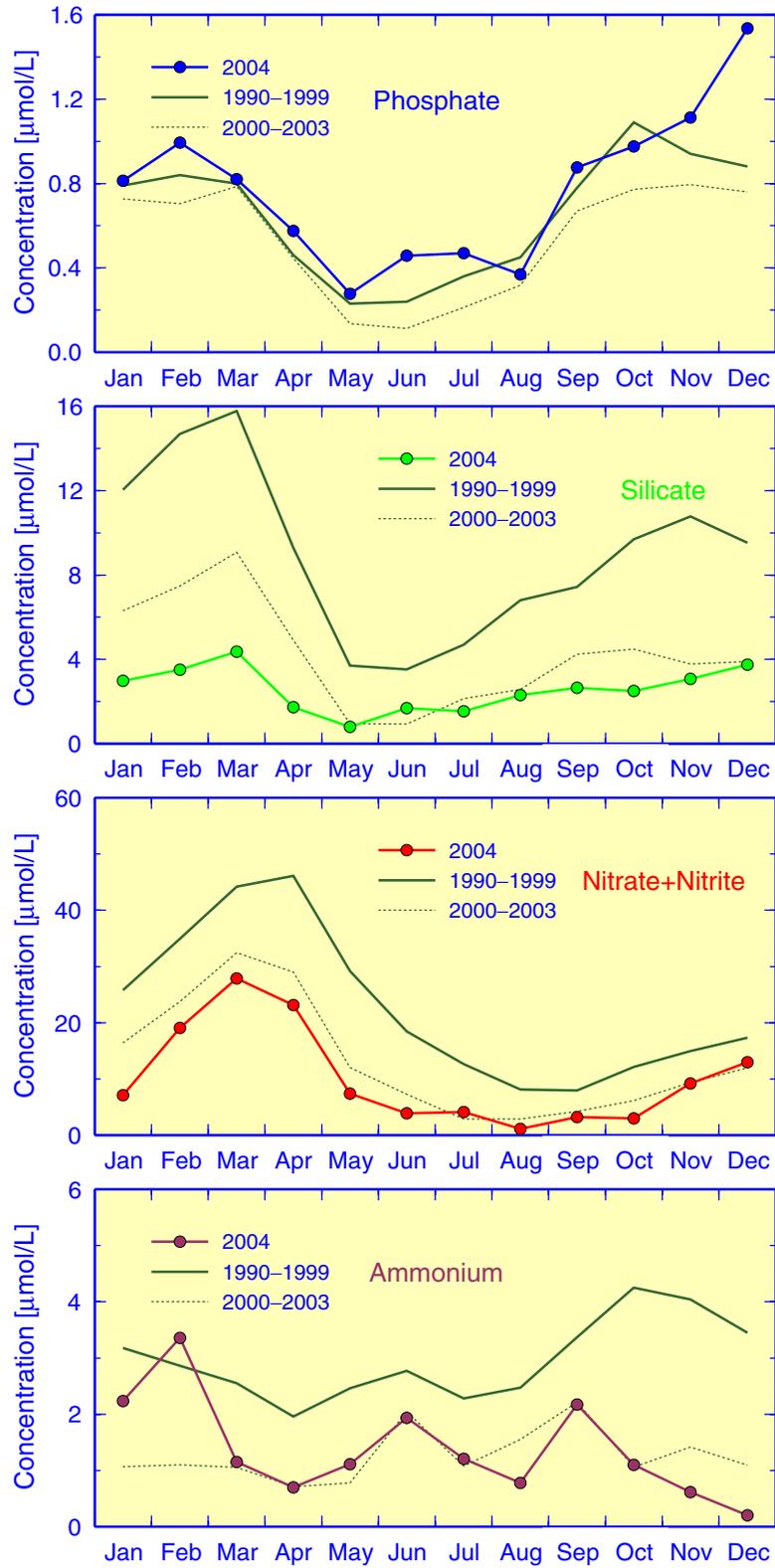


Abb. 4-16: Jahresgänge der Nährstoffkonzentrationen ( $\mu\text{mol/L}$ ) bei Helgoland Reede mit Klimatologie.

Fig. 4-16: Annual cycles of nutrient concentrations ( $\mu\text{mol/L}$ ) at Helgoland Roads versus climatology.

2004 entsprach die Entwicklung des Ammoniumgehalts dem mittleren Verlauf der letzten Jahre, der sich durch Gipfelkonzentrationen um  $2 \mu\text{mol/L}$  im Juni und September auszeichnete.

Die monatlichen Silikatgehalte rangierten im Jahr 2004 zwischen saisonalen Extremwerten von  $4.4 \mu\text{mol/L}$  im März und  $0.8 \mu\text{mol/L}$  im Mai (Abb. 4-16), als der Großteil des Silikats von Kieselalgen (Diatomeen) aufgenommen war. Das in der Kieselschale der Diatomeen gebundene Silikat wurde anschließend durch Remineralisierungsprozesse langsam wieder in die Wassersäule freigesetzt. Das saisonale Maximum im März fiel deutlich flacher aus als in beiden mittleren Jahresgängen. Dies trifft für die Mehrzahl der monatlichen Gehalte gleichermaßen zu. Die Form des Jahresgangs entsprach dabei durchaus dem typischen jahreszeitlichen Verlauf, der sich insbesondere durch einen zögerlichen Anstieg der Gehalte von Juni bis November auszeichnet.

Insgesamt entsprachen die monatlichen Konzentrationen der meisten Nährstoffe bei Helgoland Reede im Jahr 2004 den Mittelwerten der Periode 2000 – 2003 oder unterschritten diese sogar. Lediglich die Phosphatgehalte lagen fast ganzjährig nicht nur über diesen Vergleichswerten, sondern auch leicht über den Mittelwerten der 1990er Jahre.

#### 4.1.5 Zusammenfassung

Die räumlichen Verteilungsmuster des Phosphat- und Silikatgehalts sowie der Summenkonzentration von Nitrat und Nitrit im Meerwasser der Deutschen Bucht entsprachen im Winter denen der Salzgehaltsverteilung in hohem Maße, da in dieser Jahreszeit geringer biologischer Aktivität hydrodynamische Vermischung der dominante Prozess ist.

Die regressiv aus Salzgehalts- und Nährstoffanalysen abgeleiteten, für Küstenwasser (Salzgehalt 30) und Meerwasser der eigentlichen Deutschen Bucht ( $S = 33$ ) repräsentativen Nährstoffgehalte unterschieden sich im Winter 2004 wenig von denen des Vorjahreswinters. Die Phosphatgehalte lagen in der Deutschen Bucht wenig, im Küstenwasser deutlich über den Vergleichswerten von 1936. Hohe Konzentrationen der Stickstoffverbindungen zeigten eine nach wie vor erhebliche Nährstoffbelastung an. Die durch industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten wenig beeinflussten Silikatkonzentrationen lagen im Bereich natürlicher Schwankungen.

Das stabil geschichtete Nordseewasser zeichnete sich im Sommer 2004 durch eine nährstoffarme Deckschicht aus, in der die Nährsalze, besonders Nitrat, das Algenwachstum limitierten. Chlorophyllmaxima befanden sich daher meistens im Bereich der Thermokline, da hier noch ausreichend Licht und Nährstoffe aus dem Bodenwasser für das Algenwachstum zur Verfügung standen.

Die Verteilung der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser war gegenüber derjenigen im Sommer 2003 recht ausgeglichen. Die stärksten Untersättigungen traten in der östlichen Nordsee auf, lagen bei 85 % und nur örtlich jenseits des Grenzwerts zwischen guter und mäßiger Sauerstoffversorgung (75 %).

Durch die Nährsalzlimitierung wird die Produktion von Biomasse kontrolliert, die besonders im Küstenwasser durch Nährstoffeinträge hoch blieb. Beispielsweise überschritten in den Abflussfahnen der Flüsse in der Deutschen Bucht die Nitratkonzentrationen  $1 \mu\text{mol/L}$ . Die Limitierung spiegelte sich auch in der Zusammensetzung der partikulären Stoffe (C:N Verhältnisse) wider. Der sommerliche Nährsalzverbrauch wird

#### 4 Meereschemie

zum großen Teil durch die Produktion gelöster organischer Stickstoff- und Phosphorverbindungen kompensiert, welche dann die in der Wassersäule vorhandenen Verbindungen dominieren.

Insgesamt entsprachen die monatlichen Konzentrationen der meisten Nährstoffe bei Helgoland Reede im Jahr 2004 den Mittelwerten der Periode 2000 – 2003 oder unterschritten diese sogar. Lediglich die Phosphatgehalte lagen fast ganzjährig nicht nur über diesen Vergleichswerten, sondern auch insgesamt leicht über den Mittelwerten der 1990er Jahre.

## 4.2 Organische Stoffe

### 4.2.1 Einführung

Von den heute bekannten über 18 Mio. chemischen Substanzen sind die meisten 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, EPA, OSPAR, HELCOM).

Die in diesem Bericht betrachteten Substanzen stammen größtenteils 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 Verbindungen sehr unterschiedlicher chemischer Struktur, die sich in der Umwelt entsprechend verschieden verhalten können.

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 erzeugen (z. B. DDE, Dieldrin, TBT). 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, die oft bereits bei extrem geringen Konzentrationen auftreten.

Anthropogene organische Schadstoffe sind im Meer ungleichmäßig verteilt und kommen in sehr unterschiedlichen Konzentrationen vor. Ihre Verteilung in der marinen Umwelt ist von vielfältigen Faktoren abhängig. Neben den Eintragsquellen (Schifffahrt, Industrie, Haushalt, Landwirtschaft), Eintragsmengen und Eintragspfaden (direkt über Flüsse, diffus über Atmosphäre) sind die charakteristischen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Schadstoffe und der dynamisch-thermodynamische Zustand des Meeres für Ausbreitungs-, Vermischungs- und Verteilungsprozesse relevant. Die relative Einflussstärke all dieser Variablen kann dabei von Stoff zu Stoff sehr verschieden sein und hat zur Folge, dass sich nur wenige Schadstoffe konservativ verhalten; d. h. ein einfacher Zusammenhang zwischen der Konzentration anthropogener Stoffe und 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 eines Stationsnetzes, welches im Jahr 2004 erweitert und vereinheitlicht wurde (Abb. 4-17). 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 recht rasch erkannt werden. Das BSH führt ferner bei schweren Unfällen (Sandoz-Unfall, Apron Plus) oder ungewöhnlichen natürlichen Ereignissen (Jahrhunderthochwasser der Elbe im August 2002) Sonderuntersuchungen durch, um die Öffentlichkeit zu aktuellen Fragestellungen zu informieren. Derartige Untersuchungen standen im Jahr 2004 jedoch nicht an.

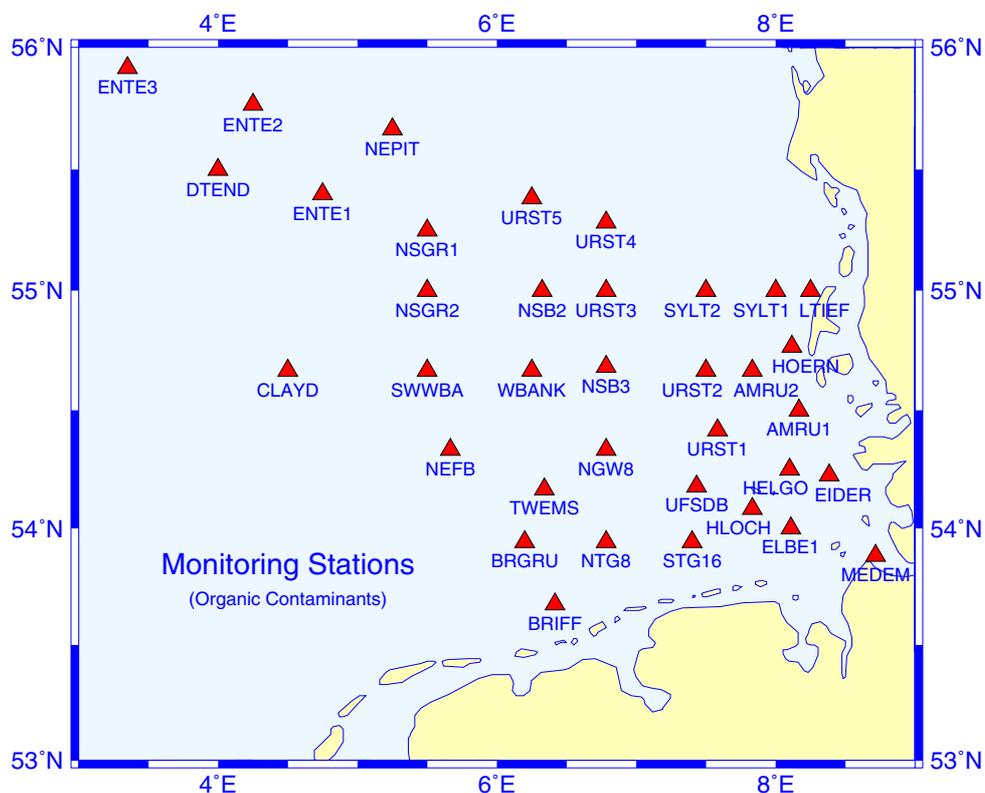


Abb. 4-17: Stationsnetz zur Schadstoffüberwachung im Meerwasser der Deutschen Bucht.

Fig. 4-17: Observational network for contaminant monitoring in the German Bight.

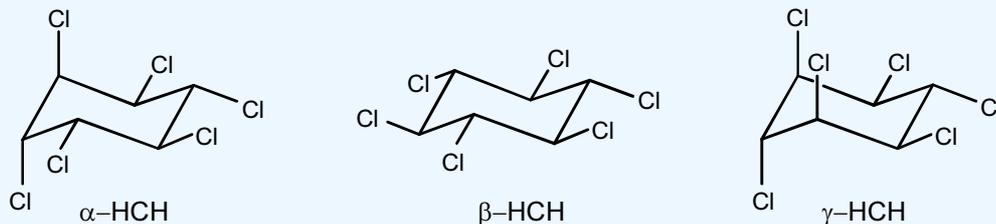
#### 4.2.2 Hexachlorcyclohexan-Isomere ( $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -HCH)

Die HCH-Isomere wurden über Jahrzehnte in großen Mengen in die Umwelt eingetragen, so dass auch im Meer eine ubiquitäre Grundbelastung beobachtet wird. Aufgrund ihrer relativ polaren Eigenschaften ( $\log K_{OW}$  Werte<sup>1</sup> 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 ge-

bunden. 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 ( $\alpha$ -HCH: ca. 65 – 70 %,  $\beta$ -HCH: ca. 7 – 20 %,  $\gamma$ -HCH: ca. 15 %,  $\delta$ -HCH: ca. 6 – 10 %,  $\epsilon$ -HCH: ca. 1 – 2 %). Als Insektizid wirksam ist lediglich das  $\gamma$ -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  $\gamma$ -Isomer (Lindan) verwendet, während in einigen Entwicklungsländern weiterhin auch technisches HCH hergestellt und eingesetzt wird.



Die unterschiedlichen Hintergrundbelastungen für die einzelnen Isomere in der Nordsee und Deutschen Bucht ermöglichen über die Bestimmung der Isomerenverhältnisse Aussagen zu Quellen und Wassermassen. Für alle drei HCH-Isomere ist die Elbe eine starke Belastungsquelle der Deutschen Bucht.

##### 4.2.2.1 HCH-Gehalte des Meerwassers

Die Konzentrationsverteilungen von  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -HCH (Lindan) in der Deutschen Bucht sind für die Monate Mai und Juli / August des Jahres 2004 in Abb. 4-18 wiedergegeben. Die Verteilungen der drei HCH-Isomere unterscheiden sich sowohl in den Küstengewässern, als auch weiter seewärts hinsichtlich Muster und absoluter Gehalte. Allen Isomeren gemeinsam waren jedoch die gegenüber den Verhältnissen im Juli / August vielerorts deutlich höheren Konzentrationen im Mai.

Bei fast ganzjährig unterdurchschnittlichen Abflussraten (vgl. Abb. 3-34, S. 112) wurden im Elbewasser etwa 10fach höhere Konzentrationen als in den Vorjahren für  $\alpha$ -HCH (4.3 bis 22.4 ng/L) und  $\beta$ -HCH (4.1 bis 11.9 ng/L) festgestellt, während  $\gamma$ -HCH in normalen Konzentrationen von 1.1 bis 2.6 ng/L angetroffen wurde. Die Grundbelastung für  $\beta$ -HCH im Meerwasser ist sehr gering und liegt meist unter der Bestimmungsgrenze von 30 pg/L. Da  $\beta$ -HCH im Elbewasser jedoch in relativ hoher Konzentration vorkam (11.9 ng/L), wird die Elbfahne entlang der nordfriesischen Küste sehr gut durch die  $\beta$ -HCH-Konzentrationen abgebildet (Abb. 4-18).

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.

$\alpha$ -HCH liegt gegenüber  $\beta$ -HCH im Meerwasser in höheren Konzentrationen vor (Median: 0.075 ng/L). Außerhalb der Elbfahne variierten die Konzentrationen zwischen 0.05 und 0.08 ng/L. In der Elbfahne selbst wurden im Mai 2004 Konzentrationen bis 0.28 ng/L gemessen, die im August auf 0.13 ng/L zurückgingen.

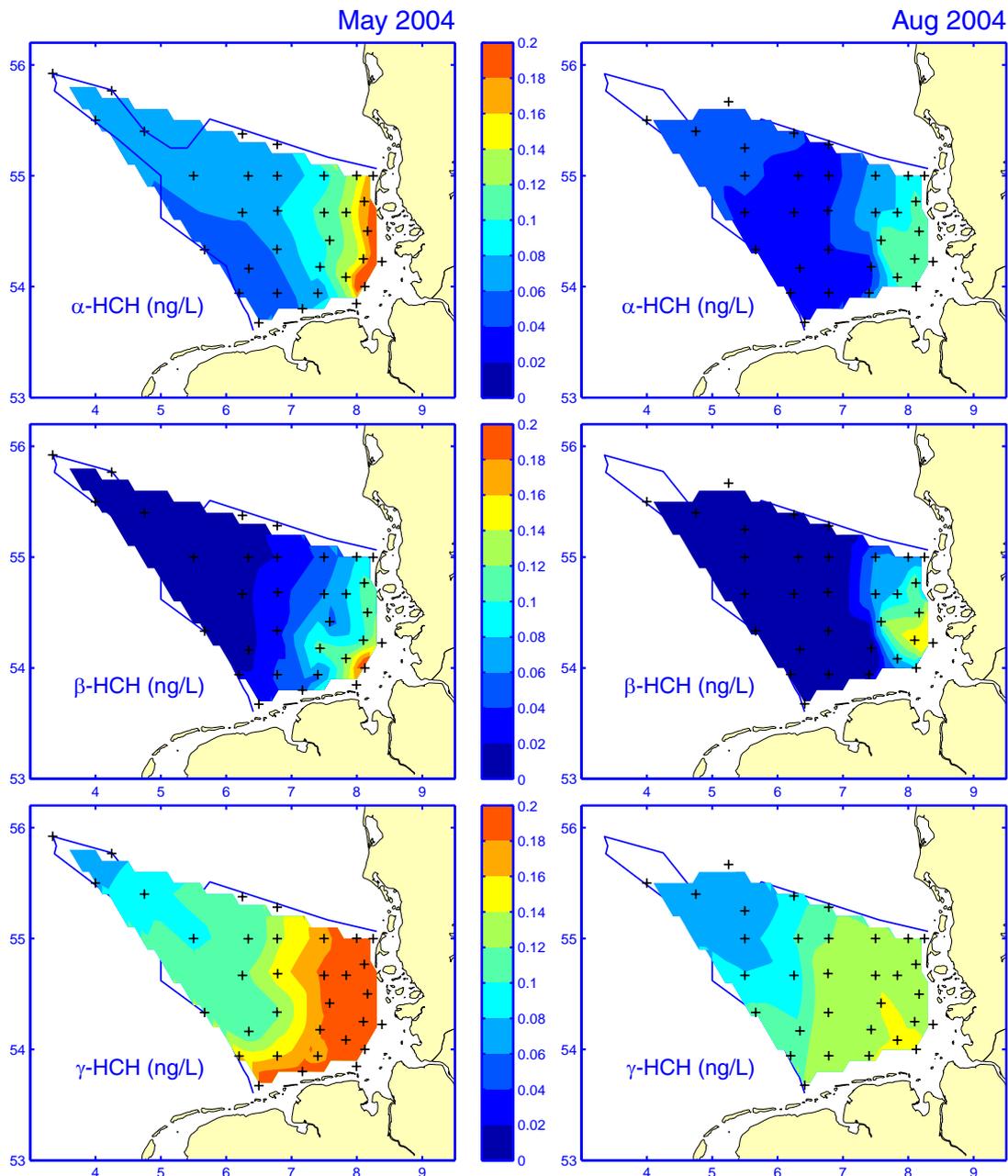


Abb. 4-18: Geographische Konzentrationsverteilungen (ng/L) von  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai und August 2004.

Fig. 4-18: Geographical distributions of  $\alpha$ -,  $\beta$ -, and  $\gamma$ -HCH concentrations (ng/L) for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May and August 2004.

Unter den drei Isomeren trat das  $\gamma$ -HCH in der Deutschen Bucht mit höchsten Konzentrationen auf (Median: 0.14 ng/L). Weitere Besonderheiten stellen die hohen Gehalte vor der Küste Ostfrieslands und das damit verbundene starke Konzentrationsgefälle

nach Norden hin dar (Abb. 4-18), welche dem Einfluss der Elbe weitgehend entzogen sind.

Die Interpretation der Konzentrationsverteilungen vereinfacht sich bei großräumiger Betrachtung, wie sie z. B. die Gesamtaufnahme der Nordsee im Juli / August 2003 ermöglichte (LOEWE ET AL. 2005). Die Konzentrationen des  $\alpha$ -HCH nehmen von Süden nach Norden zu, während diejenigen des  $\gamma$ -HCH in dieser Richtung abnehmen. Dieses Verhalten erklärt sich aus der Tatsache, dass  $\alpha$ -HCH (und auch  $\beta$ -HCH) hauptsächlich aus älteren Einträgen in der Umwelt vorhanden ist und heute nur durch Altlasten in die Umwelt eingetragen wird (u. a. über die Elbe). Die höheren  $\alpha$ -HCH-Konzentrationen im Norden kommen durch eher diffuse Altlasten, die globale Verteilung (Global Distillation) und atmosphärische Deposition zustande. Auch technische Gemische mit hohen  $\alpha$ -HCH-Gehalten, die in einigen Entwicklungsländern noch verwendet werden, gelangen auf diesem Wege in den Nordatlantik und die Nordsee. Hingegen wird  $\gamma$ -HCH auch in Europa weiterhin angewendet, was die vom europäischen Festland im Süden nach Norden hin abnehmenden Konzentrationen erklärt.

Die geschilderten Eigenschaften der großräumigen HCH-Verteilungen bedingen klar unterscheidbare Isomerenverhältnisse. Für den Einstrom durch die Straße von Dover ist ein  $\alpha/\gamma$ -Verhältnis von 0.1 charakteristisch, während das in die nördliche Nordsee einströmende Nordatlantikwasser ein  $\alpha/\gamma$ -Verhältnis von 1 aufweist. Die Verteilungsstrukturen des Isomerenverhältnisses im Süden bzw. Nordwesten der Deutschen Bucht (Abb. 4-19) sind offensichtlich mit diesen beiden Wassermassen assoziiert. Die hohen  $\alpha/\gamma$ -Verhältnisse vor der nordfriesischen Küste bilden das Elbewasser als dritten Wasserkörper ab.

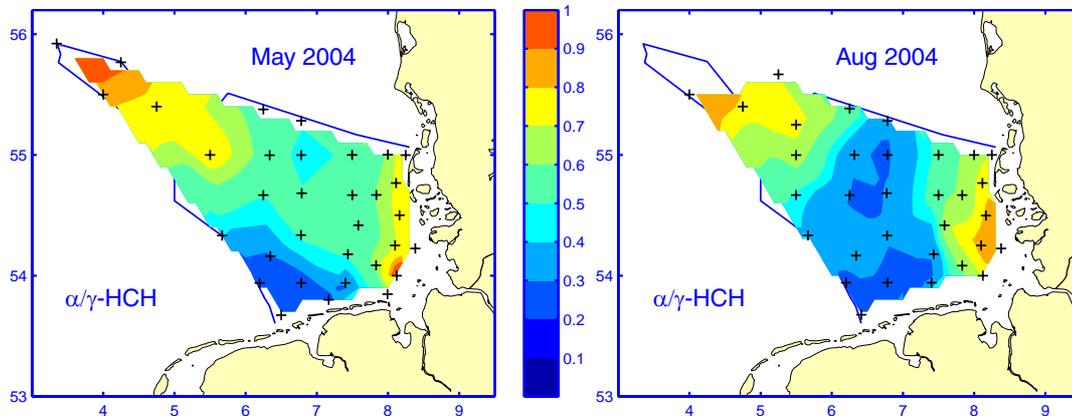


Abb. 4-19: Geographische Verteilungen des Konzentrationsverhältnisses  $\alpha$ -HCH zu  $\gamma$ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai und August 2004

Fig. 4-19: Geographical distributions of the concentration ratio  $\alpha$ -HCH to  $\gamma$ -HCH in near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May and August 2004.

Für Nährstoffe in der Deutschen Bucht ist die lineare Abhängigkeit der Konzentrationen vom Salzgehalt gut erfüllt und wird zur Trendabschätzung genutzt (vgl. Abb. 4-5, S. 126). Die durch Korrelationskoeffizienten um  $-0.96$  belegte Stärke dieses Zusammenhangs bedeutet, dass sich hier die beobachteten Konzentrationen (wie der Salzgehalt selbst auch<sup>1</sup>) in hohem Maße durch lineare Vermischung von Fluss- und Meerwasser einstellen.

Ähnlich starke lineare Abhängigkeiten vom Salzgehalt ( $-0.98 < r < -0.86$ ) ergaben sich für die Konzentrationen der HCH-Isomere in der Deutschen Bucht im Mai 2004. Die gegen die Salzgehalte in Abb. 4-20 aufgetragenen HCH-Konzentrationen zeigen jedoch auch systematische Abweichungen von einem ideal-linearem Zusammenhang (bzw. den Regressionsgeraden), die offenbar aus der Vermischung von wenigstens drei Wassermassen mit unterschiedlicher Grundbelastung resultieren (s. o.). So würden beispielsweise die in Abb. 4-20 positiv markierten Konzentrationen der  $\alpha$ -HCH-Proben aus der südwestlichen Deutschen Bucht (vgl. Abb. 4-19, S. 145) mit der für das Ensemble bestimmten Regressionsbeziehung überschätzt, diejenigen aus der nordwestlichen Deutschen Bucht (negativ und  $s > 34$ ) unterschätzt. Aus der Anordnung der beiden Probengruppen ist weiter ersichtlich, dass sich  $\alpha$ -HCH in diesen Wassermassen ebenfalls linear, aber in geringerem Maße mit zunehmenden Salzgehalt verdünnt, als die »verschmierende« Regressionsbeziehung für das Probenensemble suggeriert.

Andere Faktoren, die eher unsystematische Störungen »perfekt« linearer Vermischungsprozesse bedingen, bestehen in der gegenüber den Konzentrationsschwankungen im Meerwasser starken Veränderlichkeit des Elbe-Input (negativ und  $s < 31$ ), die besonders deutlich in der Streuung der  $\beta$ -HCH-Gehalte hervortritt, und Veränderungen des ozeanographischen Zustands während der Messkampagne.

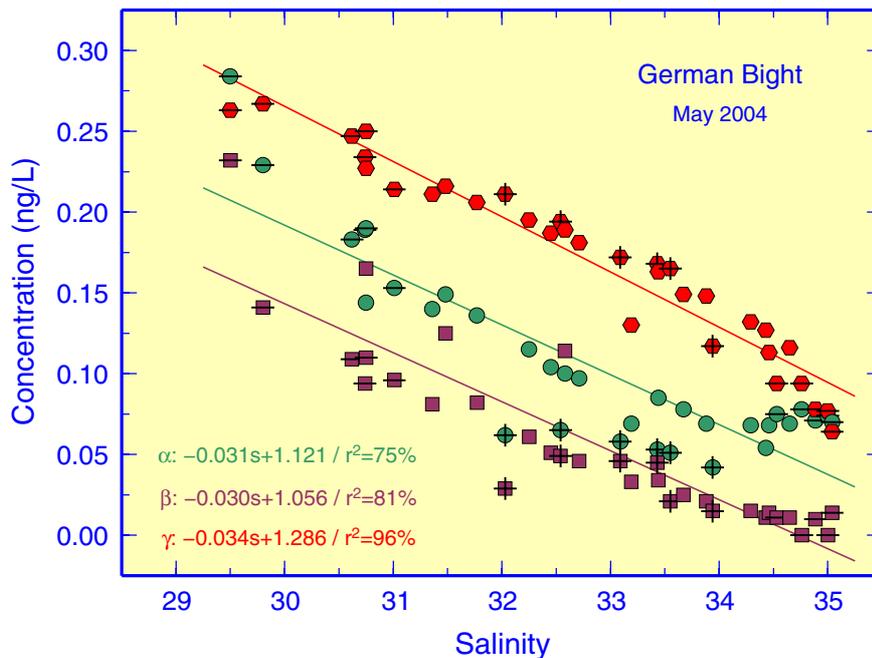


Abb. 4-20: HCH-Konzentration vs. Salzgehalt im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Mai 2004; +/- Symbole bedeuten  $\alpha/\gamma$ -Verhältnis  $< 0.4$  (+) bzw.  $> 0.7$  (-), vgl. Abb. 4-19.

Fig. 4-20: HCH-concentration vs. salinity in near-surface sea water of the German Bight in May 2004; crossed and dashed symbols indicate  $\alpha/\gamma$ -ratio  $< 0.4$  (+) and  $> 0.7$  (-), cf. Fig. 4-19.

1. Der Salzgehalt  $s$  einer linearen Mischung zweier Wassermassen hängt von den Salzgehalten und den relativen Volumina der Mischungskomponenten ab:  $s = s_1 * v_1 + s_2 * (1 - v_1)$ . Für ein Gemisch aus 1 l Flusswasser ( $s = 0$ ) und 4 l Seewasser ( $s = 35$ ) ergibt sich beispielsweise ein Salzgehalt von 28 ( $s = 0 * 1/5 + 35 * 4/5$ ). Die angegebene Mischungsformel lässt sich nach  $v_1 = (s - s_2)/(s_1 - s_2)$  umstellen und vereinfacht sich im Beispiel zu  $v_1 = 1 - s/35$ . Der Salzgehalt (des Gemisches) lässt sich demnach und ggf. anschaulicher als Süßwasseranteil ( $v_1$ ) auffassen. Für  $s = 30, 32$  und  $34$  beläuft sich dieser Anteil auf etwa 15, 9 und 3 % (vgl. Abb. 4-20).

## 4.2.2.2 Zeitliche Entwicklung der Meerwasserbelastung

Für die HCH-Isomere liegen verlässliche Messwerte seit 1975 vor, so dass die langfristige Entwicklung der Konzentrationen gut dokumentiert ist und belastbare Trendaussagen möglich sind. Konzentrationszeitserien für  $\alpha$ - und  $\gamma$ -HCH an der Station ›Elbe 1‹ sind stellvertretend für die Verhältnisse in der inneren Deutschen Bucht in Abb. 4-21 dargestellt.

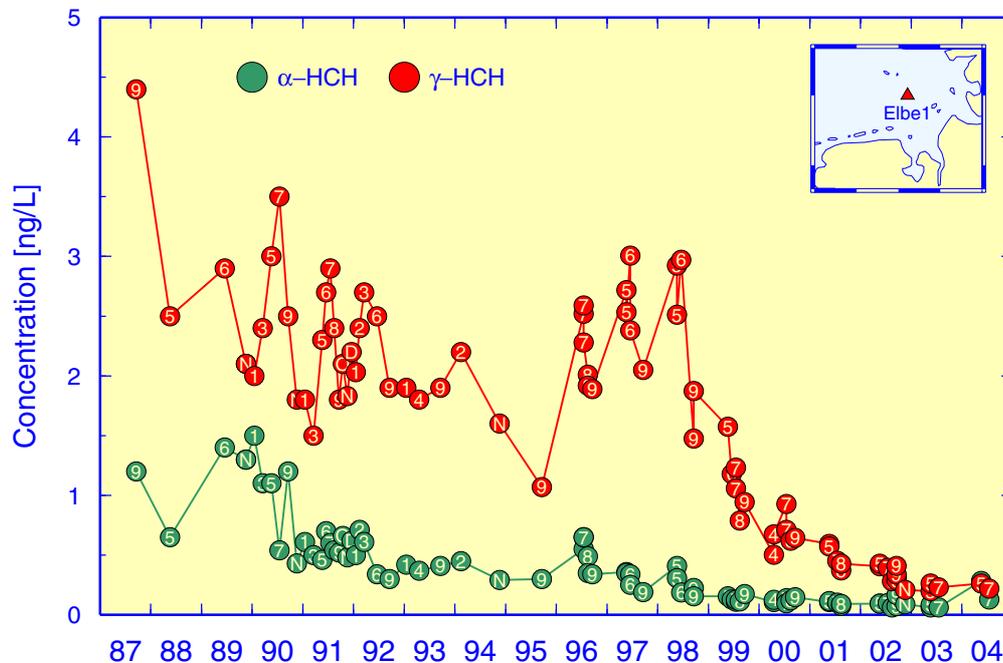


Abb. 4-21: Zeitliche Entwicklung der  $\alpha$ - und  $\gamma$ -HCH-Konzentrationen an Station Elbe1 (ex T41) seit 1987. Kreise enthalten den Beobachtungsmonat (1, 2, 3, ..., O, N, D).

Fig. 4-21: Temporal evolution since 1987 of  $\alpha$ - and  $\gamma$ -HCH concentrations at station Elbe1 (ex T41). Figures inside bullets give month of observation (1, 2, 3, ..., O, N, D).

Seit 1986 war für  $\alpha$ -HCH trotz hoher Schwankungen ein deutlicher Rückgang der Konzentration zu beobachten. Dieser Abwärtstrend hatte sich seit 1999 etwas verlangsamt, brach jedoch im Jahr 2004 ab, als es zu einem Anstieg auf das Niveau von 1998 kam. Ursache hierfür waren stark erhöhte Konzentrationen in der Elbe (Abb. 4-22). Bei Stade lagen die  $\alpha$ -HCH-Konzentrationen nicht nur deutlich über den Mittelwerten der Vorjahre, sondern auch oberhalb des Niveaus, das während des Elbehochwassers im August 2002 erreicht worden war. Aufgrund der geringen Wasserführung der Elbe im Jahr 2004 (vgl. Abb. 3-34, S. 112) fiel der Spitzeneintrag in die Deutsche Bucht allerdings geringer aus; andererseits war die Konzentration über einen längeren Zeitraum sehr hoch. Für den  $\beta$ -HCH-Gehalt gilt Ähnliches (Abb. 4-22), während der Lindangehalt der Elbe kaum erhöht war, so dass die Langzeitentwicklung in der Deutschen Bucht unbeeinflusst blieb.

Die Lindankonzentration unterlag bis 1998 großen Schwankungen, die durch eine ausgeprägte saisonale Variabilität verstärkt wurden (Abb. 4-21); hohe Konzentrationen traten dabei häufig im Frühsommer auf. Zur Abschätzung saisonbereinigter Trends wurden die innerhalb eines Jahres verfügbaren Messungen gemittelt. Die Zeitserien dieser »Jahresmittel«<sup>1</sup> sind in Abb. 4-23 gemeinsam mit denjenigen für  $\alpha$ -HCH an den Stationen ›Elbe 1‹, ›LTIEF‹ und ›DTEND‹ dargestellt.

Zunächst ist bemerkenswert, dass die Konzentrationen ( $c$ ) beider Isomere seit Ende der 1990er Jahre von unterschiedlichen Ausgangsniveaus ( $c_0$ ) um etwa eine Größenordnung abgefallen sind. Diese exponentiellen Trends erscheinen wegen der log-Skalierung als Geraden mit unterschiedlicher Steigung  $k$ , welche mit der Zeitkonstanten im Exponentialansatz ( $c/c_0 = e^{kt}$ ) identisch ist und über  $t(c/c_0=0.5)=\ln(0.5)/k$  die »Halbwertszeit« liefert, nach der  $c$  auf die Hälfte des Anfangswerts  $c_0$  fällt.

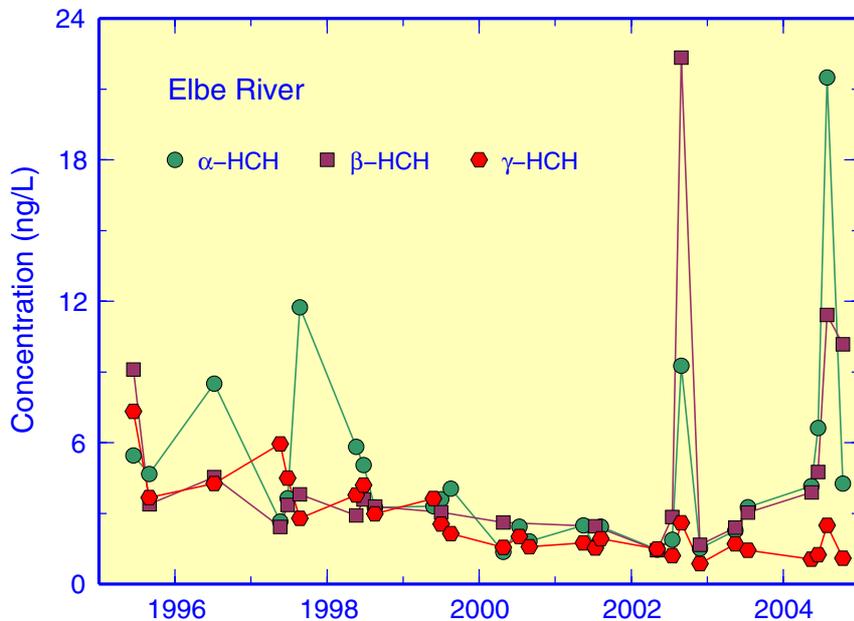


Abb. 4-22: Zeitliche Entwicklung der  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -HCH-Konzentrationen bei Stade (Elbe) seit 1995.

Fig. 4-22: Temporal evolution since 1995 of  $\alpha$ -,  $\beta$ - and  $\gamma$ -HCH concentrations near Stade (Elbe River).

Die Entwicklung der  $\alpha$ -HCH-Konzentration unterlag an allen drei Positionen seit Ende der 1980er Jahre einem ungebrochenen Abwärtstrend, der durch wenig verschiedene Halbwertszeiten von 3.7 (DTEND) bis 4.4 Jahren (Elbe 1) charakterisierbar ist. Die Konzentration des  $\alpha$ -HCH hat sich demnach in der Deutschen Bucht etwa alle 4 Jahre halbiert. Seit 2 oder 3 Jahren wurden allerdings infolge ansteigender Konzentrationen im Elbewasser (Abb. 4-22) stagnierende (LTIEF) oder sogar ansteigende Konzentrationen (Elbe 1 2004) in der östlichen Deutschen Bucht gemessen (Abb. 4-23).

Im Fall der Lindankonzentration führt ein exponentieller Ausgleich über den vollständigen Zeitbereich (1989 – 2004) auf ähnliche Zeitkonstanten bzw. Halbwertszeiten von 4.0 (DTEND) bis 4.5 Jahren (Elbe 1). Eine gute Approximation der tatsächlichen zeitlichen Entwicklung wird jedoch erst durch stückweise lineare Anpassung möglich, die nach dem Verfahren von TOMÉ UND MIRANDA (2004) durchgeführt wurde. Danach ereigneten sich Trendbrüche an den Positionen Elbe 1 und LTIEF im Jahr 1998, in der äußeren Deutschen Bucht (DTEND) zwei Jahre früher.

1. Nicht nur die Zeitpunkte, sondern auch die Anzahl der Messungen schwanken stark von Jahr zu Jahr, so dass die Bezeichnung Jahresmittel nicht in jedem Fall sachgerecht erscheint. Beispielsweise ist die Lindankonzentration im Jahr 1995 auf der Position Elbe 1 durch lediglich eine Messung im September belegt, die den tatsächlichen Jahresmittelwert vermutlich deutlich unterschätzt (vgl. Abb. 4-21, S. 147).

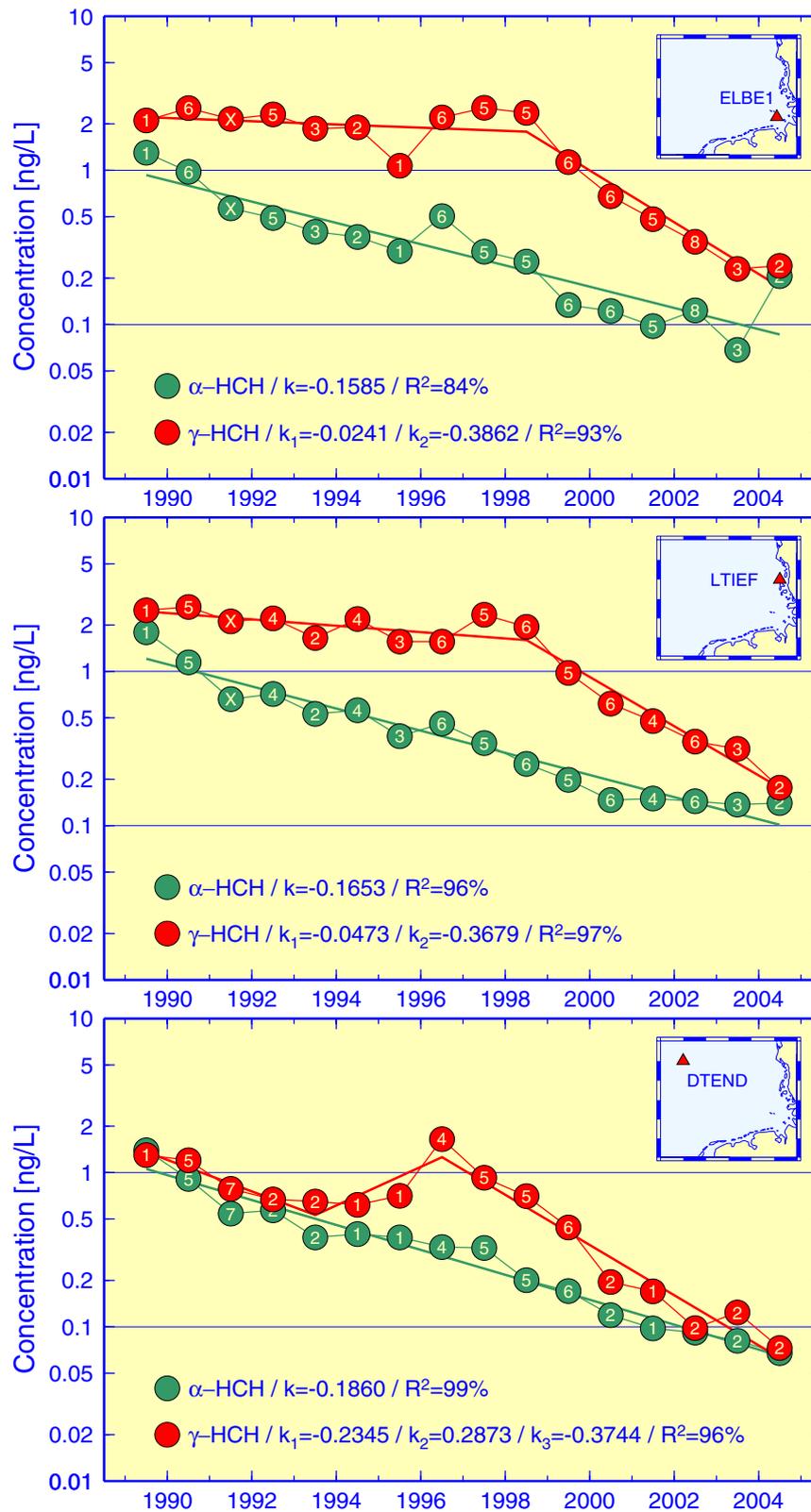


Abb. 4-23: Konzentrationstrends für  $\alpha$ - und  $\gamma$ -HCH in der Deutschen Bucht. Kreise sind Jahresmittel mit Probenanzahl / Jahr (1, 2, ..., 9, X). Die Zeitkonstanten  $k_{(i)}$  der (partiellen) Exponentialtrends liefern »Halbwertszeiten« ( $\ln(0.5)/k$ ) von 4 ( $\alpha$ ) bzw. 2 Jahren ( $\gamma$  seit ca. 1997).

Fig. 4-23: Trends in  $\alpha$ - and  $\gamma$ -HCH concentrations in the German Bight. Annual mean bullets with samples/yr; time constants  $k_{(i)}$  yield »half lifes« of 4 ( $\alpha$ ) and 2 yrs ( $\gamma$  since about 1997).

Für den ersten Zeitabschnitt von knapp 10 Jahren ergab sich an den küstennahen Stationen (mit  $t_{0,5} = 28.8$  a, Elbe 1 und 14.7 a, LTIEF) nur eine geringfügige Reduktion der Lindankonzentration, während für DTEND einander kompensierende gegenläufige Trends festgestellt wurden ( $t_{0,5} = \pm 3$  a). Im Jahr 1998 (bzw. 1996, DTEND) setzte an allen drei Stationen ein rapider, gleichstarker Rückgang der Lindankonzentration ein (1.8 a, Elbe 1; 1.9 a LTIEF und DTEND). Der Lindangehalt hat sich demnach seither in der Deutschen Bucht etwa alle 2 Jahre – und damit doppelt so schnell wie der  $\alpha$ -HCH-Gehalt – halbiert (Abb. 4-23). An der Station Elbe 1 sank der Lindangehalt von 2.35 ng/L (1998) um 90 % auf 0.23 ng/L (2003). Im Jahr 2004 blieb der Lindangehalt unverändert (0.24 ng/L).

### 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 auch im Jahr 2004 die höchsten Konzentrationen in Proben der schlickreichen Station ›KS11‹ vor der Elbmündung gemessen. Im Mittel wurden hier Belastungen mit  $\alpha$ -HCH von 0.15  $\mu\text{g}/\text{kg}$  und mit  $\gamma$ -HCH von 0.06  $\mu\text{g}/\text{kg}$  festgestellt. Im übrigen Gebiet variierten die Gehalte von < 0.005 bis 0.06  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

Zeittrends sind aufgrund der hohen Variabilität der Konzentrationen und des relativ kurzen Beobachtungszeitraums von gegenwärtig zehn Jahren bislang nicht erkennbar.

### 4.2.3 Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe (HCB, PCB, DDT)

Obwohl die drei Schadstoffklassen HCB, PCB und DDT sehr unterschiedliche Anwendungen haben und sich chemisch unterscheiden, lassen sie sich gut gemeinsam betrachten. Alle drei Gruppen sind sehr lipophil ( $K_{OW}$ -Werte von 5 bis 7, s. Fußnote, S. 143) 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.

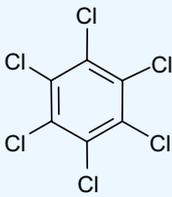
#### 4.2.3.1 CKW-Gehalte des Meerwassers

Die Elbe ist mit HCB deutlich belastet; allerdings nimmt die HCB-Konzentration bereits im Ästuar sehr stark ab. Im Juli / August 2004 sank beispielsweise die Konzentration von Stade (410 pg/L) über Cuxhaven (134 pg/L) bis zur Station Eider (6.5 pg/L) in der inneren Deutschen Bucht um fast zwei Größenordnungen. Die starke Affinität des HCB zum Schwebstoff führt über Sedimentation zur raschen Reduktion der HCB-Konzentrationen in der Wassersäule.

Im Sommer 2004 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 1 – 3 µg/L vor, ohne dass Konzentrationsschwerpunkte oder Quellen außerhalb der Flüsse festgestellt wurden.

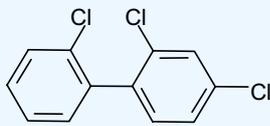
**Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe**



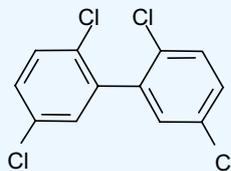
**Hexachlorbenzol (HCB)** wurde als Weichmacher und Flammschutzmittel für Kunststoffe und Schmiermittel, vor allem aber als Fungizid in Holzschutzmitteln angewandt; ferner gelangt es bei der Herstellung von Lösungsmitteln und beim Verbrennen chlorhaltiger Produkte in die Umwelt. Herstellung und Weiterverarbeitung 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.

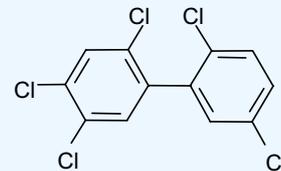
PCB sind giftig und zeigten im Tierversuch krebserregende Wirkung. Im tierischen Organismus werden sie kaum abgebaut, sondern reichern sich zu hohen Konzentrationen an. In der Übersicht sind einige der wichtigsten PCB-Kongeneren dargestellt.



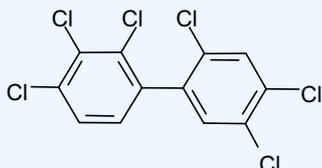
PCB 28



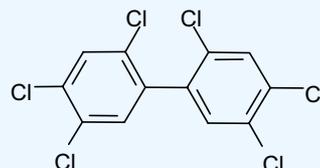
PCB 52



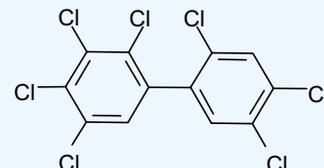
PCB 101



PCB 138

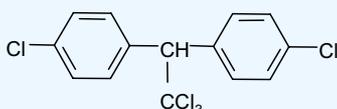


PCB 153

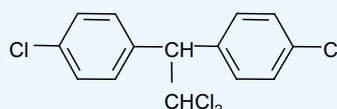


PCB 180

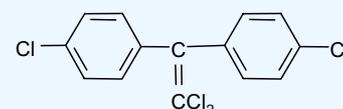
**Dichlor-diphenyl-trichlorethan (DDT)** ist ein Insektizid, das seit den 1930er Jahren in der Land- und Forstwirtschaft zur Bekämpfung von Schadinsekten eingesetzt wurde. Seine Anwendung wurde in der BRD 1972 und in der ehemaligen DDR 1988 verboten. In einigen Entwicklungsländern wird DDT nach wie vor zur Malariaabkämpfung 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

Während in der Elbe bei Stade im Juli / August 2004 für das Leit-PCB CB153 eine Konzentration von 245 pg/L beobachtet wurde, sanken die Gehalte bei Cuxhaven auf ein Drittel (77 pg/L) und in der inneren Deutschen Bucht auf 2 – 13 pg/L ab. Das Konzentrationsgefälle ähnelte somit demjenigen des HCB sehr stark. Auch hinsichtlich der Größenordnung entsprachen die CB153-Konzentrationen den HCB-Gehalten, 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 Juli / August 2004 ein Gehalt von 1040 pg/L gemessen; für p,p'-DDE und p,p'-DDT lagen die Konzentration bei 318 pg/L und 156 pg/L. (Im Folgenden wird das p,p'-Präfix unterdrückt.) Das Konzentrationsgefälle zur Deutschen Bucht war ähnlich stark ausgeprägt wie bei den PCB und dem HCB. DDT und DDE waren außerhalb des Elbeästuars meist nicht mehr nachzuweisen (< 1 pg/L). Das Abbauprodukt DDD ließ sich im Jahr 2004 aufgrund analytischer Probleme nicht mit der üblichen Genauigkeit bestimmen; in der Deutschen Bucht wurden jedoch 4 pg/L nicht überschritten.

Alle CKW-Konzentrationen lagen 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 des TOC-Gehalts des Sediments in der Deutschen Bucht ist in *Abb. 4-24* dargestellt. Die TOC-Gehaltsverteilung lässt sich nach drei Belastungsgruppen klassifizieren, welche über die Konzentrationsintervalle 7 – 26 mg/g (rot), 2.2 – 6.9 mg/g (orange) und < 0.4 – 2.1 mg/g (grün) definiert sind.

Die auf Trockenmasse bezogenen Konzentrationsverteilungen von HCB, CB153 und DDD in der Deutschen Bucht im Mai 2004 sind in *Abb. 4-25 (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. 4-24*).

Die höchsten auf Trockenmasse bezogenen Schadstoffkonzentrationen wurden auf der schlickreichen Station ›KS11‹ sowie der unmittelbar benachbarten Station ›KS8‹ in der inneren Deutschen Bucht festgestellt. Die Konzentrationen der Leitkomponenten DDD, HCB und CB153 erreichten auf ›KS11‹ 2.2, 0.9 und 2.8 µg/kg TM. Ein weiterer Schwerpunkt lag im Gebiet der Stationen ›UE20‹, ›WB5‹ und ›WB1‹, wo das Sediment ebenfalls einen relativ hohen Feinkornanteil aufweist (DDD: 0.27, HCB: 0.04, CB153: 0.09 µg/kg TM). Die Sedimente aller anderen Stationen sind sehr sandig; die

sehr geringen Schadstoffkonzentrationen lagen hier in der Nähe der Bestimmungsgrenzen ( $< 0.01$  bis  $0.04 \mu\text{g}/\text{kg TM}$ ).

Bei Normierung der Schadstoffkonzentrationen auf den TOC-Gehalt ergibt sich eine deutliche Nivellierung der oben geschilderten Konzentrationsunterschiede (Abb. 4-25, unten). Maximum-zu-Minimum-Verhältnisse reduzieren sich dabei von  $> 1000$  auf  $< 20$ . Die Gruppierung in drei Belastungsklassen bleibt jedoch bestehen.

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.

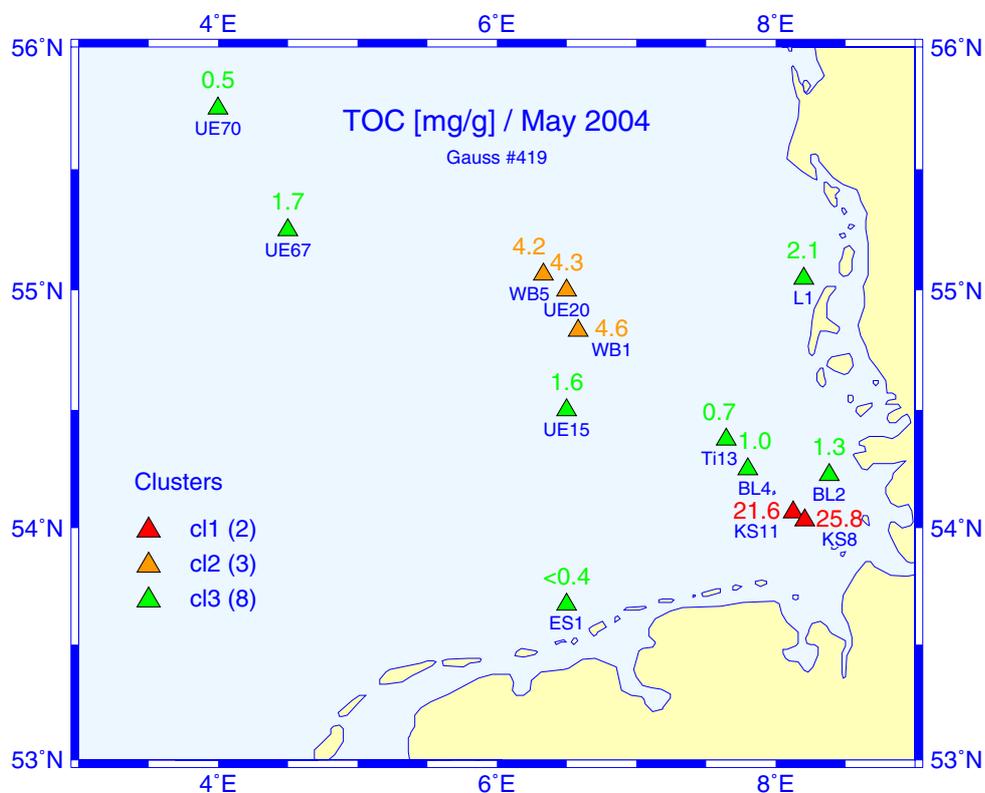


Abb. 4-24: Geographische Verteilung des TOC-Gehalts im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2004.

Fig. 4-24: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight in May 2004.

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. 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

#### 4 Meereschemie

inneren Deutschen Bucht sind daher kaum als direkte Ablagerung von Elbesedimenten oder -schwebstoffen interpretierbar.

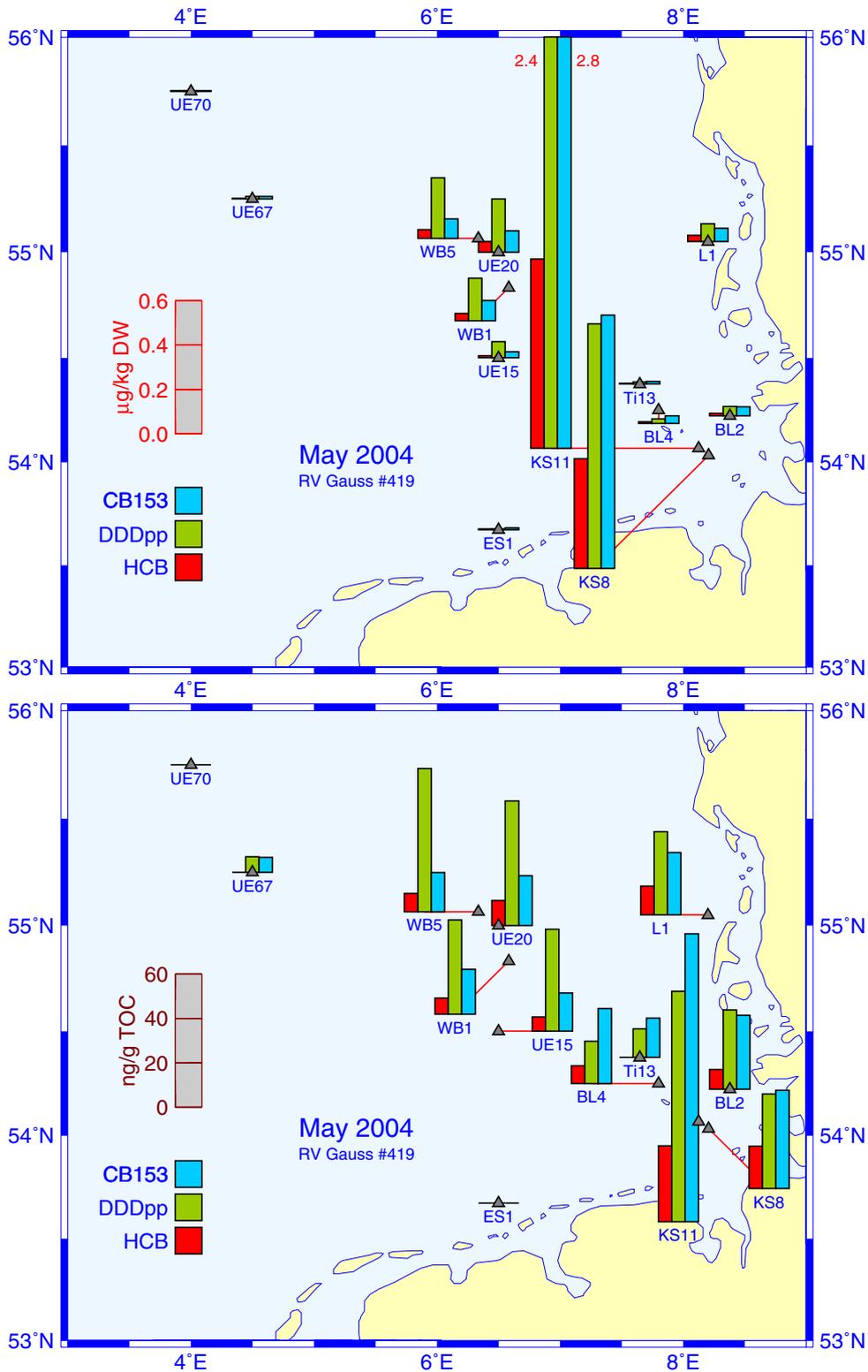


Abb. 4-25: HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2004.

Fig. 4-25: HCH-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2004.

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 ungeradzahligter Kettenlängen auf Landpflanzen als Ursprung hin. Als Maß für den Anteil an biogenen Alkanen wird der ›**Carbon Preference Index**‹ (CPI: Summe der ungeradzahligten n-Alkane dividiert durch die Summe der geradzahligten im Bereich von n-C<sub>20</sub> bis n-C<sub>30</sub>) 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-C<sub>17</sub>, n-C<sub>19</sub> und n-C<sub>15</sub> 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. 156*) 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. 160*).

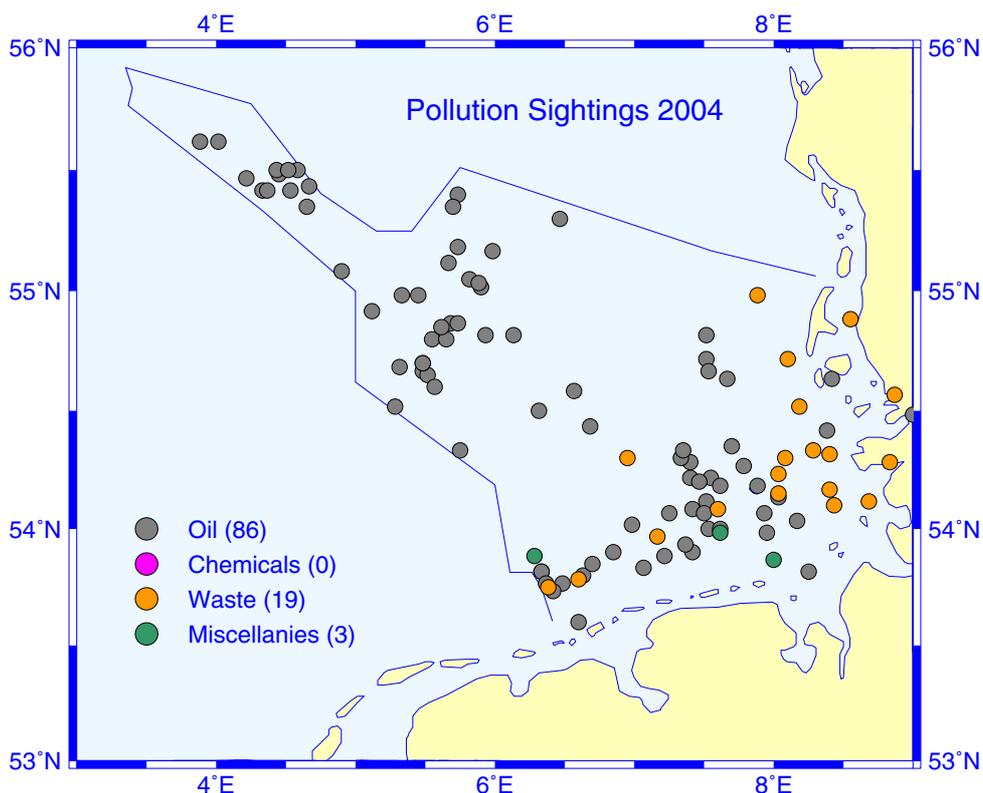
##### 4.2.4.1 Akute Ölverschmutzungen

Obwohl bei den Untersuchungen der chronischen Verschmutzung durch Erdölkohlenwasserstoffe nur eine geringe Belastung im Meerwasser beobachtet wurde (vgl. *Abschnitt 4.2.4.2, S. 156*), sind auch im Jahr 2004 zahlreiche akute Verschmutzungen durch Öl in der Deutschen Bucht beobachtet worden.

Von der Küstenwache (Bundesgrenzschutz See, Zoll, Vollzugsorgane der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Fischereiaufsicht), der Marine, der Wasserschutzpolizei sowie durch private Dritte wurden im Jahr 2004 insgesamt 108 Gewässerverunreinigungen in der Deutschen Bucht (AWZ) gemeldet (2003: 97). In der Regel handelte es

sich um Ölverschmutzungen. Die räumliche Verteilung der beobachteten Verschmutzungen ist in *Abb. 4-26* dargestellt. Die Häufung von Ölverschmutzungen außerhalb der ostfriesischen Inseln fällt mit den Hauptfahrwassern zusammen.

Im Rahmen von 19 Strafverfahren wurden im BSH vergleichende Analysen zwischen Proben aus Ölfilmen und von verdächtigten Schiffen durchgeführt. Insgesamt wurden dazu im Jahr 2004 192 Ölproben untersucht. Besondere Erwähnung verdient eine großräumige Öl-Verschmutzung, die im Winter 2004 an der Schleswig-Holsteinischen Westküste auftrat. Durch internationale Zusammenarbeit der ermittelnden Behörden, Öl-Analysen und Ausbreitungssimulationen mit dem Driftmodell des BSH konnten mögliche Verursacher eingegrenzt werden.



*Abb. 4-26: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht im Jahr 2004.*

*Fig. 4-26: Pollution sightings in the German Bight in 2004.*

#### 4.2.4.2 Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane

Der Konzentrationsbereich der Summe der Aliphaten lag im Juli / August 2004 zwischen 13 ng/L in der zentralen Nordsee und 587 ng/L in der südlichen Deutschen Bucht (*Tab. 4-2*). Für die Verteilung der Konzentrationen über die n-Alkane ergaben sich im wesentlichen vier verschiedene Muster, für die typische Beispiele in *Abb. 4-27*, S. 158 angegeben sind.

Die Mediankonzentrationen einzelner n-Alkane im Bereich C<sub>20</sub> bis C<sub>30</sub> lagen in der Deutschen Bucht zwischen 0.7 und 2.1 ng/L. Die relativ homogene Konzentrationsverteilung (*Abb. 4-28*, S. 159) mit einem mittleren Carbon Preference Index von 1.2 weist auf eine gewisse Grundbelastung der Nordsee durch Erdölkohlenwasserstoffe hin. Die Konzentrationen zeigen allerdings, dass diese chronische Belastung relativ gering ist. Eine Ausnahme bildet die Summenkonzentration von 490 ng/L auf der Station

BRGRU; hier lag eine akute Ölverschmutzung vor, wie ein CPI-Index von 0.98 und das Verteilungsmuster der Alkane eindeutig belegen (vgl. Abb. 4-27, S. 158). In der Elbe wurde ein anderes Verteilungsmuster der Konzentrationsbeiträge der n-Alkane beobachtet (Tab. 4-2, Abb. 4-28). Die Bevorzugung ungeradzahligter Kettenlängen (Maximum bei C<sub>29</sub>) 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 C<sub>17</sub> (bis 167 ng/L), C<sub>19</sub> (bis 122 ng/L) und vereinzelt auch C<sub>15</sub> (bis 18 ng/L) diejenigen aller anderen Alkane. Diese drei Alkane sind bekannte Stoffwechselprodukte von Algen.

AUG 2004 ng/L	STADE 1 sample	CUXHAVEN 1 sample	GERMAN BIGHT			
			min	max	median	mean
C <sub>12</sub>	1.10	1.02	0.00	4.99	0.37	0.49
C <sub>13</sub>	0.63	0.59	0.00	4.21	0.23	0.34
C <sub>14</sub>	0.88	0.89	0.08	3.42	0.41	0.53
C <sub>15</sub>	5.19	2.23	1.12	17.53	2.95	4.24
C <sub>16</sub>	2.54	1.81	0.39	1.62	0.73	0.81
C <sub>17</sub>	31.88	28.41	0.73	166.6	55.94	55.61
C <sub>18</sub>	3.49	3.07	0.44	43.42	3.77	5.14
C <sub>19</sub>	3.07	9.93	0.46	122.4	18.47	24.30
C <sub>20</sub>	2.25	1.50	0.36	4.21	0.59	0.79
C <sub>21</sub>	6.83	3.67	0.43	18.55	0.80	1.46
C <sub>22</sub>	4.01	2.96	0.48	56.24	0.92	2.66
C <sub>23</sub>	12.87	6.82	0.60	90.83	1.02	3.86
C <sub>24</sub>	6.75	4.77	0.51	93.29	1.10	4.07
C <sub>25</sub>	23.76	13.43	0.71	88.31	1.49	4.36
C <sub>26</sub>	11.46	7.47	0.68	65.88	1.43	3.58
C <sub>27</sub>	28.43	14.63	0.55	28.49	1.23	2.26
C <sub>28</sub>	9.83	6.08	0.44	20.70	0.98	1.74
C <sub>29</sub>	33.75	18.35	0.87	14.25	1.87	2.46
C <sub>30</sub>	9.40	5.17	0.42	9.50	1.26	1.56
TOTAL	198.1	132.8	14.8	586.5	99.4	120.3
CPI	2.55	2.15	0.80	1.55	1.14	1.16

Tab. 4-2: Konzentrationen von n-Alkanen im Wasser der Deutschen Bucht im August 2004.

Table 4-2: Concentrations of n-Alkanes in German Bight sea water in August 2004.

Wie Abb. 4-29, S. 160 zeigt, waren hohe Konzentrationen von C<sub>17</sub> und C<sub>19</sub> im Hochsommer vor allem im Küstenbereich zu beobachten. Eine gute Korrelation zum Schwebstoffgehalt besteht nicht. Eine ähnliche Konzentrationsverteilung wurde auch im vorausgehenden Mai angetroffen. Allerdings wurden auf den ost- und nordfriesischen Küstenstationen für C<sub>17</sub> etwas geringere Konzentrationen von bis zu 52 ng/L gemessen; die räumliche Ausdehnung der Gebiete hoher Konzentrationen war im Mai ebenfalls kleiner als im Juli / August.

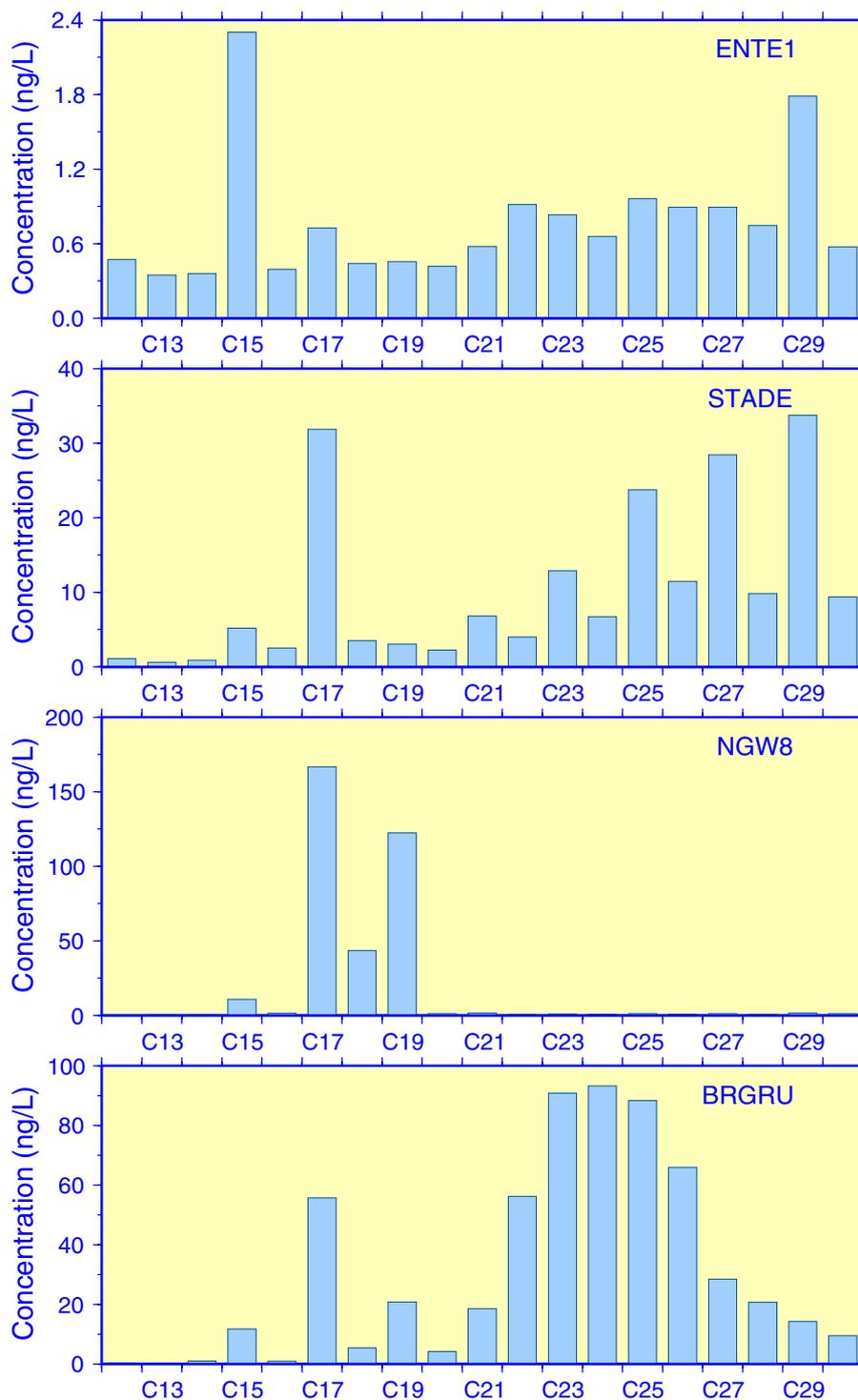


Abb. 4-27: Beispiele für Konzentrationsmuster von *n*-Alkanen im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im August 2004. Hintergrundbelastung mit Resten bio- und petrogenen Alkane (Ente1), hohe Alkananteile von terrestrischen Pflanzen (Stade/Elbe), von Algenstoffwechselprodukten (NGW8) und infolge Ölverschmutzung (BRGRU). Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-17, S. 142.

Fig. 4-27: Different *n*-Alkane patterns in near-surface sea water of the German Bight in August 2004. Background concentrations with remnants of bio- and petrogenic Alkanes (Ente1), high fractions from terrestrial plants (Stade/Elbe River), from algae metabolites (NGW8), and due to oil spill (BRGRU). Cf. Fig. 4-17, p. 142 for a station map.

Bemerkenswert ist, dass die Gesamtkonzentration der Aliphaten in der Elbe durchaus nicht immer die Höchstkonzentration im Nordseegebiet darstellt (vgl. Tab. 4-2). In Algenblüten werden z. T. deutlich höhere Summenkonzentrationen erreicht. Die beobachteten Konzentrationen stellen keine toxikologisch 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.

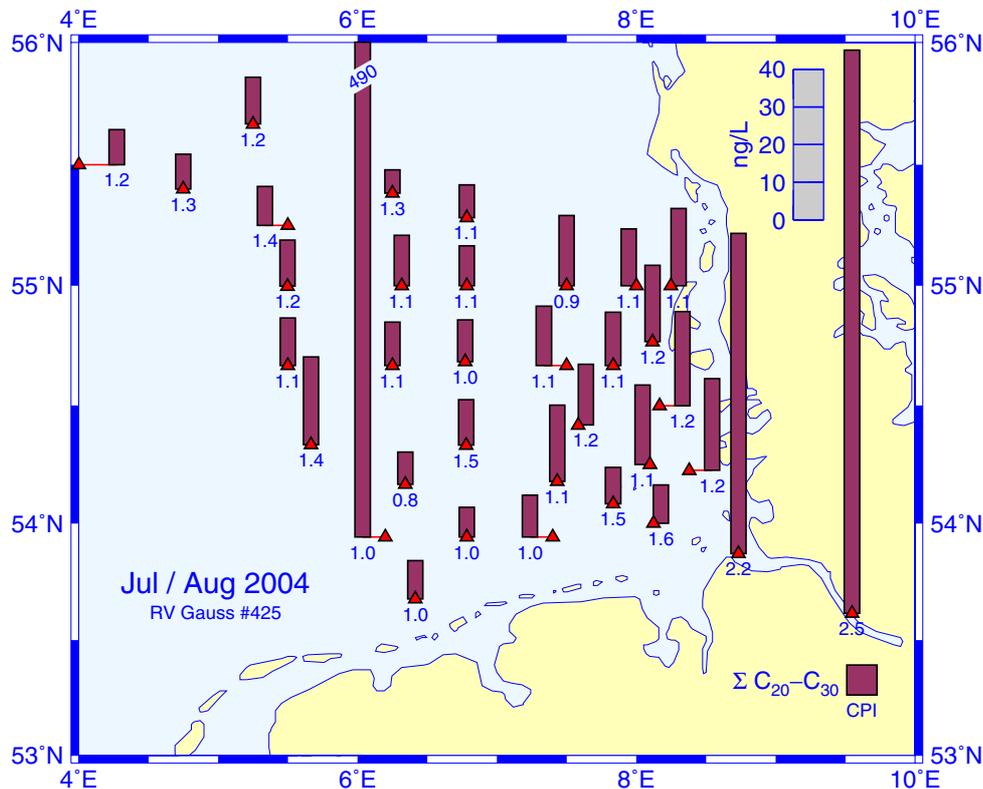


Abb. 4-28: Geographische Konzentrationsverteilung für die Summe der n-Alkane von  $C_{20}$  bis  $C_{30}$  im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht (5 m) im Juli / August 2004. Werte unterhalb der Säulen geben den CPI, Säulenhöhen in ng/L.

Fig. 4-28: Geographical distribution of total concentration of n-Alkanes from  $C_{20}$  to  $C_{30}$  for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in July / August 2004. Figures below columns give the CPI, column heights in ng/L.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Deutschen Bucht eine Grundbelastung durch Reste von Erdölkohlenwasserstoffen nachweisbar war. Nur auf der Station »BRGRU« wurden deutlich erhöhte Konzentrationen gemessen (Abb. 4-28, S. 159; Summe  $C_{20}$  bis  $C_{30}$ : 490 ng/L) und ein Muster gefunden (Abb. 4-27, S. 158), das eindeutig auf eine akute Verschmutzung durch Öl hinweist (CPI: 0.98). Alle anderen Fälle höherer Alkangehalte waren von 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, so dass zur Sedimentbelastung durch Ölrreste keine Aussagen möglich sind.

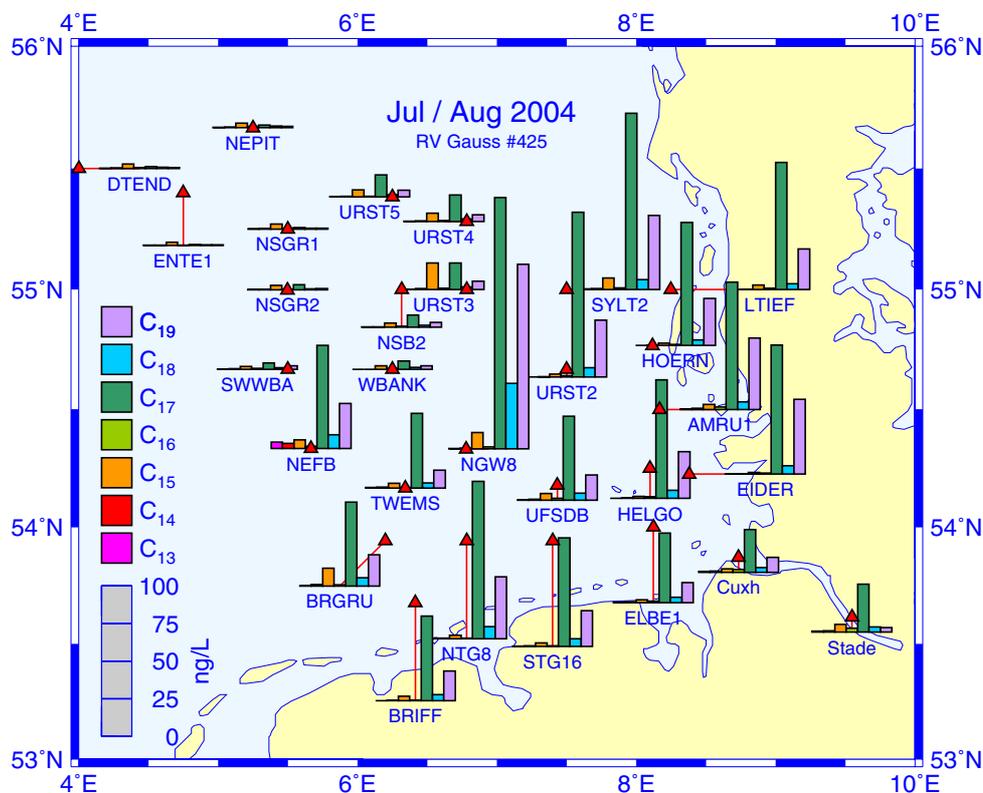


Abb. 4-29: Geographische Konzentrationsverteilungen für die n-Alkane  $C_{13}$  bis  $C_{19}$  im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Juli / August 2004. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-29: Geographical distribution of concentrations of n-Alkanes  $C_{13}$  to  $C_{19}$  for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in July / August 2004. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.

#### 4.2.4.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Die PAK sind einander zwar strukturell 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. 143). Unterschiedliche Konzentrationsverteilungen sind in der Verschiedenheit physikalisch-chemischer Eigenschaften und Eintragspfade begründet.

##### a) PAK-Gehalte des Meerwassers

Eine Dokumentation der Konzentrationsverteilungen und Verhaltensweisen aller vom BSH überwachten PAK würde den Rahmen des Berichts sprengen. Deshalb wurden Cluster- und Regressionsanalysen durchgeführt, die Aufschluss über ähnliches und eigenständiges Verhalten gaben, und so eine sinnvolle Auswahl von PAK-Verbindungen erleichterten (LOEWE ET AL. 2005). Die nachfolgende Untersuchung beschränkt

sich daher auf wenige typische Verbindungen, nämlich Naph, Fl, Phen, Flu und BaP, die sich entweder sehr eigenständig oder repräsentativ verhalten.

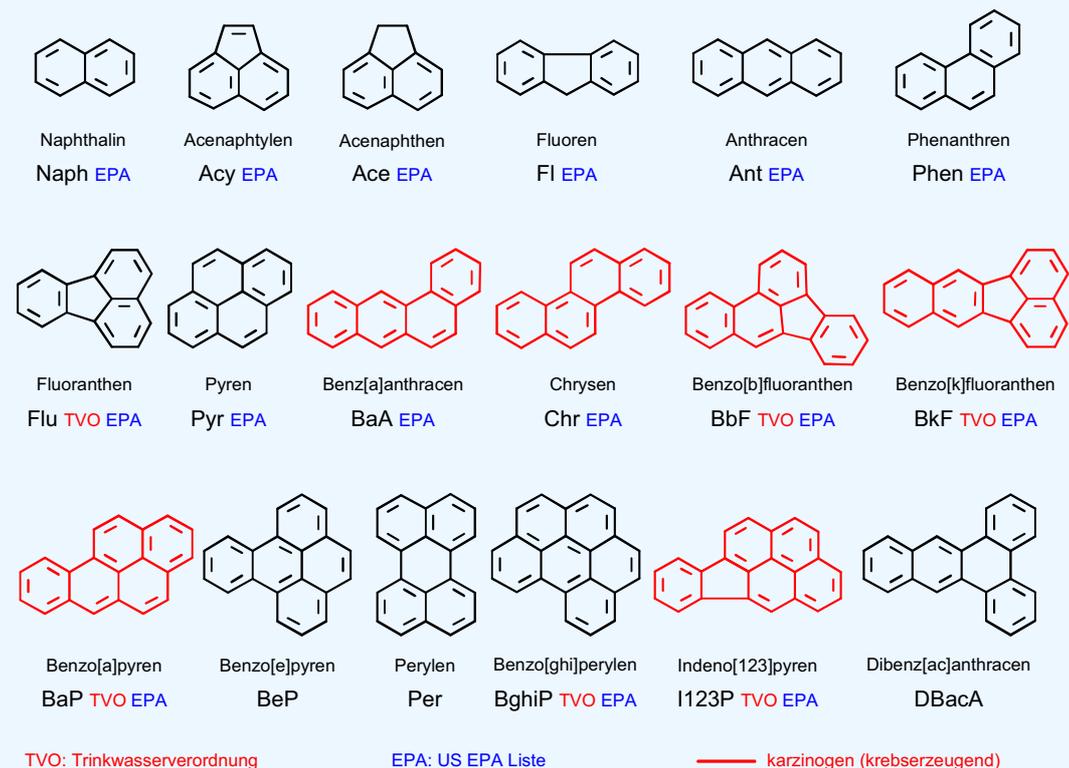
**Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)**

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:



Die Konzentrationen dieser PAK-Verbindungen variierten im Juli / August 2004 in der Elbe bei Stade zwischen 0.8 ng/L (Naph) und 14.7 ng/L (Flu). In der Deutschen Bucht lagen alle Konzentrationen im Intervall 0.005 – 0.6 ng/L, während Mediankonzentrationen zwischen 0.015 ng/L (BaP) und 0.32 ng/L (Naph) rangierten. Mit Ausnahme der Naph-Verteilung zeigten alle PAK-Verteilungen einen mehr oder minder starken Kon-

zentrationsabfall von der Küste zur offenen See hin (Abb. 4-30). Für die hochkondensierten 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  $> 1000$ . Für die 2- und 3-Ring-Aromaten fiel der Gradient weniger steil aus (Konzentrationsverhältnisse  $< 30$ ).

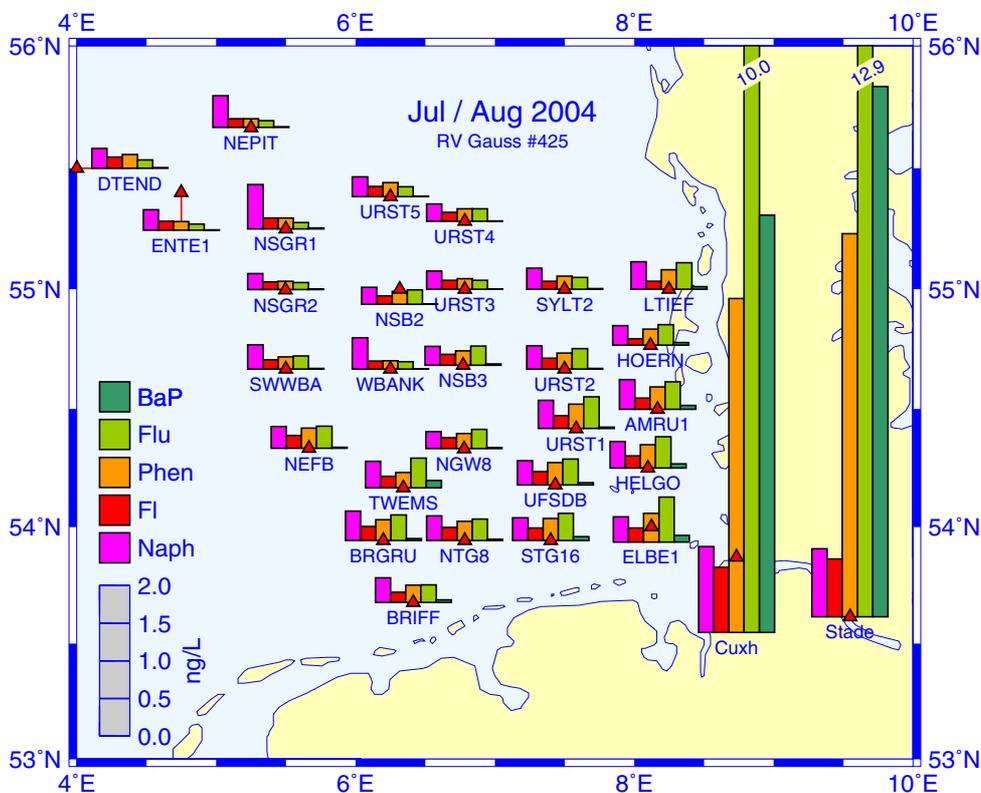


Abb. 4-30: Konzentrationen einiger PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Juli / August 2004. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-30: Concentrations of some PAHs in near-surface water (5 m) of the German Bight in July / August 2004. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.

Der Unterschied rührt hauptsächlich daher, dass die hochkondensierten polyzyklischen Aromaten – im Gegensatz zu den besser wasserlöslichen, niedrig kondensierten 2- und 3-Ring-Aromaten – eine große Affinität zu Schwebstoffen zeigen. Die Konzentrationen dieser Aromaten werden deshalb, wie der Schwebstoffgehalt selbst, verstärkt durch komplexe Sedimentations-, Resuspensions- und Depositionsprozesse mitbestimmt. Einfache lineare Abhängigkeiten vom Schwebstoffgehalt existieren dabei offenbar nicht (LOEWE ET AL. 2005). Brauchbare lineare Beziehungen zwischen den Konzentrationen der relativ gut wasserlöslichen 2- bis 3-Ring-Aromaten und dem Salzgehalt, welche lineare Vermischung als dominanten Prozess ausweisen würden (vgl. Abb. 4-20, S. 146), ließen sich ebenfalls nicht aufstellen. Die linear »erklärbare« Varianz lag im Mittel bei lediglich 15 % und bestenfalls (Flu) bei 25 % (LOEWE ET AL. 2005).

Die Konzentrationen der verschiedenen PAK sind zeitlich hochvariabel, so dass gegenwärtig keine Aussagen zur langfristigen Entwicklung getroffen werden können. Da im Jahr 2004 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.

#### 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 bis zu  $10^5$ -fach höherer Konzentration vor als in der Wasserphase. Die PAK-Konzentrationen im Sediment übertreffen diejenigen der chlorierten Kohlenwasserstoffe um das 100- bis 1000fache. PAK waren daher auf allen Stationen nachweisbar.

Die Konzentrationsmuster der PAK im Sediment (Abb. 4-31) 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 Naph, in schwebstoffreichen Küstengebieten meist für Phen oder Flu festgestellt.

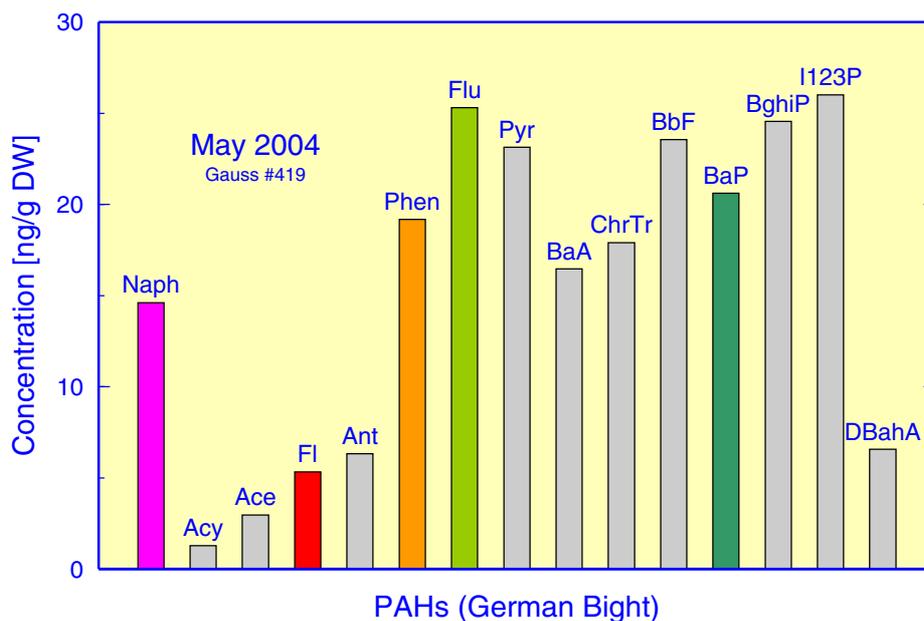


Abb. 4-31: Mittleres PAK-Konzentrationsmuster im Sediment der Deutschen Bucht.

Fig. 4-31: Mean PAH concentration pattern in sediment samples from the German Bight.

Im Mai 2004 lagen die BaP-Konzentrationen in der Deutschen Bucht zwischen  $< 0.25$  (NWG) und  $91.2 \mu\text{g}/\text{kg}$  TM (Abb. 4-32, oben); wie für CKW (vgl. Abb. 4-25, S. 154) wurden die höchsten Konzentrationen vor der Elbmündung ( $\text{KS11}$ ) und an Stationen mit relativ hohen TOC-Gehalten in der zentralen Deutschen Bucht ( $\text{WB5}$ ,  $\text{UE20}$ ) 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. 4-32, unten). Der Variationsbereich der Konzentrationen reduziert sich für diese Normierung auf das schmale Intervall 0.51 – 5.99  $\mu\text{g/g}$  TOC. Die nahezu fehlende räumliche Struktur der Konzentrationsverteilung

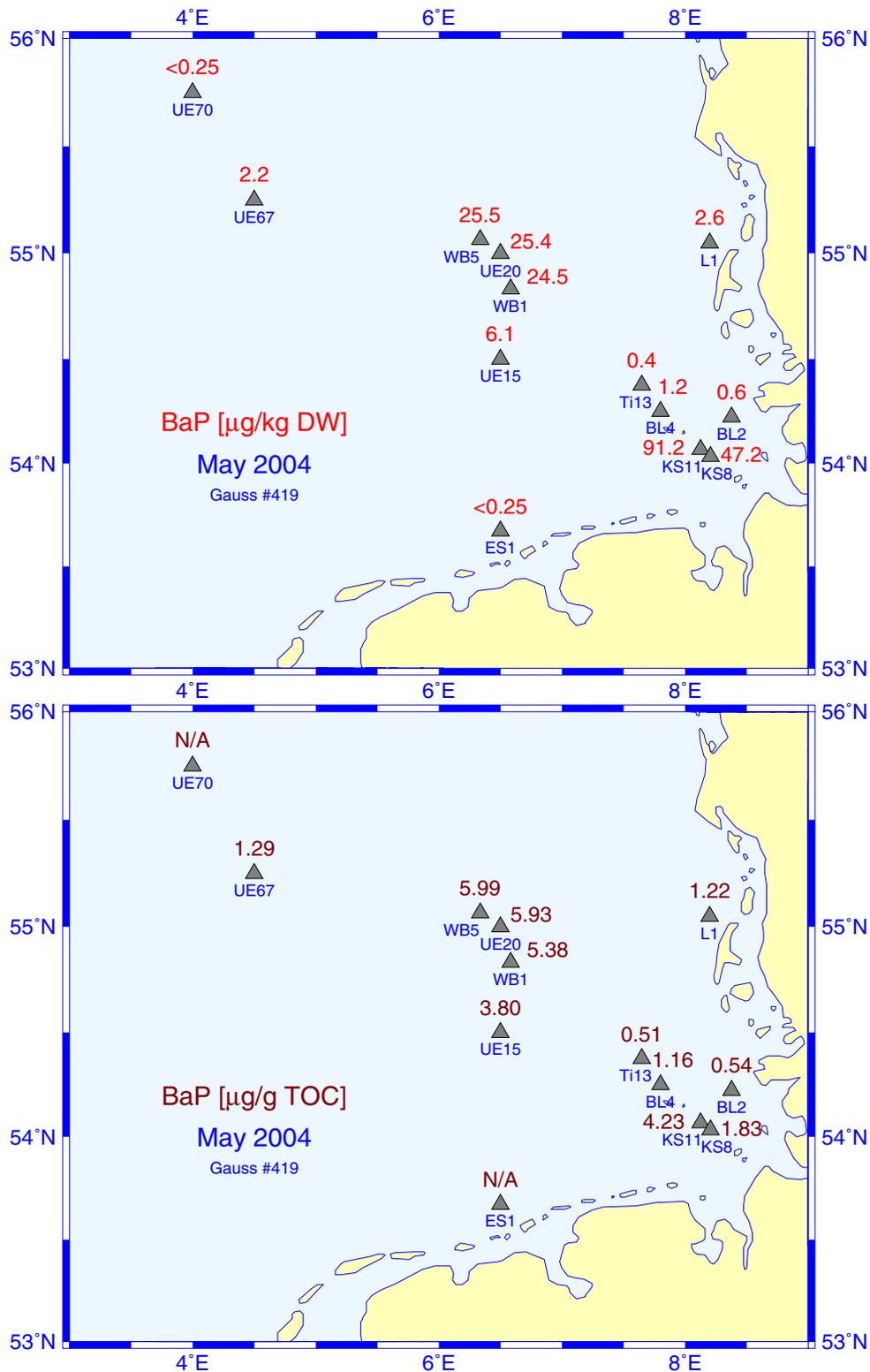


Abb. 4-32: Benzo[a]Pyren-Konzentrationen im Oberflächensediment der Deutschen Bucht.  
 Fig. 4-32: B[a]P concentrations in surface sediments of the German Bight.

gen 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. 4-32, unten) und der CKW (Abb. 4-25, S. 154), fällt allerdings auf, dass BaP in der zentralen Deutschen Bucht (>WB5< etc.) maximale Konzentrationen erreichte. Dieser 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.

#### 4.2.5 Polare Pestizide

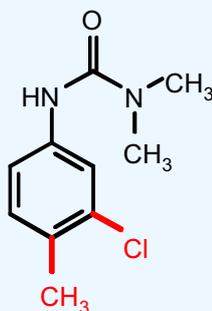
Im Gegensatz zu den »klassischen«, unpolaren Schadstoffen haben die meisten modernen Pflanzenbehandlungsmittel polare Eigenschaften und sind oft auch weniger persistent. Sie umfassen eine Vielzahl verschiedener Stoffgruppen, so dass ihre Analytik schwierig und aufwendig ist. Neben den in der Wasserrahmenrichtlinie 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.

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 2004 dokumentiert und interpretiert.

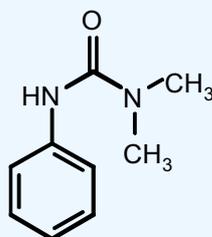
##### Tafel 4-6: Herbizide

**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.

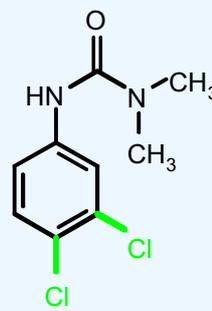
##### Phenylharnstoff-Herbizide



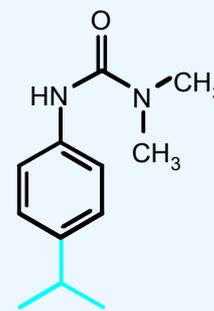
Chlortoluron



Fenuron



Diuron



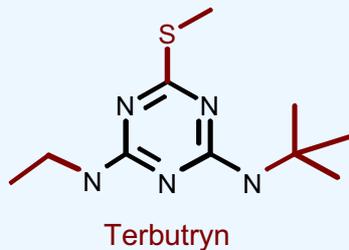
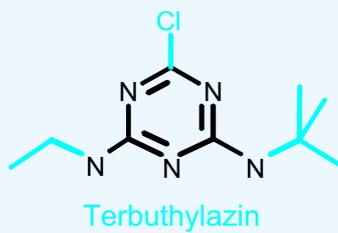
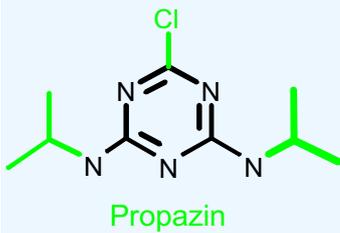
Isoproturon

(Fortsetzung ...)

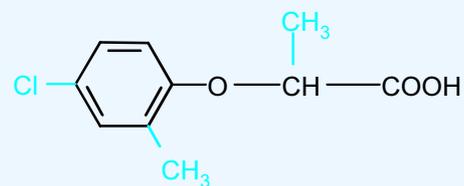
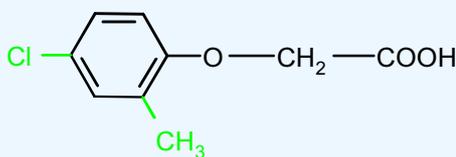
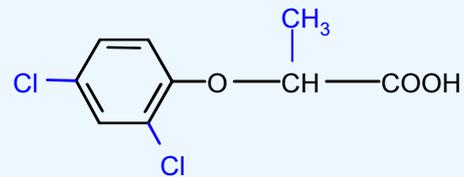
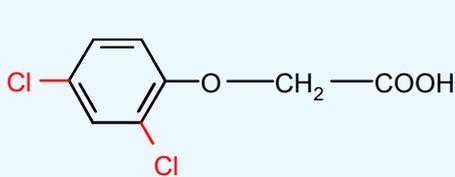
Tafel 4-6: Herbizide

(... Fortsetzung)

## Triazin-Herbizide



## Phenoxyessigsäure-Herbizide



## 4.2.5.1 Herbizidgehalte des Meerwassers

Da die Elbe die stärkste Quelle für Schadstoffeinträge in die Deutsche Bucht und süd-östliche Nordsee darstellt, wurden Proben aus dem Elbeästuar in die Untersuchung einbezogen. Der Pestizideintrag und demzufolge die Pestizidkonzentrationen des Wassers unterliegen erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen, die aus der saisonalen Anwendung der einzelnen Wirkstoffe resultieren (vgl. Abschnitt 4.2.5.2, S. 169).

Von 42 analysierten Pestiziden waren in der Elbe 25 nachweisbar; diese wurden sämtlich auch in der Deutschen Bucht angetroffen. Speziell wurden aus allen drei Hauptstoffklassen der Herbizide – nämlich Phenylharnstoffe, Triazine und Phenoxyessigsäuren – mehrere Vertreter im ng/L-Konzentrationsbereich im Seewasser nachgewiesen. Die am häufigsten und in höchsten Konzentrationen angetroffenen Vertreter der Phenylharnstoffe waren Diuron und Isoproturon. Von den Triazin-Herbiziden wurden vor allem Terbutylazin, Simazin und Atrazin gefunden, während unter den Phenoxyessigsäuren Mecoprop und MCPA in höchsten Konzentrationen festgestellt wurden.

Die räumlichen Konzentrationsverteilungen in der Deutschen Bucht sind in Abb. 4-33 für die sieben wichtigsten Triazine wiedergegeben. In der Elbe waren diese Stoffe in Konzentrationen von 1 bis 50 ng/L nachweisbar. Diese hohen Einträge sind weitgehend verantwortlich für die hohe Belastung der Küstenregionen der südlichen Nordsee. Zur offenen See hin wurde ein steiles Konzentrationsgefälle beobachtet, so dass in der zentralen Nordsee (→ENTE1←) nur noch Atrazin und Terbutylazin nachweisbar waren.

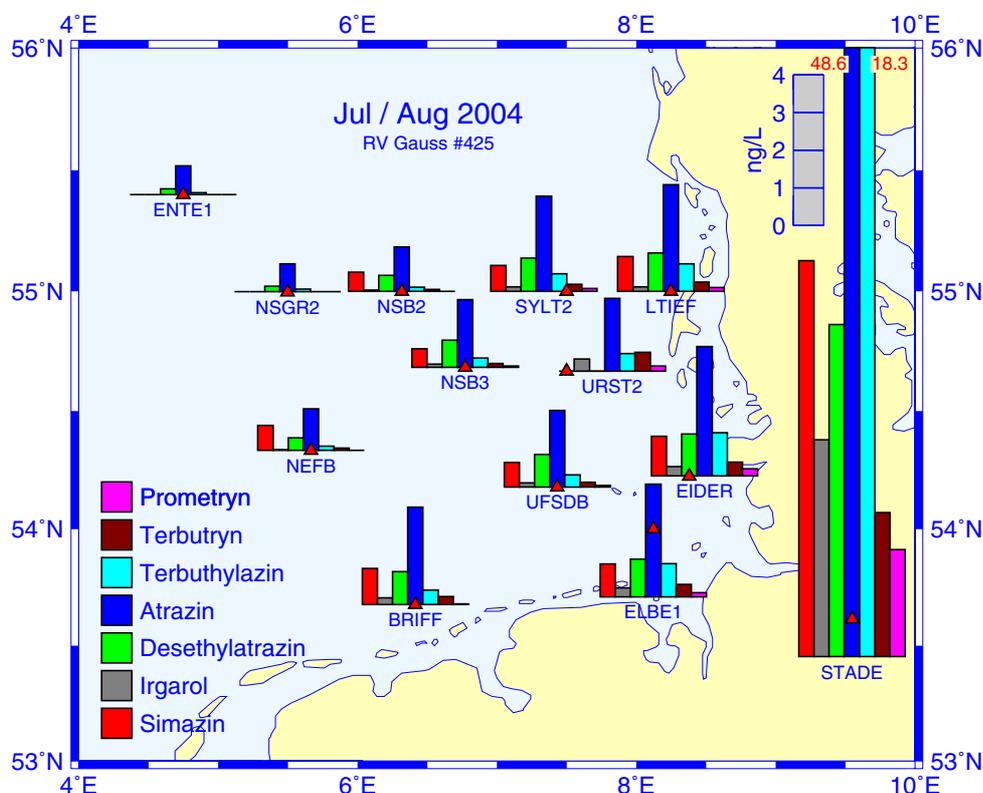


Abb. 4-33: Konzentrationen (ng/L) einiger Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Juli / August 2004.

Fig. 4-33: Concentrations (ng/L) of some triazine herbicides in near-surface sea water of the German Bight in July / August 2004.

Die Konzentrationsverteilungen für die vier wichtigsten Phenylharnstoff-Herbizide sind in Abb. 4-34, S. 169 dargestellt. Das grundsätzliche Verteilungsmuster ähnelt dem der Triazine stark; die absoluten Konzentrationen unterscheiden sich jedoch aufgrund anderer Eintragsmengen.

In Tab. 4-3 sind regionale Konzentrationsmittelwerte für die 21 im Juli / August 2004 am häufigsten nachgewiesene Herbizide zusammengefasst. In der Elbe variierten die

Konzentrationen zwischen 0.8 und 49 ng/L, in Küstengewässern zwischen < NWG (LoD) und 5 ng/L. In der offenen See waren bei den gegenwärtigen Bestimmungsgrenzen nur Diuron, Isoproturon, Atrazin (0.75 ng/L) und Terbutylazin (0.06 ng/L) 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.

<b>AUG 2004 ng/L</b>	<b>ELBE RIVER (STADE)</b>	<b>COASTAL WATERS</b>	<b>OPEN SEA</b>
<b>CHLORTOLURON</b>	3.98	0.97	< LoD
<b>DIURON<sup>†</sup></b>	35.14	5.02	0.37
<b>FENTHION</b>	0.00	< LoD	< LoD
<b>ISOPROTURON<sup>†</sup></b>	12.72	1.23	0.19
<b>LINURON</b>	1.35	< LoD	< LoD
<b>FENURON</b>	3.04	0.12	< LoD
<b>BENTAZON</b>	3.34	0.26	< LoD
<b>AMETRYN</b>	0.83	0.10	< LoD
<b>ATRAZIN<sup>†</sup></b>	48.60	2.96	0.75
<b>DESETHYLATRAZIN</b>	8.81	1.00	0.15
<b>HEXAZINON</b>	3.72	0.16	< LoD
<b>IRGAROL</b>	5.75	0.20	< LoD
<b>PROMETRYN</b>	2.84	0.11	< LoD
<b>PROPAZIN</b>	1.15	< LoD	< LoD
<b>SIMAZIN<sup>†</sup></b>	10.50	0.95	< LoD
<b>TERBUTHYLAZIN</b>	18.30	0.78	0.06
<b>TERBUTRYN</b>	3.82	0.29	< LoD
<b>2,4-D</b>	2.56	0.47	< LoD
<b>MCPA</b>	6.65	0.71	< LoD
<b>DICHLORPROP</b>	1.39	0.20	< LoD
<b>MECOPROP</b>	5.06	0.98	< LoD
<b>MEDIAN COLUMN</b>	3.82	0.29	< LoD
<b>TOTAL</b>	179.5	16.5	1.5

<sup>†</sup> Among priority organic contaminants according to the EC Water Framework Directive.

Tab. 4-3: Regional gemittelte Konzentrationen (ng/L) einiger polarer Pestizide in der Deutschen Bucht im August 2004. (LoD = Nachweisgrenze.)

Table 4-3: Regional average concentrations (ng/L) of some polar pesticides in the German Bight in August 2004. (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 4-6, S. 165*). 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. 4-3).

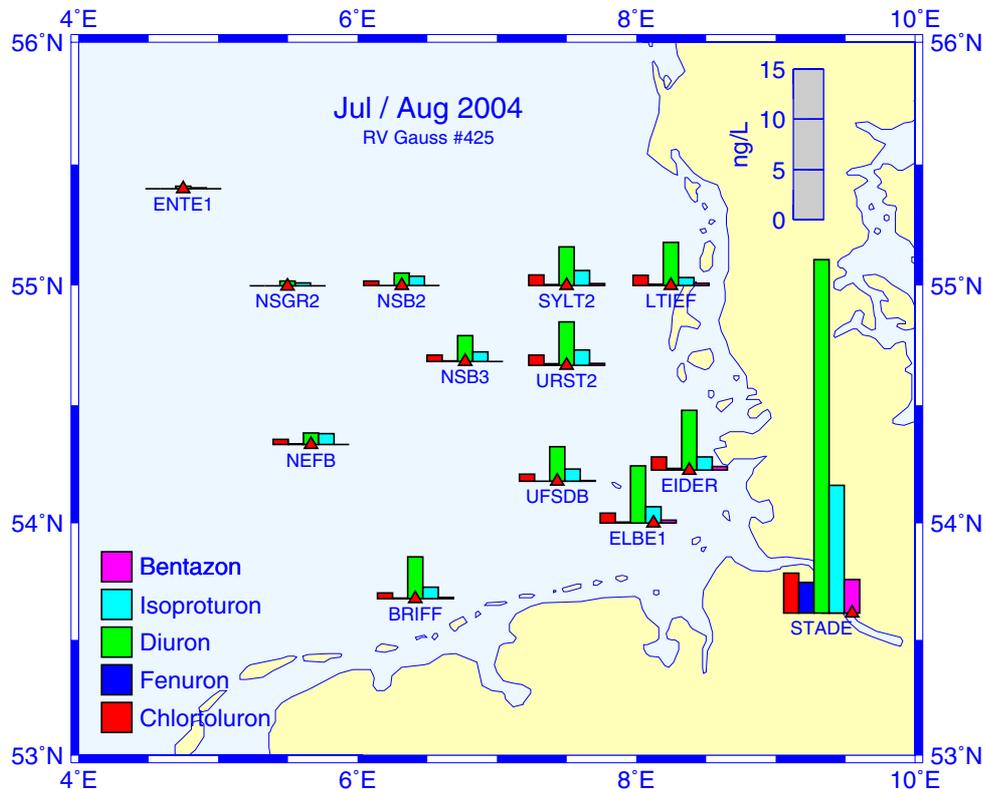


Abb. 4-34: Konzentrationen (ng/L) einiger Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Juli / August 2004.

Fig. 4-34: Concentrations (ng/L) of some phenylurea herbicides in near-surface sea water of the German Bight in July / August 2004.

#### 4.2.5.2 Zeitliche Variabilität der Herbizidgehalte

Pestizide werden meist sehr gezielt eingesetzt, so dass die Eintragsmengen und demzufolge die Konzentrationen des Wassers starken saisonalen Schwankungen unterliegen. In Abb. 4-35 ist beispielhaft der jahreszeitliche Konzentrationsverlauf im Jahr 2004 für einige Herbizide in der Elbe bei Stade (Mai bis Juli) bzw. Blankenese (Januar und ab September) wiedergegeben.

Die zeitliche Datendichte für die Deutsche Bucht ist verständlicherweise weitaus geringer, aber auch anhand der Ergebnisse der Überwachungsfahrten in Mai und Juli / August 2004 sind unterschiedliche Belastungen erkennbar. Die Konzentrationen der meisten Substanzen lagen im August auf fast allen Stationen über denen im Mai (Abb. 4-36, Verhältnisse > 1). Der größte Anstieg war für Terbutylazin zu beobachten (16fach in der Elbe), die größte Verringerung (auf ein Zehntel) fand sich für Bentazon. Die raumzeitlichen Variabilitäten der Substanzen sind sehr komplex und ein einfacher Zusammenhang zwischen den Konzentrationen in der Elbe bei Stade und in der Deutschen Bucht ist nicht immer gegeben. Mögliche Erklärungen sind Einträge aus dem landwirtschaftlich intensiv genutzten ›Alten Land‹ stromab von Stade, starke Schwankungen der Eintragsmengen und verzögerte Auswirkungen in der Deutschen Bucht aufgrund unterschiedlich langer Transportwege und -zeiten.

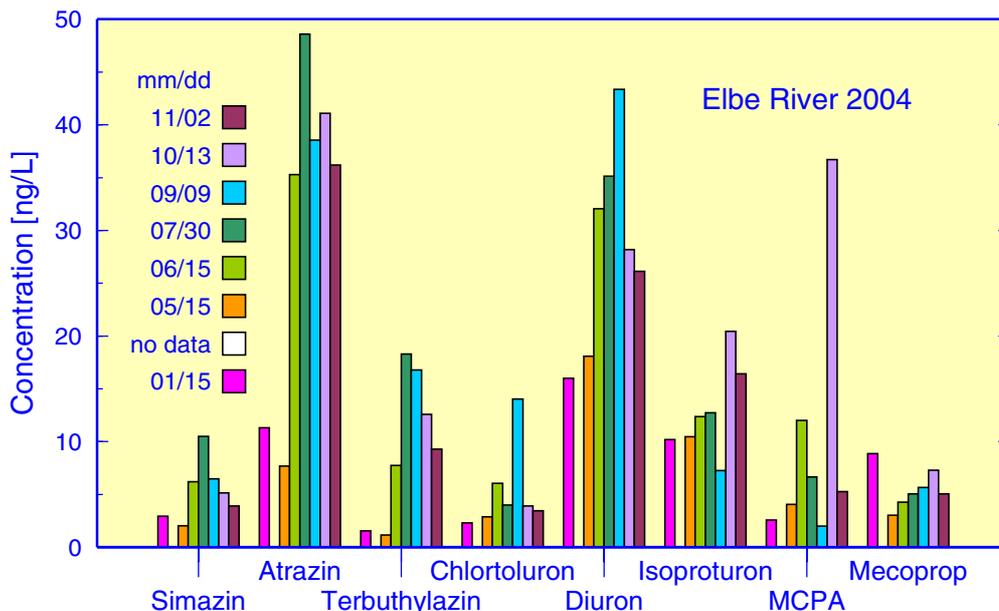


Abb. 4-35: Saisonale Entwicklung der Konzentrationen ausgewählter Pestizide in der Elbe im Jahr 2004 bei Stade (Mai bis Juli) bzw. Blankenese.

Fig. 4-35: Seasonal evolution in 2004 of selected pesticides in the Elbe River at Stade (May through July), respectively Blankenese.

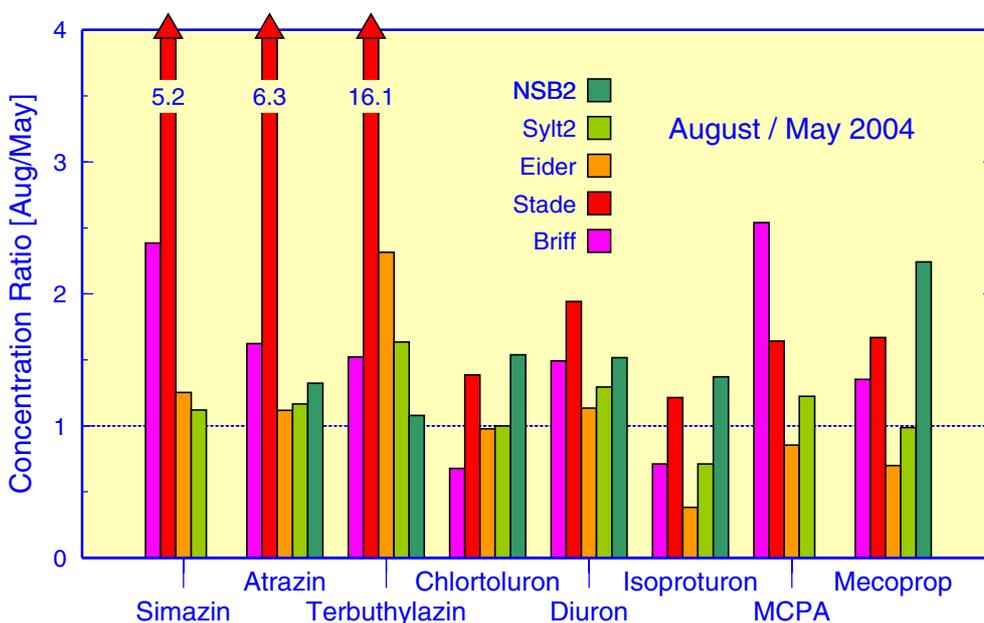


Abb. 4-36: Konzentrationsverhältnisse (Aug/Mai 2004) ausgewählter Pestizide in der Deutschen Bucht und bei Stade (Elbe). Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-34, S. 169.

Fig. 4-36: Concentration ratios (Aug/May 2004) of selected pesticides in the German Bight and at Stade (Elbe River). As to geographical positions cf. Fig. 4-34, p. 169.

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 2004 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.

#### 4.2.6 Zusammenfassung

Erwartungsgemäß ergaben sich auch im Jahr 2004 für die verschiedenen organischen Schadstoffe unterschiedliche räumliche Verteilungen und zeitliche Tendenzen. Dabei lassen sich die Konzentrationen des Meerwassers z. Zt. besser bewerten als die des Sediments. Für die meisten Schadstoffe ist die Elbe die Haupteintragsquelle für die Deutsche Bucht. Generell nehmen die Schadstoffgehalte mehr oder minder schnell von der Küste zur offenen See hin ab.

Außerhalb der Elbfahne sind die Konzentrationen von unpolaren Schadstoffen gewöhnlich sehr niedrig. Ein starker Konzentrationsabfall von der Küste zur offenen See zeichnete deshalb die räumlichen Verteilungen sowohl der sehr lipophilen chlorierten Kohlenwasserstoffe HCB, PCB und DDT, als auch der hochkondensierten PAK aus. Dabei waren die Konzentrationen stark von den Schwebstoffgehalten der Proben abhängig.

Durch die Verbesserung der Analysemethoden ist es in den letzten Jahren möglich geworden, eine Vielzahl polarer Schadstoffe zu erfassen. Hierbei zeigte sich, dass viele dieser Stoffe in weitaus höheren Konzentrationen vorkommen als die klassischen lipophilen Schadstoffe, so dass jene künftig stärker in die Überwachung einbezogen werden.

Für die meisten Chorkohlenwasserstoffe lassen sich aufgrund hoher Konzentrationschwankungen im Meerwasser und kurzer Beobachtungszeiten keine robusten Trends angeben. Die Konzentrationen der Hexachlorcyclohexan-Isomere  $\alpha$ - und  $\gamma$ -HCH sind hingegen im Zeitraum 1989 – 2004 exponentiell zurückgegangen. Die Gehalte an  $\alpha$ -HCH halbierten sich in der Deutschen Bucht alle 4 Jahre. Die  $\gamma$ -HCH-Gehalte hingegen gingen zunächst bis etwa 1998 ortsabhängig um nur 5 – 35 % zurück, während sie sich im anschließenden Zeitabschnitt im Überwachungsgebiet alle 2 Jahre halbierten. Sowohl für  $\alpha$ -, als auch  $\gamma$ -HCH liegen die Konzentrationen inzwischen weit unter 0.5 ng/L. Obgleich im Jahr 2004 für  $\alpha$ - und  $\beta$ -HCH in der Elbe bis zu 10fach höhere Konzentrationen gemessen wurden, setzte sich die Abnahme auf den meisten Stationen in der Deutschen Bucht fort. Im von der Elbfahne beeinflussten Seegebiet vor der nordfriesischen Küste wurde der langfristige Abwärtstrend allerdings unterbrochen.

Für die PCB- und DDT-Verbindungen der Chlorkohlenwasserstoffe wurden die Nachweisgrenzen erniedrigt, so dass sie inzwischen auch in der äußeren Deutschen Bucht in sehr geringen Konzentrationen nachweisbar waren. Die PAK-Gehalte des Meerwassers liegen im Wertebereich der vorangegangenen Jahre; ein zeitlicher Trend ist bisher nicht erkennbar.

Die Konzentrationen der polaren Pestizide unterlagen auch im Jahr 2004 recht starken jahreszeitlichen Schwankungen; da regelmäßige Analysen erst seit dem Jahr 2000 durchgeführt werden sind Zeittrends bislang nicht abschätzbar.

Obwohl lipophile Schadstoffe im Sediment in ca.  $10^4$ - bis  $10^6$ -fach höheren Konzentrationen als im Meerwasser vorkommen, lassen sich Quellenkorrelationen oder zeitliche Trends kaum feststellen. Der Bezug auf organischen Kohlenstoff (TOC) statt auf Trockenmasse ergibt nur zum Teil ein einfacher zu bewertendes Bild. Unter allen untersuchten Stoffen sind die Konzentrationsverteilungen der PCB die homogensten nach denen der PAK; beide Substanzklassen lagen – bezogen auf die Trockenmasse – in Ems, Weser und Elbe in ähnlichen Konzentrationen vor, die in der Deutschen Bucht abnahmen. Für die DDT-Gruppe und das HCB wurden in der Elbe weitaus höhere Konzentrationen gemessen als in Ems und Weser. Auch die Konzentrationen dieser Stoffe nahmen in der Deutschen Bucht ab, wenngleich die Gehalte auf einigen Stationen auf ähnlich hohem Niveau wie in Ems und Weser lagen. Die Konzentrationen aller untersuchten Verbindungen unterlagen im Sediment hohen Schwankungen, die sich auch bei Normalisierung der Konzentrationen auf TOC nicht hinreichend reduzieren ließen, so dass – auch wegen des kurzen Überwachungszeitraums von nur 9 Jahren – robuste Trends nicht festgestellt werden konnten.

## 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 aus natürlichen Prozessen resultieren, 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 innerhalb gewisser Konzentrationsgrenzen 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 gelangen z. T. erhebliche zusätzliche Mengen einzelner Elemente in die Umwelt, 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, Sediment und Biota (OSPAR 1998).

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 kontaminierter Süßwassermassen über die kontinentalen Flusssysteme, 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 Schlüsselprozess zur Entfernung der Metalle aus dem Meer gegenüber.

Im Detail unterscheidet sich 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 in die Überwachungsprogramme des Bund-Länder-Messprogramms (BLMP) und international in die Monitoringprogramme der Meeresschutzkonventionen für Nordsee (OSPAR) und Ostsee (HELCOM) eingebettet.

**Tafel 4-7: 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 Methylquecksilbers stufenweise um jeweils etwa 10 %. Bei höher entwickelten Lebewesen wie den marinen Säugetieren ist das Zentralnervensystem das anfälligste Organ für Belastungen durch Methylquecksilber. 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 Verlötlungen, 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 4-7: 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. Innerhalb dieses Berichtes ist der Fokus auf die ökotoxikologisch wichtigen Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink gerichtet. Zunächst werden die verwendeten Bewertungskriterien vorgestellt. Anschließend folgen separate Darstellungen der Metallbelastungssituation im Wasserkörper und im Sediment, die inhaltlich sowohl räumliche Muster, Belastungsschwerpunkte und -ursachen, als auch die zeitliche Entwicklung der Gehalte abdecken.

#### 4.3.2 Bewertungskriterien

Bezugspunkt zur Bewertung der im Untersuchungsgebiet beobachteten 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 unbeeinflussten Gebieten festgelegt. Metallhintergrundkonzentrationen im Sediment werden in der Regel für tiefere, ältere Schichten bestimmt (Kernproben).

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

<sup>†</sup> Holds for biologically available, non-complexed fraction (about 10 %) of total dissolved Cu.

Tab. 4-4: 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 4-4: 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 from the German Bight.

Grundlage der Bewertung der Wasserbelastung sind durch OSPAR für die Region ›Greater North Sea‹ festgelegte ›Background Reference Concentrations‹ (BRC) bzw. Hintergrundbelastungswerte. In *Tab. 4-4* sind die BRCs für gelöste Elementkonzentrationen gemeinsam mit den BSH-Sedimenthintergrundwerten für die Deutsche Bucht angegeben. Die Spannweiten der Sedimentkonzentrationen wurden aus der < 20 µm Korngrößenfraktion tiefer gelegener Schichten aus Sedimentkernen abgeleitet. Die auch für Sediment vorhandenen OSPAR-Hintergrundwerte wurden nicht herangezogen, da diese sowohl aus feinen Sedimenten, als auch der Feinkornfraktion abgeleitet (vgl. *Abschnitt 4.3.4.1, S. 181*) und darüber hinaus auf die Aluminiumkonzentration normiert wurden. Aluminium wurde jedoch im BSH-Monitoring nicht immer mitbestimmt, so dass eine vollständige Umrechnung der Messwerte nicht möglich ist.

### 4.3.3 Metallgehalte des Meerwassers

#### 4.3.3.1 Quellen, Senken und Prozesse

Große Flüsse wie Elbe, Weser, Ems, Rhein, Schelde, Themse und Humber tragen in beträchtlichem Umfang partikelgebundene und gelöste Metalle ins Küstenwasser der Nordsee ein. Austauschprozesse zwischen Wasserkörper, Sediment (Sedimentation, Resuspension) und Atmosphäre (Deposition, Verdampfung), aber auch chemische und biologische Umwandlungsprozesse sind hier, im Mischbereich von Meer- und Flusswasser, von erheblicher Intensität und beeinflussen das Gleichgewicht zwischen gelösten und partikelgebundenen Spurenstoffen entsprechend stark. Viele Elemente werden in den Flussästuaren effektiv zurückgehalten, manche beim Übergang ins Meer nahezu ausschließlich verdünnt, andere durch Desorption und Remineralisierung in der gelösten Phase angereichert. Der Meeresboden stellt die wichtigste Senke für Spurenmetalle im marinen Ökosystem dar (s. *Abschnitt 4.3.4, S. 180*).

Mit der allgemeinen zyklonalen Nordseezirkulation (s. *Abb. 3-1, S. 65*) mischen sich in der Deutschen Bucht Schadstofffrachten weiter westlich mündender Flusssysteme ein und bilden ein komplexes Stoffgemenge, in dem sich die Herkunft einzelner Stoffe nur schwer oder gar nicht zurückverfolgen lässt. Das Küstenwasser ist hier allerdings besonders durch die Metallfracht der Elbe beeinträchtigt, die sich gewöhnlich nord- und seewärts entlang der nordfriesischen Küste ausbreitet und verdünnt.

Neben Flussfrachten sind atmosphärische Einträge für einige Elemente von großer Bedeutung. Die Stärke des Eintragssignals nimmt ebenfalls mit zunehmender Entfernung von den Ballungszentren der Küste ab. Auch die Verklappung von Industrieabfällen und Klärschlämmen spielte in der Deutschen Bucht lange eine wichtige Rolle (vgl. *Abschnitt 4.3.4.3, S. 183*).

#### 4.3.3.2 Gelöste und partikuläre Metallgehalte

Metalle liegen im Wasserkörper gelöst und partikulär, d. h. an Schwebstoff gebunden vor. Der Metallgehalt des Meerwassers setzt sich deshalb additiv aus gelösten und partikelgebundenen Anteilen zusammen, welche sich nach Filtrieren der Wasserproben für das schwebstofffreie Filtrat und den Filtrerrückstand bestimmen lassen. Die relative Anteil der gelösten Fraktion am Gesamtmetallgehalt ist in *Abb. 4-37* als Boxstatistik<sup>1</sup> für eine Auswahl von Spurenmetallen zusammengefasst. Die Ergebnisse, denen Proben mit Salzgehalten  $\geq 32$  aus dem Zeitraum 1999 – 2004 zugrunde liegen, zeigen die Verhältnisse im küstenfernen Meerwasser der Deutschen Bucht (vgl.

Abb. 4-4, S. 124 für charakteristische Salzgehaltsverteilungsmuster). Die unterschiedliche Affinität der Metalle zum Schwebstoff ist klar erkennbar. Während Zink, Nickel, Kupfer und Cadmium zu über 80 % gelöst vorliegen, treten Eisen, Blei und Mangan hier vornehmlich partikelgebunden auf.

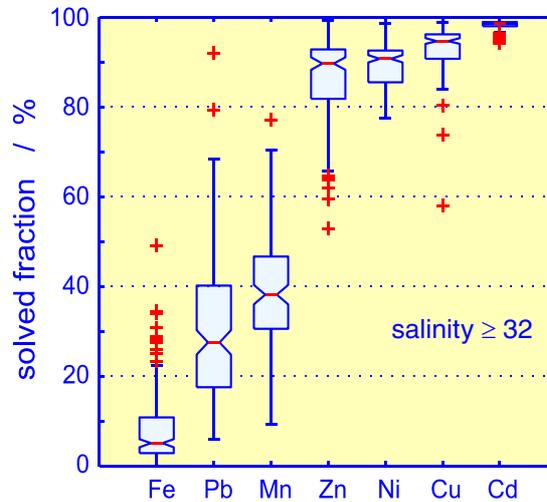


Abb. 4-37: Relativer Anteil der gelösten Gehaltsfraktion am Gesamtmetallgehalt für küstenfernes Meerwasser der Deutschen Bucht. Der Boxstatistik (s. Fußnote, S. 177) liegen »Winterproben« aus dem Zeitraum 1999 – 2004 zugrunde.

Fig. 4-37: Ratio of dissolved to total metal concentration (%) for sea water in the German Bight proper. Boxstatistics are based on winter samples from 1999 – 2004.

Die getrennte Betrachtung der Metallgehalte in Schwebstoff und Filtrat ist notwendig, um Wasserkörper mit unterschiedlichem Schwebstoffgehalt vergleichen zu können. Denn insbesondere für Elemente mit hoher Schwebstoffaffinität bilden sich in den räumlichen Verteilungen der Gesamtmetallgehalte lediglich die Muster der Schwebstoffgehalte ab. Rückschlüsse auf Quellstruktur und Hotspots wären auf Basis der Gesamtgehalte erheblich erschwert.

#### 4.3.3.3 Metallgehalte im Jahr 2004

Zur Reduktion des biologisch bedingten »Rauschens« in den beobachteten Elementkonzentrationen wurden für die nachstehenden weitergehenden Analysen nur Meerwasserproben aus der kühlen Jahreszeit (November bis März) herangezogen.

Die Bedeutung der Süßwasserzuflüsse als Belastungsquelle zeigt sich in den räumlichen Konzentrationsverteilungen der Elemente Blei, Cadmium, Kupfer, Quecksilber und Zink. Die typischen Verteilungsmuster im Bereich des deutschen Festlandssockels sind in Abb. 4-38 für den gelösten Zink- und Cadmiumgehalt im Februar 2004 dargestellt.

Im Bereich der Abflussfahne der Elbe, die sich von der Elbmündung nordwärts entlang der nordfriesischen Küste erstreckt, überschritten die Cadmiumkonzentrationen in

1. Die Boxstatistik bietet eine kompakte Zusammenfassung wichtiger Verteilungskennzahlen. Das Boxsymbol bildet den Median (zentrale rote Linie,  $P_{50}$ ) mit 98 % Vertrauensbereich (Einschnürung der Box), den durch Unter- und Oberkante der Box begrenzten Interquartilbereich ( $P_{25}$  –  $P_{75}$ ) sowie die Extremwerte der Messreihe (Ausleger) ab. Messwerte, die einen Abstand von 1.5 Interquartilbreiten zu den Interquartilgrenzen überschreiten, sind durch Kreuze als Ausreißer kenntlich gemacht.

Küstennähe 30 ng/L, nahmen jedoch weiter seewärts schnell ab. Die Zinkverteilung zeigt hier qualitativ ähnliche Konzentrationsgradienten. Darüber hinaus ist ein lokales Maximum nördlich des Dollarts gut sichtbar, das sich bereits im Januar abzeichnete und einen hohen Zinkeintrag über die Ems anzeigt (Abb. 4-38).

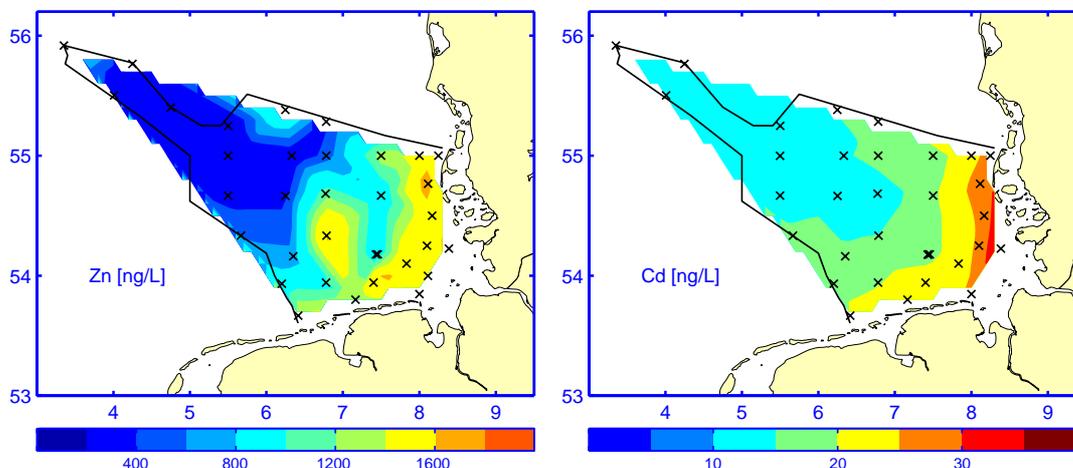


Abb. 4-38: Räumliche Verteilungen des Zink- und Cadmiumgehalts im filtrierten Oberflächenwasser im Februar 2004. Die Probenahmestationen sind durch Kreuze gekennzeichnet.

Fig. 4-38: Spatial distributions of zinc and cadmium concentration in filtrated near-surface sea water in February 2004. Crosses indicate sampling sites.

Im küsternen Oberflächenwasser mit Salzgehalten über 34 (vgl. Abb. 3-28, S. 106) lagen die Cadmiumkonzentrationen im Winter 2004 im Hintergrundbereich (vgl. Tab. 4-4, S. 175), die von Blei und Zink leicht darüber. Auch der Kupfergehalt, für den sich ein Median von 342 ng/L ergab (Tab. 4-5), lag innerhalb natürlicher Grenzen, wenn der Umstand berücksichtigt wird, dass diese lediglich für den nicht komplexierten, biologisch verfügbaren Anteil der etwa 10fach höheren gelösten Kupferfraktion gelten. Im Küstenwasser ( $28 < s < 30$ ) überschritten die Cadmium- und Zinkgehalte die Hintergrundwerte deutlich. Die Hälfte der Bleigehaltsmessungen lag im Hintergrundbereich, während der berücksichtigungsfähige, nicht komplexierte Anteil von ca. 10 % des gelösten Kupfers unter der natürlichen Obergrenze von 90 ng/L blieb.

ELEMENT	SAMPLES	PERCENTILE			SALINITY
		25%	50%	75%	
<b>Cd</b>	7	29	32	32	28 – 30
<b>Cu</b>	6	701	743	764	
<b>Pb</b>	7	15	20	97	
<b>Zn</b>	8	1626	1705	1863	
<b>Cd</b>	36	12	16	18	≥ 34
<b>Cu</b>	36	187	342	382	
<b>Pb</b>	36	26	33	49	
<b>Zn</b>	36	344	479	721	

Tab. 4-5: Elementkonzentrationen im filtrierten Meerwasser der Deutschen Bucht im Jan / Feb 2004. Proben nach Salzgehalt stratifiziert, Konzentrationen in ng/L.

Table 4-5: Dissolved metal concentrations in the German Bight in Jan / Feb 2004. Samples stratified as to salinity, concentrations in ng/L.

## 4.3.3.4 Zeitliche Entwicklung

Die Elementkonzentrationen im filtrierten Oberflächenwasser zeigten im gesamten Gebiet der Deutschen AWZ im Vergleich zu den Vorjahren keine außergewöhnlichen Veränderungen. Die Blei- und Kupfergehalte waren gegenüber 2003 leicht erhöht. Die im Winter 2002 im Küstenwasser festgestellte außergewöhnlich hohe Bleikonzentration wurde jedoch nicht wieder erreicht (Abb. 4-39, oben). Ursache für die extreme Blei-

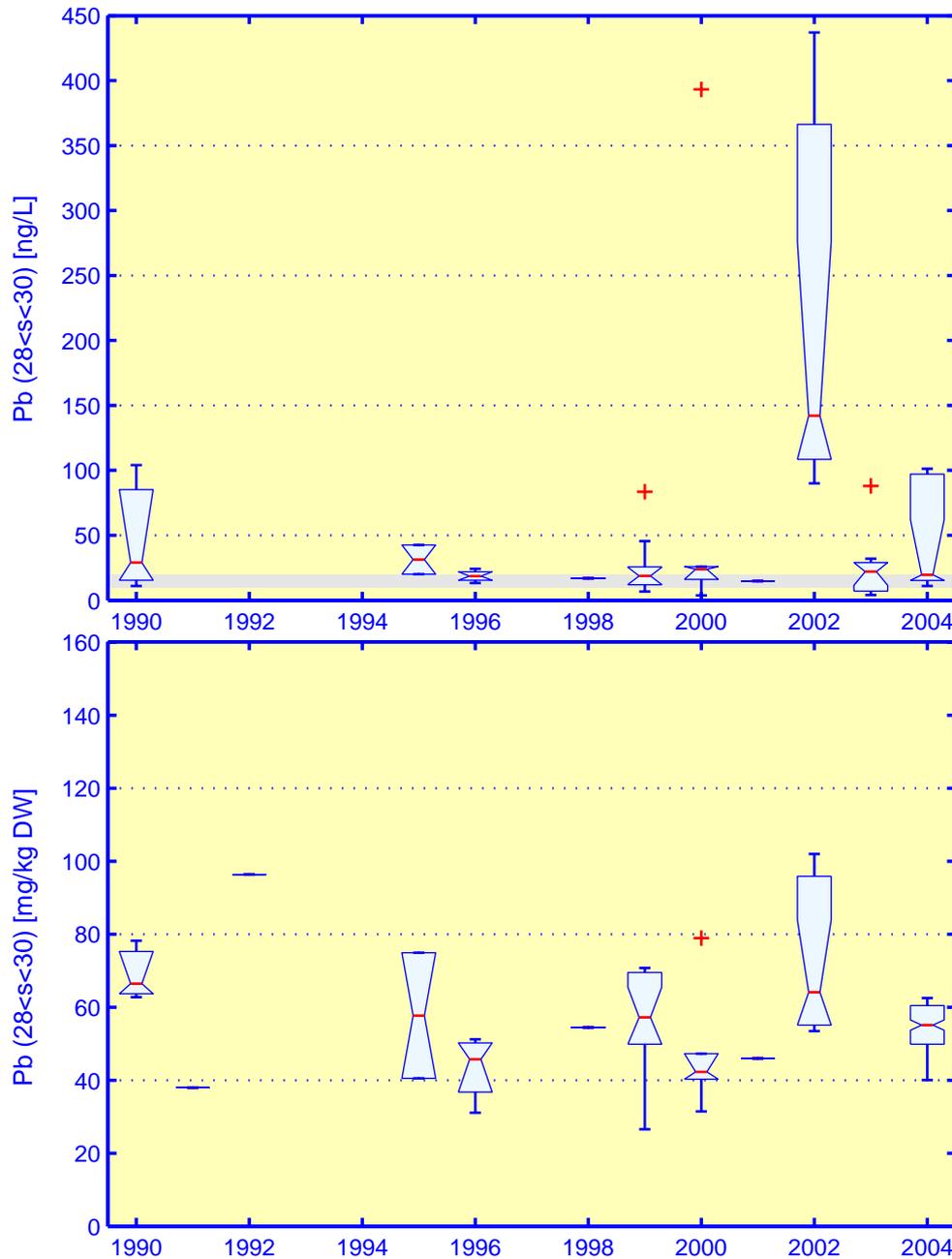


Abb. 4-39: Bleigehalt im küstennahen Oberflächenwasser der Deutschen Bucht ( $28 < \text{Salzgehalt} < 30$ ) für gelöste (oben) und partikelgebundene (unten, bezogen auf Trockenmasse) Fraktion.

Fig. 4-39: Lead concentration in coastal near-surface sea water of the German Bight ( $28 < \text{salinity} < 30$ ) for dissolved (top) and particulate (bottom) dry weight fraction.

belastung war vermutlich kolloidal gebundenes Blei, das bei der Filtration nicht zurückgehalten wird. Die betroffenen Proben wurden während einer Messkampagne im Februar gewonnen, der sich durch eine ungewöhnliche Häufung von Sturmweatherlagen auszeichnete (LOEWE ET AL. 2005, TAB. 2.3). Im flachen Wasser ist unter diesen Bedingungen eine verstärkte Resuspension von Sediment und erhöhte Partikelfracht wahrscheinlich. Eine gleichzeitig hohe Eisenkonzentration sowie der erhöhte Bleigehalt im Schwebstoff (Abb. 4-39, unten) unterstützen diese Hypothese.

Die zeitliche Entwicklung der im küstenfernen Bereich gemessenen Elementgehalte ist weitgehend von derjenigen unter Land entkoppelt. Im Küstenwasser ist diese Entwicklung vor allem von Variationen in der Metallfracht der großen Flüsse und der Dynamik in den Flussästuaren geprägt. Auf hoher See sind hingegen die großräumige Zirkulation der Nordsee und Austauschprozesse mit der Atmosphäre und dem Sediment dominante Faktoren für Veränderungen der Metallgehalte. Hier wurden für die überwiegend gelöst vorliegenden Elemente nicht nur geringere Konzentrationen gemessen, sondern auch deutlich andere zeitliche Entwicklungen als im Küstenwasser beobachtet. Exemplarisch ist in Abb. 4-40 die Zeitreihe der Cadmiumkonzentration im filtrierten Meerwasser bei hohen Salzgehalten über 34 dargestellt. Die Gehalte variierten sämtlich im grauen Hintergrundbereich, waren Anfang der 1990er Jahre maximal und erreichten im Jahr 2001 ein Minimum. Im Jahr 2004 lagen die Konzentrationen auf dem mittleren Niveau von 1995.

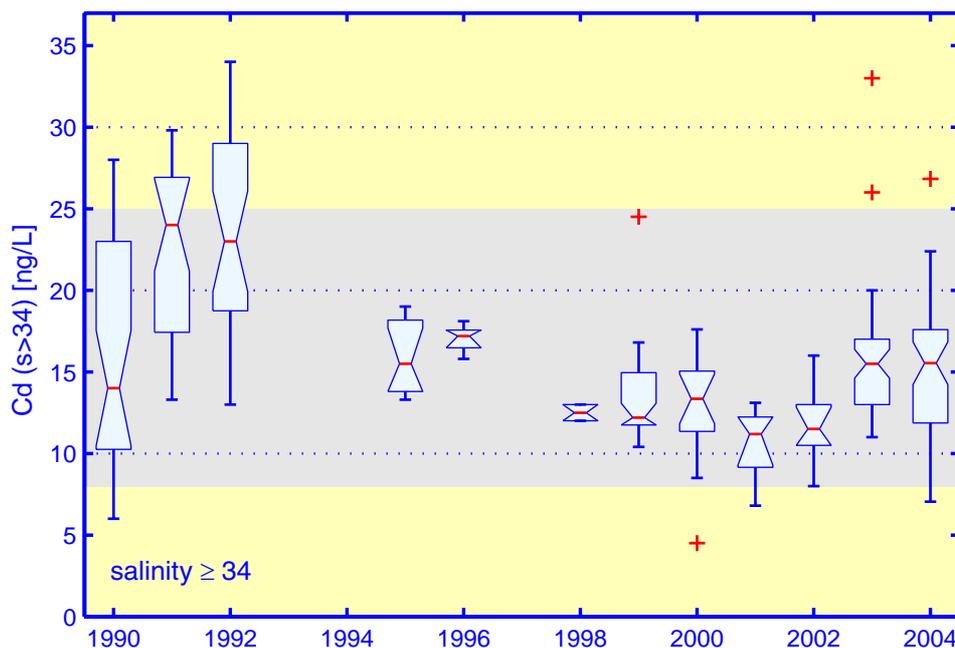


Abb. 4-40: Cadmiumgehalt im Winter im filtrierten oberflächennahen Meerwasser der Deutschen Bucht bei Salzgehalten über 34.

Fig. 4-40: Cadmium concentrations in winter in filtrated near-surface sea water from the German Bight. Only samples with an associated salinity above 34 were used.

#### 4.3.4 Metallgehalte des Sediments

Der Meeresboden stellt die wichtigste Senke für Spurenmetalle im marinen Ökosystem dar. Er kann jedoch auch als systeminterne Belastungsquelle wirksam sein (vgl. S. 191), was hohe Gehalte im Wasserkörper trotz reduzierter externer Metalleinträge

möglich macht. Die Funktion des Meeresbodens ist u. a. von Stromstärke, Turbulenz, Bathymetrie und den Eigenschaften des Sediments selbst abhängig und darum raumzeitlich wenig bestimmt. Die unterschiedliche Zusammensetzung und Beschaffenheit der Sedimente erschwert die Vergleichbarkeit und Interpretation raumzeitlicher Entwicklungen in der Metallbelastung weiter. Bedingt Abhilfe schaffen einheitliche Bezugsgrößen, wie sie der hier verwendete Feinkornanteil des Sediments darstellt.

#### 4.3.4.1 Merkmale des Feinkornanteils

Die vorwiegend an Schwebstoff gebundenen Elemente sedimentieren in der Nordsee in relativ eng umgrenzten Gebieten. Physikalisch zeichnen sich diese Regionen vor allem durch einen geringen Eintrag kinetischer Energie aus; einmal sedimentierte Teilchen zeigen hier nur geringe Neigung zur Resuspension. Das wichtigste Sedimentakkumulationsgebiet der Nordsee befindet sich im tieferen Teil des Skagerrak und in der norwegischen Rinne. 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 %. Weite Teile des Meeresbodens der Nordsee sind hingegen mit Sanden bedeckt und zeichnen sich durch geringe Feinkornanteile im Sediment aus. In diesen als dispersiv geltenden Gebieten findet keine Nettosedimentation statt. Abb. 4-41 zeigt Ergebnisse von Korngrößenanalysen, die an auf dem Deutschen Festlandsockel entnommenen Sediment-

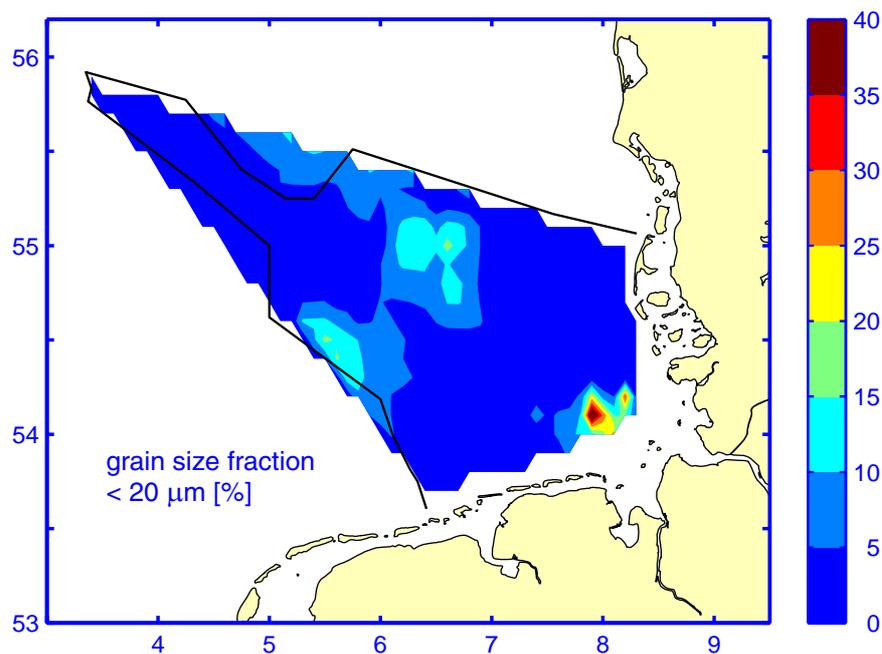


Abb. 4-41: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion ( $< 20 \mu\text{m}$ ) am Gesamtsediment im Zeitraum 1995 – 2004.

Fig. 4-41: Mean spatial distribution of relative grain size fraction ( $< 20 \mu\text{m}$ ) as compiled from surface sediment samples from the period 1995 – 2004.

proben aus dem Zeitraum 1995 bis 2004 vorgenommen wurden. Die schlickigen bzw. feinsandigen Gebiete in der inneren Deutschen Bucht und auf der Weißen Bank treten durch einen hohen Feinkornanteil deutlich hervor.

Die grobe Sandfraktion des Sediments besteht vor allem aus Silikaten. Wegen ihrer chemischen Beschaffenheit und infolge ihrer relativ kleinen Oberfläche zeigt diese Fraktion nur eine geringe Affinität zur Adsorption von Spurenmetallen. Die Feinkornfraktion setzt sich hingegen vor allem aus Tonmineralen und organischem Material zusammen, enthält aber auch Eisen(III)-oxid-hydrate, Mangan(IV)-oxid-hydrate und Eisen(II)-sulfide, die zur effizienten Anreicherung vieler Spurenelemente in der Feinkornfraktion beitragen. Um die Metallbelastung in dispersiven und Akkumulationsgebieten vergleichen zu können, werden die Elementgehalte entweder auf den Feinkornanteil standardisiert oder direkt in der Korngrößenfraktion  $< 20 \mu\text{m}$  bestimmt. Auf diese Weise wird die Verdünnung der Elementgehalte 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. Wird kein anderer Bezug explizit angegeben, beziehen sich die nachfolgend diskutierten Elementkonzentrationen ausschließlich auf die Gehalte in der Feinkornfraktion.

#### 4.3.4.2 Metallgehalte im Jahr 2004 (Trendmonitoringgebiete)

Die mittleren Quecksilber, Zink und Bleigehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensedimentes lagen im Jahr 2004 in der gesamten deutschen AWZ um das 3- bis 5fache und damit erheblich über den Hintergrundwerten (s. Tab. 4-4, S. 175). Zur räumlichen Differenzierung dieses Ergebnisses wurden die Trendüberwachungsstationen 6 Gebieten zugeordnet und die dort gemessenen Metallgehalte entsprechend gruppiert (Abb. 4-42). Für eine Auswahl von Elementen sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Gehalte in Tab. 4-6 angegeben. Mit Ausnahme der Quecksilbergehalte traten

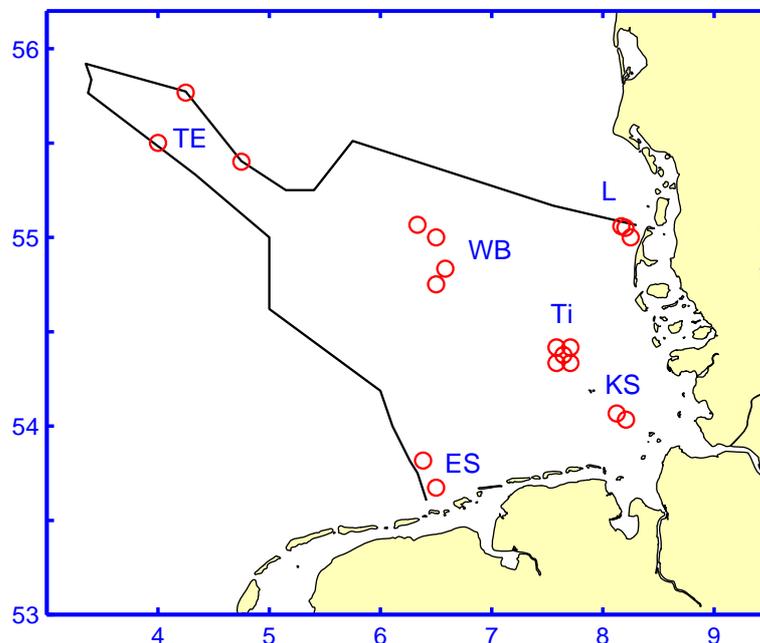


Abb. 4-42: Weiskarte der Sedimentstationen zur Trendüberwachung.

Fig. 4-42: Location map of sediment stations used in trend monitoring.

die niedrigsten mittleren Konzentrationen im Bereich der weißen Bank auf. Der mittlere Cadmiumgehalt lag hier mit  $0.20 \text{ mg/kg}$  im Hintergrundbereich von  $0.08 - 0.24 \text{ mg/kg}$ , besonders in Küstennähe jedoch weiterhin erheblich darüber. Lediglich die Kupferge-

halte befanden sich im gesamten Untersuchungsgebiet im Hintergrundbereich oder nur wenig darüber.

Belastungsursachen werden im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

2004	ES	KS	TI	L	WB	TE
<i>f20</i>	0.8 ± 0.2	27.9 ± 16.0	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.1	6.1 ± 5.5	0.2
<i>Ag</i>	0.29 ± 0.12	0.46 ± 0.15	0.26 ± 0.07	0.26 ± 0.02	0.19 ± 0.05	0.30
<i>As</i>	36 ± 5	28 ± 4	91 ± 44	64 ± 9	27 ± 4	77
<i>Cd</i>	0.80 ± 0.30	0.68 ± 0.18	0.67 ± 0.37	1.36 ± 0.10	0.20 ± 0.08	0.55
<i>Cu</i>	24 ± 8	24 ± 4	28 ± 3	32 ± 5	22 ± 2	34
<i>Fe</i>	5.1 ± 0.5	4.0 ± 0.4	9.5 ± 3.2	8.9 ± 0.9	4.7 ± 0.3	6.2
<i>Hg</i>	0.17	0.53 ± 0.20	0.23	0.28	0.14 ± 0.01	0.06
<i>Ni</i>	45 ± 6	37 ± 4	49 ± 3	48 ± 1	49 ± 2	59
<i>Pb</i>	107 ± 31	75 ± 12	182 ± 25	163 ± 16	72 ± 1	217
<i>Zn</i>	310 ± 94	222 ± 35	727 ± 253	715 ± 76	160 ± 17	./.

Tab. 4-6: Feinkornanteile (*f20*) und Metallgehalte des Oberflächensediments in Trendüberwachungsgebieten der Deutschen Bucht im Jahr 2004. Mittelwerte mit Standardabweichungen in mg/kg, Eisen und Feinkornanteil in %. Zur Lage der Gebiete vgl. Abb. 4-42, S. 182.

Table 4-6: Fine grain fractions (*f20*) and metal concentrations in surface sediments from trendmonitoring areas in the German Bight in 2004. Means and standard deviations in mg/kg, except iron and fine grain fraction (%). For a location map cf. Fig. 4-42, p. 182.

#### 4.3.4.3 Räumliche Verteilung und Belastungsschwerpunkte

In größeren Abständen, zuletzt in den Jahren 1995 und 2000, werden über das Standardmessprogramm zur Bestimmung zeitlicher Trends hinausgehende Beprobungen des Deutschen Festlandssockels durchgeführt. Die räumliche Auflösung des umfangreicheren Stationsnetzes ist hinreichend fein für Flächendarstellungen der in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments bestimmten Metallgehalte, so dass ein klares Bild über Belastungsschwerpunkte und -ursachen in der Deutschen Bucht entsteht.

##### a) Dünnsäureverklappungsgebiet ›Ti‹

Einer der deutlichsten, bis heute sichtbaren Effekte wurde durch die Verklappung von Dünnsäure im Seegebiet nordwestlich von Helgoland verursacht, die bereits 1989 eingestellt wurde. Dünnsäure ist eine Bezeichnung für verdünnte Schwefelsäure, die bei der Titandioxidproduktion anfällt und u. a. mit Eisen erheblich verunreinigt ist (BSH 1991). Die während der Gesamtaufnahme im Februar 2000 bestimmten Eisengehalte des Oberflächensediments (0 – 2 cm) sind in Abb. 4-43 (links) als räumliche Verteilung dargestellt. Klar erkennbar ist die gegenüber der Umgebung erhöhte Eisenkonzentration im ehemaligen Verklappungsgebiet (›Ti‹, s. Abb. 4-42, S. 182). Auch die Elemente Zink, Blei und Arsen sind hier auffällig angereichert (vgl. Tab. 4-6). Während sich die deutlich erhöhte Eisenbelastung direkt auf den Eintrag von Dünnsäure zurückführen lässt, ist die Anreicherung der anderen Elemente eher durch Sekundäreffekte wie Ko-Präzipitation mit Eisenoxidhydraten bedingt.

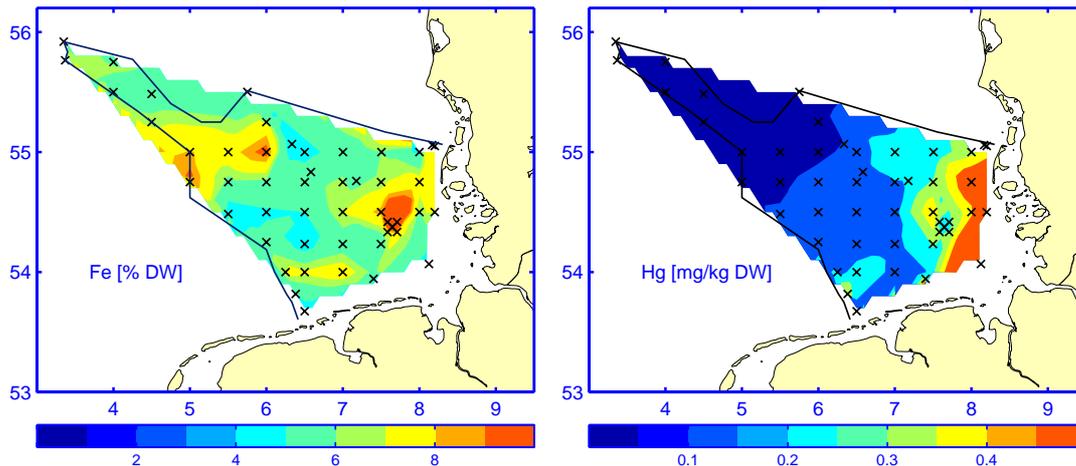


Abb. 4-43: Räumliche Verteilungen des Eisen- und Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion (< 20 µm) des Oberflächensediments im Februar 2000.

Fig. 4-43: Spatial distributions of iron and mercury content in the fine grain fraction (< 20 µm) of surface sediments in February 2000.

#### b) Flussfracht und Klärschlammverklappung im Gebiet ›KS‹

Anders als die o. g. Elemente zeigen Quecksilber, aber auch Silber, Cadmium und Kupfer keine von den angrenzenden Gebieten unterscheidbare Anreicherung im Dünnsäureverklappungsgebiet. Quecksilber und Silber sind stattdessen vor allem im Bereich der Elbemündung und entlang der schleswig-holsteinischen Küste angereichert. Die räumlichen Verteilungen dieser Elemente werden hier vom nordwärts gerichteten Elbeausstrom stark geprägt, was Abb. 4-43 (rechts) exemplarisch für Quecksilber belegt.

Im unter direktem Einfluss der Elbe stehenden Schlickfallgebiet südöstlich Helgolands (›KS‹, Abb. 4-42, S. 182) wurde bis 1983 Klärschlamm verklappt. Hier ergaben sich für den Zeitraum 1999 – 2004 die nachfolgenden mittleren Metallgehalte ( $\pm$  Standardabweichung) im Oberflächensediment: Quecksilber ( $0.59 \pm 0.20$ ), Silber ( $0.44 \pm 0.14$ ), Cadmium ( $0.78 \pm 0.28$ ), Kupfer  $26.7 \pm 3.8$ ), Blei ( $84 \pm 14$ ), Zink ( $343 \pm 45$ ), Eisen ( $4.3 \pm 0.5$ ); Angaben in mg/kg, Eisen in %. Eine auf die über 20 Jahre zurückliegende Verklappungsaktivität hinweisende Charakteristik der Metallgehalte ist im Oberflächensediment nicht mehr feststellbar. Die Metallbelastung ist hier eindeutig von der Elbefracht dominiert.

#### c) Mittlere und äußere Deutsche Bucht, ›WB‹ und ›TE‹

Die geringsten Schwermetallgehalte wurden im mittleren Teil der Deutschen Bucht festgestellt. Im Gebiet der Weißen Bank (›WB‹, Abb. 4-42) ergaben sich für den Zeitraum 1999 – 2004 die nachfolgenden mittleren Metallgehalte ( $\pm$  Standardabweichung) im Oberflächensediment: Quecksilber ( $0.16 \pm 0.02$ ), Blei ( $74 \pm 14$ ), Cadmium ( $0.16 \pm 0.06$ ), Kupfer ( $21 \pm 2$ ), Zink ( $157 \pm 32$ ); Angaben in mg/kg.

Am äußeren Ende der deutschen AWZ, wo Ausläufer der Dogger Bank in das Untersuchungsgebiet hineinreichen (›TE‹, Abb. 4-42), sind die Gehalte einiger Elemente wieder stärker im Oberflächensediment angereichert. Dies betrifft vor allem das Element Blei, aber auch Chrom. Exemplarisch zeigt Abb. 4-44 die räumliche Verteilung des Bleis im Oberflächensediment im Februar 2000. Die Ursachen für dieses charak-

teristische Muster sind noch unbekannt. Bei der Interpretation der Daten ist unbedingt zu berücksichtigen, dass die hohen Gehalte in einem Gebiet mit sehr geringem Feinkornanteil im Sediment gemessen wurden (vgl. Tab. 4-6, S. 183). Bezogen auf das Gesamtsediment ergeben sich deutlich geringere Konzentrationen.

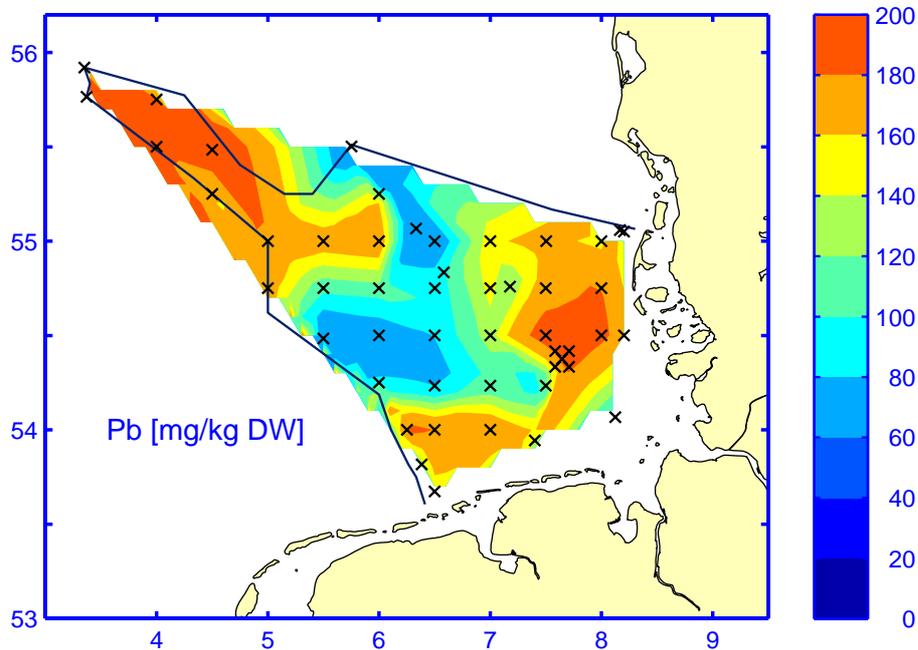


Abb. 4-44: Räumliche Verteilung des Bleigehalts in der Feinkornfraktion ( $< 20 \mu\text{m}$ ) des Oberflächensediments im Februar 2000.

Fig. 4-44: Spatial distribution of mercury content in the fine grain fraction ( $< 20 \mu\text{m}$ ) of surface sediments in February 2000.

#### 4.3.4.4 Zeitliche Entwicklung

Die Schwermetallbelastung im Oberflächensediment der AWZ war in den vergangenen 30 Jahren insgesamt rückläufig, stagniert jedoch seit etwa 10 Jahren. Dies gilt besonders für die küstennahen, durch Flussfrachten stark beeinträchtigten Gebiete. Seit 1999 wurden allerdings teilweise wieder deutlich höhere Konzentrationen auf den Stationen im Schlickfallgebiet südöstlich Helgolands ( $\text{KS}$ , Abb. 4-42, S. 182) gemessen. Die zeitliche Entwicklung des Quecksilbergehalts in diesem Gebiet wird in Abb. 4-45 durch jährliche Boxstatistiken (s. Fußnote, S. 177) für den Zeitraum 1976 – 2004 veranschaulicht. Die Konzentrationen lagen zu jeder Zeit erheblich oberhalb des grau hervorgehobenen Hintergrundintervalls. Während die Mediankonzentration, außer im Jahr 1999, in den letzten Jahren durchaus im Schwankungsbereich der 1990er liegt, ist eine erhebliche Zunahme der Streuung, die vor allem in den Jahren 1999, 2000 und 2004 hervortritt, unübersehbar. Ein ähnliches, wenn auch schwächeres Signal wurde auch für Blei, Kupfer und Zink nachgewiesen. Darüber hinaus war der beobachtete Effekt nicht regional begrenzt. Auch in den nördlicheren, küstennahen Trendüberwachungsgebieten (vgl. Abb. 4-42, S. 182) wurden im gleichen Zeitraum erhöhte Konzentrationen gemessen. Eine weitergehende Betrachtung dieses Phänomens ist in LOEWE ET AL. (2005) enthalten.

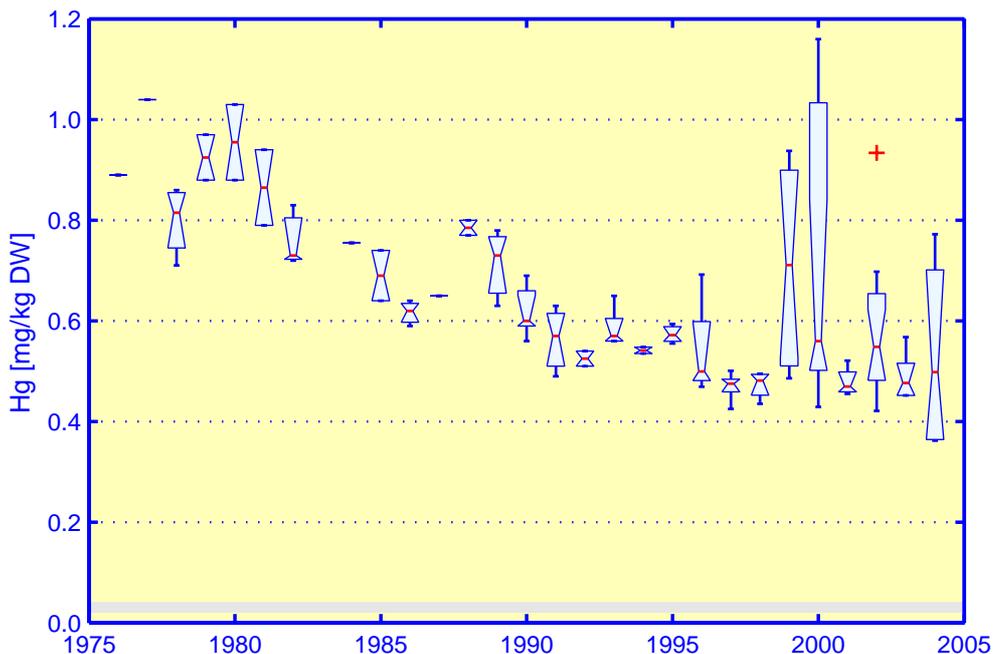


Abb. 4-45: Quecksilbergehalt in der Feinkornfraktion ( $< 20 \mu\text{m}$ ) des Oberflächensediments südöstlich Helgolands (KS, vgl. Abb. 4-42, S. 182).

Fig. 4-45: Mercury content in the fine grain fraction ( $< 20 \mu\text{m}$ ) of surface sediments southeast of Helgoland (KS, cf. Fig. 4-42, p. 182).

### 4.3.5 Zusammenfassung

Die räumlichen Konzentrationsverteilungen der Elemente Quecksilber, Cadmium, Blei, Kupfer und Zink zeigen im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht ähnliche Muster. Die Gehalte nehmen von der Küste zur offenen See hin deutlich ab. Belastungsschwerpunkte sind die innere Deutsche Bucht und das Elbeästuar, aber auch in den Mündungsgebieten von Weser und Ems wurden erhöhte Konzentrationen nachgewiesen.

Die Konzentrationen der Elemente Cadmium, Blei und Zink im filtrierten Wasser und Quecksilber im unfiltrierten Wasser waren bis etwa 1990 rückläufig, stagnieren jedoch seither. Im Jahr 2004 lagen die im filtrierten Meerwasser der äußeren Deutschen Bucht gemessenen Konzentrationen der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei und Zink im Bereich der Hintergrundkonzentrationen oder wenig darüber. In Küstennähe wurden die oberen Hintergrundwerte von Zink und Cadmium deutlich überschritten. Nach heutigem Kenntnisstand geht von den gemessenen Metallbelastungen des Meerwassers keine unmittelbare Gefahr für das marine Ökosystem aus.

In regional begrenzten Gebieten der Deutschen Bucht waren einige Elemente im Oberflächensediment immer noch deutlich über den Hintergrundkonzentrationen angereichert, obwohl der Eintrag von Schwermetallen durch verbesserte Abgas- und Abwasserreinigung und Optimierung von Produktionsprozessen abgenommen hat. Die Metallfrachten der Flüsse werden vorzugsweise im küstennahen Sediment angereichert. Vor allem die Gehalte der Elemente Quecksilber, Silber, Zink, Cadmium, Blei und Kupfer zeigen eine entsprechende räumliche Struktur mit deutlich erhöhten Gehalten in Küstennähe und abnehmenden Gradienten zur offenen See hin. Silber und Quecksilber sind entlang der nordfriesischen Küste besonders stark angereichert, was

auf die Elbe als Belastungsquelle hinweist. Abweichend von den übrigen genannten Elementen kommt Blei auch im äußeren Teil der Deutschen Bucht in erhöhten Konzentrationen vor. Die Gehalte der Elemente Quecksilber, Zink und Blei liegen im gesamten Untersuchungsgebiet, die von Cadmium und Kupfer vor allem in Küstennähe oberhalb der Hintergrundintervalle.

Seit Beginn der regelmäßigen Überwachung in den 1970er Jahren sind vor allem die Quecksilber-, Kupfer-, Cadmium- und Nickelgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments zurückgegangen; dieser Trend zeigt sich im küstennahen Bereich besonders deutlich. Für die Zinkgehalte lässt sich nur hier und insbesondere vor der niedersächsischen Küste eine abnehmende Tendenz feststellen, während die Bleigehalte im gesamten Untersuchungsgebiet unregelmäßigen Schwankungen unterliegen. Eine Sonderrolle nimmt das ehemalige Dünnsäureverklappungsgebiet nordwestlich von Helgoland ein. Hier wurden weiterhin vor allem erhöhte Eisen- aber auch Zink-, Blei- und Arsengehalte gemessen. Ein rückläufiger Trend hat hier trotz Beendigung der Verklappungsaktivität im Jahr 1989 bislang nicht eingesetzt.

Abweichend vom Gesamtbild wurde in jüngerer Zeit wieder eine stärkere Sedimentbelastung durch Quecksilber aber auch Blei und Zink im Einflussbereich der Elbe festgestellt.

## 4.4 Radioaktive Stoffe

### 4.4.1 Einführung

Im Salz des Meeres sind alle chemischen Elemente und damit auch natürliche Radionuklide enthalten, die primordialen oder kosmogenen Ursprungs sind. Zu den kosmogenen Radionukliden, welche durch die kosmische Höhenstrahlung ständig nachgebildet und über die Atmosphäre ins Meer eingetragen werden, gehören Tritium,  $^{14}\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$  und  $^{32}\text{Si}$ . Die primordialen Isotope sind mit dem Weltall entstanden und aufgrund ihrer extrem langen Halbwertszeiten noch nicht zerfallen. Zu diesen zählen die Uranisotope 235 und 238 und  $^{232}\text{Th}$  mit den intermediären Produkten der zugehörigen drei natürlichen Zerfallsreihen, sowie  $^{87}\text{Rb}$  und  $^{40}\text{K}$ . Uran liegt im Meerwasser in relativ hoher Konzentration von etwa  $3.3 \mu\text{g/L}$  vor, während  $^{40}\text{K}$  im Meersalz hoch konzentriert ist und die Volumenaktivität des Meerwassers dominiert. Das hinsichtlich der Strahlenexposition des Menschen relevanteste Isotop ist der alpha-Strahler  $^{210}\text{Po}$  (aus der Zerfallsreihe des  $^{238}\text{U}$ ), weil es in manchen Meeresorganismen stark angereichert wird. In Tab. 4-7 sind für eine Reihe natürlicher Radionuklide neben den Halbwertszeiten typische Hintergrundaktivitäten in Meerwasser und Sediment angegeben.

RADIO NUCLIDE	HALF-LIFE yrs	SEA WATER Bq/m <sup>3</sup>	SEDIMENT Bq/kg
<i>Tritium</i>	12.3	20 – 100 <sup>†</sup>	–
$^7\text{Be}$	0.146	1.1 – 3.4	–
$^{14}\text{C}$	$5.73 \times 10^3$	5.5 – 6.7	–
$^{32}\text{Si}$	$172 \pm 4$	$0.2 - 3.3 \times 10^{-3}$	–
$^{40}\text{K}$	$1.28 \times 10^9$	11800 – 12300	100 – 1000
$^{87}\text{Rb}$	$4.80 \times 10^{10}$	30	–
$^{232}\text{Th}$	$1.41 \times 10^{10}$	$0.4 - 30 \times 10^{-3}$	12 – 50
$^{228}\text{Ra}$	5.76	0.8 – 8	–
$^{228}\text{Th}$	1.91	0.004 – 0.3	–
$^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$	1.9	0.1 – 10
$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$	40 – 44	2 – 200
$^{234}\text{Th}$	0.066	0.6 – 0.8	#
$^{234}\text{U}$	$2.45 \times 10^5$	47	#
$^{230}\text{Th}$	$8.0 \times 10^4$	$2.52 \times 10^{-3}$	#
$^{226}\text{Ra}$	1617	0.8 – 8	20 – 80
$^{210}\text{Pb}$	22.3	0.4 – 2	100 – 300 <sup>‡</sup>
$^{210}\text{Po}$	0.378	0.6 – 1.9	100 – 300 <sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Holds for oceanic deep-water, free of anthropogenic contributions.  
<sup>#</sup> In North Sea sediments equilibrium with Uranium-238 is assumed.  
<sup>‡</sup> Holds for surface sediments.

Tab. 4-7: Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser und Sediment der Nordsee.

Table 4-7: Activity of some natural radio nuclides for North Sea sea-water and sediment.

Die von natürlichen Radionukliden ausgehende ionisierende Strahlung gehört zu den Rahmenbedingungen, unter denen Leben entstanden ist und fortbesteht. Im Rahmen der atmosphärischen Kernwaffenversuche der 1950er und 1960er Jahre wurden je-

doch erhebliche Mengen künstlicher Radionuklide freigesetzt, die als radioaktiver Niederschlag (Fallout) zu einer noch heute messbaren globalen Kontamination führten. Auch die industrielle Nutzung der Kernenergie war und ist mit einer zusätzlichen Belastung der Umwelt – und damit auch der Meeresumwelt – durch künstliche Radioisotope verbunden. Alle der weit über 2000 verschiedenen künstlich erzeugten Kerne, die nicht in der Natur vorkommen, sind radioaktiv. Zu jedem Element ist heute mindestens ein radioaktives Isotop bekannt. Der Umstand, dass sich diese Isotope chemisch praktisch nicht von den stabilen (nicht radioaktiven) Isotopen des jeweiligen Elements unterscheiden, begünstigt die Anreicherung bestimmter Radionuklide in der Nahrungskette.

#### Tafel 4-8: Radioaktivität

**Radioaktivität** ist die Eigenschaft gewisser Elemente, genauer der Atomkerne instabiler Isotope, sich ohne äußere Einwirkung unter Aussendung einer charakteristischen Strahlung solange umzuwandeln, bis ein stabiler Endkern entsteht. Bei der Umwandlung (o. a. Zerfall) der Radioisotope ändert sich die Zusammensetzung (Teilchenstrahlung, z. B.  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung) oder der Energiezustand des Kerns ( $\gamma$ -Strahlung); diese ionisierenden Strahlungsarten unterscheiden sich u. a. hinsichtlich ihrer Durchdringungsfähigkeit und Strahlenwirkung.

Die meisten der über 40 bekannten **natürlichen Radionuklide** zählen zu den schwersten Elementen (Ordnungszahlen 81 bis 92), von denen nur Uran (92) und Thorium (90) in größeren Mengen in der Natur vorkommen. Sie lassen sich weiter in primordiale und kosmogene Nuklide unterteilen. Die primordialen Isotope sind mit dem Weltall entstanden und aufgrund extrem langer Halbwertszeiten noch nicht zerfallen. Zu diesen gehören Kalium-40, Rubidium-87 sowie die Mutternuklide Uran-238, Uran-235, Thorium-232 mit den Zwischenprodukten der drei natürlichen Zerfallsreihen. Kosmogene Nuklide wie Tritium, Beryllium-7 und Kohlenstoff-14 werden durch kosmische Höhenstrahlung ständig nachgebildet und aus der Atmosphäre ins Meer eingetragen.

**Künstliche Radionuklide** fallen bei der Kernspaltung aus Uran oder Plutonium an. Sie gelangen vor allem durch nukleare Wiederaufbereitungsanlagen, in geringen Mengen auch beim Betrieb von Kernkraftwerken über Abluft und Abwasser in die Umwelt. Einige der bei der Kernspaltung anfallenden Nuklide, wie Tritium oder C-14, entstehen auch durch natürliche Prozesse. Inzwischen sind weit über 2000 künstliche Radionuklide bekannt.

Niederschlagsraten sind ein Maß für die in einem Zeitintervall anfallende Regenmenge, aus der sich nicht ohne weiteres ergibt, wie nass der Durchschnittsmensch wird. Genauso wenig sind die gemessenen Zerfallsraten (Bq) der verschiedenen Radionuklide mit der **Strahlenwirkung** und daraus resultierenden Belastung biologischer Systeme gleichzusetzen. Die Strahlenwirkung hängt zunächst von der vom Gewebe absorbierten Energie – der Energiedosis – ab, die in J/kg oder Gray (Gy) angegeben wird. Da die verschiedenen Strahlungsarten bei gleicher Energiedosis unterschiedliche Wirkungen zeigen, wurden von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) aus strahlenepidemiologischen Untersuchungen abgeleitete Strahlungswichtungsfaktoren festgelegt. Ferner wurden Gewebewichtungsfaktoren eingeführt, welche die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Organe und Gewebe berücksichtigen. Diese dimensionslosen Dosisfaktoren werden mit der Energiedosis zur effektiven Dosis verknüpft, die (zur Unterscheidung von der Energiedosis) in Sievert (Sv) angegeben wird.

Die **effektive Dosis** aus allen natürlichen und künstlichen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel 4 mSv im Jahr. Diese Dosis stammt etwa jeweils zur Hälfte aus der natürlichen und der medizinischen Strahlenexposition, insbesondere aus der Röntgendiagnostik (KOELZER 2006). Zur effektiven Dosis aus allen natürlichen Strahlungsquellen trägt die innere Strahlenexposition 1.4 mSv bei, die zu etwa 75 % durch Radon-222 und Radon-220 und insbesondere deren kurzlebige Folgeprodukte und zu 1/8 durch Kalium-40 verursacht wird. Demgegenüber beträgt die Gesamtaktivität des Standardmenschen 9000 Bq und ergibt sich zu über 95 % aus den Zerfallsraten von K-40 (4200 Bq), Be-7 (3800 Bq) und Rb-87 (650 Bq) (VOLKMER 2005). Die Aktivität der Rn-Isotope und ihrer Zerfallsprodukte, welche den Hauptbeitrag zur Dosis leisten, ist hingegen mit insgesamt 45 Bq verschwindend gering.

Das Nuklid  $^{99}\text{Tc}$  (Halbwertszeit 210 000 Jahre) reichert sich beispielsweise mit einem Faktor  $> 10^5$  (gegenüber der Volumenaktivität im Meerwasser) in Braunalgen, wie Blasentang oder Sägezähntang aber auch Hummer an, während der Anreicherungsfaktor für das dosisrelevante Nuklid  $^{137}\text{Cs}$  (Halbwertszeit 30 Jahre) in Meeresfischen nur etwa 100 beträgt (IAEA 1985, AARKROG ET AL. 1994, NIES UND KANISCH 2002). Tritium hingegen, das auch auf natürliche Weise durch kosmische Höhenstrahlung entsteht, wird in Biota praktisch nicht angereichert.

Die Überwachung künstlicher Radioaktivität durch das BSH erstreckt sich in der Nordsee seit Jahren schwerpunktmäßig auf die Nuklide Tritium,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und einige Transurane<sup>1</sup> ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  und  $^{244}\text{Cm}$ ) (NIES UND HERRMANN 2005). Diese Nuklide zeichnen sich durch eine hohe Isobarenausbeute bei der Spaltung oder Neutronenaktivierung der Kernbrennstoffe  $^{235}\text{Uran}$  und  $^{239}\text{Pu}$  aus und gelten als radiologisch relevant für eine mögliche Strahlenexposition des Menschen über den Meeresspfad. Aus technischen Gründen konnten im Jahr 2004 Aktivitätsmessungen für Tritium und  $^{99}\text{Tc}$  nicht durchgeführt werden.

Die Kontamination des Meerwassers wird als Volumenaktivität o. a. Aktivitätskonzentration in  $\text{Bq}/\text{m}^3$  angegeben, wobei ›Becquerel‹ für die Anzahl der Nuklidumwandlungen oder Kernzerfälle pro Sekunde steht. Dieses Aktivitätsmaß ist den vom Wetterdienst gemessenen Niederschlagsraten vergleichbar. So wenig, wie sich aus diesen ohne weiteres die »Durchnässung« der Bevölkerung ergibt, folgt aus jenen die radioaktive Belastung von Flora, Fauna oder Mensch. Einige ergänzende Bemerkungen zur Strahlenwirkung finden sich in *Tafel 4-8*.

#### 4.4.2 Quellen künstlicher Radionuklide

Die atmosphärischen Kernwaffentests der 1950er und 1960er Jahre führten über radioaktive Niederschläge (Fallout) zu einer globalen Kontamination mit künstlichen Radionukliden. Die Aktivitätsverteilung dieser Nuklide im Oberflächenwasser des Nordatlantik stellt für die Nordsee eine Vorbelastung bzw. Hintergrundkonzentration dar, die hier durch andere regionale Belastungsquellen überlagert und verstärkt wird.

So dominierten mit Beginn der 1970er Jahre die kontrollierten und genehmigten Ableitungen radioaktiver Abwässer der europäischen Wiederaufarbeitungsanlagen für Kernbrennstoffe, La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien), die Aktivitätskonzentrationen künstlicher Radionuklide in der Nordsee. Die Kontaminationen der Irischen See (Sellafield) bzw. des Kanals werden mit den Meeresströmungen in andere Meeresgebiete verfrachtet und erreichen die Nordsee über die nordwestliche Öffnung zum Atlantik (Sellafield) bzw. über die Straße von Dover. Die Transportzeiten von La Hague bzw. Sellafield bis in die Deutsche Bucht belaufen sich auf etwa ein bzw. drei Jahre, weshalb nur langlebige Radionuklide mit Halbwertszeiten  $> 1$  Jahr von Interesse sind (BAILLY DU BOIS UND DUMAS 2005).

Internationale Anstrengungen – z. B. im Rahmen des Oslo/Paris-Übereinkommens ([www.ospar.org](http://www.ospar.org)) – haben bewirkt, dass die in den 1970er Jahren sehr hohen Einleitungen beider Wiederaufbereitungsanlagen kontinuierlich reduziert wurden. Das Meerwasser der Nordsee ist deshalb inzwischen nur sehr gering durch künstliche Radionuklide belastet.

1. Transurane stehen im Periodensystem oberhalb des schwersten natürlichen Elements –  $^{92}\text{Uran}$ .

Ein Großteil der Belastung durch  $^{137}\text{Cs}$  und Transurane resultiert inzwischen aus resuspendierten Partikeln des Sediments der Irischen See und weniger aus den gegenwärtigen Ableitungen der Wiederaufarbeitungsanlagen (KERSHAW ET AL. 1999). Das Sediment der Irischen See wurde vor allem in den 1970er Jahren hoch kontaminiert. Die Quellstärke des Sediments für  $^{137}\text{Cs}$  wird auf 50 bis 70 TBq/Jahr geschätzt, was dem 5- bis 10fachen der gegenwärtigen Einleitungen entspricht. Resuspension wird sowohl durch natürliche Ereignisse wie Stürme, als auch durch menschliche Aktivitäten wie Grundnetz- und Baumkurrenfischerei hervorgerufen.

Die Oberflächensedimente der Nordsee sind großteils sandig, was eine nur schwache Tendenz zur Anreicherung von Radionukliden beinhaltet. Für  $^{137}\text{Cs}$  liegen die spezifischen Aktivitäten hier unter 10 Bq/kg, für Transurane zwischen 1 und 2 Bq/kg Trockenmasse. Die spezifische Aktivität des natürlichen  $^{40}\text{K}$  übersteigt 100 Bq/kg meist deutlich. Das Sediment ist in den meisten Gebieten bis in 40 cm Tiefe weitgehend durchmischt, so dass sich keine Informationen über unterschiedliche Eintragzeiten im relevanten Zeitraum der vergangenen 50 Jahren ableiten lassen. Dieser Umstand indiziert, dass die Abreicherung der Wassersäule durch Sedimentation ein durch Wiederfreisetzung abgelagerter Radionuklide umkehrbarer Prozess ist. Die seit einigen Jahren relativ stationären Volumenaktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  (Abb. 4-46, S. 192) deuten möglicherweise auf ein Gleichgewicht dieser Austauschprozesse hin.

Der Fallout infolge des Reaktorunfalls von Tschernobyl im April 1986 ist nur noch im Ausstrom des Ostseewassers nachweisbar, das die Nordsee über der norwegischen Rinne verlässt. Ableitungen aus Kernkraftwerken oder anderen kerntechnischen Einrichtungen spielen für das Aktivitätsinventar der Nordsee kaum eine Rolle. Sie sind allenfalls in unmittelbarer Umgebung dieser Anlagen nachweisbar. Dies gilt auch für die bis 1982 durchgeführte Versenkung schwach-radioaktiver Abfälle in mehr als 4000 m Tiefe im Nordostatlantik. Auch die früheren Versenkungen radioaktiver Abfälle durch die ehemalige UdSSR in der Barents- und Karasee, oder das 1989 gesunkene russische Atom-U-Boot ›Komsomolets‹ in etwa 1700 m Tiefe in der Norwegensee führten zu keiner erhöhten Belastung dieser Meeresgebiete oder gar der Nordsee.

#### 4.4.3 Caesium und Strontium

$^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  rückten insbesondere nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl, bei dem neben  $^{131}\text{I}$  gerade diese langlebigen Spalt- und Aktivierungsnuklide in hohem Maße freigesetzt wurden, in den Blickpunkt öffentlichen Interesses.

Die zeitliche Entwicklung der Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  seit 1961 ist in Abb. 4-46 für die Positionen der früheren Feuerschiffe ›Elbe 1‹ und ›Borkumriff‹ dargestellt. Deutlich treten die hohen Konzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  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 Abflusswassers der Elbe erklärt. Heute ist der Tschernobyl-Fallout in der Deutschen Bucht nicht mehr nachweisbar. Lediglich im Skagerrak entlang der norwegischen Küste lassen sich noch geringe Spuren aus dieser Quelle im Ausstromwasser der Ostsee feststellen.

Die kurzzeitige Spitzenkonzentration beim  $^{137}\text{Cs}$  im Jahr 1981 bei ›Borkumriff‹ ist auf das Vordringen höher kontaminierter Wassermassen aus nördlicheren Seegebieten zurückzuführen. Dieser Konzentrationsanstieg ging einher mit einer verminderten Ak-

tivität von  $^{90}\text{Sr}$ , was Sellafield eindeutig als Quelle ausweist, denn das Nuklidmuster der Emissionen von Sellafield und La Hague unterschied sich zu diesem Zeitpunkt deutlich voneinander.

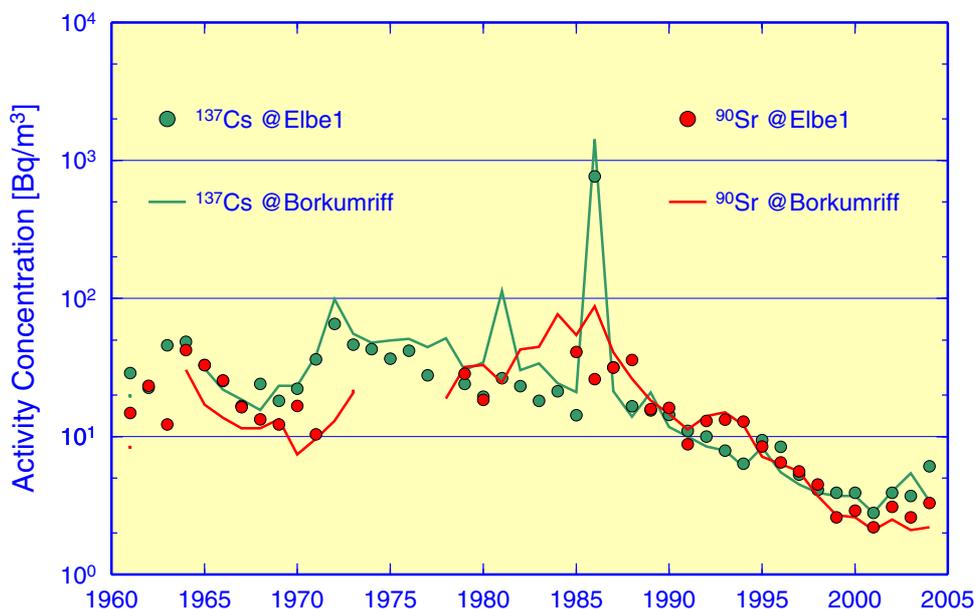


Abb. 4-46: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  an den früheren Positionen der Feuerschiffe ›Borkumriff‹ und ›Elbe 1‹.

Fig. 4-46: Time series of annual maximum activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  at former positions of out-of-operation light vessels ›Borkumriff‹ and ›Elbe 1‹.

Der weitgehend kontinuierliche, exponentielle Rückgang der Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  seit Ende der 1980er Jahre ist nur zum geringen Teil auf den radioaktiven Zerfall selbst zurückzuführen. Der Hauptgrund hierfür liegt vielmehr in den geringeren Ableitungen dieser Radionuklide durch beide Wiederaufbereitungsanlagen. Dieser Rückgang wurde für ein breites Spektrum anderer Nuklide beobachtet und ist als Erfolg der internationalen Übereinkommen zum Schutze des Meeres zu werten (OSPAR, Nordseeschutzkonferenzen). In den letzten 5 oder 6 Jahren setzte sich diese Verringerung allerdings nicht weiter fort, wie aus den relativ stationären bzw. stagnierenden Volumenaktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  ersichtlich ist (Abb. 4-46).

Die räumlichen Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  im Verlauf des Jahres 2004 sind in Abb. 4-47 für die Deutsche Bucht zusammengefasst. Systematische jahreszeitliche Unterschiede sind nicht erkennbar. Gegenüber dem Fallout leicht erhöhte Konzentrationen von Radiocaesium traten lediglich im Nordwesten auf. Diese erhöhte Kontamination ist großteils auf resuspendiertes Material aus Sedimenten der Irischen See zurückzuführen, welche durch Einleitungen in den 1970er Jahren stark belastet wurden. Die Volumenaktivität von  $^{134}\text{Cs}$  liegt im Meerwasser der Nordsee inzwischen unterhalb der Nachweisgrenze von  $0.2 \text{ Bq/m}^3$ .

Die Konzentrationen von  $^{90}\text{Sr}$  waren räumlich ebenfalls relativ homogen verteilt. Die gegenüber  $^{137}\text{Cs}$  insgesamt geringeren Konzentrationen sind auf die unterschiedliche Spaltausbeute der Isobaren 137 bzw. 90 bei der Kernspaltung zurückzuführen und weisen oberirdische Kernwaffenversuche der 1960er Jahre als Hauptquelle aus.

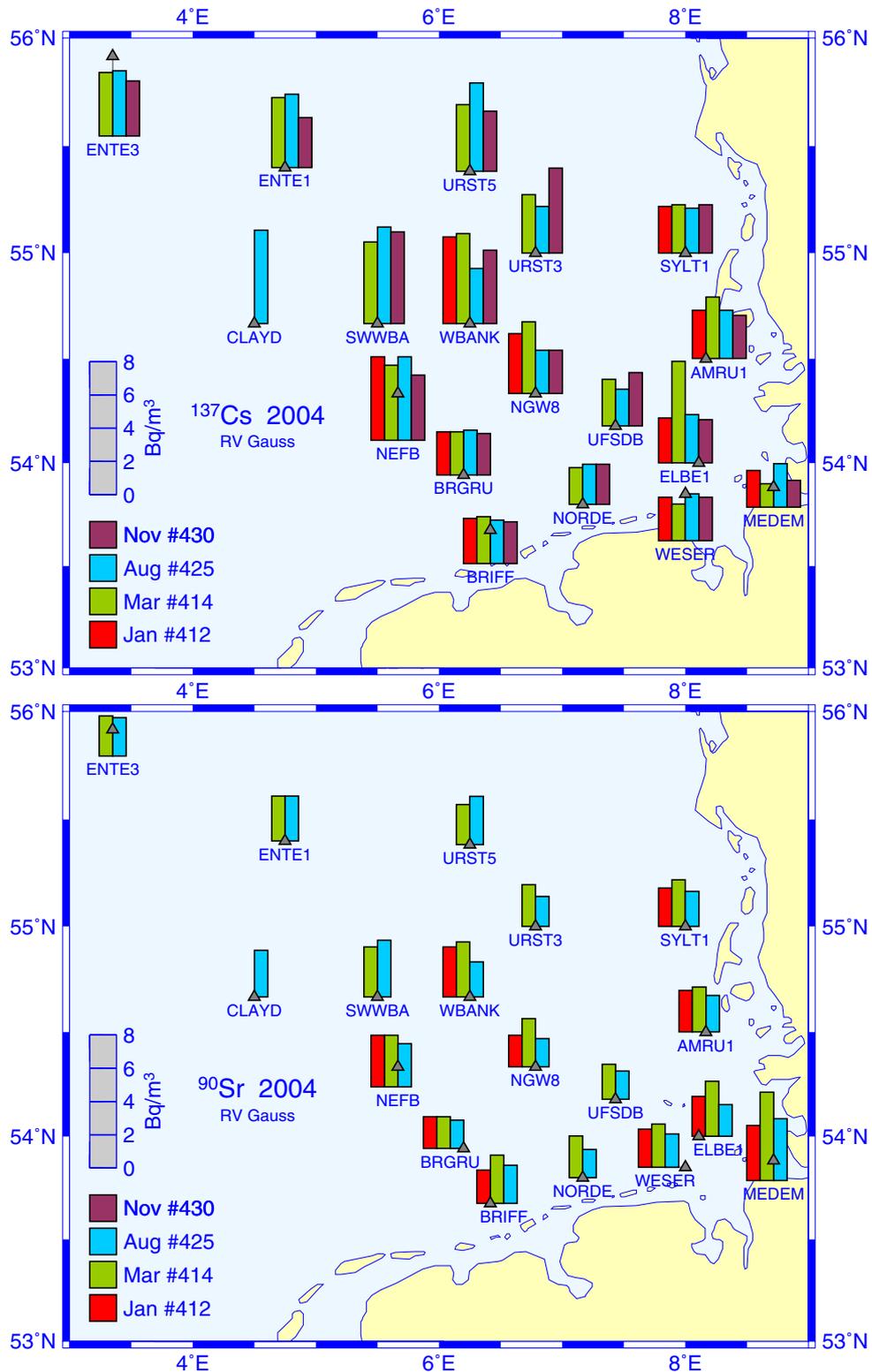


Abb. 4-47: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2004. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-47: Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  activity concentrations in near-surface sea water of the German Bight during 2004. Underneath columns station IDs.

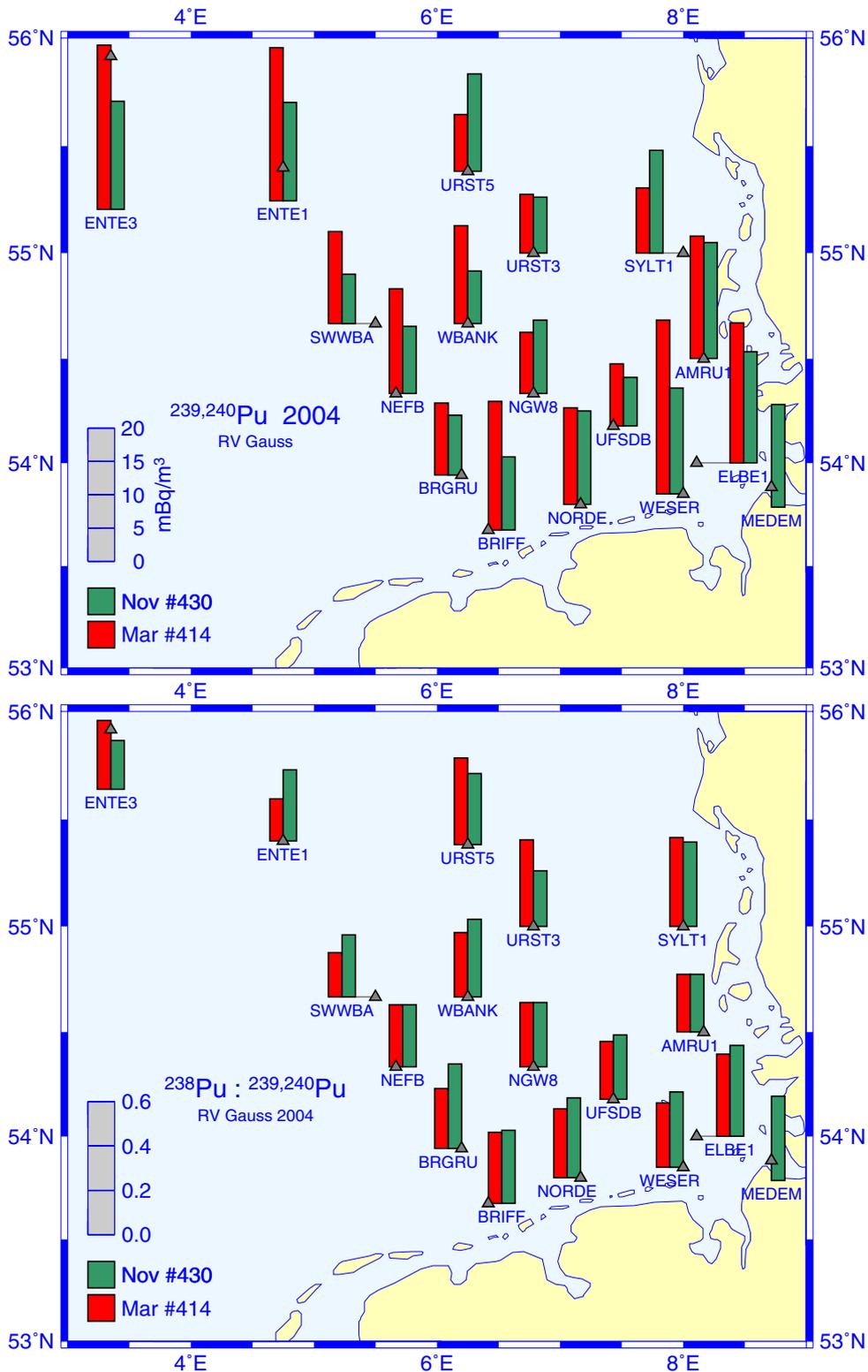


Abb. 4-48: Verteilungen der Aktivitätskonzentration von  $^{239,240}\text{Pu}$  (oben) und des Plutonium-Aktivitätsverhältnisses  $^{238}\text{Pu}$  zu  $^{239,240}\text{Pu}$  im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2004.

Fig. 4-48: Distributions of activity concentration of  $^{239,240}\text{Pu}$  (top) and the Plutonium activity ratio  $^{238}\text{Pu}$  to  $^{239,240}\text{Pu}$  in near-surface sea water of the German Bight during 2004.

Die im Einflussbereich der Elbe und Weser erhöhten Konzentrationen von  $^{90}\text{Sr}$  erklären sich aus dem Umstand, dass dieses Falloutnuklid in den Tonmineralen der Landfläche weniger stark als  $^{137}\text{Cs}$  adsorbiert wird und folglich über den Süßwasserkreislauf stärker ins Meer eingetragen wird. Die Tendenz zu maximalen Konzentrationen im Küstenwasser im März dürfte mit maximalen Abflussraten der Flusssysteme in dieser Jahreszeit zusammenhängen (z. B. Abb. 3-34, S. 112).

#### 4.4.4 Transurane

Als Transurane bezeichnet man Elemente mit Ordnungszahlen  $> 92$ . Sie stehen im Periodensystem jenseits von  $_{92}\text{Uran}$  und sind i. d. R. wie die hier untersuchten Plutonium- und Americiumnuklide langlebige alpha-Strahler.

Räumliche Verteilungen der Aktivitätskonzentration von  $^{239,240}\text{Pu}$  in der Deutschen Bucht sind in Abb. 4-48 (oben) dargestellt. Die Konzentrationen variierten im März zwischen 8 und 26  $\text{mBq/m}^3$  und waren damit mehrheitlich deutlich höher als im November 2004. Mit durchschnittlich 15 (März) bzw. 12  $\text{mBq/m}^3$  waren sie jedoch außerordentlich gering und lagen auch lokal meist auf dem Niveau des globalen Fallouts im nordatlantischen Oberflächenwassers. Abb. 4-48 (unten) zeigt Verteilungen des Aktivitätsverhältnisses der Plutoniumisotope  $^{238}\text{Pu}$  zu  $^{239,240}\text{Pu}$ , die sich jahreszeitlich wenig unterscheiden. Die Verhältnisse geben Aufschluss über die Herkunft dieser Nuklide. Während für den globalen Fallout der atmosphärischen Kernwaffentests Aktivitätsverhältnisse von 0.04 – 0.06 charakteristisch sind, liegen diejenigen für die Pu-Isotope

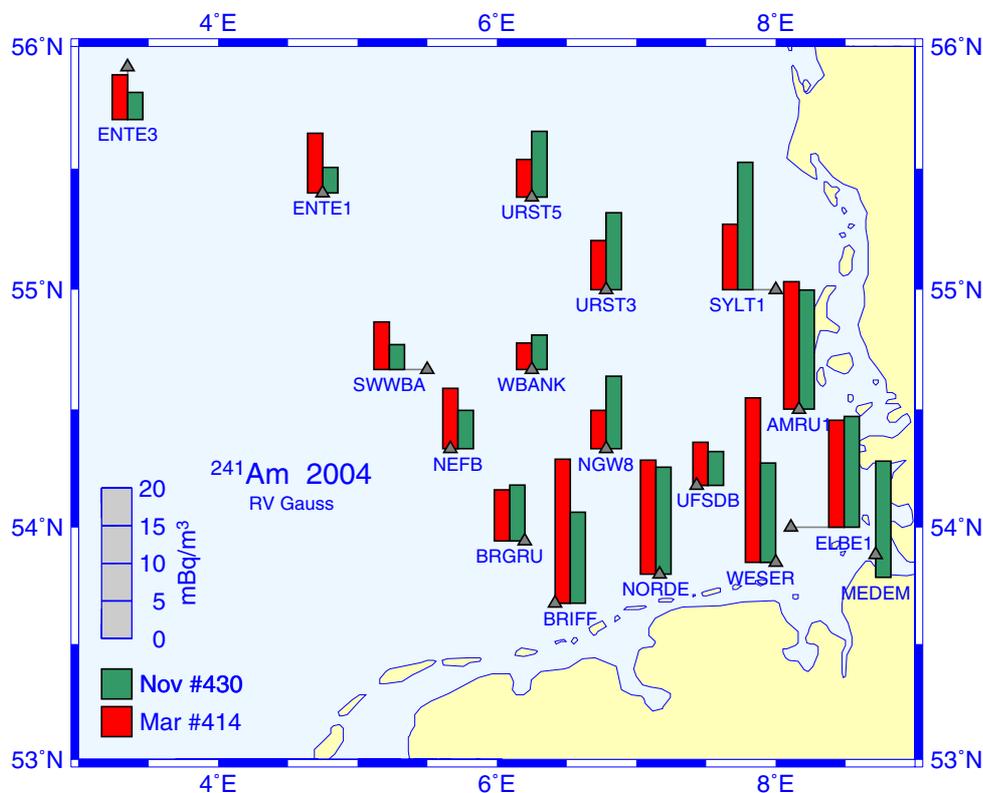


Abb. 4-49: Verteilung der Aktivitätskonzentration des Transurans  $^{241}\text{Am}$  im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2004.

Fig. 4-49: Distribution of activity concentration of transuranic  $^{241}\text{Am}$  in near-surface sea water of the German Bight during 2004.

aus den Wiederaufbereitungsanlagen mit mehr als 0.5 deutlich darüber. Die aktuellen Aktivitätsverhältnisse in der Deutschen Bucht, die im Mittel bei 0.3 lagen, weisen die Anlagen Sellafield oder La Hague als Hauptquellen aus.

Plutonium und in noch stärkerem Maße Americium zeichnen sich durch eine hohe Schwebstoffaffinität aus. Die hohen Aktivitätskonzentration von  $^{241}\text{Am}$  im Küstenwasser (Abb. 4-49, S. 195) sind vermutlich auf den hier relativ hohen Schwebstoffanteil des Meerwassers zurückzuführen.  $^{244}\text{Cm}$  ist in der Deutschen Bucht kaum noch nachweisbar.

Die im Nordseewasser nachgewiesenen Transurane stellen somit eine Mischung aus Altlasten (resuspendiertes Material aus dem Sediment der Irischen See und globaler Fallout) und dem in den gegenwärtigen Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlagen enthaltenen Material dar.

### 4.4.5 Zusammenfassung

Die Überwachung war im Jahr 2004 auf die dosisrelevanten Radionuklide  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und die Transurane  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$  in der Deutschen Bucht fokussiert. Die Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen der Radionuklide wiesen hier insgesamt nur noch geringe räumliche Unterschiede auf. Die Konzentrationen lagen wenig über denen im Oberflächenwasser des Nordatlantiks, die auf den globalen Fallout atmosphärischer Kernwaffentests zurückzuführen sind. Die gegenüber dem Küstenbereich leicht höheren Konzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  im nordwestlichen Seegebiet kamen insbesondere durch resuspendiertes Material aus dem hochbelasteten Sediment der Irischen See und rezente Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlage Sellafield zustande. In den Konzentrationsverteilungen von  $^{90}\text{Sr}$  war ein charakteristischer Süßwassereintrag erkennbar, der zeitgleich mit den Abflussraten der Elbe im März maximal war.

Die effektive Gesamtexposition beträgt in Deutschland durchschnittlich 4 mSv pro Jahr und Person, wovon die Hälfte auf medizinische, insbesondere röntgendiagnostische Maßnahmen zurückzuführen ist. Die Kontamination der Nordsee durch künstliche Radionuklide trägt zur Strahlenexposition der Bevölkerung nur über den Expositionspfad »Fisch- oder Meeresfrüchteverzehr« bei. Aus einem durchschnittlichen Konsum von 14 kg im Jahr resultiert eine effektive Dosis von maximal 0.2  $\mu\text{Sv/a}$ , die deutlich unter der laut Strahlenschutzverordnung »trivialen Dosis« (10  $\mu\text{Sv/a}$ ) bleibt. Da sich aus der Anreicherung von Radionukliden in der Nahrungskette kein signifikanter Dosisbeitrag für den Menschen ergibt, dürfte dies auch für Flora und Fauna der Nordsee zutreffen.

## 4.5 Referenzen

- Aarkrog, A., M. S. Baxter, A. O. Bettencourt, R. Bojanowski, A. Bologna, S. Charmason, I. Cunha, R. Delfanti, E. Duran, E. Holm, R. Jeffree, H. D. Livingston, S. Mahapanyawong, H. Nies, I. Osvath, Li Pingyu, P. P. Povinec, A. Sanchez, J. N. Smith und D. Swift, A comparison of doses from  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Po}$  in marine food: A major international study. *J. Environmental Radioactivity*, 34, 69-90, 1996.
- Bailly du Bois, P. und F. Dumas, Fast hydrodynamic model for medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers, *Ocean Modelling*, 9, 169-210, 2005.
- Bester, K. und H. Hühnerfuss, Triazines in the Baltic and North Sea, *Mar. Poll. Bull.*, 26, 423-427, 1993.
- Brockmann, U., T. Raabe, K. Hesse, K. Viehweger, S. Rick, A. Starke, B. Fabiszisky, D. Topcu und R. Heller, Seasonal budgets of the nutrient elements N and P at the surface of the German Bight during winter 1996, spring 1995, and summer 1994, *Dt. Hydrogr. Z.*, Supp. 51, 1-24, 1999a.
- Brockmann, U., K. Viehweger, T. Raabe, S. Rick, H.J. Rick, R. Heller und D. Topcu, Conversion of nutrients in the Elbe river plume during drift experiments in the German Bight during spring 1995 and summer 1994, *Dt. Hydrogr. Z.*, Supp. 51, 293-312, 1999b.
- Brockmann, U. und D. Topcu, Nutrient atlas of the North Sea, *Umweltbundesamt*, Berlin, 64pp, 404 figs, mit CD-ROM, 2001.
- Brockmann, U., B. Heyden, M. Schütt, A. Starke, D. Topcu, K. Hesse, N. Ladwig und H. Lenhart, Assessment criteria for eutrophication areas – emphasis German Bight, Forschungsbericht 298 25 233, *UBA Texte 48/03*, 109+140pp, Berlin, 2003.
- BSH, Abfallbeseitigung auf der Hohen See. 68-78 in: Jahresbericht des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 1990, *BSH*, 1991.
- Butler, E. I., S. Knox und M. I. Liddicoat, The relationship between inorganic and organic nutrients in sea water, *J. mar. biol. Ass. U.K.*, 59, 239-250, 1979.
- Diaz, R. J. und R. Rosenberg, Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna, *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 33, 245-303, 1995.
- IAEA, Sediment  $K_d$ s and concentration factors for radionuclides in the marine environment, *Tech. Rep. Series*, No. 247, Vienna, 1985.
- Kershaw, P. J., D. McCubbin und K. S. Leonard, Continuing contamination of North Atlantic and Arctic waters by Sellafield radionuclides, *Sci. Tot. Env.*, 237/238, 119-132, 1999.
- Koelzer, W., Lexikon zur Kernenergie, *Forschungszentrum Karlsruhe*, Karlsruhe, 2006. <http://iwrwww1.fzk.de/kernenergielexikon>.
- 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.
- 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.

Law, C. S. und N. J. P. Owens, Denitrification and nitrous oxide in the North Sea, *Neth. J. of Sea Res.*, 25, 65-74, 1990.

Loewe, P., S. Schmolke, G. Becker, U. Brockmann, S. Dick, C. Engelke, A. Frohse, W. Horn, H. Klein, S. Müller-Navarra, H. Nies, N. Schmelzer, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald, S. Weigelt, Nordseezustand 2003, *Berichte des BSH*, Nr. 38, 220pp, 2005. [www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht38/index.jsp](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/Bericht38/index.jsp)

MURSYS, Jahresbericht, Die winterliche Feinstruktur der Nährstoffverteilung in der Deutschen Bucht, *BSH*, 1997.

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, *Berichte des BSH*, Nr. 32, 81pp, 2003.

Nies, H. und G. Kanisch, European maritime areas and marine fish, 39-46 in: Henrich, E. und A. Janssens (eds.), *Stakeholders' Conference on Approaches to Environmental Radioactivity*, Proceedings, Luxembourg, 2-3 December 2002, 206pp., 2003. [http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/conference/shc\\_2003\\_09\\_19\\_proceedings\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/conference/shc_2003_09_19_proceedings_en.pdf)

Nies, H. und J. Herrmann, Radioaktive Stoffe in Nord- und Ostsee. 61-68 in: Trugenberg-Schnabel, Peter, Kanzliwius, Bernhard und Bergler (Hrsgb.), *Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland, Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz, Daten und Bewertung für 2002 und 2003*, *BfS Schriften*, Nr. 34/05, BfS, Salzgitter, 116pp, 2005.

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.

Puls, W., Simulation of suspended sediment dispersion in the North Sea, *ICES C.M.*, 1-22, 1987.

Redfield, A. C., On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. 176-192 in: Daniel, R. J. (ed.), *James Johnstone Memorial Volume*, *University Press*, Liverpool, UK, 348pp, 1934.

Redfield, A. C., B. H. Ketchum und F.A. Richards, The influence of organisms on the composition of sea water. 26-77 in: Hill, M.N. (ed.), *The Sea*, *Wiley Interscience*, London, 1963.

Sommer, U., *Biologische Meereskunde*, *Springer-Verlag*, Berlin, 475 pp, 1998.

Theobald, N., Identifizierung neuer Schadstoffe im Rahmen der Meeresumwelt-Überwachung (Target- und Non-Target-Screening), *Dt. Hydrogr. Z.*, Suppl. 8, 27-37, 1998.

Tomé, A. R. und P. M. A. Miranda, Piecewise linear fitting and trend change points of climate parameters, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L02207, 2004.

Volkmer, M., Basiswissen Kernenergie, *Informationskreis KernEnergie*, Berlin, 100pp, 2005. [www.kernenergie.net/documentpool/basiswissen2005.pdf](http://www.kernenergie.net/documentpool/basiswissen2005.pdf)

# Abbildungsverzeichnis

## Atmosphärenphysik

- Abb. 2-1: NAO-Index 2004. lk: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998), lpf6(lk): tiefpassgefiltert über 6 Monate. cruea: Gibraltar & Südwest Island ([www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao\\_update.htm](http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm)). cpccdb: Amplitude des NAO-Musters aus rotierter Hauptkomponentenanalyse des 700 hPa Höhenanomaliefeldes ([www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml)). .....33
- 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,  $0.6 \times 0.6$ ) und umhüllen 81, 62, 40 bzw. 18 % 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 2004. ....34
- Abb. 2-3: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 4. Okt. 2004 (Sturmtief »Uschi«) mit Gitterpositionen zur Wetterlagenklassifizierung. ....36
- Abb. 2-4: Relative Häufigkeitsverteilung der täglichen Zirkulationszustände im Zeitraum 1971 – 2000 mit Klassifizierungskriterien.....37
- Abb. 2-5: Luftströmung um Hoch (A) und Tief (C). ....38
- Abb. 2-6: Saisonale Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2004 mit Perzentilen der empirischen Verteilungen für 1971 – 2000 (Stapelsäulen); Perzentilbereich 1 – 99, Intervallgrenzen bei 5, 25, 50 (Median), 75, 95 %. ....42
- Abb. 2-7: Wie Abb. 2-6, jedoch für monatliche Häufigkeiten. ....43
- Abb. 2-8: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: Klimatologie (1971 – 2000), Mitte: 2004, rechts: Anomalien; 1 = Winter = Januar, Februar, März etc.....46
- Abb. 2-9: Monatsklimatologie (1971 – 2000) der Luftdruckverteilung im Meeresniveau (hPa). . ....47
- Abb. 2-10: Monatliche Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) im Jahr 2004. ....49
- Abb. 2-11: Monatliche Anomalien des Luftdrucks im Meeresniveau (hPa) im Jahr 2004. ....50
- Abb. 2-12: Saisonale 50%-Wahrscheinlichkeitsellipsen des »Nordseewindes« (1=Winter=JFM, 2=Frühling, etc.); oben: 2004, unten: 2003. ....52
- Abb. 2-13: Virtuelle Trajektorie des »Nordseewindes« mit Ensemble und Klimatologie. Zeitmarken kennzeichnen Monatsanfänge, Jahreszahlen die Endpunkte der Ensemblemitglieder. . . ....54
- Abb. 2-14: Jahrgang 2004 der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971 – 2000) mit 95%-Band ( $\pm 1.96$  zwischenjährige Standardabweichungen).  $1 \text{ kJcm}^{-2}$  entspricht einer Strahlungsflussdichte von  $116 \text{ Wm}^{-2}$ . ....57
- Abb. 2-15: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney für 2004 mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima  $\pm 1.96$  zwischenjährige Standardabweichungen) .....58

## Physikalische Ozeanographie

- Abb. 3-1: Saisonale Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2004 (JFM = Januar-Februar-März, AMJ ...). Vektormittel aus Strömungsfeldern des »BSHcmod«. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.....65
- Abb. 3-2: Wassertransport durch die Straße von Dover in 2004 (BSHcmod);  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . .66
- Abb. 3-3: Wassertransport durch das Kattegat in 2004 (BSHcmod);  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....67

Abb. 3-4: Schematik der Zirkulationstypen des täglichen Reststroms in der Deutschen Bucht. . . . .	68
Abb. 3-5: Saisonale Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2003 und 2004. . . . .	70
Abb. 3-6: Häufigkeit und Andauer der drei wichtigsten Zirkulationstypen. . . . .	70
Abb. 3-7: Verteilung der täglichen Zirkulationsmuster auf die Wetterlagen im Jahr 2004. Schmale Säulen enthalten die erwarteten Häufigkeiten bei Unabhängigkeit. . . . .	71
Abb. 3-8: Wie Abb. 3-7, jedoch für das Jahr 2003. . . . .	72
Abb. 3-9: Saisonale geographische Verteilungen von Wellenhöhe, Windsee und Dünung im Jahr 2004; JFM = Januar, Februar, März etc. Nummern kennzeichnen die Positionen der Stationen ›Brent‹ (1), ›Ekofisk‹ (2), ›Euro‹ (3), ›NSB-II‹ (4), ›Helgoland‹ (5) und ›UFS DB‹ (6). . . . .	75
Abb. 3-10: Wellenhöhe, Windsee und Dünung während der Stürme ›Uschi‹ (Abb. 2-3, S. 36) und ›Pia‹ (Tab. 2-1, S. 39). . . . .	76
Abb. 3-11: Streudiagramm für simulierte und beobachtete Wellenhöhen und -richtungen an der Station NSB-II. Für weitere Erklärungen s. Abb. 3-12. . . . .	77
Abb. 3-12: Streudiagramm für simulierte und beobachtete Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten bei Ekofisk und Helgoland. Die Parallelen (mit vertikalem Abstand von $\pm 1.96$ Standardschätzfehlern) zur Regressionsgeraden begrenzen das Gebiet, welches theoretisch 95 % der Datenwolke enthält. Für statistische Maßzahlen s. Tab. 3-3. . . . .	78
Abb. 3-13: Saisonale prozentuale Häufigkeitsverteilungen für Windgeschwindigkeit (links) sowie Wellenhöhe und -richtung (rechts) an der Position ›UFS DB‹ im Jahr 2004. Wellenhöhen sind $\log_2$ -skaliert. Datenbasis DWD-Modelle. . . . .	82
Abb. 3-14: Wie Abb. 3-13, jedoch für Position ›Ekofisk‹. . . . .	84
Abb. 3-15: Hochwasserstände bei Cuxhaven im Jahr 2004 (bezogen auf NN) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band sowie intramonatlichen 90%-Grenzen. . . . .	88
Abb. 3-16: Niedrigwasserstände bei Cuxhaven im Jahr 2004 (bezogen auf NN) mit Monatsklimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band sowie intramonatlichen 90%-Grenzen. . . . .	89
Abb. 3-17: Monatsmittel der Niedrigwasserstände (cm) bei Cuxhaven mit Anomalien und Perzentilen (%). Tiefpassfilterbreite 3 Monate. Farbstufen für Perzentile: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %. . . . .	90
Abb. 3-18: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2004 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K. . . . .	93
Abb. 3-19: Jahresgang der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen im Jahr 2004 mit Ensemble der Jahresgänge seit 1968 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971 – 1993) und zwischenjährigen Standardabweichungen (Kreisradius). . . . .	94
Abb. 3-20: Jahresgang 2004 der monatlichen Oberflächentemperatur bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1.96$ Standardabweichungen). . . . .	94
Abb. 3-21: Rangstatistik der Jahresmittel der Oberflächentemperatur der Nordsee. . . . .	95
Abb. 3-22: 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). . . . .	96
Abb. 3-23: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: 1978 – 1987, Mitte: 1991 – 2000, rechts: Differenzen; 1 = Winter = Januar, Februar, März etc. . . . .	97
Abb. 3-24: Temperaturschichtung ( $^{\circ}\text{C}$ ) im Sommer 2004 (FS Gauß, Reise #425). . . . .	99
Abb. 3-25: Temperaturschichtung ( $^{\circ}\text{C}$ ) entlang 56 $^{\circ}\text{N}$ im Sommer der Jahre 1998 bis 2004. . . . .	100
Abb. 3-26: Temperaturschichtung ( $^{\circ}\text{C}$ ) im Jahr 2004 an den MARNET-Stationen ›Deutsche Bucht‹, ›Ems‹ und ›NSB II‹. Sensortiefen: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m. . . . .	101
Abb. 3-27: Flächenbezogene Eisvolumensumme für die deutsche Nordseeküste im Zeitraum 1897 – 2004. . . . .	103

Abb. 3-28: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2004. . . . .	106
Abb. 3-29: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2004 (FS Gauß, Reise #425). . . . .	107
Abb. 3-30: Driftpfad eines profilierenden Treibkörpers im Übergangsbereich zum Nordatlantik. Die im Zeitabstand von etwa 10 Tagen markierten Auftauchpositionen des norwegischen Argo-Floats zeigen die geographische Lage der im Zeitraum vom 13. Aug. bis 1. Dez. 2003 aufgezeichneten Profile (s. Abb. 3-32). FIC und FSC bezeichnen britische CTD-Stationen im Fair-Isle Current und Faroe-Shetland Channel (s. Abb. 3-31). . . . .	109
Abb. 3-31: Salzgehaltsanomalien im »Faroe Shetland Channel« und »Fair Isle Current«. Basisperiode 1971 – 2000; FSC-Anomalien sind mit Faktor 3 skaliert. Zur Lage der Messpositionen s. Abb. 3-30, S. 109. (Reproduziert nach Abbn. 32 & 36, ICES 2005). . . . .	110
Abb. 3-32: Salzgehaltsprofile im Herbst 2003 entlang der Trajektorie eines norwegischen Treibkörpers (s. Abb. 3-30, S. 109). Klimatologie (1900 – 1998) mit 95%-Band nach GOURETSKI UND KOLTERMANN (2004). . . . .	111
Abb. 3-33: Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Langzeitmittel (1971 – 2000) und 95 %-Grenzen. $1 \text{ km}^3/\text{a}$ entspricht $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$ . (Quelle: WSA-Lauenburg). . . . .	112
Abb. 3-34: Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe in Jahr 2004 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1.96$ Standardabweichungen). $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechen $2.592 \text{ km}^3/\text{Monat}$ . (Quelle: WSA-Lauenburg). . . . .	112
Abb. 3-35: Jahresgang 2004 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1.96$ Standardabweichungen). . . . .	113

## Meereschemie

Abb. 4-1: Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit Verteilungen ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächenwasser im Winter 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten (außer für $\text{PO}_4$ ). . . . .	120
Abb. 4-2: Verhältnis Silikat zu Phosphat (M/M) im Oberflächen- und Bodenwasser im Winter 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten. . . . .	121
Abb. 4-3: Verteilungsmuster ( $\mu\text{mol/L}$ ) für Phosphat, Silikat, Nitrat und Nitrit in der Deutschen Bucht im März 2004. . . . .	122
Abb. 4-4: Salzgehaltsverteilung im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2004. . . . .	124
Abb. 4-5: Zeitserien der geschätzten winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (Salzgehalt 30) mit 95%-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Referenzwerten von 1936, soweit verfügbar. . . . .	126
Abb. 4-6: Phosphatkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten. . . . .	128
Abb. 4-7: Nitratkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten. . . . .	128
Abb. 4-8: Silikatkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten . . . . .	129
Abb. 4-9: Ammoniumkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten. . . . .	129
Abb. 4-10: Nitritkonzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten. . . . .	130
Abb. 4-11: Chlorophyllkonzentration ( $\mu\text{g/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004; $\log_2$ -Farbskala beachten. . . . .	131
Abb. 4-12: Sauerstoffsättigung (%) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004. . . . .	132

Abb. 4-13: DON- und DOP-Konzentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004. ....	134
Abb. 4-14: Verhältnis C zu N (M/M) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2004. ....	135
Abb. 4-15: Vertikalverteilungen entlang $56^\circ\text{N}$ im Sommer 2004 (FS Gauß, Reise #425) für Chlorophyll, produktionsrelevante Nährstoffe und Sauerstoff. ....	136
Abb. 4-16: Jahresgänge der Nährstoffkonzentrationen ( $\mu\text{mol/L}$ ) bei Helgoland Reede mit Klimatologie. ....	138
Abb. 4-17: Stationsnetz zur Schadstoffüberwachung im Meerwasser der Deutschen Bucht. ....	142
Abb. 4-18: Geographische Konzentrationsverteilungen (ng/L) von $\alpha$ -, $\beta$ - und $\gamma$ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai und August 2004. ....	144
Abb. 4-19: Geographische Verteilungen des Konzentrationsverhältnisses $\alpha$ -HCH zu $\gamma$ -HCH im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Mai und August 2004. ....	145
Abb. 4-20: HCH-Konzentration vs. Salzgehalt im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Mai 2004; +/- Symbole bedeuten $\alpha/\gamma$ -Verhältnis $< 0.4$ (+) bzw. $> 0.7$ (-), vgl. Abb. 4-19. ....	146
Abb. 4-21: Zeitliche Entwicklung der $\alpha$ - und $\gamma$ -HCH-Konzentrationen an Station Elbe1 (ex T41) seit 1987. Kreise enthalten den Beobachtungsmonat (1, 2, 3, ..., O, N, D). ....	147
Abb. 4-22: Zeitliche Entwicklung der $\alpha$ -, $\beta$ - und $\gamma$ -HCH-Konzentrationen bei Stade (Elbe) seit 1995. ....	148
Abb. 4-23: Konzentrationstrends für $\alpha$ - und $\gamma$ -HCH in der Deutschen Bucht. Kreise sind Jahresmittel mit Probenanzahl / Jahr (1, 2, ..., 9, X). Die Zeitkonstanten $k_{(i)}$ der (partiellen) Exponentialtrends liefern »Halbwertszeiten« ( $\ln(0.5)/k$ ) von 4 ( $\alpha$ ) bzw. 2 Jahren ( $\gamma$ seit ca. 1997)... ..	149
Abb. 4-24: Geographische Verteilung des TOC-Gehalts im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2004. ....	153
Abb. 4-25: HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2004.. ....	154
Abb. 4-26: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht im Jahr 2004. ....	156
Abb. 4-27: Beispiele für Konzentrationsmuster von n-Alkanen im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im August 2004. Hintergrundbelastung mit Resten bio- und petrogenen Alkane (Ente1), hohe Alkananteile von terrestrischen Pflanzen (Stade/Elbe), von Algenstoffwechselprodukten (NGW8) und infolge Ölverschmutzung (BRGRU). Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-17, S. 142. ....	158
Abb. 4-28: Geographische Konzentrationsverteilung für die Summe der n-Alkane von $\text{C}_{20}$ bis $\text{C}_{30}$ im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht (5 m) im Juli / August 2004. Werte unterhalb der Säulen geben den CPI, Säulenhöhen in ng/L. ....	159
Abb. 4-29: Geographische Konzentrationsverteilungen für die n-Alkane $\text{C}_{13}$ bis $\text{C}_{19}$ im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Juli / August 2004. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen. ....	160
Abb. 4-30: Konzentrationen einiger PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht im Juli / August 2004. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen. ....	162
Abb. 4-31: Mittleres PAK-Konzentrationsmuster im Sediment der Deutschen Bucht. ....	163
Abb. 4-32: Benzo[a]Pyren-Konzentrationen im Oberflächensediment der Deutschen Bucht. ....	164
Abb. 4-33: Konzentrationen (ng/L) einiger Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Juli / August 2004. ....	167
Abb. 4-34: Konzentrationen (ng/L) einiger Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Juli / August 2004. ....	169
Abb. 4-35: Saisonale Entwicklung der Konzentrationen ausgewählter Pestizide in der Elbe im Jahr 2004 bei Stade (Mai bis Juli) bzw. Blankenese. ....	170

Abb. 4-36: Konzentrationsverhältnisse (Aug/Mai 2004) ausgewählter Pestizide in der Deutschen Bucht und bei Stade (Elbe). Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-34, S. 169. ....	170
Abb. 4-37: Relativer Anteil der gelösten Gehaltsfraktion am Gesamtmetallgehalt für küstenfernes Meerwasser der Deutschen Bucht. Der Boxstatistik (s. Fußnote, S. 177) liegen »Winterproben« aus dem Zeitraum 1999 – 2004 zugrunde. ....	177
Abb. 4-38: Räumliche Verteilungen des Zink- und Cadmiumgehalts im filtrierten Oberflächenwasser im Februar 2004. Die Probenahmestationen sind durch Kreuze gekennzeichnet. ....	178
Abb. 4-39: Bleigehalt im küstennahen Oberflächenwasser der Deutschen Bucht (28 < Salzgehalt < 30) für gelöste (oben) und partikelgebundene (unten, bezogen auf Trockenmasse) Fraktion. ....	179
Abb. 4-40: Cadmiumgehalt im Winter im filtrierten oberflächennahen Meerwasser der Deutschen Bucht bei Salzgehalten über 34. ....	180
Abb. 4-41: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion (< 20 µm) am Gesamtsediment im Zeitraum 1995 – 2004. ....	181
Abb. 4-42: Weiskarte der Sedimentstationen zur Trendüberwachung. ....	182
Abb. 4-43: Räumliche Verteilungen des Eisen- und Quecksilbergehalts in der Feinkornfraktion (< 20 µm) des Oberflächensediments im Februar 2000. ....	184
Abb. 4-44: Räumliche Verteilung des Bleigehalts in der Feinkornfraktion (< 20 µm) des Oberflächensediments im Februar 2000. ....	185
Abb. 4-45: Quecksilbergehalt in der Feinkornfraktion (< 20 µm) des Oberflächensediments südöstlich Helgolands (»KS«, vgl. Abb. 4-42, S. 182). ....	186
Abb. 4-46: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von <sup>137</sup> Cs und <sup>90</sup> Sr an den früheren Positionen der Feuerschiffe »Borkumriff« und »Elbe 1«. ....	192
Abb. 4-47: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von <sup>137</sup> Cs und <sup>90</sup> Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2004. Unterhalb der Säulen Stationskennungen. ....	193
Abb. 4-48: Verteilungen der Aktivitätskonzentration von <sup>239,240</sup> Pu (oben) und des Plutonium-Aktivitätsverhältnisses <sup>238</sup> Pu zu <sup>239,240</sup> Pu im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2004. ....	194
Abb. 4-49: Verteilung der Aktivitätskonzentration des Transurans <sup>241</sup> Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2004. ....	195



# Tabellenverzeichnis

## Atmosphärenphysik

Tab. 2-1: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2004. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark). . . . .	39
Tab. 2-2: Kontingenztabelle der Wetterlagen im Jahr 2004 (%). . . . .	39
Tab. 2-3: Nordseewindstatistik. Mittelwerte und Standardabweichungen (m/s) für zonale ( $u, s_u$ ) und meridionale ( $v, s_v$ ) Windkomponenten, Vektorwind und -richtung ( $V, V_{dir}$ ), Geschwindigkeitsbetrag (Vel), Persistenz ( $V/Vel$ in %) und »Fläche« der 50%-Wahrscheinlichkeitsellipse ( $FE_{50} = 1.3863 \pi s_a s_b$ in J/kg). . . . .	53

## Physikalische Ozeanographie

Tab. 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht im Jahr 2004. . . . .	69
Tab. 3-2: Wellenhöhenstatistik (Modelldaten, alle Angaben in m). Das Zentil $P_{90}$ unterteilt die Menge der nach aufsteigendem Wert sortierten Wellenhöhen im Verhältnis 9:1. Zur Lage der Stationen s. Abb. 3-9, S. 75. . . . .	76
Tab. 3-3: Ergänzende lokale Statistik für Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit zu Abb. 3-11 und Abb. 3-12. Zur Lage der Stationen s. Abb. 3-9, S. 75. . . . .	79
Tab. 3-4: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (SWH) bei Helgoland (Waverider-Daten, keine Seegangsrichtung). . . . .	79
Tab. 3-5: Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Feuerschiff »Deutsche Bucht« im Jahr 2004 (WAM-Antriebsdaten, DWD). . . . .	81
Tab. 3-6: Wie Tab. 3-5, jedoch für Windsee (WAM-Modell, DWD). . . . .	81
Tab. 3-7: Zensierte prozentuale Häufigkeitsverteilung für Windgeschwindigkeit und Windrichtung an der Position »Ekofisk« im Jahr 2004 (WAM-Antriebsdaten, DWD). . . . .	83
Tab. 3-8: Wie Tab. 3-7, jedoch für Windsee (WAM-Modell, DWD). . . . .	83
Tab. 3-9: Wärmehalt entlang 56 °N im Zeitraum 1998 – 2004. . . . .	102
Tab. 3-10: Relative Nordseeoberfläche (%) mit bodennahen Salzgehalten über 35 (Atlantikwasser) mit Winter NAO-Index (LOEWE UND KOSLOWSKI 1998). . . . .	106

## Meereschemie

Tab. 4-1: Geschätzte Nährstoffkonzentrationen mit 95%-Vertrauensbereich ( $\mu\text{mol/L}$ ) für Küstenwasser ( $S_{30}$ ) und Meerwasser der eigentlichen Deutschen Bucht ( $S_{33}$ ). . . . .	125
Tab. 4-2: Konzentrationen von n-Alkanen im Wasser der Deutschen Bucht im August 2004. . . . .	157
Tab. 4-3: Regional gemittelte Konzentrationen (ng/L) einiger polarer Pestizide in der Deutschen Bucht im August 2004. (LoD = Nachweisgrenze.) . . . . .	168
Tab. 4-4: Hintergrundkonzentrationen der Elemente Cadmium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Zink in der gelösten Fraktion (Wasser) und im Sediment ( $< 20 \mu\text{m}$ ). Wasser: OSPAR Region »Greater North Sea«. Sediment: BSH-Sedimentkernuntersuchungen in der Deutschen Bucht. . . . .	175
Tab. 4-5: Elementkonzentrationen im filtrierten Meerwasser der Deutschen Bucht im Jan / Feb 2004. Proben nach Salzgehalt stratifiziert, Konzentrationen in ng/L. . . . .	178
Tab. 4-6: Feinkornanteile ( $f_{20}$ ) und Metallgehalte des Oberflächensediments in Trendüberwachungsgebieten der Deutschen Bucht im Jahr 2004. Mittelwerte mit Standardabweichungen in mg/kg, Eisen und Feinkornanteil in %. Zur Lage der Gebiete vgl. Abb. 4-42, S. 182. . . . .	183
Tab. 4-7: Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser und Sediment der Nordsee. . . . .	188



# Tafelverzeichnis

## Meereschemie

<i>Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar</i> .....	119
<i>Tafel 4-2: HCH-Isomere</i> .....	143
<i>Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe</i> .....	151
<i>Tafel 4-4: Kohlenwasserstoffe</i> .....	155
<i>Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</i> .....	161
<i>Tafel 4-6: Herbizide</i> .....	165
<i>Tafel 4-7: Metalle mit toxischem Potential in der Meeresumwelt</i> .....	174
<i>Tafel 4-8: Radioaktivität</i> .....	189



# List of Figures

## Atmospheric Physics

- Fig. 2-1: NAO Index 2004. *lk*: Ponta Delgada & Akureyri (LOEWE AND KOSLOWSKI 1998), *lpf6(lk)*: low-pass filtered (6 month). *cruuea*: Gibraltar & Southwest Island. *cpccdb*: Amplitude of NAO pattern from rotated principal component analysis of 700 hPa height anomalies. ....33
- 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 2004 of raw (yellow) and low-pass filtered (6 month, blue) monthly mean states, respectively. ....34
- Fig. 2-3: Sea level pressure (hPa) for the SW-gale of Oct, 4 2004 together with grid positions of weather-typing scheme. ....36
- Fig. 2-4: Percent frequency distribution of daily circulation states for the period 1971 – 2000 together with classification criteria. ....37
- Fig. 2-5: Air circulation around high (A) and low pressure systems (C). ....38
- Fig. 2-6: Seasonal frequencies of reduced weather types in 2004 along with percentiles of empirical distributions for 1971 – 2000 (stacked columns); percentile range: 1 – 99, internal interval limits at 5, 25, 50 (median), 75, 95 %.....42
- Fig. 2-7: As Fig. 2-6, except for monthly frequencies.....43
- Fig. 2-8: Classified seasonal sea level pressure distributions (hPa). Left: climatology (1971 – 2000), middle: 2004, right: anomalies; 1 = Winter = January, February, March etc. ....46
- Fig. 2-9: Monthly climatology of sea level pressure (hPa), base period 1971 – 2000. ....47
- Fig. 2-10: Monthly sea level pressure distributions (hPa) in 2004. ....49
- Fig. 2-11: Monthly SLP-anomalies (hPa) in 2004.....50
- Fig. 2-12: Seasonal 50%-probability ellipses for the »North Sea Wind« (1=winter=JFM, 2=spring, etc.); top: 2004, bottom: 2003. ....52
- Fig. 2-13: Progressive daily vectors of the »North Sea Wind« with ensemble and climatology. Markers indicate the first day in a month, years final points of ensemble members. ....54
- Fig. 2-14: Seasonal cycle in 2004 of monthly averaged daily global radiation totals at Norderney together with intramonthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means, and 95%-band (climatology  $\pm 1.96$  standard deviations). 1 kJcm<sup>-2</sup> is equivalent to a radiation flux density of 116 Wm<sup>-2</sup>. ....57
- Fig. 2-15: Monthly air surface temperatures at Norderney for 2004 together with 1971 – 2000 base period means, and 95%-band (climatology  $\pm 1.96$  standard deviations). ....58

## Physical Oceanography

- Fig. 3-1: Seasonal surface circulation of the North Sea in 2004 (JFM = January-February-March, AMJ ...). Vector mean currents from »BSHcmod«. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude. ....65
- Fig. 3-2: Volume transport through the Strait of Dover in 2004 (BSHcmod); 1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s...66
- Fig. 3-3: Volume transport through the Kattegat in 2004 (BSHcmod); 1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s. ....67
- Fig. 3-4: Classification scheme for daily residual currents in the German Bight. ....68
- Fig. 3-5: Seasonal frequencies of circulation patterns in the German Bight for 2003 and 2004. . ....70

## List of Figures

Fig. 3-6: Frequency and duration of main circulation types. ....	70
Fig. 3-7: Distribution of daily circulation patterns on weather types in 2004. Narrow columns give expected frequencies for independence. ....	71
Fig. 3-8: Same as Fig. 3-7, except for 2003.....	72
Fig. 3-9: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2004; JFM = January, February, March etc. Figures stand for stations ›Brent‹ (1), ›Ekofisk‹ (2), ›Euro‹ (3), ›NSB-II‹ (4), ›Helgoland‹ (5), and ›UFS DB‹ (6). ....	75
Fig. 3-10: Wave height, windsea and swell during the gales ›Uschi‹ (Fig. 2-3, p. 36) and ›Pia‹ (Table 2-1, p. 39). ....	76
Fig. 3-11: Scatter plot of simulated versus observed wave height and direction at Station NSB-II. For additional explanations cf. Fig. 3-12. ....	77
Fig. 3-12: Scatter plot of simulated versus observed waveheight and windspeed at Ekofisk and Helgoland. The lines parallel to the regression line have vertical distances of $\pm 1.96$ standard errors of estimate from it, such that 95 % of the sample points should be included between them. For supplementary statistics cf. Table 3-3.....	78
Fig. 3-13: Seasonal percent frequency distributions of wind speed as well as wave height and direction at position ›UFS DB‹ in 2004. Note $\log_2$ -scaling of wave height. Model data courtesy DWD.....	82
Fig. 3-14: Same as Fig. 3-13, except for position ›Ekofisk‹. ....	84
Fig. 3-15: 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....	88
Fig. 3-16: Low-water levels at Cuxhaven in 2004 (rel. to ordnance datum) together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band as well as intramonthly 90%-limits....	89
Fig. 3-17: Monthly mean low-water levels (cm) at Cuxhaven with anomalies and percentiles (%). Low-pass filter width 3 months. Color-steps for percentiles: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 %. ....	90
Fig. 3-18: Monthly SST anomalies in 2004 as departures from the 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. ....	93
Fig. 3-19: Seasonal cycle of areal mean weekly SST of the North Sea from December 2003 through November 2004 and ensemble of corresponding cycles since 1968. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971 – 1993. ...	94
Fig. 3-20: Seasonal cycle 2004 of monthly mean SST at Helgoland Reede together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology $\pm 1.96$ standard deviations). ....	94
Fig. 3-21: Ranked annual mean North Sea SST.....	95
Fig. 3-22: 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). ....	96
Fig. 3-23: Classified seasonal SLP distributions (hPa). Left: 1978 – 1987, middle: 1991 – 2000, right: middle minus left; 1 = Winter = January, February, March etc.....	97
Fig. 3-24: Temperature stratification ( $^{\circ}\text{C}$ ) in summer 2004 (RV Gauß, Reise #425). ....	99
Fig. 3-25: Summery temperature stratification ( $^{\circ}\text{C}$ ) along 56 $^{\circ}\text{N}$ for years 1998 through 2004. ...	100
Fig. 3-26: Temperature stratification ( $^{\circ}\text{C}$ ) in 2004 at MARNET stations ›Deutsche Bucht‹, ›Ems‹ and ›NSB II‹. Sensor depths: 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m. ....	101

Fig. 3-27: Accumulated areal ice volume for the German North Sea coast during 1897 – 2004. . . . .	103
Fig. 3-28: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2004. . . . .	106
Fig. 3-29: Salinity stratification in summer 2004 (RV Gauß, Cruise #425) . . . . .	107
Fig. 3-30: Trajectory of a Norwegian profiling Argo-float drifting about the transition zone towards the North Atlantic. Marked positions are about 10 days apart in time and refer to the profiles recorded during ascents from Aug, 13 to Dec, 1 2003 (cf. Fig. 3-32). FIC and FSC denote British CTD stations in the Fair-Isle Current and Faroe-Shetland Channel (cf. Fig. 3-31). . . . .	109
Fig. 3-31: Salinity anomalies in the ›Faroe Shetland Channel‹ and ›Fair Isle Current‹. Departures from 1971 – 2000 base period means; FSC-anomalies are scaled by factor 3. For a location map cf. Fig. 3-30, p. 109. (Redrawn from Figs. 32 & 36, ICES 2005.) . . . . .	110
Fig. 3-32: Salinity profiles as recorded during fall 2003 by a Norwegian float drifting about the transition zone towards the North Atlantic (cf. Fig. 3-30, p. 109). Climatology (1900 – 1998) and 95%-band after GOURETSKI AND KOLTERMANN (2004). . . . .	111
Fig. 3-33: Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971 – 2000) and 95 %-limits. 1 km <sup>3</sup> /a is equivalent to 31.7 m <sup>3</sup> /s. (Data courtesy WSA-Lauenburg.) . . . . .	112
Fig. 3-34: Monthly mean and maximum runoff of Elbe River in 2004 at Neu-Darchau weir together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ±1.96 standard deviations). 1000 m <sup>3</sup> /s are equivalent to 2.592 km <sup>3</sup> /month. (Data courtesy of WSA-Lauenburg.) . . . . .	112
Fig. 3-35: Seasonal cycle 2004 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). . . . .	113

## Marine Chemistry

Fig. 4-1: Phosphate, Silicate, Nitrate, and Nitrite distributions ( $\mu\text{mol/L}$ ) in surface water in winter 2004. Note $\log_2$ color scale (except for $\text{PO}_4$ ). . . . .	120
Fig. 4-2: Silicate to phosphate ratio (M/M) in near-surface and -bottom water in winter 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	121
Fig. 4-3: Geographical distributions ( $\mu\text{mol/L}$ ) of phosphate, silicate, nitrate and nitrite in the German Bight in March 2004. . . . .	122
Fig. 4-4: Salinity distribution in near-surface sea water of the German Bight in March 2004. . . . .	124
Fig. 4-5: Time series of wintry nutrient concentrations estimated for salinity 30, typical of coastal waters in the German Bight. Prediction limits are depicted as 95% bars. Reference concentrations from 1936 shown where available. . . . .	126
Fig. 4-6: Phosphate concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	128
Fig. 4-7: Nitrate concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	128
Fig. 4-8: Silicate concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	129
Fig. 4-9: Ammonium concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	129
Fig. 4-10: Nitrite concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	130

## List of Figures

Fig. 4-11: Chlorophyll concentration ( $\mu\text{g/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004 (note $\log_2$ color scale). . . . .	131
Fig. 4-12: Oxygen saturation (%) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004. . . . .	132
Fig. 4-13: DON and DOP concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004. . . . .	134
Fig. 4-14: C:N ratio (M/M) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2004. . . . .	135
Fig. 4-15: Vertical profiles along $56^\circ\text{N}$ in summer 2004 (RV Gauß, cruise #425) of chlorophyll, various nutrients, and oxygen. . . . .	136
Fig. 4-16: Annual cycles of nutrient concentrations ( $\mu\text{mol/L}$ ) at Helgoland Roads versus climatology. . . . .	138
Fig. 4-17: Observational network for contaminant monitoring in the German Bight. . . . .	142
Fig. 4-18: Geographical distributions of $\alpha$ -, $\beta$ -, and $\gamma$ -HCH concentrations (ng/L) for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May and August 2004. . . . .	144
Fig. 4-19: Geographical distributions of the concentration ratio $\alpha$ -HCH to $\gamma$ -HCH in near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May and August 2004. . . . .	145
Fig. 4-20: HCH-concentration vs. salinity in near-surface sea water of the German Bight in May 2004; crossed and dashed symbols indicate $\alpha/\gamma$ -ratio $< 0.4$ (+) and $> 0.7$ (-), cf. Fig. 4-19. . . . .	146
Fig. 4-21: Temporal evolution since 1987 of $\alpha$ - and $\gamma$ -HCH concentrations at station Elbe1 (ex T41). Figures inside bullets give month of observation (1, 2, 3, . . . , O, N, D). . . . .	147
Fig. 4-22: Temporal evolution since 1995 of $\alpha$ -, $\beta$ -, and $\gamma$ -HCH concentrations near Stade (Elbe River). . . . .	148
Fig. 4-23: Trends in $\alpha$ - and $\gamma$ -HCH concentrations in the German Bight. Annual mean bullets with samples/yr; time constants $k_{(i)}$ yield »half lifes« of 4 ( $\alpha$ ) and 2 yrs ( $\gamma$ ) since about 1997). . . . .	149
Fig. 4-24: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight in May 2004. . . . .	153
Fig. 4-25: HCH-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2004. . . . .	154
Fig. 4-26: Pollution sightings in the German Bight in 2004. . . . .	156
Fig. 4-27: Different n-Alkane patterns in near-surface sea water of the German Bight in August 2004. Background concentrations with remnants of bio- and petrogenic Alkanes (Ente1), high fractions from terrestrial plants (Stade/Elbe River), from algae metabolites (NGW8), and due to oil spill (BRGU). Cf. Fig. 4-17, p. 142 for a station map. . . . .	158
Fig. 4-28: Geographical distribution of total concentration of n-Alkanes from $\text{C}_{20}$ to $\text{C}_{30}$ for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in July / August 2004. Figures below columns give the CPI, column heights in ng/L. . . . .	159
Fig. 4-29: Geographical distribution of concentrations of n-Alkanes $\text{C}_{13}$ to $\text{C}_{19}$ for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in July / August 2004. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs. . . . .	160
Fig. 4-30: Concentrations of some PAHs in near-surface water (5 m) of the German Bight in July / August 2004. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs. . . . .	162
Fig. 4-31: Mean PAH concentration pattern in sediment samples from the German Bight. . . . .	163
Fig. 4-32: B[a]P concentrations in surface sediments of the German Bight. . . . .	164

Fig. 4-33: Concentrations (ng/L) of some triazine herbicides in near-surface sea water of the German Bight in July / August 2004. ....	167
Fig. 4-34: Concentrations (ng/L) of some phenylurea herbicides in near-surface sea water of the German Bight in July / August 2004. ....	169
Fig. 4-35: Seasonal evolution in 2004 of selected pesticides in the Elbe River at Stade (May through July), respectively Blankenese. ....	170
Fig. 4-36: Concentration ratios (Aug/May 2004) of selected pesticides in the German Bight and at Stade (Elbe River). As to geographical positions cf. Fig. 4-34, p. 169. ....	170
Fig. 4-37: Ratio of dissolved to total metal concentration (%) for sea water in the German Bight proper. Boxstatistics are based on winter samples from 1999 – 2004. ....	177
Fig. 4-38: Spatial distributions of zinc and cadmium concentration in filtrated near-surface sea water in February 2004. Crosses indicate sampling sites. ....	178
Fig. 4-39: Lead concentration in coastal near-surface sea water of the German Bight (28 < salinity < 30) for dissolved (top) and particulate (bottom) dry weight fraction. ....	179
Fig. 4-40: Cadmium concentrations in winter in filtrated near-surface sea water from the German Bight. Only samples with an associated salinity above 34 were used. ....	180
Fig. 4-41: Mean spatial distribution of relative grain size fraction (< 20 $\mu\text{m}$ ) as compiled from surface sediment samples from the period 1995 – 2004. ....	181
Fig. 4-42: Location map of sediment stations used in trend monitoring. ....	182
Fig. 4-43: Spatial distributions of iron and mercury content in the fine grain fraction (< 20 $\mu\text{m}$ ) of surface sediments in February 2000. ....	184
Fig. 4-44: Spatial distribution of mercury content in the fine grain fraction (< 20 $\mu\text{m}$ ) of surface sediments in February 2000. ....	185
Fig. 4-45: Mercury content in the fine grain fraction (< 20 $\mu\text{m}$ ) of surface sediments southeast of Helgoland (>KS<, cf. Fig. 4-42, p. 182). ....	186
Fig. 4-46: Time series of annual maximum activity concentrations of $^{137}\text{Cs}$ and $^{90}\text{Sr}$ at former positions of out-of-operation light vessels >Borkumriff< and >Elbe 1<. ....	192
Fig. 4-47: Distribution of $^{137}\text{Cs}$ and $^{90}\text{Sr}$ activity concentrations in near-surface sea water of the German Bight during 2004. Underneath columns station IDs. ....	193
Fig. 4-48: Distributions of activity concentration of $^{239,240}\text{Pu}$ (top) and the Plutonium activity ratio $^{238}\text{Pu}$ to $^{239,240}\text{Pu}$ in near-surface sea water of the German Bight during 2004. ....	194
Fig. 4-49: Distribution of activity concentration of transuranic $^{241}\text{Am}$ in near-surface sea water of the German Bight during 2004. ....	195



# List of Tables

## Atmospheric Physics

Table 2-1: Calendar of daily weather types in 2004. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).....	39
Table 2-2: Contingency table of weather types in 2004 (%).....	39
Table 2-3: North Sea Windstatistics. Means and standard deviations (m/s) for zonal ( $u$ , $s_u$ ) and meridional wind components ( $v$ , $s_v$ ), vector wind and direction ( $V$ , $V_{dir}$ ), velocity (Vel), persistence ( $V/Vel$ in %), and »area« of 50%-probability ellipse ( $FE_{50} = 1.3863 \pi s_a s_b$ in J/kg). ...	53

## Physical Oceanography

Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2004.....	69
Table 3-2: Wave height statistics (model data, all entries in m). The 90th percentile divides the waveheight distribution 9:1. For a location map cf. Fig. 3-9, p. 75.....	76
Table 3-3: Local wave height and wind speed statistics supplementary to Fig. 3-11 and Fig. 3-12. For a location map cf. Fig. 3-9, p. 75. ....	79
Table 3-4: Percent frequency distribution of significant wave height (SWH) near Helgoland (waverider data, no wave direction).....	79
Table 3-5: Censored percent frequency distribution of wind speed and direction at light vessel »Deutsche Bucht« in 2004 (WAM-Forcing, DWD).....	81
Table 3-6: Same as Table 3-5, but for windsea (WAM-Model, DWD). ....	81
Table 3-7: Censored percent frequency distribution of wind speed and direction at »Ekofisk« in 2004 (WAM-Forcing, DWD).....	83
Table 3-8: Same as Table 3-7, but for windsea (WAM-Model, DWD). ....	83
Table 3-9: Heat content along 56 °N during 1998 – 2004.....	102
Table 3-10: Fractional North Sea area (%) with near-bottom salinity exceeding 35 (Atlantic water) mit Winter NAO-Index (LOEWE AND KOSLOWSKI 1998). ....	106

## Marine Chemistry

Table 4-1: Estimated nutrient concentrations with 95% prediction limits ( $\mu\text{mol/L}$ ) for coastal water ( $S_{30}$ ) and sea water of the German Bight proper ( $S_{33}$ ). ....	125
Table 4-2: Concentrations of n-Alkanes in German Bight sea water in August 2004.....	157
Table 4-3: Regional average concentrations (ng/L) of some polar pesticides in the German Bight in August 2004. (LoD = Limit of Detection.).....	168
Table 4-4: Background concentrations of cadmium, copper, lead, mercury and zinc in the dissolved fraction (water) and in sediment (< 20 $\mu\text{m}$ ). Water: OSPAR region »Greater North Sea«, sediment: BSH sediment core samples from the German Bight. ....	175
Table 4-5: Dissolved metal concentrations in the German Bight in Jan / Feb 2004. Samples stratified as to salinity, concentrations in ng/L.....	178
Table 4-6: Fine grain fractions (f20) and metal concentrations in surface sediments from trendmonitoring areas in the German Bight in 2004. Means and standard deviations in mg/kg, except iron and fine grain fraction (%). For a location map cf. Fig. 4-42, p. 182. ....	183
Table 4-7: Activity of some natural radio nuclides for North Sea sea-water and sediment... ..	188



# Autoren / Authors

Gerd Becker	+49-40-3190-3200	gerd.becker@bsh.de
Uwe Brockmann*	+49-40-42838-3989	brockmann@rrz.uni-hamburg.de
Stephan Dick	+49-40-3190-3130	stephan.dick@bsh.de
Alexander Frohse	+49-40-3190-3212	frohse@bsh.de
Jürgen Herrmann	+49-40-3190-3325	herrmann@bsh.de
Birgit Klein	+49-40-3190-3286	birgit.klein@bsh.de
Holger Klein	+49-40-3190-3220	holger.klein@bsh.de
Peter Loewe	+49-40-3190-3214	loewe@bsh.de
Hartmut Nies	+49-40-3190-3300	nies@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



## 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.,<br>Mittelstaedt, E.,<br>Feistel, R., Klein, H.             | Hydrographische Untersuchungen im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992, 49 pp.  |
| 3  | (1994) | Oliczewski, J.,<br>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.,<br>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.,<br>Gabriel, H., Goroncy, I.,<br>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.,<br>Mittelstaedt, E.,<br>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.,<br>Klein, H., Berger, R.,<br>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.,<br>Stanislawczyk, I.,<br>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
-

- 39 (2005) Sztobryn, M., Stigge, H.-J., Wielbińska, D., Stanisławczyk, I., Kańska, A., Krzysztofik, K., Kowalska, B., Letkiewicz, B., Mykita, M., Weidig, B. Sturmfluten in der Südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)  
Storm Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts)
- 40 (2006) Loewe, P., Becker, G., Brockmann, U., Dick, S., Frohse, A., Herrmann, J., Klein, B., Klein, H., Nies, H., Schmolke, S., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N., Weigelt, S. Nordseezustand 2004
-

