

System Nordsee

2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

System Nordsee

2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen

P. Loewe • H. Klein • S. Weigelt-Krenz (Eds.)

**Berichte des
Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie
Nr. 49/2013**

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.

›SYSTEM NORDSEE‹ im Internet:

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

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2013
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.

Empfohlene Quellenangabe für inhaltliche Verweise:

Loewe, P., H. Klein, S. Weigelt-Krenz (Eds.), System Nordsee – 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen. Berichte des BSH, Nr. 49, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 2013.

Vorwort

Die Nordsee ist attraktiver Erholungsraum für Millionen, Lebensraum für den Fisch auf unserem Teller, liefert Rohstoffe wie Öl und Gas, dient als Verkehrsweg für die Schifffahrt und bietet Raum zur Erzeugung regenerativer Energien durch Wind, Wellen und Gezeiten. Gleichzeitig soll die Nordsee mit den Abfallprodukten, Abwässern und Abgasen unserer Zivilisation zurechtkommen und Klimaveränderungen verkraften.



Zwischen Juli 2006 und Juni 2007 war die Nordsee so warm wie in keinem Kalenderjahr seit Beginn unserer Analysen. Diese Periode setzte mit einer europaweiten Hitzewelle ein, bescherte uns im Herbst und Winter an 53 Tagen Sturm und endete mit einem Sommer im Frühjahr. Zu den »Begleiterscheinungen« zählten die 9. Allerheiligenflut mit erheblichen Dünenabbrüchen oder die Freakwelle, die die Messplattform Fino I in 15 m Höhe demolierte. Die Temperatur der Nordsee lag durchgängig 2 Grad, die der Deutschen Bucht sogar fast 3 Grad über dem Klimamittel. Gleichzeitig war die Nordhemisphäre mit »nur« 0.8 Grad über dem Mittel des 20. Jahrhunderts wärmer als in den vergangenen 130 Jahren. Wie sich dies weiterentwickelt und auf Schifffahrt, Küste und Meer auswirkt, ist Gegenstand unserer Untersuchungen.

Auch die chemische Belastung des Lebensraums Nordsee verändert sich. Nährstoffeinträge aus industrieller Landwirtschaft und Verkehrsemissionen beeinflussen die Lebensbedingungen mariner Organismen. Künstlich hergestellte Verbindungen, die es nie in der Umwelt gab, werden heute in deutlich messbaren Konzentrationen im Meer nachgewiesen. Hierzu zählen in großem Maßstab produzierte Industriechemikalien – wie perfluorierte Tenside zur Imprägnierung von Sport- und Freizeitbekleidung – über deren langfristige Wirkung in der belebten Natur wir bislang nichts wissen.

Den Schutz der Nordsee zu gewährleisten und gleichzeitig eine nachhaltige Nutzung zu ermöglichen, ist ein Ziel des BSH – ebenso wie der europäischen Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL). Die notwendigen Bedingungen zu definieren, umzusetzen und zu überwachen ist ein iterativer Prozess mit vielen Beteiligten. Dazu messen, analysieren, dokumentieren und interpretieren wir die Klima- und Umweltvariablen, die Zustand und Entwicklung des Systems Nordsee bestimmen und dessen Nutzung beeinflussen. Dies dient einem wachsenden, wissenschaftlich fundierten Systemverständnis, das an der Basis einer sinnvollen, effizienten und wirksamen Umsetzung der MSRL stehen muss.

Sie sind herzlich eingeladen, sich »unser« Wissen anzueignen.

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'Monika Breuch-Moritz'.

Monika Breuch-Moritz

Präsidentin des
Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Alles ist in der Natur verbunden:
Ein Zustand strebt zum andern und bereitet ihn vor.

*

Johann Gottfried von Herder (1744 – 1803)

Ideen zur Philosophie der Geschichte der Menschheit
(1. Teil, 5. Buch (VI), 1784)

Vorwort	___3
Apophthegma	___4
Zusammenfassungen	___9
Compilation of Summaries	___23
1 System Nordsee	___35
<•> <i>P. Loewe, H. Klein & S. Schmolke</i>	.....
2 Atmosphärenphysik	___37
<•> <i>P. Loewe</i>	.....
2.1 Einführung	..... 38
2.2 Daten	..... 39
2.3 Wetterlagen	..... 40
2.3.1 Klassifizierung	..... 40
2.3.2 Wetterlagenkalender	..... 43
2.3.3 Reduzierte Wetterlagen	..... 47
2.3.4 Häufigkeiten	..... 50
2.3.5 Lebensdauern	..... 54
2.3.6 Übergänge	..... 59
2.4 Luftdruckverteilung	..... 68
2.4.1 MSLP unter den Skanden	..... 69
2.4.2 MSLP-Verteilungen 2006 & 2007	..... 73
2.5 Nordseewind	..... 85
2.5.1 Saisonale Vektorwinde	..... 85
2.5.2 Zeitliche Entwicklung	..... 88
2.6 Sturm	..... 92
2.6.1 Schwellwerte	..... 92
2.6.2 Sturmkataloge	..... 96
2.6.3 Sturmaufkommen 2005/06 & 2006/07	..... 100
2.7 Lufttemperatur und Strahlung	..... 102
2.8 Zusammenfassung	..... 106
2.9 Literatur	..... 112
3 Meeresphysik	___115
<•> <i>H. Klein & P. Loewe</i>	.....
3.1 Einführung	..... 116
<•> <i>P. Loewe & H. Klein</i>	.....

3.2	Strömung	117
	<•> <i>F. Janssen, H. Klein & P. Loewe</i>	
3.2.1	Einführung	117
3.2.2	Geographische Verteilungen	117
3.2.3	Wassertransporte	122
3.2.4	Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht	125
	3.2.4.1 Daten, Methodik und Überblick	126
	3.2.4.2 2006	128
	3.2.4.3 2007	128
3.2.5	Zusammenfassung	130
3.3	Seegang	131
	<•> <i>D. Schrader</i>	
3.3.1	Einführung	131
3.3.2	Geographische Verteilungen	131
3.3.3	›Britta‹ – Extremseegang & Allerheiligenflut	134
3.3.4	Zusammenfassung	136
3.4	Wasserstand	137
	<•> <i>S. Müller-Navarra</i>	
3.4.1	Einführung	137
3.4.2	Schwankungen des Meeresspiegels	137
3.4.3	Gezeiten	138
3.4.4	Mittlerer Meeresspiegel	138
3.4.5	Windstaustatistik und Sturmfluthäufigkeit	139
3.4.6	Zusammenfassung	141
3.5	Temperatur	142
	<•> <i>P. Loewe, H. Klein, A. Frohse, A. Schulz & N. Schmelzer</i>	
3.5.1	Einführung	142
3.5.2	Oberflächentemperatur	142
3.5.3	Temperaturschichtung	147
3.5.4	Meereis	154
3.5.5	Zusammenfassung	155
3.6	Salzgehalt	156
	<•> <i>H. Klein, P. Loewe, A. Frohse & A. Schulz</i>	
3.6.1	Einführung	156
3.6.2	Salzgehaltsverteilungen	156
	3.6.2.1 Daten und Methoden	156
	3.6.2.2 2006	158
	3.6.2.3 2007	161
3.6.3	Abfluss Elbe und Salzgehalt bei Helgoland	162
3.6.4	Zusammenfassung	163
3.7	Literatur	165

4 Meereschemie _____167

<•> <i>S. Weigelt-Krenz</i>	
4.1 Einführung	168
<•> <i>S. Schmolke</i>	
4.2 Nährstoffe	170
<•> <i>S. Weigelt-Krenz</i>	
4.2.1 Einführung	170
4.2.2 Nährstoff-Flusseinträge in die Deutsche Bucht	172
4.2.3 Nährstoffverteilungen – Dt. Bucht und Nordsee	173
4.2.3.1 Verteilungsmuster im Winter 2006/2007 (Dt. Bucht)	173
4.2.3.2 Verteilungsmuster im Sommer 2006/2007 (Nordsee)	176
4.2.4 Nährstoffveränderungen in der Dt. Bucht	181
4.2.4.1 Jahreszeitliche Variabilität an ausgewählten Stationen	181
4.2.4.2 Korrelationen zum Salzgehalt	184
4.2.4.3 Langzeitliche Nährstoff-Entwicklung in der Dt. Bucht	184
4.2.5 Bewertung der Nährstoffsituation – Dt. Bucht	188
4.2.5.1 Bewertungsgrundlage	188
4.2.5.2 Bewertung 2007	188
4.2.5.3 Gesamtbewertung	188
4.2.6 Chlorophyll-a-Gehalte in der Nordsee	189
4.2.7 Sauerstoffgehalte in der Nordsee	190
4.2.8 Zusammenfassung	191
4.3 Organische Stoffe	193
<•> <i>N. Theobald</i>	
4.3.1 Einführung	193
4.3.2 Hexachlorcyclohexan-Isomere	195
4.3.2.1 HCH-Gehalte des Meerwassers – räuml. Verteilung	196
4.3.2.2 Zeitliche Entwicklung der HCH-Konzentrationen	200
4.3.2.3 HCH-Gehalte des Sediments	202
4.3.3 Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe	202
4.3.3.1 CKW-Gehalte des Meerwassers	202
4.3.3.2 CKW-Gehalte des Sediments	206
4.3.4 Kohlenwasserstoffe	206
4.3.4.1 Akute Ölverschmutzungen	206
4.3.4.2 Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane	209
4.3.4.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	211
4.3.5 Polare Pestizide	217
4.3.5.1 Herbizidgehalte des Meerwassers	217
4.3.5.2 Zeitliche Variabilität der Herbizidgehalte	223
4.3.6 Neue Schadstoffe	227
4.3.6.1 PFC-Gehalte des Meerwassers	227
4.3.6.2 PFC-Gehalte der Sedimente	229
4.3.6.3 Zeitliche Trends	230
4.3.7 Zusammenfassung	231

4.4	Metalle	232
	<•> <i>S. Schmolke</i>	
4.4.1	Einführung	232
4.4.2	Bewertungskriterien	234
	4.4.2.1 Wasser	235
	4.4.2.2 Sediment	236
4.4.3	Oberflächenwasser	238
	4.4.3.1 Gelöste und schwebstoffgebundene Metallgehalte	238
	4.4.3.2 Korrelation zw. Salzgehalt u. gelösten Metallgehalten	240
	4.4.3.3 Saisonalität der gelösten Metallgehalte	243
	4.4.3.4 Räuml. Verteilung im Oberflächenwasser der Dt. Bucht	244
	4.4.3.5 Räuml. Verteilung im Oberflächenwasser der Nordsee	247
	4.4.3.6 Langzeitentwicklung der Metallbelastung der Dt. Bucht	248
	4.4.3.7 Bewertung Wasser	249
4.4.4	Sediment	252
	4.4.4.1 Merkmale des Feinkornanteils	252
	4.4.4.2 Metallgeh. in Trendmonitoringgebieten (Dt. B. 2006/07)	254
	4.4.4.3 Metallgehalte im Oberflächensediment der Nordsee	255
	4.4.4.4 Langzeitentwicklung: Metallbel. im Oberflächensed.	256
	4.4.4.5 Bewertung Sediment	259
4.4.5	Zusammenfassung	261
4.5	Radioaktive Stoffe	263
	<•> <i>J. Herrmann & P. Loewe</i>	
4.5.1	Einführung	263
4.5.2	Quellen künstlicher Radionuklide	266
4.5.3	Caesium-137 und Strontium-90	267
4.5.4	Tritium	271
4.5.5	Transurane	272
4.5.6	Zusammenfassung	272
4.6	Literatur	275
	Abbildungsverzeichnis	___279
	Tabellenverzeichnis	___287
	Tafelverzeichnis	___291
	List of Figures	___293
	List of Tables	___301
	Autoren / Authors	___303
	Berichte des BSH	___305

Zusammenfassungen

Für den einfachen Zugriff auf die wichtigsten Ergebnisse der Zustandsanalyse sind die Zusammenfassungen der einzelnen Beiträge hier versammelt wiedergegeben.

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 bioökologischen Veränderungen erstrecken. Der Zirkulationszustand selbst wird hier aus differenzierten Analysen der großräumigen Luftdruckverteilung im Meeresniveau abgeleitet. Die Umstellung der primären Datenbasis auf NCEP/NCAR Reanalysen stellt deshalb eine der wichtigsten Neuerungen dar.

Wetterlagen (S. 40 ff.)

Aus täglichen Luftdruckfeldern im Meeresniveau für die Jahre 2006 und 2007 abgeleitete Wetterlagenkalender und darin eingebettete Sturmereignisse sind ein kompaktes, wichtiges Hilfsmittel zur Identifizierung und Interpretation anomaler Zustände und Ereignisse in atmosphärischen, ozeanographischen und chemischen Systemvariablen der Nordseeregion, die (un)mittelbar mit der atmosphärischen Zirkulation in Zusammenhang stehen.

Für robuste Statistiken wurden die 27 Wetterlagenklassen auf eine überschaubare Zustandsmenge reduziert, die sich aus den anti-/zyklonalen Rotationstypen A und C sowie den Richtungslagen NE, SE, SW und NW zusammensetzt. Diese Untersuchungen erstrecken sich von Häufigkeitsanomalien über charakteristische Lebensdauern der einzelnen Wetterlagen bis hin zu Wetterlagenübergängen im Kontext von Markovketten.

Häufigkeitsanomalien der 6 Hauptwetterlagen in den Jahren 2006 und 2007 wurden auf monatlichen, saisonalen und jährlichen Zeitskalen anhand klimatologischer Häufigkeitsverteilungen des Zeitraums 1971 – 2000 bestimmt, statistisch eingeordnet und interpretiert. Beispielsweise zeigt die ungewöhnliche Gleichverteilung von W- (SW & NW) und E-Lagen im Winter 2006 eine abgeschwächte Zonalzirkulation und überdurchschnittliche Abkühlungsraten der Meerestemperaturen an, während entgegengesetzte Implikationen aus dem Missverhältnis von 68 W-Lagen zu 2 E-Lagen für den Zeitraum Nov. 2006 bis Jan. 2007 folgen. Die Häufungen von A- (15) und S-Lagen (11) im Juli 2006 und C (15) und N-Lagen (10) im August 2006 offenbaren diametral verschiedene Temperaturverhältnisse. Ein weiterer markanter Unterschied besteht im Verhältnis von N- zu S-Lagen, welches von 0,57 im Jahr 2006 auf 1,31 im Jahr 2007 anstieg und damit erheblich über dem klimatologischen Proporz von 0,75 lag.

Schlichtes Abzählen von Episodenanzahl und Episodenlänge anhand der Wetterlagenabfolge im Zeitraum 1971 – 2000 führt auf wetterlagenspezifische mittlere Lebensdauern, die zwischen 1,6 (NE) und 2,6 Tagen (A) variieren. Die exponentielle Abnahme der Episodenanzahl mit zunehmender Episodenlänge erinnert an radioaktive Zerfallsprozesse und impliziert als denkbar einfachste Lebensdauerverteilung die Geometrische Verteilung (GV), die sich durch die einzigartige Eigenschaft der

Gedächtnislosigkeit auszeichnet. Diese Eigenschaft resultiert aus der Invarianz der Sterbewahrscheinlichkeit (dem Kehrwert der mittleren Lebensdauer und einzigen Verteilungsparameter) und beinhaltet, dass die Wahrscheinlichkeiten für Abbruch oder Fortbestehen einer Wetterlagenepisode unabhängig vom bislang erreichten Lebensalter sind. Die GV erweist sich für Lebensdauern bis zu einer Woche als adäquates Modell. Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich für langlebige A-Lagen, die als persistente Blockierungen den gewöhnlichen Wetterwechsel wochenlang stören können. Für anonymisierte Episoden – oder die Wetterlage als ›Ding-an-sich‹ – wurde eine mittlere Lebensdauer von 2 Tagen bestimmt. Die zugehörige GV (mit gleich hohen Sterbe- und Überlebenswahrscheinlichkeiten von 0,5) entspricht der Sequenzlängenverteilung, die ein Wettergott durch fortwährendes Werfen einer idealen Münze produzieren würde. Die Tatsache, dass manche Wetterlagen größeres »Talent« zeigen, am Leben zu bleiben, als andere, spricht für 6 Wettergötter, die mit Falschmünzen spielen.

Die Altersklasse ≥ 9 Tage war im Zeitraum 1971 – 2000 mit 32 Episoden und dem ältesten »Individuum« (18 Tage) von der A-Lage dominiert und ansonsten nur von SW-, NW- und SE-Lagen mit 15, 5 und 3 Episoden belegt. In den Jahren 2006 und 2007 war dieses Segment allein durch 2 bzw. 1 A-Episode besetzt, von denen jeweils eine ein Höchstalter von 11 Tagen erreichte. Das hohe Aufkommen N-licher Wetterlagen (NE & NW) im Jahr 2007 bildete sich auch in der Häufigkeit langer Episoden in der Klasse 5 – 8 Tage ab, die gegenüber 2006 von 1 auf 6 anwuchs, während diejenige der S-Episoden von 7 auf 1 zurückfiel. Die Gesamtzahl aller Episoden mit Lebensdauern ≥ 5 Tage lag in beiden Jahren mit 14 auf dem Niveau des klimatologischen Mittels (13,6) und somit wie dieses etwas oberhalb der für eine mittlere Lebensdauer von 2 Tagen aufgrund der GV erwarteten Höhe von 11,4 ($= 182,5 \times 0,5^4$). Die zugehörige kumulative Lebensdauer beträgt 95 (2006), 90 (2007), 90,7 (kM) und 68,4 Tage (GV). Auch die Gesamtzahl aller Episoden (186, 183 und 181,1/Jahr) und folglich die mittleren Lebensdauern von ≈ 2 Tagen waren auffällig stabil.

Das Auszählen der 6^2 unterscheidbaren Übergänge von Tag zu Tag stellt für die 30-jährige Zeitserie der 6 Wetterlagen eine dritte Abzählmethode dar, die nicht nur Informationen zu Gesamtvorkommen und Lebensdauer enthält, sondern auch Aufschluss über typische und untypische Abfolgemuster gibt. Im Bild einer Ballspielanalyse entsprechen diese Elemente der individuellen Gesamtzeit des Ballbesitzes und den darin enthaltenen Zeiten und Zeitpunkten des Am-Ball-Bleibens und Abspiels. Die resultierende quadratische Matrix der Übergangshäufigkeiten ist hochgradig asymmetrisch und in der Hauptdiagonalen, die Selbstübergänge (Am-Ball-Bleiben) repräsentiert, am stärksten besetzt. Dies bedeutet einerseits, dass sich das wechselseitige Abspielverhalten der Spieler nicht im Gleichgewicht befindet, und andererseits, dass jeder Spieler selbstverliebt lieber am Ball bleibt als abzuspielen. Insbesondere der 2. Aspekt zeigt hohe serielle Autokorrelation an, die gemeinsam mit geometrisch verteilten Verweilzeiten in unveränderten Zuständen zu den inhärenten Eigenschaften einer Markovkette 1. Ordnung zählt.

Die Anpassung dieses stochastischen Prozesses an die Daten besteht in der zeilenweisen Normierung der Übergangshäufigkeiten mit den individuellen Gesamthäufigkeiten der 6 Wetterlagen. Jeder Zeilenvektor der Übergangsmatrix stellt eine bedingte 1-schrittige Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Eintreten irgendeiner der 6 Wetterlagen am Folgetag dar, sofern aktuell die dem Zeilenvektor zugeordnete Wetterlage herrscht. Die Gedächtnislosigkeit der MK besteht dabei darin, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten ausschließlich vom aktuellen Zustand abhängen und demnach

nicht davon, auf welchem verschlungenen Pfaden auch immer der aktuelle Zustand erreicht worden ist. Bemerkenswert ist ferner, dass die vorliegende MK für stochastische Vorhersagezeiträume von einer Woche gegen eine eindeutige, vom Anfangszustand unabhängige, stationäre Grenzverteilung konvergiert, die mit der klimatologischen Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen übereinstimmt. Die schnelle Degeneration des Vorhersagepotentials auf das klimatologische Niveau und die Markovsche Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit – gleichbedeutend mit der ausschließlichen Abhängigkeit der Zukunft von der Gegenwart – bilden beachtliche Parallelen zur numerischen Wettervorhersage mit physikbasierten Modellen.

Die starke Erhaltungsneigung macht die Persistenzvorhersage Morgen-wie-Heute mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zwischen 39 (NENE) und 59% (AA) zur bestmöglichen. Von im Mittel etwa 2 Tage andauernden Stagnationsperioden abgesehen, besteht die wahrscheinlichste Wetterlagenabfolge für beliebige Anfangszustände (außer SE & NE) in der periodischen Sequenz A-SW-C-NW-A, welche das regionstypische Durchziehen von Tiefdruckstörungen beschreibt, denen Zwischenhochs vorausgehen und folgen. Die seltenen Wetterlagen SE und NE sind ebenso wie ihre Cousins (SW & NW) am häufigsten in Sequenzen A-SE-C bzw. C-NE-A eingebunden. Die wechselweisen Übergänge C \leftrightarrow A, NE \leftrightarrow SW, und NW \leftrightarrow SE werden von heute auf morgen nur selten oder gar nicht realisiert.

Im Vergleich zur Klimatologie traten die Richtungswetterlagen NW und SW im Jahr 2006 wesentlich seltener bzw. häufiger ein, wobei diese Abweichungen hauptsächlich durch geringere bzw. häufigere Selbstübergänge und speziell das seltene (1) bzw. hohe Vorkommen (7) von langlebigen Episoden (≥ 5 Tage) zustande gekommen sind. Im Jahr 2007 lagen bzgl. NW und SW praktisch inverse Verhältnisse vor. Zusätzlich traten NE-Lagen aus gleichem Grunde erheblich häufiger ein, während SE-Lagen insgesamt, hinsichtlich der Selbstübergänge, aber auch hinsichtlich der echten Übergänge zu anderen Wetterlagen auf die Hälfte zurückfielen. Die Anzahl aller Wetterlagenepisoden – oder gleichbedeutend die Gesamthäufigkeiten der echten Wetterlagenwechsel – unterlagen nur geringen Schwankungen (s. o.). Dieses Ergebnis trifft anscheinend auch weitgehend auf die Episodenanzahl individueller Wetterlagen zu, so dass Anomalien im Gesamtvorkommen der einzelnen Wetterlagen vor allem Anomalien im Vorkommen langlebiger Episoden widerspiegeln. Im Unterschied zum Jahr 2006 reduzierte sich der periodische Zyklus im Jahr 2007 auf die Abfolge A-SW-NW-A. Dieser war zudem wenig stabil, denn die Übergänge ASW und ANW ereigneten sich nahezu gleich oft, was ebenso auf die Übergänge SWNW und SWC zutrifft. Die Ursachen hierfür wurden anhand der reduzierten Wetterlagenkalender erläutert.

Luftdruckverteilung (S. 68 ff.)

Luftdruckverteilungen im mittleren Meeresniveau (MSLP) repräsentieren die großskalige atmosphärische Zirkulation im Nordseeraum, denn sie implizieren die geostrophische Vektorwindverteilung an der Oberfläche.

Der grundsätzliche klimatologische Jahresgang ist durch eine kräftige SW-liche Anströmung im Herbst und Winter charakterisiert, die sich im Frühjahr abschwächt, im Frühsommer auf eine NW-Strömung umstellt und schließlich unter Rückdrehung auf W und Intensivierung wieder in den Herbstmodus übergeht. Dieser Ablauf ergibt sich aus der jahreszeitlich wechselnden Dominanz von Islandtief und Azorenhoch und ist an die meridionale Verlagerung der Frontalzone um etwa 10 Breitengrade gekoppelt. Diese geht mit der Abschwächung des Islandtiefs und NE-Ausdehnung des Azoren-

hochs im Verlauf des Frühjahrs einher und kehrt sich mit dem Wiedererstarren des subpolaren Tiefs und dem Rückzug des Azorenhochs in die Subtropen zum Ende des Sommers um.

Monatliche und saisonale Druckmuster der Jahre 2006 und 2007 wurden wie tägliche MSLP-Verteilungen mittels des vollständigen Wetterlagenklassifizierungsverfahrens typisiert und mit entsprechenden Klimatologien des Zeitraums 1971 – 2000 verglichen. Im Unterschied zu den synoptischen Verteilungen stellen diese Druckfelder keine Wetterlagen sondern Witterungslagen dar, deren Abweichungen von der Klimatologie als Manifestationen der chaotisch dynamischen Entwicklung einer gedächtnislosen Atmosphäre auf diesen Zeitskalen unkorreliert, nicht auseinander herleitbar und lediglich einer Dokumentation zugänglich sind.

Die saisonalen MSLP-Verteilungen setzen sich häufig aus kurzfristigeren komplementären Zirkulationsanomalien zusammen, die einander auf dieser Zeitskala auslöschen. Im Gegensatz zu den Monatsverteilungen entsprechen die saisonalen Verteilungen deshalb meist weitgehend der Klimatologie. Ausnahmen hiervon bildeten der Winter 2006, der durch eine S-liche Meridionalzirkulation charakterisiert war, sowie der Herbst des gleichen Jahres, in dem eine erheblich verstärkte SW-Zirkulation vorherrschte. Demgegenüber waren besonders markante intrasaisonale Unterschiede kennzeichnend für den Sommer 2006 und den Winter 2007, die sich in inversen Lufttemperaturanomalien über den nordhemisphärischen Landmassen der mittleren Breiten ausprägten, was die Eingebundenheit großräumiger atmosphärischer Zirkulationsanomalien in das erdumspannende Wellen- und Wirbelsystem dieser Breitenzone dokumentiert. Der gerne als Indikator für die atmosphärische Zirkulation herangezogene Index der Nordatlantischen Oszillation reicht für eine zuverlässige Charakterisierung der Anströmung im Nordseeraum nicht immer hin. So war beispielsweise die verstärkte SW-Zirkulation im September und Oktober 2006 Konsequenz eines entsprechend starken, positiven Modus des Ostatlantikmusters und mit einer von verschiedenen NAO-Indizes angezeigten abgeschwächten Zonalzirkulation nicht vereinbar.

Im Zuge der Umstellung der Datenbasis auf MSLP-Verteilungen der NCEP/NCAR Reanalysen wurde die Druckreduktionsproblematik in Gebirgsregionen im Bereich der norwegischen Skanden sichtbar. Gegenüber früher verwendeten störungsfreien Druckfeldern des UK MET OFFICE weisen die Verteilungen hier im Herbst und Winter Deformationen auf, die gewöhnlich als artifizielle SE-liche Windabweichung in Erscheinung treten. Die MSLP-Verteilungen werden lediglich für diagnostische Analysen genutzt, denen letztlich das Wetterlagenklassifizierungsverfahren zugrunde liegt; da die Ergebnisse des Verfahrens durch dieses Artefakt auf keiner der relevanten Zeitskalen in unerträglicher Weise beeinträchtigt werden, wurde an den unmanipulierten Feldern des NCEP/NCAR festgehalten.

Nordseewind (S. 85 ff.)

Der Nordseewind ist als Beiprodukt der Wetterlagenklassifizierung ein zum Windindex proportionaler geostrophischer Wind, der die charakteristische Windstärke und -richtung im Nordseeraum angibt. Auf Basis täglicher Vektorwinde wurden Windellipsen und virtuelle Trajektorien konstruiert, welche die saisonalen Zustände und jahreszeitlichen Entwicklungen der Windverhältnisse in den Jahren 2006 und 2007 veranschaulichen. Vektorielle und skalare Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und Richtungs-

Stabilitäten wurden als monatliche, saisonale, und jährliche Mittelwerte tabellarisch dokumentiert.

Die Vorherrschaft von Winden aus der westlichen Hemisphäre schlug sich in beiden Jahren in einem W:E-Verhältnis des Zonalwindes von knapp 3:1 nieder. Das S:N-Verhältnis des Meridionalwindes war 2006 mit 3:2 deutlich unausgeglichener als gewöhnlich und im Jahr 2007 (1:1). Das Verhältnis von vektorieller zu skalarer Windgeschwindigkeit ist ein Maß für die Windrichtungsstabilität bzw. Persistenz und liegt für saisonale und jährliche Mittelwerte typischerweise bei 1:2 – im Frühjahr jedoch bei 1:4. Erhebliche Abweichungen hiervon ergaben sich für Winter (1:4), Frühjahr (1:2) und Herbst 2006 (3:4). Starkwinde (> 10 m/s) traten im Herbst/Winter 2006/07 mit 60% wesentlich öfter auf als im Winter 2006 und Herbst 2007 (je 40%). Gegenüber den Verhältnissen im Frühjahr (26%) und Sommer 2006 (10%) halbierte bzw. verdreifachte sich 2007 das Vorkommen von Starkwinden in den entsprechenden Jahreszeiten.

Die virtuelle klimatologische Trajektorie des Nordseewindes illustriert den jahreszeitlich wechselnden Einfluss von Islandtief und Azorenhoch. 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 Vorzugwindrichtung angeben lässt. 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.

Zu den markantesten Abweichungen von der klimatologischen Trajektorie zählt der SSW-liche Verlauf im Winter 2006 mit insgesamt dominantem Meridionalwind, aber extrem geringer Richtungsstabilität von 0,5:9,2 oder 5% im Februar. Bemerkenswert sind ferner die für April untypische, kräftige und persistente (68%) Westströmung, der ausgesprochen schwache SW-Wind im Juli sowie die intensive Zonalzirkulation von November 2006 bis Ende Januar 2007 mit mittleren skalaren Windgeschwindigkeiten über 15 m/s (Jan.) und Richtungsstabilitäten bis zu 90% (Dez.). Im Juli 2007 erreichte der W-Wind skalare und vektorielle Windgeschwindigkeiten, die doppelt bzw. dreimal so hoch waren wie im Vorjahresmonat. Im September und November stand ein NW-licher Trajektorienverlauf im Gegensatz zur Klimatologie und SW-lichen Winden des Vorjahres. Nicht nur die erheblichen Unterschiede in der jahreszeitlichen Entwicklung beider Jahre, sondern auch deren Abweichungen von der Klimatologie verschwimmen bei Betrachtung von mittleren skalaren (8,4, 8,9, 8,6 m/s) und vektoriellen (4,0, 4,2, 3,5 m/s) Windgeschwindigkeiten für 2006, 2007 und den Zeitraum 1971 – 2000. Die vielleicht augenfälligsten Unterschiede bestehen hinsichtlich der Windrichtungen (242° , 270° , 253°).

Sturm (S. 92 ff.)

Die Sturmidentifizierung basiert auf einem Schwellwertverfahren für den Sturmindex G^* , der über die im Rahmen der Wetterlagenklassifizierung bestimmten Indizes für Windgeschwindigkeit und Vorticity definiert ist. Die Umstellung der Datenbasis auf tägliche Luftdruckfelder der NCEP/NCAR Reanalysis I, die im Unterschied zu den früher verwendeten Feldern des UK MET OFFICE nicht auf einem Einzeltermin beruhen, sondern über 4 Termine geglättete Tagesmittel darstellen, machte eine Neukalibrierung der Schwellwerte erforderlich, um eine Unterschätzung der Sturmhäufigkeiten um knapp 30% auszuschließen. Die Anpassung einer Verallgemeinerten Paretoverteilung an G^* im Zeitraum 1971 – 2000 ergab, dass der Sturmindex Pareto-Typ-2 ver-

teilt ist mit oberer Schranke bei 69,2 hPa und zugehörigen Maxima für Windgeschwindigkeit (V) und Vorticity (ζ) von 42,9 m/s und 1,05 Umdrehungen pro Tag. Die zu den Überschreitungswahrscheinlichkeiten 0,1, 0,02 & 1/365 bestimmten neuen Schwellwerte (28,3, 36,6 & 44,6 hPa) der 3 Klassen ›Sturm‹ (G), ›starker Sturm‹ (SG) und ›sehr starker Sturm‹ (VSG) sind mit Grenzwerten für V und ζ von 17,5, 22,7 & 27,7 m/s und 0,43, 0,55 & 0,67 UpT verknüpft.

Die beiden stärksten Stürme ereigneten sich am 2. 12. 1966 ($G^* = 55,3$ hPa) und 16. 2. 1962 ($G^* = 53,7$ hPa, ›Vincinette‹, Hamburger Sturmflutkatastrophe). Der Dezembersturm hält gleichzeitig den Rotationsgeschwindigkeitsrekord (0,78 UpT), während ›Vincinette‹ die bislang höchste Windgeschwindigkeit (31,4 m/s) erreichte. Das kalibrierte Sturmidentifizierungsverfahren wurde ferner zur Erstellung von Sturmkatalogen genutzt, welche die Häufigkeiten der 3 Sturmklassen für jeden Monat des Zeitraums 1948 – 2010 dokumentieren. Auf der Grundlage dieser Kataloge wurde eine Bewertung des Sturmaufkommens in den gegenüber dem Kalenderjahr um 6 Monate verschobenen Sturmjahren 2005/06 und 2006/07 vorgenommen.

Abgesehen vom Sturmtief ›Uriah‹, das am 26. 6. 2007 zu einer Rekord-Sommersturmflut im Emsbereich führte, kamen Stürme in beiden Saisons nur von Oktober bis März vor. Das Sturmaufkommen in der Saison 2005/06 war auf Monatsicht durchweg unterdurchschnittlich und zusammengenommen mit 23 Sturmtagen – von denen nur 2 zur SG-Klasse zählten – ungewöhnlich gering. Die Anzahl von G- und SG-Stürmen in der Saison 2006/07 war demgegenüber mit 40 und 12 doppelt bzw. 6mal so hoch. Mit insgesamt 54 Sturmtagen liegt das Sturmjahr 2006/07 auf Rang 3 hinter 1994/95 (56) und 1989/90 (57). Neue Rekordhäufigkeiten wurden im Herbst (OND) und Dezember erreicht (27 & 14). Die Sturmfrequenz für Dezember und Januar (14+12) wurde nur 1982/83 (7+21) übertroffen und trat gleichzeitig mit Rekordwerten des Arktischen Oszillationsindex von über 2 auf. Die Orkane ›Britta‹ (1. 11. 2006), ›Franz‹ (12. 1. 2007), ›Orkun‹ (18. 3. 2007) und der bereits zur Saison 2007/08 zählende Orkan ›Tilo‹ (9. 11. 2007) verursachten an der deutschen Nordseeküste Sturmfluten mit Hochwasserständen meist deutlich oberhalb 200 cm über MHW.

Lufttemperatur und Strahlung (S. 102 ff.)

Die hier erarbeiteten Befunde basieren auf Beobachtungen des DWD zur Globalstrahlung und Lufttemperatur auf Norderney – sind jedoch von überregionaler Bedeutung. Die in den Jahren 2006 und 2007 eingetretenen Abweichungen vom jeweiligen klimatologischen Jahresgang wurden auf Zirkulationsanomalien zurückgeführt und dabei nicht nur miteinander, sondern auch mit den nordhemisphärischen Temperaturen des NCDC der NOAA in Beziehung gesetzt.

Zu den markantesten Strahlungsanomalien zählen die drastischen Überschüsse im Juli und ähnlich hohe Defizite im August 2006. Diese Dichotomie, die sich auch in entgegengesetzten krassen Temperatursauslenkungen spiegelt, war Ergebnis einer dauerhaft quasistationären Hochdrucklage (Omegablock), die zur Monatswende durch eine ebenso persistente Troglage abgelöst wurde. Ein weiterer Omegablock führte im April 2007 erneut zu signifikanten Strahlungsüberschüssen.

Mit 10,6 und 11,0 °C sind 2006 und 2007 für Norderney die wärmsten Kalenderjahre im Zeitraum 1971 – 2010. In den Schatten gestellt werden diese Rekorde von der im Juli 2006 mit der europaweiten Hitzewelle einsetzenden 12-monatigen extremen Warmperiode, in der die Temperatur mit 12,3 °C um 3 K über dem Klimamittel lag. Alle saisonalen Temperaturen (JAS, OND etc.) erreichten neue Rekordhöhen, so dass

der Jahresgang insgesamt auf einem um 3 K erhöhten Niveau ablief. Maßgebend für die Persistenz der Anomalie waren eine starke S-liche Anströmungskomponente ab September, das immense Sturmaufkommen von Oktober bis März, die extreme Zonalzirkulation von November bis Januar, die außergewöhnliche Einstrahlung im April und ein sommerartig schwachwindiges Frühjahr. Der großräumige Einfluss der atmosphärischen Zirkulationsanomalien spiegelt sich in der Tatsache, dass die Temperatur der Nordhemisphäre seit mindestens 130 Jahren in keiner 12-Monatsperiode so warm oder wärmer war wie im fast identischen Zeitfenster von Juni 2006 bis Mai 2007.

Meeresphysik

Strömung (S. 117 ff.)

Die Oberflächenzirkulation der Nordsee, basierend auf monatlichen Strömungsfeldern (Modell), zeichnete sich im Winter 2006 durch eine abgeschwächte Meridionalzirkulation aus, die im wesentlichen aus dem im Januar und März über der Nordsee vorherrschenden Südwind resultierte. Ein für diese Jahreszeit typisches nordseeweites zyklonales Strömungsmuster konnte sich daher nicht ausprägen. Auch im Frühjahr und Sommer 2006 waren die Strömungsfelder wenig stabil und wiesen kaum überregionale Strukturen auf. Im Herbst/Winter 2006/07 bildete sich eine starke atmosphärische Zonalzirkulation aus, die mit einem der höchsten Sturmaufkommen im Zeitraum 1948 – 2010 verbunden war. Dies bewirkte die Ausbildung einer nordseeweiten, starken und persistenten zyklonalen Oberflächenzirkulation. Mit Umstellung der atmosphärischen Zirkulation im Februar 2007 stellte sich bei vorherrschenden S-Winden ein Strömungszustand wie im März 2006 ein. Einerseits kam die nordseeweite Zirkulation weitgehend zum Erliegen, andererseits bahnte sich der über lange Zeit reduzierte Baltische Ausstrom jetzt mit sehr hoher Intensität seinen Weg in die nördliche Nordsee. Im weiteren Verlauf des Jahres 2007 war die Oberflächenzirkulation meist nur schwach ausgeprägt und von geringer Persistenz.

Die Zirkulationsstatistik für die Deutsche Bucht basiert auf der zeitlichen Abfolge der täglichen Zirkulationsmuster der Restströme mit neun typischen Mustern. Das Jahr 2006 zeichnete sich gegenüber dem Vor- und dem Folgejahr durch eine bemerkenswert geringere Tag-zu-Tag Variabilität und eine deutlich geringere Häufigkeit der in der Regel an Starkwindereignisse gebundenen direktionalen Strömungsmuster aus.

Im Jahr 2007 trat das zyklonale Muster mit der geringsten Häufigkeit im Referenzzeitraum 2000 – 2009 auf. Obwohl in der zweiten Januardekade fast durchgängig Weststurm herrschte, war die zyklonale Zirkulation in der Deutschen Bucht durch eine Phase variabler Zirkulation unterbrochen. Das antizyklonale Strömungsmuster erreichte (wie schon im Jahr 2004) eine Rekordhäufigkeit von 71 Tagen. Das besonders seltene (häufige) Vorkommen des variablen Musters im Sommer (Herbst) befindet sich im Einklang mit hohen (geringen) Geschwindigkeiten des Nordseewindes in den entsprechenden Jahreszeiten.

Seegang (S. 131 ff.)

Die typischen Verteilungsmuster des Seegangs sind durch die vorherrschenden Windverhältnisse und die geographisch-bathymetrische Gestalt der Nordsee geprägt. Die mittleren Wellenhöhen waren in den meisten Quartalen der Jahre 2006 und 2007 höher als in den Vorjahren. Wind und Windsee kamen in allen Jahreszeiten im Mittel

aus Richtungen zwischen SW und NW, außer im Winter 2006, als südöstliche Richtungen dominierten. Die Dünung hatte in allen Jahreszeiten NW-liche Richtung. In einem NNW-Sturm am 1. November kam es in der nördlichen und zentralen Nordsee zu signifikanten Wellenhöhen über 10 m; vor der ostfriesischen Küste wurden noch 9,8 m gemessen.

Wasserstand (S. 137 ff.)

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts werden an der deutschen Nordseeküste mit Pegeln Wasserstände gemessen. Die Pegelmessungen beziehen sich in ihrer Höhe auf geodätische Festpunkte der Landesvermessung und liefern im strengen Sinne also Erkenntnisse über relative Wasserstandsschwankungen.

Aus diesen Messungen lässt sich für den Referenzzeitraum 2006 – 2007 ableiten, dass sich weder die Gezeiten, noch die Anzahl von Sturmfluten oder gar der mittlere relative Meeresspiegel signifikant verändert haben. Veränderungen der Gezeitenhübe, -höhen und -phasen fließen in die jährliche Produktion der Gezeitentafeln des BSH ein. Die Veränderung des relativen mittleren Meeresspiegel liegt weiter im Rahmen des langjährigen Anstiegs von etwa 20 cm pro Jahrhundert und die Anzahl der Sturmfluten lag etwas über dem Mittel der Jahre 1951 – 2007, es gab aber auch schon Jahre mit mehr als zweifacher Häufigkeit. Bei der Anzahl von Sturmfluten in den einzelnen Jahren spielt in hohem Maße der Zufall eine Rolle, denn bei Sturmfluten müssen Zeitpunkt des Sturmhöhepunktes und Gezeitenphase zueinander passen.

Temperatur (S. 142 ff.)

Das Jahresmittel der Nordseeoberflächentemperatur lag in beiden Jahren auf der erstmals 2002 erreichten Rekordhöhe von 11,0 °C. Die mittlere Temperatur für die Zeitspanne von Juli 2006 bis Juni 2007 übertraf diesen Höchstwert nochmals um 0,6 K und lag damit um 3,7 Standardabweichungen über dem klimatologischen Jahresmittel der Basisperiode 1971 – 1993 von 9,9 °C. Innerhalb dieser extremen Warmphase, die für die Nordhemisphäre die wärmste 12-monatige Periode seit mindestens 130 Jahren darstellt, vollzog sich der jahreszeitliche Temperaturgang auf einem nahezu beständig um 1,7 K – in der Deutschen Bucht sogar um 2,7 K – über der Klimatologie liegenden Niveau. Auslöser der Warmanomalie war eine europaweite Hitzewelle im Juli 2006. Ihr langlebiges Fortbestehen war Ergebnis verfestigender, teils intensivierender Faktoren, von denen die starke S-liche Anströmungskomponente ab September, das extreme Sturmaufkommen von Oktober bis März, die außergewöhnlich hohe Einstrahlung im April bei beständigem Hochdruck und ein sommerartig schwachwindiges Frühjahr 2007 besonders nennenswerten Einfluss ausübten.

Nach einem insbesondere in den östlichen Seegebieten tendenziell zu kaltem Frühjahr wurde während der Gesamtaufnahme der Nordsee im August 2006 eine außergewöhnlich warme Deckschicht vorgefunden, die jedoch von so geringer Mächtigkeit war, dass Wärmeinhalt ($1,520 \times 10^{21}$ J) und Volumentemperatur (10,4 °C) ähnlich gering ausfielen wie zuletzt im August 2002. Im Unterschied hierzu wurden im August 2007 eine sehr mächtige Deckschicht und gleichzeitig annähernd normale Oberflächentemperaturen angetroffen. Bezogen auf mittlere Schichtungsverhältnisse des vergangenen Jahrzehnts waren die Temperaturen oberhalb 20 m um 1 – 2 K zu kalt, diejenigen im Tiefenbereich 20 – 40 m entsprechend zu warm. Im Vergleich mit den Verhältnissen im August 2006 verschärft sich dieser Kontrast auf 2 – 3 K.

Die Tiefenverteilung der Temperatur in der Deutschen Bucht wurde anhand von Daten der Dauermessstationen ›NSB III‹ und ›EMS‹ des MARNET-Netzwerks dokumentiert. Bei der wenig außerhalb des ganzjährig durchmischten flachen Küstenwassers liegenden Station ›EMS‹ waren insbesondere im Frühjahr alternierende Phasen von Stratifizierung und Erosion zu beobachten. Diese waren an strahlungsintensive und gleichzeitig windschwache bzw. strahlungsarme und windstarke Episoden oder Ereignisse gebunden, die mit einer Entkopplung bzw. Überschneidung des windinduzierten Turbulenzregimes mit der Gezeitenstromturbulenz der Bodenschicht einhergingen. Unter praktisch gleichen meteorologischen Konditionen konnte sich bei der tieferen und geringeren Gezeitenströmen ausgesetzten Station ›NSB III‹ eine ab Anfang Juni 2006 beständige Schichtung mit scharfer Thermokline im 15 – 20 m Tiefenbereich ausbilden, die im Verlauf des von Tiefdruckstörungen geprägten August nur allmählich erodierte.

Im Winter 2005/06 bildete sich Meereis trotz der im Prinzip günstigen schwachen Zonalzirkulation erst Ende Januar und fast ausschließlich an der nordfriesischen Küste. Der als ›schwach‹ klassifizierte Eiswinter dauerte bei Eisdicken von 5 – 20 cm knapp eine Woche an. Im Winter 2006/07 blieb die Deutsche Nordseeküste vollständig eisfrei. Die unter verstärkter Zonalzirkulation geringen Abkühlungsraten reichten erst recht nicht hin, um den zu Winterbeginn erneut sehr hohen Wärmeinhalt des Meerwassers der Deutschen Bucht deutlich vor Durchschreiten des saisonalen Minimums im Februar abzubauen.

Salzgehalt (S. 156 ff.)

Das von Norden einströmende atlantische Wasser mit $S > 35$ drang im Jahr 2006 ganzjährig am Boden und an der Oberfläche bis $55,5^\circ$ N nach Süden vor. In der Bodenschicht reichte das atlantische Wasser bis an die Norwegische Küste heran und bis ins Skagerrak hinein, an der Oberfläche wurde es durch den salzärmeren Baltischen Ausstrom über der Norwegischen Rinne in seiner Ausdehnung nach Westen begrenzt. Der gesamte Salzinhalt lag mit 0,7 Standardabweichungen unter dem langfristigen Mittel 2000 – 2009.

Die den Salzgehalt in der Deutschen Bucht beeinflussenden Festlandsabflüsse lagen im April und Mai 2006 aufgrund ungewöhnlich starker Schneefälle im Winter erheblich über den klimatologischen Monatsmitteln. Der Abfluss der Elbe entsprach im April dem 2½-fachen des langjährigen Mittelwertes.

Infolge des ungewöhnlich hohen Sturmaufkommen im Herbst/Winter 2006/07 drang im Jahr 2007 das atlantische Wasser von Norden her bis auf etwa $54,2^\circ$ N vor; gleichzeitig drang eine Zunge atlantischen Wassers aus dem Kanal in die südliche Nordsee ein. Im Sommer war die Nordsee deutlich salzärmer. An der Oberfläche wurden Salzgehalte > 35 nur noch NW-lich der Linie Peterhead – Fladengrund – Südspitze Shetlands, also im unmittelbaren Einflussbereich des Fair-Isle-Stroms, angetroffen. Auch am Boden verringerte sich die Fläche atlantischen Wassers, dessen Südrand sich um über 60 sm NE-wärts verlagerte. Der gesamte Salzinhalt der Nordsee entsprach im Sommer mit $1,143 \times 10^{12}$ t praktisch dem 10-Jahresmittel der vergangenen Dekade. Der vertikale Salzgehaltsgradient über der norwegischen Rinne war deutlich weicher als im Vorjahr, so dass sich keine eigentliche Halokline ausbildete. Die Gesamtabflussmengen der Elbe in den Jahren 2006 und 2007 lagen mit $22 \text{ km}^3/\text{a}$ dicht am langjährigen Mittel.

Meereschemie

Nährstoffe (S. 170 ff.)

Die über Elbe und Weser eingetragenen Nährstofffrachten in die Deutsche Bucht zeigen trotz großer interannueller Unterschiede eine deutlich abnehmende Tendenz. Dies spiegelt sich auch im langzeitlichen Verlauf der Nährsalzkonzentrationen in der Deutschen Bucht wider.

Die regressiv aus Salzgehalts- und Nährstoffanalysen abgeleiteten, für Küstenwasser (Salzgehalt 30) und Meerwasser der eigentlichen Deutschen Bucht (S = 34) repräsentativen Nährstoffgehalte unterschieden sich im Winter 2006 und 2007 wenig von denen der Vorjahre. Die Phosphatgehalte lagen in der Deutschen Bucht nicht mehr, im Küstenwasser ca. 60% über den Vergleichswerten von 1936 bzw. über den im Rahmen von OSPAR diskutierten Orientierungswerten. Hohe Konzentrationen der Stickstoffverbindungen zeigen eine nach wie vor erhebliche Nährstoffbelastung an. Die durch industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten wenig beeinflussten Silikatkonzentrationen lagen im Bereich natürlicher Schwankungen.

Das Nordseewasser zeichnete sich wie in den Vorjahren im Sommer 2006/07 durch eine nährstoffarme Deckschicht aus, in der die Nährsalze, besonders Nitrat, das Algenwachstum limitierten. Auffallend waren im Sommer 2007 höhere Konzentrationen im Elbeausstrombereich, da durch hohe Abflussmengen über die Elbe Nährstoffe in die Deutsche Bucht getragen wurden. Die Chlorophyllkonzentrationen in der zentralen Nordsee waren aufgrund der Stickstofflimitierung gering. Chlorophyllmaxima traten nur in Küstennähe auf, da hier durch starke Oberflächenabflüsse und Remineralisierungsprozesse ausreichend Nährstoffe zur Verfügung standen.

Das Redfieldverhältnis ($N/P = 16$), ein Parameter, der im Rahmen von OSPAR auch zur Eutrophierungsbewertung herangezogen wird, lag in weiten Bereichen der Nordsee außerhalb des natürlichen Bereiches und spiegelte zum Teil die Stickstofflimitierung in den Sommermonaten wider.

Im Berichtszeitraum war die Verteilung der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser vergleichbar mit den Vorjahren (80 – 100%). Die stärksten Untersättigungen traten sowohl 2006 als auch 2007 in der östlichen Nordsee auf, sie lagen hier unter 60% und sanken örtlich auf 53% ab.

Organische Stoffe (S. 193 ff.)

Erwartungsgemäß ergaben sich auch in den Jahren 2006 und 2007 für die verschiedenen organischen Schadstoffe unterschiedliche räumliche Verteilungen und zeitliche Tendenzen. 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.

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

Für die meisten Chlorkohlenwasserstoffe lassen sich aufgrund hoher Konzentrationschwankungen im Meerwasser und kurzer Beobachtungszeiten keine robusten Trends angeben. Die Konzentrationen der Hexachlorcyclohexan-Isomere α - und γ -HCH sind hingegen im Zeitraum 1989 – 2007 exponentiell zurückgegangen. Die Gehalte an α -HCH halbierten sich in der Deutschen Bucht alle 4 Jahre. Die γ -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 α -, als auch γ -HCH liegen die Konzentrationen inzwischen weit unter 0,5 ng/L. Im von der Elbfahne beeinflussten Seegebiet vor der nordfriesischen Küste war der langfristige Abwärtstrend von α -HCH bereits um die Jahrtausendwende in eine Seitwärtsbewegung übergegangen. In den beiden Jahren des Berichtszeitraums ist hingegen wieder eine Tendenz zur weiteren Reduktion zu beobachten.

Die höchsten Schadstoffkonzentrationen werden in der Deutschen Bucht nicht mehr für klassische, lipophile Schadstoffe beobachtet, sondern für ›moderne‹, eher polare und persistente Pestizide. Aufgrund dieser Eigenschaften verhalten sich diese Stoffe relativ ›konservativ‹, so dass meist recht gute inverse Korrelationen zwischen Stoffkonzentration und Salzgehalt gelten, welche die großen, in die südliche Nordsee entwässernden Flüsse als Haupteintragsquellen ausweisen. Die Konzentrationen der polaren Pestizide unterlagen auch in den Jahren 2006 und 2007 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. Die Konzentrationen aller untersuchten Verbindungen unterlagen im Sediment hohen Schwankungen, die sich auch bei Normalisierung der Konzentrationen auf organischen Kohlenstoff (TOC) nicht hinreichend reduzieren ließen, so dass – auch wegen des kurzen Überwachungszeitraums von nur 12 Jahren – robuste Trends nicht festgestellt werden konnten.

Am Beispiel einer neuen Schadstoffklasse – den perfluorierten Tensiden – konnte gezeigt werden, dass anhand ungestörter Sedimentkerne aus Sedimentationsgebieten retrospektiv Aussagen über Langzeittrends möglich sind.

Metalle (S. 232 ff.)

Im Wasser der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) wurden in den Jahren 2006 und 2007 keine Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn, gelöst) gemessen, die negative Auswirkungen auf die belebte Natur wahrscheinlich machen würden. Grundlage dieser Einschätzung ist die Anwendung des WRRL-Umweltqualitätsstandards AA-EQS auf die Cadmium-, Blei-, Quecksilber- und Nickelgehalte. Kupfer und Zink wurden auf Basis der Wasserqualitätsstandards (WQS) der US-EPA bewertet.

Hintergrundwerte erreichten die Metallgehalte (gelöst) nur in der äußeren AWZ, und dort auch nur die Elemente Cadmium und Nickel. Auch in direkter Nähe zur Küste in Wasserkörpern mit Salzgehalten > 28 wurden in keinem Fall die Effektgrenzwerte er-

reicht. Allerdings ist die Bestimmung und Evaluation geeigneter Effektgrenzwerte für marine Ökosysteme nach wie vor Gegenstand der Forschung und wissenschaftlichen Diskussion.

Zwischen 2003 und 2007 zeigten die Zeitreihen der Elemente Kupfer und Nickel (gelöst) im küstennahen Wasser signifikant zunehmende Trends, die Gehalte blieben jedoch sehr deutlich unter den Effektgrenzwerten.

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.

Cadmium, Zink und Nickel zeigen ausgeprägte Jahrgänge mit erhöhten Gehalten im Frühjahr und Minima im Spätsommer bis Herbst. Dagegen zeigt das gelöst vorliegende Mangan ein deutliches Maximum im Sommer, was auf Sauerstoffmangelsituationen in der Wassersäule hinweist.

Nach heutigem Kenntnisstand geht von den gemessenen Metallbelastungen des Meerwassers keine Gefahr für das marine Ökosystem aus.

Die Metallbelastung der Feinkornfraktion ($< 20 \mu\text{m}$) im Oberflächensediment erreicht entlang der nordfriesischen Küste Gehalte, die negative biologische Effekte verursachen können. Von den sechs untersuchten Elementen (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) überschreiten fünf (nur Nickel nicht) in Küstennähe vor Sylt den Effektgrenzwert. Zink zeigt im gesamten deutschen Küstenbereich entsprechend erhöhte Werte, Quecksilber nur entlang der nordfriesischen Küste bis zur Elbemündung. Blei ist das einzige Element, das den Effektgrenzwert in der gesamten deutschen AWZ überschreitet. Die niedrigste Belastung wird im Gebiet der Weißen Bank gemessen, hier erreichen die Elemente Cadmium und Kupfer in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments ihre Hintergrundwerte. Das dieser Auswertung zugrundeliegende Bewertungsverfahren ist weitgehend an das von OSPAR angewendete Bewertungsschema angelehnt. Es wurden die Effektgrenzwerte (ERL) der amerikanischen ozeanographischen Behörde (NOAA) angewendet.

Signifikante zeitliche Trends, die im Zeitraum zwischen 1998 und 2007 ermittelt wurden, waren alle abnehmend (Weiße Bank (Cu), Ems (Zn, Pb), deutsche Bucht (Hg)). Quecksilber zeigte seit 1997 in nahezu der gesamten deutschen Bucht signifikant abnehmende Trends. Eine Ausnahme stellen allerdings Veränderungen in der inneren deutschen Bucht, südöstlich Helgoland, dar, die hier seit 1999 zu einer deutlich erhöhten Variabilität der Quecksilbergehalte führten. Die Ursache hierfür liegt mit Sicherheit nicht in gestiegenen Emissionen aus der Elbe, sondern vermutlich eher in regionalen Umlagerungen am Meeresboden, die tiefer liegende, höher belastete Sedimenthorizonte an die Oberfläche befördert haben.

Unabhängig von diesen seit 1999 beobachteten Veränderungen, führte die Umlagerung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen zur Tonne E3 zu einer regional begrenzten Zunahme der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments. Vor allem handelt es sich hierbei um die Elemente Cadmium, Kupfer, Quecksilber und Zink.

Radioaktive Stoffe (S. 263 ff.)

Die Überwachung auf radioaktive Stoffe war in den Jahren 2006 und 2007 auf die Radionuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr , Tritium und die Transurane ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am in der Deutschen Bucht fokussiert. Die Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen der Radionuklide wiesen hier insgesamt gegenüber früheren Jahren 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}Cs im nordwestlichen Seegebiet kamen insbesondere durch resuspendiertes Material aus dem hochbelasteten Sediment der Irischen See zustande. In den Konzentrationsverteilungen von ^{90}Sr war ein charakteristischer Süßwasser-eintrag aus der Elbe erkennbar.

Die im Bereich der Elbe und ihrem Ästuar erhöhten Aktivitätskonzentrationen von Transuranen entstammen anhand der Aktivitätsverhältnisse eindeutig nicht dem Fallout, lassen sich jedoch auch nicht einer lokalen Quelle zuordnen. Im letzteren Fall müssten auch andere künstliche Radionuklide in deutlich erhöhten Konzentrationen nachzuweisen sein, was nicht der Fall ist. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand bleibt nur die Hypothese einer Anreicherung in der Tideelbe über natürliche Transportprozesse durch Adsorption an Schwebstoffen.

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 0,3 mSv/a, die deutlich unter der laut Strahlenschutzverordnung »trivialen Dosis für eine einzelne Quelle« (10 mSv/a) bleibt und dementsprechend aus der Sicht des Strahlenschutzes außer Acht gelassen werden kann. 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.

Compilation of Summaries

This compilation of summaries is to make the main findings of the ›North Sea System‹ accessible to a broader readership. As to aid following these findings, all figures and tables of the main sections come with English annotations and captions.

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 bio-ecological change. The circulation state itself is derived here from a variety of diagnostic analyses of large-scale mean sea level pressure distributions. The changeover to NCEP/NCAR reanalyses as the primary database, hence, forms a major novelty.

Weather types (p. 40 sqs.)

Weather types and storm events as deduced from daily atmospheric sea level pressure fields were presented as annual calendars for 2006 and 2007. These calendars have proven useful aids in identifying and interpreting anomalous states and incidents in atmospheric, oceanographic and chemical variables of the North Sea System, if immediately or indirectly linked to atmospheric circulation.

For robust statistical analyses the set of 27 weather types was reduced to a more comprehensible set of 6 states: the anti-/cyclonic rotational types A and C and directional types NE, SE, SW, and NW. Investigations of the reduced set span from frequency anomalies and characteristic life times to weather-type transitions in the framework of Markov chains.

Frequency anomalies in 2006 and 2007 of the main weather types were determined, assessed, and interpreted on monthly, seasonal, and annual time scales using empirical distributions pertaining to the climatological base period 1971 – 2000. For instance, uniformly distributed W (SW & NW) and E types in winter 2006 hint to anomalously weak zonal circulation and above normal cooling rates in sea temperatures, while opposite implications follow from the disparity of 68 W types versus 2 E types from November through January 2007. Frequencies of A (15) and S types (11) in July 2006 and C(15) and N types (10) in the succeeding month of August reveal diametrically disparate temperature conditions in summer 2006. Another significant difference consists in the proportion of N to S types, which by increasing from 0.57 in 2006 to 1.31 in 2007 considerably surmounted the climatological proportion of 0.75.

Artlessly counting off the 30-year base period sequence of weather types as to number and length of weather-type episodes yields mean lengths or lifetimes that vary between 1.6 (NE) and 2.6 days (A). Reminiscent of radioactive decay, the exponential decline of number of episodes with increasing length points to the Geometric Distribution (GD) as the most simple of lifetime models. The unique property the GD only shares with its continuous analogue, the Exponential, is memorylessness. This property results from the invariance of death probability, which is the single distribution parameter estimated by the inverse of mean lifetime. As a consequence, the

probability of death or survival of a weather-type episode is independent of its current age. The GD turns out an adequate model for lifetimes as long as a week. The poorest agreement arises for longlived A types representing persistent blocking situations, which can bring to a stand the erratic course of weather evolution for time spans up to several weeks. The anonymized episode or, more colloquial, the weather type as the ›thing-in-itself‹ was found to have a mean lifetime of 2 days. Hence, having equal death and survival probabilities of 0.5, the corresponding GD conforms to the run length distribution some weather goddess could have produced by constantly flipping a true coin. The fact that some weather types show greater »talent« than others, when it comes to survival, instead hints to 6 cheats playing the game.

At 32 episodes, amongst them the Methuselah, who attained the great age of 18 days, weather type A dominated the age group ≥ 9 days during 1971 – 2000. Otherwise this range was occupied only by 15 SW, 5 NW and 3 SE episodes. In 2006 and 2007 the same range was exclusively inhabited by 2 and 1 A episodes, of which 1 reached 11 days in each year. The frequent occurrence of northerly (NE & NW) weather types in 2007 also showed in long episodes within the age band 5 – 8 days, the frequency of which increased from 1 to 6 vis-à-vis 2006, while at the same time southerly episodes dropped from 7 to 1. Episodes attaining ages ≥ 5 days total up to 14 for either year and, thus, match the climatological mean (13,6). All of these counts slightly exceed the expected amount of 11.4 ($= 182.5 \times 0.5^4$) due to a GD at death probability 0.5. The corresponding cumulative lifetimes amount to 95 (2006), 90 (2007), 90,7 (cm), and 68,4 days (GD). Moreover, the overall number of episodes (186, 183, and 181,1/yr), and, hence, the mean lifetimes of ≈ 2 days have been conspicuously stable.

A third way of counting applied to the 30-year time series of weather types consists in tallying the 6^2 distinguishable transitions from day to day. This mode of counting not only entails information on frequency and lifetime of weather types, but also sheds light on typical and untypical patterns in their sequential evolution. Within the analogue of a ball-game analysis these elements correspond to each players total time of ball possession, which is comprised of times of holding on to the ball and points in time of passing it. The resulting quadratic matrix of transition counts is highly asymmetric and most heavily occupied in the main diagonal, representing self-transitions. The first feature signifies that mutual passing among any 2 players is unbalanced, while the latter stands for each players self-regarding attitude of rather sticking to the ball than cooperatively passing it. Specifically, the narcissistic behavior implies high serial autocorrelation, which together with geometrically distributed sojourn times in unchanged states ranks among the inherent properties of 1st order Markov chains.

Fitting this stochastic process to the data consists in transforming the row entries of the count matrix into relative frequencies with respect to each row's sum, i. e. the individual total frequency of the weather type associated with each row. Any row vector of this transition matrix represents a conditional 1-step probability distribution for the conjoint event that any of the 6 weather types occurs tomorrow provided that today's weather is of the type the row applies to. The memorylessness of the MC consists in the fact that the transition probabilities exclusively depend on its current state and, in particular, not on whatever intricate path the current state was reached. It is also worth noting, that the MC at hand – regardless of its initial state – converges towards a unique stationary distribution for stochastic forecasting periods of 1 week. Actually, this limit distribution is the climatological probability distribution of the 6 weather types. The rapid leveling off of the forecasting potential towards the climatological skill and the Markovian property of memorylessness – tantamount to the exclusive de-

pendence of the future on the present – form notable parallels to numerical weather forecasting from the laws of physics.

The strong inclination of weather types to stay alive makes persistence forecasts (tomorrow-as-today) with success probabilities from 39 (NENE) to 59% (AA) the best option. Disregarding stagnation periods of about 2 days on average, the most probable sequence of weather types under arbitrary initial states (except NE & SE) is the periodic succession of A-SW-C-NW-A, which describes a typical-of-the-region passage of a low pressure system preceded and followed by interim highs. As with their cousins (SW & NW), the rare weather types SE and NE are most likely embedded in sequences A-SE-C and C-NE-A, respectively. The two-way transitions C<>A, NE<>SW, and NW<>SE cannot be realized from one day to the next, or rarely so.

Compared to climatology, directional weather types NW/SW occurred noticeably less/more frequently in 2006. Primarily, these departures arose from less/more frequent self-transitions, more specifically, from the rare (1)/frequent (7) occurrence of long-lived episodes (≥ 5 days). Virtually inverse conditions as to NW and SW were a notable characteristic of 2007. In addition, NE types were more abundant for the same reason, while SE types dropped by half (*vis-à-vis* 2006) overall, as well as to self-transitions and proper transitions to other weather types. As noted earlier, the total number of weather type episodes – equivalent of the total frequency of proper transitions – was subject to minor fluctuations, only. Apparently, this finding widely applies to individual numbers of episodes as well, such that anomalies in total occurrence of individual types primarily reflect anomalies in the occurrence of long-lived episodes. In contrast to 2006, the periodic cycle in 2007 was limited to the sequence A-SW-NW-A. Moreover, this cycle was less stable, since transitions ASW and ANW were about equally frequent, which also holds for SWNW and SWC transitions. The causes thereof were explained on the basis of reduced weather-type calendars.

Atmospheric pressure distribution (p. 68 sqs.)

In signifying geostrophic vector winds, mean sea level pressure (MSLP) distributions represent the large-scale atmospheric circulation in the greater North Sea region.

The general climatological cycle is characterized by intense SW-ly flow through fall and winter, an attenuated flow in spring, turning NW in early summer, finally backing W and intensifying when blending into its cold-season mode. This course of change reflects the seasonally varying dominance of the Icelandic low and the Azores high and is coupled to a meridional migration of the frontal zone on the order of 10 degrees. The shifts go along with the weakening of the Icelandic low and the NE-ward expansion of the Azores high in the course of spring and, conversely, the re-strengthening of the subpolar low and the retraction of the Azores high to subtropical latitudes towards the end of summer.

Using the full weather-typing scheme, monthly and seasonal pressure patterns in 2006 and 2007 were classified in the same fashion as daily MSLP distributions and compared to corresponding climatologies for the period 1971 – 2000. Unlike synoptic distributions, temporal means do not represent weather types but compound flow conditions, the anomalies of which may be conceived as manifestations of the chaotic-dynamic evolution of a memoryless atmosphere. As anomalies on these time scales embody uncorrelated or disjointed states, they can be little more than documented.

Seasonal MSLP distributions are frequently composed of complementary shorter-term circulation anomalies, which tend to cancel out one another on this time scale. In

contrast to monthly distributions, they are usually found in close accord with climatological reference states. Notable exceptions are the S-ly meridional flow in winter 2006 and the sharply enhanced SW-ly flow throughout the fall of the same year. In comparison, particularly striking intraseasonal circulation contrasts in summer 2006 and winter 2007 expressed themselves in inverse month-to-month surface air temperature anomalies across the entire land mass within temperate latitudes of the Northern Hemisphere. This hemispheric response clearly shows that large-scale atmospheric circulation anomalies are integrated into the mid-latitudes' earth-girding system of waves and eddies.

The widely used North Atlantic Oscillation index does not always provide a useful indication of atmospheric flow in the North Sea region. The enhanced SW-ly flow in September and October 2006, for example, was associated with a correspondingly strong positive mode of the East Atlantic Pattern, while, at the same time, various NAO indices were suggestive of (incompatibly) weak zonal circulation.

The switch of the database to NCEP/NCAR reanalyses made obvious the problem of pressure reduction to mean sea level in mountain regions in general, and in the Norwegian Scandes in particular. In comparison to previously used MSLP fields of the UK MET OFFICE, the NCEP/NCAR fields were found to be noticeably distorted here in fall and winter. This deformation usually corresponds to an artificial SE deflection of the wind. MSLP distributions are solely employed here in diagnostic analyses, which in the end are based on the weather-typing scheme. As this technique did not yield unbearably compromised results on any relevant time scale, no attempts were made to correct the NCEP/NCAR fields for this artefact.

North Sea Wind (p. 85 sqs.)

Being proportional to the wind index of the weather-typing scheme, the geostrophic ›North Sea Wind‹ characterizes wind speed and direction across the North Sea. Using daily wind vectors wind probability ellipses and virtual displacement trajectories were constructed as to visualize seasonal states and day-to-day evolution of wind conditions in 2006 and 2007. Monthly, seasonal, and annual means of both, vector and scalar wind speeds, wind direction and directional stability are reported among other tabulated statistics.

In either year, the prevalence of westerly winds is reflected in a W:E ratio of the zonal wind of nearly 3:1. At 3:2 the S:N ratio of the meridional wind in 2006 was markedly less balanced than usual or in 2007 (1:1). The proportion of vector to scalar wind speed measures directional stability or persistence. Proportions close to 1:2 are typical of annual and seasonal means – excepting spring, when persistence falls to about 1:4. Substantial deviations occurred in winter (1:4), spring (1:2), and fall 2006 (3:4). At 60% high winds (> 10 m/s) were much more frequent in fall/winter 2006/07 than in winter 2006 or fall 2007 (40% each). High wind frequencies in spring (13%) and summer 2007 (30%) were ½ and 3 times as large as in corresponding seasons of 2006.

Seasonal shifts in the influence of Icelandic Low and Azores High are apparent from the climatological virtual trajectory of ›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. With progressing spring season, the influence of the Azores High eventually prevails. Weak WNW winds at its northern edge from early June characterize average North Sea summer weather.

One prominent departure from the climatological trajectory consists in the SSW-ly course in winter 2006 when meridional winds were dominant on the whole, even though directional persistence was as low as 0.5:9.2 or 5% in February. Also of note are a strong and persistent (68%) W-ly flow in and most untypical of April, distinctly weak SW-ly winds in July, and the intense zonal circulation from November 2006 through January 2007 with mean scalar wind speeds beyond 15 m/s (Jan.) and persistences up to 90% (Dec.). In July 2007, W-ly winds reached scalar and vectorial speeds 2 and 3 times as high as those of July 2006. The NW-ly course of the trajectory in September and November was in contrast to climatology and prevalent SW-ly winds of the previous year. These sizeable differences in the seasonal evolution of wind conditions, not only between both years, but also in comparison to climatology, do not vanish but become blurred on inspection of annual mean scalar (8.4, 8.9, 8.6 m/s) and vectorial wind speeds (4.0, 4.2, 3.5 m/s) for 2006, 2007, and 1971 – 2000. On annual time scales, the perhaps most conspicuous distinctions are due to wind direction (242°, 270°, 253°).

Gales (p. 92 sqs.)

Gale identification employs a peak-over-threshold technique on the gale index G^* defined in terms of wind-speed and vorticity indices as carried over from the weather-typing scheme. Original thresholds were specified for a UK MET OFFICE daily mean sea level pressure dataset based on one-per-day operational analyses. By contrast, NCEP/NCAR Reanalysis I MSLP data used here constitute daily means of 4 fields per day. To account for the smoothing effect arising from averaging, thresholds had to be re-adjusted as to not underestimate gale frequencies by some 30%. To this end, a Generalized Pareto Distribution was fitted to the tail of G^* within 1971 – 2000. The gale index thus turned out Pareto-Type-2 distributed with upper bound at 69.2 hPa and associated limits of wind speed (V) and vorticity (ζ) of 42.9 m/s and 1.05 rpd, respectively. The new thresholds for the 3 classes ›Gale‹ (G), ›Severe Gale‹ (SG), and ›Very Severe Gale‹ (VSG) were estimated for excess probabilities of 0.1, 0.02 & 1/365 at 28.3, 36.6 & 44.6 hPa. Corresponding limits of V and ζ are 17.5, 22.7 & 27.7 m/s and 0.43, 0.55 & 0.67 rpd.

The 2 most severe gales occurred on Dec. 2, 1966 ($G^* = 55.3$ hPa) and Feb. 16, 1962 ($G^* = 53.7$ hPa, ›Vincinette‹, Hamburgian storm surge disaster). The December storm also holds the record vorticitywise (0.78 rpd), while as yet ›Vincinette‹ produced the highest wind speed (31.4 m/s). Re-calibrated gale identification was further used in compiling catalogues of monthly and seasonal frequencies of classified and total gale days from 1947/48 through 2009/10. These catalogues for gale years (shifted by 6 month vis-à-vis the calendar year) served as the basis of assessment of gale frequencies during gale years 2005/06 and 2006/07.

Apart from the cyclone ›Uriah‹ that gave rise to a record summer storm surge in the Ems region on June 26, 2007, all gales of both, the 2005/06 and the 2006/07 season, fell into the core period October to March (O2M). Monthly gale frequencies were constantly below average throughout O2M in 2005/06 such that, taken together at 26 gale days of which only 2 were classified SG, this season ranks unusually low. In comparison, counts of G (40) and SG (12) were about twice and 6 times as high, respectively, during O2M 2006/07. At 54 gale days altogether 2006/07 ranks 3rd place behind gale years 1994/95 (56) and 1989/90 (57). New records were established in fall (OND) and December (27 & 14). Gale frequencies in December and January (14+12) were surpassed just once, viz. 1982/83 (7+21), and went along with record high values above

2 of the Arctic Oscillation Index. Cyclones ›Britta‹ (Nov. 1, 2006), ›Franz‹ (Jan. 12, 2007), ›Orkun‹ (Mar. 18, 2007), and ›Tilo‹ (Nov. 9, 2007) – the latter pertaining to the 2007/08 season – brought about storm surge heights well beyond 200 cm above MHW at the German coast.

Air temperature and radiation (p. 102 sqs.)

Though based on DWD observations at Norderney, the findings on global radiation and air temperature are of supraregional relevance. Departures in 2006 and 2007 from respective climatological cycles were attributed to atmospheric circulation anomalies, related to one another and to surface temperature anomalies of the Northern Hemisphere due to NOAA's NCDC.

The drastic surplus in July 2006 immediately followed by a deficit of conformable size in August constitutes one of the most prominent radiation anomalies. Reflecting itself in strong diametrical temperature excursions, this dichotomy resulted from steady quasistationary high pressure weather (Omega block), which at the end of the month was replaced with an equally persistent trough pattern. Another Omega block caused the significant radiation surplus of April 2007.

At 10.6 and 11.0 °C, 2006 and 2007 are the warmest calendar years at Norderney during the 40-year period 1971 – 2010. These records were put in the shade by the extreme warm period, kick-started in July 2006 by a pan-European heatwave, persisting through June 2007, and reaching a temperature of 12.3 °C, which exceeds the climatological mean by as much as 3 K. New records were set by all seasonal temperatures (JAS, OND etc.) such that the entire seasonal cycle proceeded on a level elevated about 3 K above normal. The persistence of this warm period resulted from an unusual chain of maintaining and reinforcing atmospheric anomalies, viz., a strong S-ly flow component from September, an immense frequency of gales from October through March, an extremely enhanced zonal circulation from November through January, an excessive radiative surplus in April, and summery weak winds in spring. The large-scale impact of atmospheric circulation anomalies shows in the fact that for at least 130 years the temperature in the Northern Hemisphere never was as warm or warmer than in the next to identical 12-month period from June 2006 through May 2007.

Physical Oceanography

Currents (p. 117 sqs.)

In the winter of 2006, North Sea surface circulation as derived from monthly current fields (model) was characterized by weaker meridional circulation, attributable mainly to predominantly southerly winds in the North Sea region in January and March. Due to these conditions, the typical seasonal pattern of cyclonic circulation in the entire North Sea failed to develop. Also in the spring and summer of 2006, current fields were not very stable and hardly showed any supraregional patterns. Strong atmospheric zonal circulation developed in autumn/winter of 2006/2007, which was related to one of the highest frequencies of storm events in the period of 1948 – 2010. This led to the development of a strong, persistent cyclonic circulation pattern in the entire North Sea. A reversal of atmospheric circulation in February 2007, with predominantly southerly winds, led to a circulation pattern equalling that in March 2006. Whereas, on the one

hand, circulation in the entire North Sea region now came to a near standstill, the Baltic outflow, on the other hand, which had been at a low level for a long period of time, now formed a very strong stream flowing into the northern North Sea. Later in the year 2007, surface circulation was mostly weak and of low persistence.

Circulation statistics for the German Bight are based on the temporal sequence of daily circulation patterns of the residual currents, which show nine typical patterns. Compared to the year before and the year after, 2006 had a markedly lower day-to-day variability and clearly lower frequency of directional flow patterns, which are usually linked to high wind events.

In the reference period of 2000 – 2009, the lowest frequency of cyclonic patterns was recorded in 2007. Although westerly storms continued almost throughout the second half of January, cyclonic circulation in the German Bight was interrupted by a phase of variable circulation. The anticyclonic circulation pattern reached a record frequency of 71 days (as in 2004). The particularly rare (frequent) occurrence of the variable pattern in summer (autumn) is in keeping with high (low) speeds of North Sea wind in the particular seasons.

Waves (p. 131 sqs.)

Typical wave distribution patterns are determined by the prevailing wind conditions and by the geographic/bathymetric shape of the North Sea. Mean wave heights in most quarters of the years 2006 and 2007 were higher than in the preceding years. In all seasons, the mean wind and wind wave directions were SW – NW, except in the winter of 2006 when southeasterly directions prevailed. Swell had a NW direction in all seasons. During a NNW storm event on November 1, 2006, significant wave heights in the northern and central North Sea exceeded 10 m, and 9.8 m was measured off the East Frisian coast.

Sea Level (p. 137 sqs.)

Since the middle of the 19th century, water levels along the German North Sea coast have been measured at gauge stations. Measured water levels are referred to land-based geodetic survey points and, strictly speaking, provide data on relative water level fluctuations.

With respect to the period from 2006 to 2007, available measurement data indicate that there have been no significant changes either in the tides or in the number of storm surges, and least of all in relative mean sea level. Any changes in tidal ranges, heights, and phases are taken into account in the Tide Tables issued by the BSH, which are published annually. The observed change in relative mean sea level is within the scope of the long-term rate of sea level rise, which is about 20 cm per century, and the number of storm surges is slightly above the mean of the 1951 – 2007 period, although there have been a few years with more than twice the normal frequency. The number of storm surge events in any particular year is governed to a considerable extent by chance because a storm surge can only occur if the peak of the storm coincides with the tidal phase.

Temperature (p. 142 sqs.)

In both years, 2006 and 2007, the annual mean sea surface temperature (SST) of the North Sea tied the record height of 11.0 °C established in 2002. Nonetheless, this record

was cut by the mean SST of the span July 2006 through June 2007, which at 11.6 °C was 3.7 standard deviations above the base period mean of 9.9 °C for 1971 – 1993. This extreme warm phase well-nigh coincides with the warmest 12-month period in the Northern Hemisphere for at least 130 years. The seasonal SST cycle proceeded on an almost constantly elevated level of 1.7 K – in the German Bight even 2.7 K – above normal. Excited was the warm anomaly by the pan-European heatwave of July 2006. Its longevity resulted from consolidating and reinforcing atmospheric conditions of which had most notable impact a strong S-ly flow component from September, an exceedingly high gale frequency from October through March, an excessively high radiative surplus in April in steady high pressure weather, and summery weak winds in spring 2007.

After spring had been somewhat on the cold side, particularly in eastern parts, an exceedingly warm isothermal surface layer was encountered during the North Sea Survey in August 2006. This layer had such low a thickness, however, that heat content (1.520×10^{21} J) and volume temperature (10.4 °C) turned out about as small as observed in August 2002 for the last time. By contrast, a mighty surface layer and next to normal surface temperatures were found in August 2007. Referring to mean conditions of stratification during the past decade, temperatures above 20 m depth were too cold by 1 – 2 K, while those between 20 – 40 m were too warm by this amount. In comparison to conditions in August 2006, this contrast becomes as stark as 2 – 3 K.

The vertical temperature distribution in the German Bight was documented by reference to continuous data acquired at MARNET stations ›NSB III‹ and ›EMS‹. Located a touch beyond perennially mixed shallow coastal water, at ›EMS‹ alternate phases of stratification and erosion were observed in spring, in particular, which were associated with spells of weak winds and intense insolation on the one hand, and episodes or events of high winds and low radiation on the other. These conditions went along with decoupled and interlocked turbulence regimes of the top and bottom layer due to wind stirring and tidal friction, respectively. By contrast, an incessant stratification together with a sharp thermocline in the 15 – 20 m depth range could evolve since early June 2006 at ›NSB III‹, under virtually identical meteorological forcing but weaker tidal currents and larger water depth. Here, stratification was eroded only gradually through an abundance of low pressure disturbances in the course of August.

In spite of an inherently favorable weak zonal circulation, sea ice started to form not until the end of January 2006 and almost exclusively along the Northfrisian coastline. At thicknesses ranging within 5 – 20 cm, the ice season 2005/06 lasted barely a week and, hence, was classified ›weak‹. Throughout the winter 2006/07 the German waters remained clear of ice. The heat content of German Bight sea water was again excessive at the onset of winter. All the more insufficient as to exhaust this heat much prior to crossing the seasonal minimum in February were reduced cooling rates under intensified zonal flow.

Salinity (p. 156 sqs.)

Throughout 2006, inflowing Atlantic water of $S > 35$ from the north spread south as far as 55.5° N, both in the bottom and surface layers. At the bottom, Atlantic water spread as far as the Norwegian coast and intruded into the Skagerrak. At the surface, lower-salinity Baltic outflow through the Norwegian channel blocked its westward progress. Total salinity, with 0.7 standard deviations, was below the long-term mean of 2000 – 2009.

Riverine inflow, which influences salinity in the German Bight, far exceeded the climatological monthly means in April and May 2006 due to exceptionally strong snowfalls during winter. The Elbe discharge volume in April was 2½ times the long-term mean.

Because of an unusually strong storm season in autumn/winter 2006/2007, Atlantic water flowing in from the north spread as far as about 54.2° N in 2007. At the same time, a tongue of Atlantic water intruded into the southern North Sea through the Channel. Salinity in the North Sea was markedly lower in summer. In the surface layer, salinities > 35 were only found NW of the line connecting Peterhead – Fladen Ground – southern tip of Shetland, i. e. in the area directly influenced by the Fair Isle Current. Also at the bottom, the areal extent of Atlantic water decreased, with its southern boundary shifting more than 60 nm in NE direction. The total salt content of the North Sea in summer, at 1.143×10^{12} t, about corresponded to the 10-year mean of the preceding decade. The vertical salinity gradient in the Norwegian Channel was clearly weaker than the year before, so that a halocline in the proper sense did not form. Total river runoff volumes of the river Elbe in the years 2006 and 2007, at 22 km³/a, were close to the long-term mean.

Marine Chemistry

Nutrients (p. 170 sqs.)

Nutrient loads transported into the German Bight by the rivers Elbe and Weser show a clear downward trend, despite major interannual differences. This is also reflected in the long-term trend of nutrient concentrations in the German Bight.

Nutrient levels in the winter seasons of 2006 and 2007, derived by regression from salinity and nutrient analyses and representative of coastal water (salinity 30) and sea water of the German Bight proper (S = 34), hardly differed from the concentrations measured in previous years. Phosphate levels in the German Bight no longer exceeded the reference values from 1936 or the orientation values discussed within the framework of OSPAR; levels in the coastal waters exceeded these values by about 60%. High levels of nitrogen compounds indicate that major nutrient loading is still taking place. Silicate concentrations, which are not much influenced by industrial or agricultural activities, were in the range of natural fluctuations.

In the summer of 2006/2007, as in the years before, the North Sea surface layer was characterized by low nutrient levels limiting algal growth, with nitrate being the main limiting factor. Nutrient levels in the summer of 2007 were conspicuously high in the Elbe outflow area due to high runoff volumes transporting nutrients from the river Elbe into the German Bight. Chlorophyll levels in the central North Sea were low due to the observed nitrogen limitation. Chlorophyll maxima occurred only in the coastal waters, supported by sufficient nutrient availability due to high surface runoff and remineralization processes.

The Redfield ratio (N/P = 16), a parameter also used for eutrophication assessment within the framework of OSPAR, was outside the normal range in large areas of the North Sea, in part reflecting nitrogen limitation during the summer months.

In the period under review, the distribution of oxygen saturation in bottom water was comparable to that in earlier years (80 – 100%). The strongest oxygen deficits, both in 2006 and 2007, were observed in the eastern North Sea, where less than 60% and locally only 53% was measured.

Organic Pollutants (p. 193 sqs.)

Spatial distributions and temporal trends of the different organic pollutants varied also in 2006 and 2007, as expected. The main source of pollutants in the German Bight is riverine discharges by the river Elbe. Pollutant levels generally decrease more or less rapidly from the coast toward the open sea.

Outside the Elbe plume, concentrations of non-polar pollutants normally are very low. Therefore, spatial distributions both of the highly lipophilic, chlorinated hydrocarbons HCB, PCB, and DDT, and of polycondensed PAH were characterized by a strong decrease of concentrations from the coast toward the open sea. Concentrations were found to depend strongly on the amount of suspended particulate matter present in the samples.

As the limits of detection for PCB and DDT compounds among chlorinated hydrocarbons have been lowered, very low concentrations of these compounds have now also been found in the outer German Bight. PAH levels of sea water were comparable to those in earlier years; no temporal trend has been found.

Robust trends have not been identified for most chlorinated hydrocarbons due to high fluctuations of their concentrations in sea water and because of the short observation periods. By contrast, concentrations of the hexachlorocyclohexane isomers α - and γ -HCH decreased exponentially in the period from 1989 to 2007. Levels of α -HCH in the German Bight decreased by half every 4 years. Levels of γ -HCH, however, initially decreased only by 5 – 35% in the monitoring area until about 1998, depending on location, after which they decreased by half every 2 years. Meanwhile, levels of both α - and γ -HCH are far below 0.5 ng/L. In the area off the North Frisian coast, which is influenced by the Elbe plume, the long-term downward trend of α -HCH was replaced by a lateral trend as early as the turn of the Millennium. However, in the two years of the period under review, a downward trend set in again.

The highest pollutant levels in the German Bight no longer are those of the classical lipophilic pollutants but of 'novel' pesticides, which characteristically are mostly polar and persistent. Due to these properties, the substances behave rather 'conservatively', i. e. rather good inverse correlations between substance concentration and salinity apply in most cases, which support the conclusion that the main input sources are the major rivers discharging into the southern North Sea. Also in 2006 and 2007, levels of polar pesticides were subject to major seasonal fluctuations. It is not possible to identify time trends currently because analyses were not made routinely before 2000.

Although concentrations of lipophilic pollutants in sediment are about 10^4 to 10^6 times higher than in sea water, source correlations or temporal trends can hardly be identified. Sediment concentrations of all compounds studied were subject to high fluctuations which, even with normalization of concentrations to total organic carbon (TOC), could not be reduced sufficiently to allow any robust trends to be identified, also due to the short monitoring period of 12 years.

It has been shown on the example of a novel class of pollutants – perfluorinated surfactants – that conclusions regarding long-term trends can be made retrospectively on the basis of undisturbed sediment cores taken in sediment provinces.

Metals (p. 232 sqs.)

Metal levels (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, dissolved) measured in water samples from the German Exclusive Economic Zone (EEZ) in 2006 and 2007 were such that no ad-

verse impacts on living organisms were to be expected. That is the conclusion from an evaluation of cadmium, lead, mercury and nickel concentrations based on the WFD environmental quality standard AA-EQS. Copper and zinc were evaluated according to the water quality standard (WQS) of the US Environmental Protection Agency (EPA).

Background values of metals (dissolved) were found only in the outer parts of the EEZ, but only for the elements cadmium and nickel. Also close to the coast, in water bodies with salinities > 28, effects limits values were not reached anywhere. It should be taken into account, though, that the determination and evaluation of suitable effects limit values for marine ecosystems still are subject to research and scientific debate.

Between 2003 and 2007, time series of the elements copper and nickel (dissolved) in coastal waters showed significant upward trends but levels nevertheless remained very clearly below the effects limits.

Spatial concentration distributions of the elements mercury, cadmium, lead, copper, and zinc in surface water of the German Bight show similar patterns. Their levels decrease markedly from the coast toward the open sea. The highest pollution levels are found in the inner German Bight and Elbe estuary, but elevated concentrations have also been found in the estuaries of the rivers Weser and Ems.

Cadmium, zinc, and nickel show marked seasonal cycles, with elevated levels in spring and minima in late summer to August. By contrast, dissolved manganese had a pronounced maximum in summer, which points to an oxygen deficiency situation in the water column.

According to present knowledge, metal concentrations currently measured in sea water do not pose a hazard to the marine ecosystem.

Along the North Frisian coast, metal concentrations in fine-grained surface sediment (< 20 µm) have reached levels capable of causing adverse biological effects. Of the six elements investigated (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn), five (nickel being the only exception) reached effects levels off the coast of Sylt. Zinc levels are elevated along the entire German coast, whereas elevated mercury levels have been measured only along the North Frisian coast, up to the Elbe estuary. Lead is the only element exceeding the effects limit in the entire area of the German EEZ. The lowest levels are found in the area of the White Bank, where concentrations of the elements cadmium and copper drop to background values in fine-grained surface sediment. The method used in this assessment is based largely on the OSPAR assessment method. The ERL guideline values for effects limits issued by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) were used in the assessment.

All significant temporal trends in the period from 1998 to 2007 were downward trends (White Bank (Cu), Ems (Zn, Pb), German Bight (Hg)). Mercury levels since 1997 have shown a significant downward trend almost throughout the German Bight. However, the waters south-east of Helgoland in the inner German Bight constitute an exception. Changes taking place in this area have led to a clearly higher variability in mercury levels since 1999, which is definitely not attributable to higher emissions from the river Elbe but probably to local redistribution processes on the seabed which have brought deeper, more polluted sediment horizons to the surface.

Independent of these changes observed since 1999, sediment dredged from Hamburg harbour and dumped near buoy E3 has led to a local increase in metal levels in fine-grained surface sediment, mainly cadmium, copper, mercury, and zinc.

Radioactive Substances (p. 263 sqs.)

In 2006 and 2007, monitoring of radioactive substances focused on the radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H (tritium), ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$, and ^{241}Am in the German Bight. Compared to earlier years, distributions of the activity concentrations of radionuclides generally showed only minor spatial differences. Concentrations hardly exceeded those in surface water of the North Atlantic Ocean, which were caused by global fallout from atmospheric nuclear weapons tests. Slightly elevated levels of ^{137}Cs in the northwestern sea area, as compared to the coastal area, were attributable to resuspended material from highly contaminated sediment in the Irish Sea. The distribution of ^{90}Sr concentrations reflected the characteristic freshwater discharge from the river Elbe.

Based on activity ratios, elevated activity concentrations of Transuranium elements found in the area of the Elbe river and estuary definitely are not fallout-related, although they cannot be attributed to any local source either. If the latter were the case, clearly elevated levels of other artificial radionuclides would also have to be present, which is not the case. According to present knowledge, the only remaining hypothesis is enrichment in the tidal Elbe via natural transport processes and adsorption to suspended particulate matter.

The total effective dose in Germany averages 4 mSv per year and person, about half of which is attributable to medical measures, primarily x-ray diagnostics. Consumption of fish and seafood is the only exposure path through which contamination of the North Sea with artificial radionuclides contributes to radiation exposure of the population. Average consumption of 14 kg per year results in an effective dose of max. 0.3 mSv/a, which is clearly below the ›trivial dose‹ of 10 mSv/a specified in the German ›Strahlenschutzverordnung‹ (Radiation Protection Ordinance). As enrichment of radionuclides in the food chain has not led to a significant increase in the effective dose for humans, the same applies probably to North Sea flora and fauna.

1 System Nordsee



Courtesy of Sagaki Keita 2008 (sagakikeita.com)

Thirty-six Views of Mount Fuji — 富嶽三十六景 | #1: The Great Wave off Kanagawa — 神奈川沖浪裏

<•> P. Loewe, H. Klein & S. Schmolke • • • • •

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 holistische Verständnis der Prozesse, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen im System Nordsee ist Voraussetzung für eine nachhaltige Bewirtschaftung und wirksame Systemeingriffe zum Schutz der Meeresumwelt. 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.

Zustand und Entwicklung des komplexen Systems Nordsee sind 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. Systeme

matische 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 notwendige Verweise 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 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 → Meeresphysik → 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.

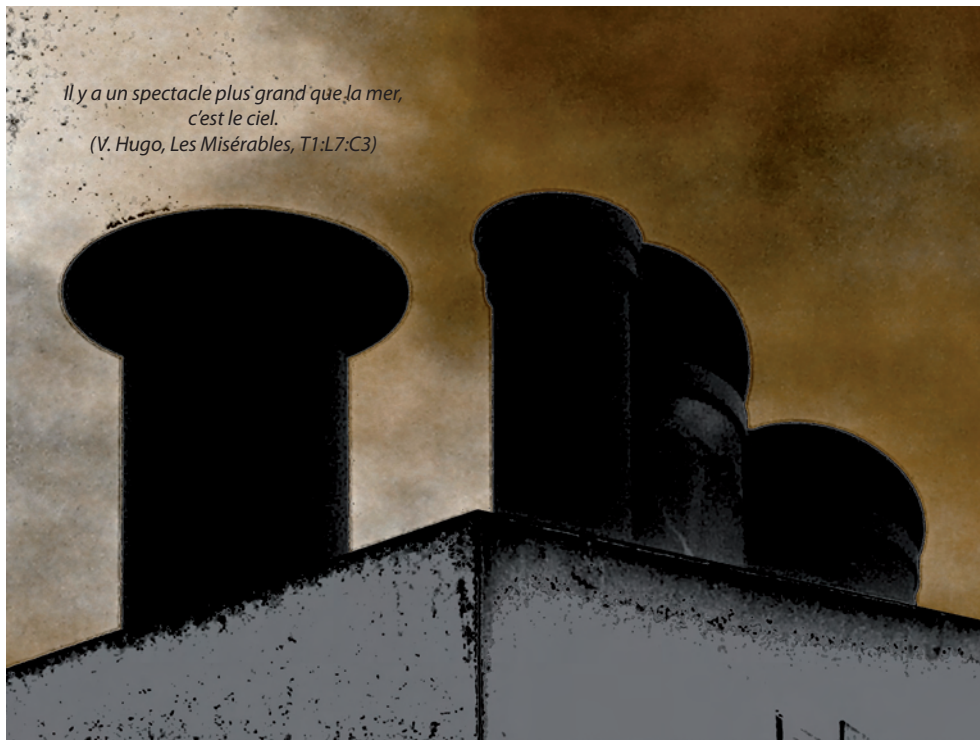
Der Zustand der Atmosphäre ist von wesentlicher Bedeutung für den Zustand des Meeres und dessen Verständnis. Dabei können auch sehr kurzlebige atmosphärische Ereignisse, wie die in Wetterlagenkalendern ausgewiesenen Stürme, entsprechend kurzfristige (Sturmfluten), aber auch dauerhafte Folgen (z. B. Auflösung der Schichtung) für den Meereszustand haben. Mit der Umstellung der Datenbasis auf NCEP/NCAR Reanalysen wurde das Sturmaufkommen im Nordseeraum für die vergangenen 60 Jahre neu bestimmt. Zu den relevanten Weiterentwicklungen zählen ebenso Untersuchungen zu den Lebensdauern und Übergängen von Wetterlagen.

Die wichtigsten ozeanographischen Zustandsgrößen werden in Beiträgen zu Meeresströmung, Seegang, Wasserstand, Temperatur und Salzgehalt diskutiert. Informationen zum Meereis, das sich als negativer Wärmeinhalt auffassen lässt, sind unter ›Temperatur‹ zu finden. Die Oberflächentemperatur der Nordsee lag 2006 und 2007 erneut auf der erstmals im Jahr 2002 erreichten Rekordhöhe von 11,0 °C. Bereits in der Zeitspanne von Juli 2006 bis Juni 2007 wurde dieser Rekord mit 11,6 °C deutlich übertroffen. Dass diese Phase die bislang extremste Warmperiode für die Nordhemisphäre insgesamt darstellt, verdeutlicht: die Nordsee ist ein offenes, in das System Erde eingebundenes Untersystem.

Das Kapitel Meereschemie enthält Beiträge zur Belastung der Nordsee durch Nährstoffe, Spurenmetalle, organische und künstliche radioaktive Stoffe. Es werden die Belastungspfade (Quellen) beschrieben, das Vorkommen und Verhalten von Stoffen und Stoffgruppen in der marinen Umwelt dargestellt und deren räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung analysiert. Soweit erkennbar, werden Zusammenhänge zwischen der aktuellen Ausprägung der stofflichen Belastung und den Belastungsur-sachen sowie den ozeanographischen Rahmenbedingungen hergestellt.

Zu den wichtigen Neuerungen zählen Untersuchungen zur jahreszeitlichen Variabilität von Nährstoffen an ausgewählten Stationen in der Deutschen Bucht sowie die Ausdehnung der organischen Schadstoffanalysen auf eine neue prioritäre Substanzklasse, die perfluorierten Tenside. Bei den Spurenmetallen wird ein besonderer Fokus auf die Verteilungs-/Verdünnungsfunktion gelöster Metalle gerichtet.

2 Atmosphärenphysik



<•>

P. Loewe

2.1	Einführung	... 38
2.2	Daten	... 39
2.3	Wetterlagen	... 40
2.4	Luftdruckverteilung	... 68
2.5	Nordseewind	... 85
2.6	Sturm	... 92
2.7	Lufttemperatur und Strahlung	... 102
2.8	Zusammenfassung	... 106
2.9	Literatur	... 112

2.1 Einführung

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 Veränderungen in der Artenzusammensetzung erstrecken.

Die Interpretation ozeanographischer Zustandsanomalien setzt also Kenntnisse über den Zustand der Atmosphäre voraus, welcher maßgeblich durch die großräumige atmosphärische Zirkulation bestimmt ist. Der Zirkulationszustand selbst wird hier aus differenzierten Analysen der großräumigen Luftdruckverteilung über der Nordsee abgeleitet. Nahezu allen hier präsentierten Befunden liegen Luftdruckfelder im Meeresniveau zugrunde. Die Umstellung der primären Datenbasis auf NCEP/NCAR Reanalysen stellt deshalb eine der wichtigsten Neuerungen dar.

Ein Schwerpunkt des Kapitels besteht in der Untersuchung der Wetterlagen über der Nordsee. Diese beruhen auf einer Klassifizierung der täglichen Luftdruckfelder und werden zusammen mit gleichzeitig identifizierten Sturmereignissen als Wetterlagenkalender dokumentiert. Anhand eines von 27 auf 6 Hauptwetterlagen reduzierten Sets von Zirkulationszuständen werden monatliche, saisonale und jährliche Häufigkeitsstatistiken diskutiert. Weitergehende Untersuchungen betreffen die Lebensdauern der reduzierten Wetterlagen, die sich in guter Näherung als geometrisch verteilt erweisen, so dass sich die Wetterlagenentwicklung von Tag zu Tag als Zustandsänderung einer Markovkette interpretieren lässt.

Die geographischen Verteilungen der monatlichen und saisonalen Luftdruckfelder der Jahre 2006 und 2007 werden mit entsprechenden Luftdruckklimatologien verglichen, um zugehörige Zirkulationsanomalien zu identifizieren und zu bewerten. Für die genannten längeren Zeitskalen stellen diese Felder jeweils aktuelle, typische und abweichende mittlere Wetterlagen oder Witterungslagen dar, die sich in gleicher Weise wie die täglichen Felder klassifizieren lassen. Die im Prinzip beliebige Entstehungsgeschichte dieser mittleren Zirkulationsstände bleibt hier anhand der Wetterlagenkalender nachvollziehbar.

Weitere Schwerpunkte des Kapitels bestehen in der statistischen Analyse des für die Region Nordsee repräsentativen ›Nordseewindes‹, der als Beiprodukt der Wetterlagenklassifizierung anfällt, sowie des Sturmaufkommens im Nordseeraum. Die Umstellung auf NCEP/NCAR Luftdruckfelder machte Anpassungsarbeiten hinsichtlich der Sturmquantile des Sturmidentifizierungsverfahrens erforderlich, die ebenfalls dokumentiert sind. Ein relevantes Teilergebnis – der verwendete Sturmindex folgt einer Pareto-Typ-2 Verteilung – beinhaltet, dass Wind- und Rotationsgeschwindigkeiten in Stürmen nicht beliebig groß, sondern in der Höhe beschränkt sind.

Der Nutzen der über die allgemeine atmosphärische Zirkulation gewonnenen Kenntnisse wird schließlich im Rahmen der Interpretation von Jahresgängen der Sonneneinstrahlung sowie der Lufttemperatur demonstriert. Atmosphärischen Ursachen für Zustandsanomalien ozeanographischer oder chemischer Variablen wird ggf. im Rahmen der Diskussion der jeweiligen Zustandsgröße Rechnung getragen.

Zusammenfassungen der jeweiligen Hauptkapitel findet der Leser gesammelt in *Kap. 2.8, S. 106*.

2.2 Daten

Die Ergebnisse zu Lufttemperatur und Strahlung auf Norderney (*Kap. 2.7, S. 102*) beruhen auf Messreihen des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES. Den ebenda präsentierten nordhemisphärischen Temperaturanomalieverteilungen liegt der MLOST Datensatz (›Merged Land-Ocean Surface Temperatures‹) der NOAA in der Version GHCN-M v3.1.0 & ICOADS/ERSST v3b zugrunde (SMITH ET AL. 2008), der im Januar 2012 von der Webseite www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-products.php bezogen wurde.

Alle anderen Ergebnisse wurden durch verschiedenste diagnostische Analysen von Luftdruckfeldern im Meeresniveau (MSLP) erzielt. In früheren Ausgaben dieses Berichts wurden hierfür die ›Northern Hemisphere Mean Sea Level Pressure (MSLP) fields (1873 – 2005)‹ des UK METEOROLOGICAL OFFICE (2012) verwendet. Die Aktualisierung dieses Datensatzes wurde mit dem Jahr 2005 jedoch eingestellt, so dass hier eine Umstellung der Quelldaten auf MSLP-Felder der ›NCEP/NCAR Reanalysis I (1948-present)‹ (KALNAY ET AL. 1996) vorgenommen wurde. Insbesondere wurden Tages- und Monatsmittelfelder von der NOAA/OAR/ESRL PHYSICAL SCIENCE DIVISION, Boulder, Colorado, USA bezogen, und zwar von deren Webseite www.esrl.noaa.gov/psd.

Im Rahmen vergleichender Analysen beider Datensätze wurde eine Inhomogenität des UKMO Datensatzes aufgedeckt, die zu einer Unterschätzung der Häufigkeit von Sturmtagen um knapp 30% in den Jahren 2002 bis 2005 geführt hat. Als Folge davon weisen die Wetterlagenkalender früherer Berichtsausgaben zu wenig Stürme aus. Auch der fragwürdige Widerspruch zwischen dem steilen Rückgang des Sturmaufkommens seit Mitte der 1990er Jahre und dem gleichzeitig flachen Abwärtstrend im Hochwasserstand Cuxhaven (LOEWE 2009) klärt sich so auf.

Seit 2002 beruhen die täglichen UKMO MSLP-Felder nicht mehr auf Analysen eines einzelnen Termins (JONES 1987), sondern sind offenbar wie die Tagesfelder der NCEP/NCAR Reanalysen als Mittelwerte über 4 Termine angegeben. Die damit einhergehende Glättung der Druckfelder bedingt, dass die bislang auf Einzeltermine ausgelegten Schwellwerte des POT (›Peaks Over Threshold‹) Sturmidentifizierungsverfahrens seltener überschritten wurden. Die diesen Umständen Rechnung tragende Angleichung der Schwellwerte wird in *Kap. 2.6.1, S. 92* beschrieben.

Bekanntermaßen treten starke Abweichungen zwischen NCEP/NCAR und UKMO MSLP-Feldern in orographischen Regionen wie Grönland, Antarktis oder Tibetischem Plateau auf (REID ET AL. 2001). Derartige Diskrepanzen wurden hier insbesondere im Bereich der südlichen Skanden festgestellt (*Kap. 2.4.1, S. 69*). Für eine Einschätzung dieser Unterschiede wurde die MSLP-Zeitreihe der WMO Station 01492 Oslo-Blindern von der Webseite des EUROPEAN CLIMATE ASSESSMENT & DATASET PROJECTS (www.ecad.eu) bezogen (KLEIN TANK ET AL. 2001). Zusätzlich wurden hierfür monatliche MSLP-Felder der ERA-40 Reanalyse genutzt, die auf dem Webserver des EUROPÄISCHEN ZENTRUMS FÜR MITTELFRISTIGE WETTERVORHERSAGE (ECMWF) unter http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_moda vorgehalten werden.

2.3 Wetterlagen

Die maßgeblichen Antriebsbedingungen für ozeanographische Zustandsänderungen sind durch die großräumige atmosphärische Zirkulation definiert.

Eine 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 COLLISON (1977) ein automatisches Verfahren entwickelt, welches eine Klassifizierung der täglichen Großwetterlage ausschließlich auf Basis von Luftdruckdaten im Meeresniveau erlaubt. Auch durch ihre 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).

Im Anschluss an einen Abriss der Klassifizierungsmethode wird diese zur Bestimmung der täglichen Wetterlagen in den Jahren 2006 und 2007 eingesetzt. Die stark differenzierten Ergebnisse werden in Form von Wetterlagenkalendern präsentiert, in die zudem eine Sturmklassifizierung eingebettet ist. Für weitergehende statistische Untersuchungen wird der Zustandsraum von 27 auf 6 Wetterlagen reduziert. Abgesehen von der Identifizierung von Häufigkeitsanomalien auf verschiedenen Zeitskalen werden Lebensdauerverteilungen und Wetterlagenübergänge für das reduzierte Set analysiert.

2.3.1 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. 2-1 zeigt die Luftdruckverteilung für den stärksten Sturm des Jahres 2007 am 18. März. Durch Auswertung des Luftdrucks an den gekennzeichneten 16 Gitterpositionen ergeben sich für den Wind- und Vorticity-Index 40,4 bzw. 40,8 hPa. Diese Werte entsprechen einer Windgeschwindigkeit von 25,0 m/s aus Kompassrichtung 279° und einer Wirbelstärke von 111°/Tag und gelten streng für die Position 55° N/5° E. Die daraus abgeleitete Klassifizierung ›sehr starker zyklonaler Weststurm‹ (CW/VSG) ist repräsentativ für das durch die Punkte 4–5–9–13–12–8 begrenzte Gebiet. Weitere Klassifizierungsbeispiele findet man in *Kap. 2.4, S. 68*.

Die bivariate Verteilung der täglichen Windgeschwindigkeits- und Vorticity-Indizes ist in *Abb. 2-2* 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. Winde aus beiden Hemisphären standen im Zeitraum 1971 – 2000 im Verhältnis 68:32; das entsprechende Verhältnis für Winde mit

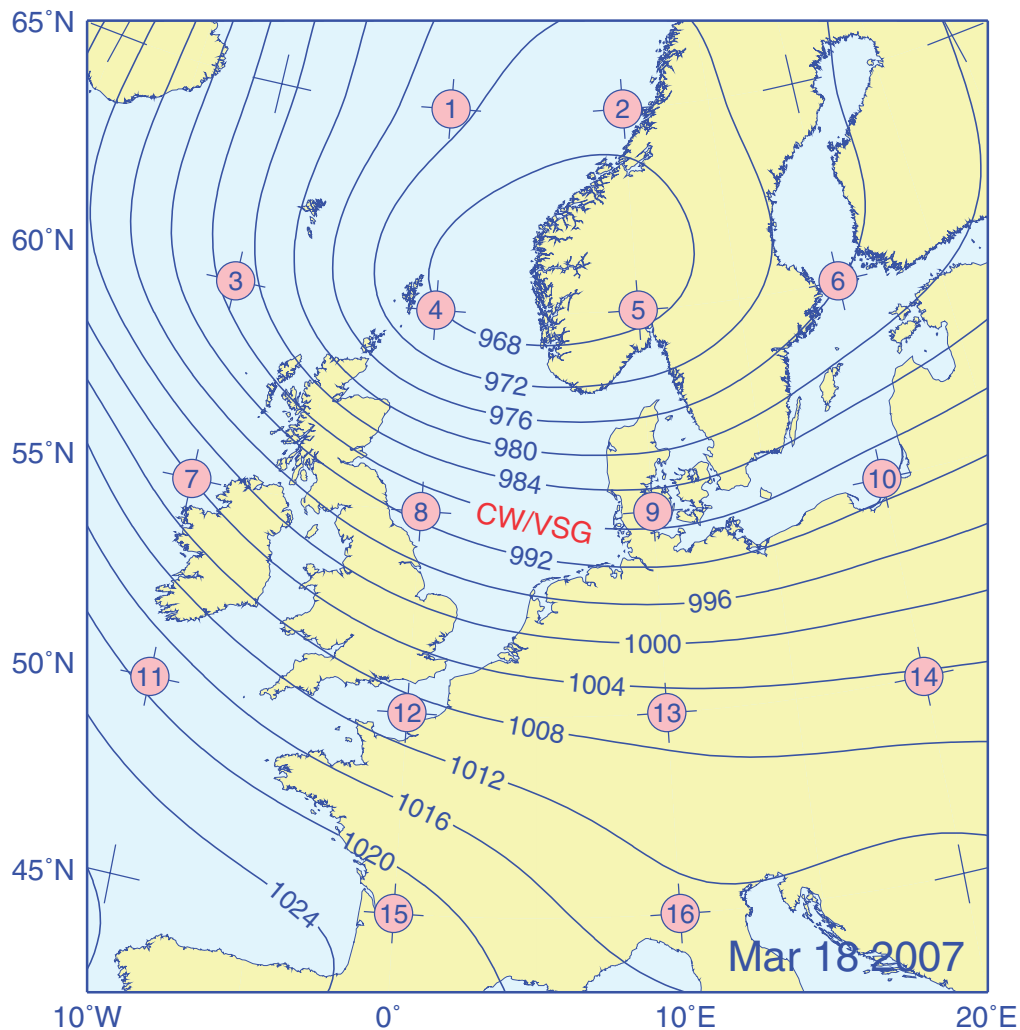


Abb. 2-1: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 18. März 2007 (Orkantief ›Orkun‹) mit Gitterpositionen zur Wetterlagenklassifizierung.

Fig. 2-1: Sea level pressure (hPa) for the very severe gale ›Orkun‹ of March, 18 2007 together with grid positions of weather-typing scheme.

S- bzw. N-Komponenten lag bei 55:45. Ferner ist der Lage der Verteilungsgipfel im negativen Vorticitybereich zu entnehmen, dass antizyklonale Rotationsformen häufiger auftreten als zyklonale (61:39).

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. 2-2, 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. 2-2 enthält Zirkulationsformen, die wegen ihrer schwachen Ausprägung unklassifizierbar sind.

Die blauen Ellipsenschalen in Abb. 2-2 dienen der Klassifizierung von Sturmereignissen. Indexpaare innerhalb dieser drei Schalen stehen für Sturm (›GALE‹), starker Sturm

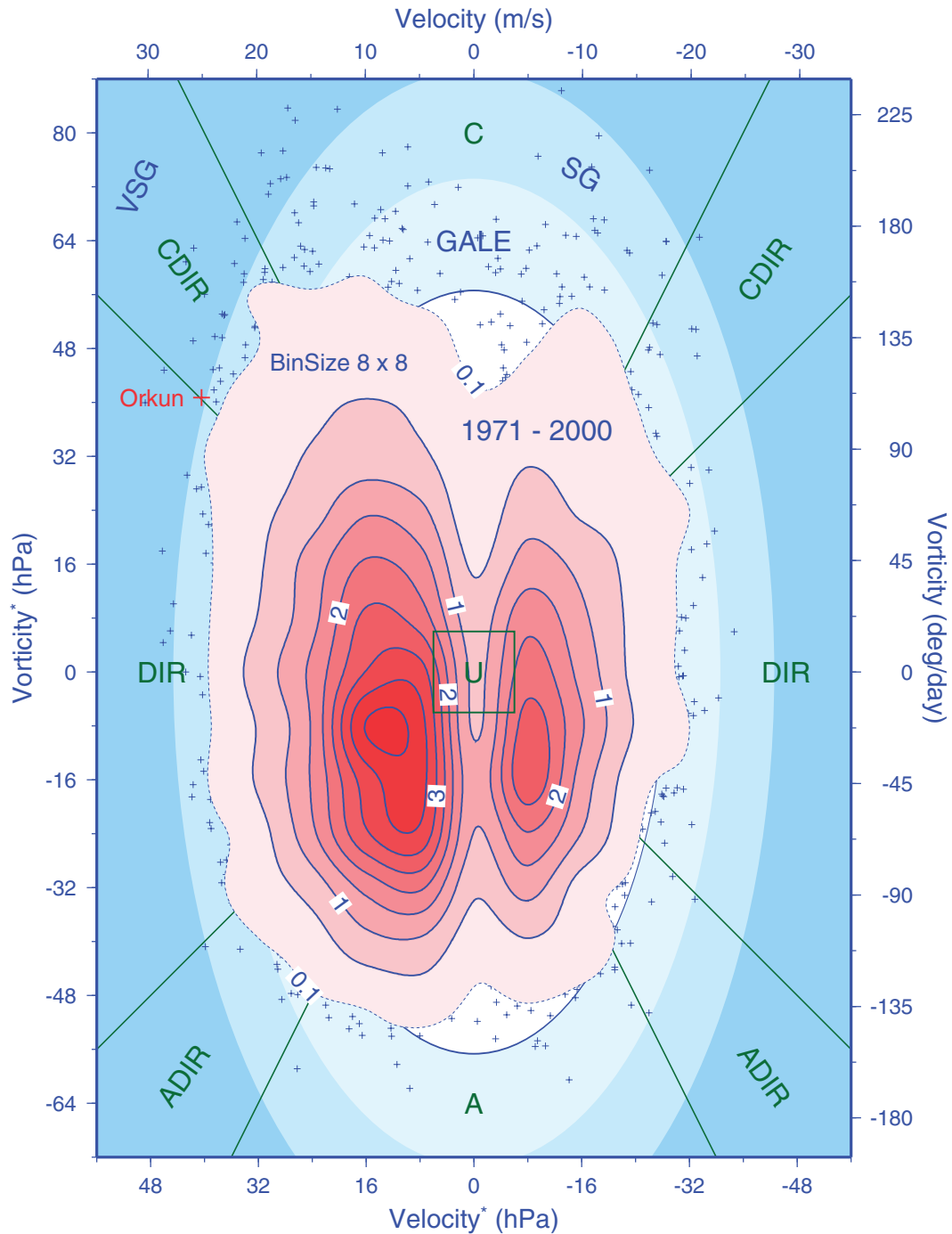


Abb. 2-2: Rel. Häufigkeitsverteilung der täglichen Zirkulationszustände im Zeitraum 1971 – 2000 mit Klassifizierungskriterien. Demarkationslinien (grün) zwischen Richtungs- und Hybridsektoren ($\zeta^*/V^* = \pm 1$) sowie Hybrid- und Rotationssektoren ($\zeta^*/V^* = \pm 2$). Schwellwerte G_{thr}^* für Sturmelipsen (blau): 28,3 (gale), 36,6 (severe gale), 44,6 hPa (very severe gale); Halbachsen: $a^* = 2 G_{thr}^*$, $b^* = a^*/2$. Obere und rechte Achsenskalierung: $V = 0,62V^*$, $\zeta = 2,72\zeta^*$.

Fig. 2-2: Percent frequency distribution of daily circulation states for the period 1971 – 2000 together with classification criteria. Boundary lines (green) separating directional from hybrid ($\zeta^*/V^* = \pm 1$), and hybrid from rotational sectors ($\zeta^*/V^* = \pm 2$). Thresholds G_{thr}^* for elliptical gale shells (blue): 28.3 (gale), 36.6 (severe gale), 44.6 hPa (very severe gale); half axes: $a^* = 2 G_{thr}^*$, $b^* = a^*/2$. Top and right axes: $V = 0.62 V^*$, $\zeta = 2.72 \zeta^*$.

(›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. Der in *Abb. 2-1* dargestellte Orkan ›Orkun‹ wurde als ›VSG‹ identifiziert. Aufgrund der dezentralen Lage des Kerndrucks dominiert der Wind-Index V^* (40,4 hPa) den Sturm-Index G^* (45,3 hPa), welcher über die elliptische Beziehung $(V^{*2} + \frac{1}{4}\zeta^{*2})^{1/2}$ definiert ist. Mit dem Vorticity-Index von 40,8 hPa liegt das Verhältnis ζ^*/V^* gerade über 1 und ›Orkun‹ knapp oberhalb der Winkelhalbierenden im hybriden Sektor ›CDIR‹ der Zirkulationsverteilung (*Abb. 2-2*).

2.3.2 Wetterlagenkalender

Dieser Abschnitt dokumentiert die Wetterentwicklung über der Nordsee in den Jahren 2006 und 2007 durch Jahreskalender der klassifizierten täglichen Wetterlagen (*Tab. 2-1 & Tab. 2-3, S. 45*). Diese Kalender sind speziell geeignet, Besonderheiten in physikalischen und chemischen Zustandsvariablen aufzuklären, sofern diese vom Zirkulationszustand der Atmosphäre maßgeblich beeinflusst oder sogar getriggert werden. Beispiele hierfür sind Ein- und Ausstromereignisse (*Kap. 3.2.3, S. 122*), Reststrommuster in der Deutschen Bucht (*Kap. 3.2.4, S. 125*), Deckschichtvertiefung und -erosion (*Kap. 3.5.3, S. 147*) oder hohe Bleigehalte im Januar 2007 (*Kap. 4.4.3.6, S. 248*).

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. 2-1, S. 41*) abhängigen Windrichtungen anhand von *Abb. 2-3, S. 46* vergegenwärtigt. Diese zeigt eine schematische Darstellung einer W-Wetterlage im Nordseeraum, die ein Beobachter (bei W) in der Frontalzone zwischen dem Tiefdruckwirbel im Norden und der Hochdruckzelle südlich davon feststellt. Zur Approximation anderer Richtungswetterlagen sind entsprechende Markierungen der beiden Druckzellen translatorisch im Zentrum des die Nordsee repräsentierenden Graphikrahmens zur Deckung zu bringen. 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. Allgemein gilt: der hohe Druck befindet sich zur Rechten des Beobachters, sofern dieser dem Wind den Rücken kehrt.

A(DIR)-Lagen (blau) herrschten an 121/120, C(DIR)-Lagen (rot) an 79/73 Tagen des Jahres 2006/2007 (*Tab. 2-1/Tab. 2-3*). Die Anzahl 1 – 3 Tage andauernder Ereignisse bzw. Episoden war für beide Gruppen in beiden Jahren mit 31/36 (C(DIR)) und 38/33 etwa gleich groß. Nur in der A(DIR)-Klasse traten Episoden ein, die länger als eine Woche und bis zu 12 Tage andauerten (4/3). Derart persistente C- & CDIR-Sequenzen sind aufgrund des gewöhnlich transienten Charakters von Tiefdrucksystemen auch kaum zu erwarten.

Bei weniger rigider Betrachtungsweise lassen sich jedoch in den Kalendern durchaus langlebige zyklonal geprägte Phasen wechselhaften Wetters ausmachen; beispielsweise diejenige im August 2006, welche die Hitzewelle in Europa beendete oder diejenige, die von Mitte Juni 2007 bis in die 3. Juli Dekade hinein als regnerisch unterkühlter Sommer in Norddeutschland spürbar war. Ungewöhnlich stabiles Hochdruckwetter (A(DIR)) herrschte an 17/15 Tagen im Juni/Juli 2006 (Hitzewelle), aber auch im zu kühlen Winter 2006 (JFM: 36), im April 2007 (24) – dem nordhemisphärisch wärmsten April seit 1881 – und im Oktober 2007 (23).

2 Atmosphärenphysik

2006	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	C		C	SW	CS	N	A	C	SW	S	N	SW
2				CSW	S	A	SE	CN		C	AN	SW
3	A	A	C	CNW		ANW	E	N	NW	NW	ANW	SW+
4				NW		AN	C	A	A	SW	NW	SW
5	ASE		CNW		SE		CSW	AN	W	CSW	AW	W
6		W	NW	W			W		N	W	AW	SW+
7	SE		ASW			A	AW	AN		AW	W	CSW
8		C	CS	C			SW	W	A	SW	NW	NW
9	AS	CN	C	CNW	E		AW	W		A	SW	NW
10	SW	AN	CSE	AN	ANE		AW	C		A	A	ASW
11	W	A	ANE	SW	AN	AS	W	C	AS	SE	W	SW
12	A	SW	A		UNC			CNE	S	S	NW	
13	ASW	ASW	A	W	NW	ASW					W	W
14	S	S	AS		A	N		C		A		
15	AS	SW	AE	ASW	S	A	A		SE			W
16	S	CS	E		C			CSW				W
17	CSW		AE	W	SW	UNC		SE	UNC	S	SW	NW
18	C	C	A			SW		C				
19	SW	SE		SW	CSW	CSW	ASE	CS	W	CS	ASW	
20	CSW	E	N	UNC	C	SW	C	C	ASW	C	SW	
21	CN			E	W		UNC		AS	CSW	CSW	
22		A	A	A	C	CW	A	NW	S		CSW	
23	A	NE	A	ASW	W	AW	UNC	W	AS	C	CSW	A
24	ASW		SE	A	SW	S	A	C	CSE		SW	
25	N	E	S	SW		CE		UNC		AS		
26	NE	ANE	CS	W	W	CN		C	C	C	ASW	
27	ANE	NW	CSW			NW	UNC	NW	A	NW	ASW	
28		C	CSW	N	NW					SW	SW	
29			W			A	A	CNW	SW	NW	ASW	ASW
30		./.	CSW	C	N		SW	NW		SW	ASW	SW+
31			CW	./.		./.		AW	./.	C+	./.	W

Tab. 2-1: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2006. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-1: Calendar of daily weather types in 2006. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2006	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	2.2	1.1	0.5	0.5	2.5	4.1	1.9	0.5	19.7	33.2
C	1.1	0.3	0.3	0.5	1.9	4.7	0.8	1.4	10.7	21.6
U	3.8	0.5	2.2	4.7	3.8	11.5	9.9	5.5	3.3	45.2
Σ	7.1	1.9	3.0	5.8	8.2	20.3	12.6	7.4	33.7	100

Tab. 2-2: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2006 (%).

Table 2-2: Contingency table of weather types in 2006 (%).

2007	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	W+	A	C	AE	AE	E	S	ASW	W	A	AW	CW
2	NW	NW	NW	A	ANE	A	CS	W	W	A	A	C
3	W	A	CSW	NE	NE	AE	C	A	NW	ANW	ANW	CNW
4	CW	A	AS	A	NE		ASW	AN	UNC	A	A	AW
5	W	NW	SW	ANW	AN	NE	W	S	A	A	W	SW
6		C	SW	A	SW		C	CS	ANW		NW	W
7	SW	CSE	CSW	W	W	E	W	C			NW	C+
8			AW	W					NW		W	W
9	W+	E	W	W	NW		NW	N	ANW		NW	C
10	W	SE	AW	AW	CSW	UNC	W		NW		NW	C
11	W+	CS	AW	A	CNW		CNW		ANW	W	N	AN
12		C	ASW		CSW	NW	W	UNC		ANW		A
13	W	C	A		C	UNC	SW	SW	A	A	C	A
14	W+	S				ANE	CSW	S	W	ASW	NE	
15		A	AW	AS	W	CE	ASW	CSW	A	SW	A	
16	W	S		AN	UNC	C	C	CW	SW			
17	SW	S	W	ANW	CNW		CSW	W	CNW	NW	AW	A
18	CW+	N	CW++	A	SW	UNC	W	SW	NW	AN	S	
19	W	A	CNW	NW		A	A	C	W		SE	
20	W	S	N	A		UNC	E	C	W			
21	CW	CS	AN		A		C	CNE	SW		CS	
22		S	NE				UNC		AW		C	SW
23	N	S		ASW		C	CSE	NE	SW		N	A
24	NE	CS	E		AW		C	ANW			W	ASW
25	A	C		S	UNC		AW	AW	CW		NW	SW
26		C		A		CN	SW		N		N	W
27	NW	W	SE	ANE	CNE	NW	W	NW	NE	ASW	A	SW
28	NW	CSW		NE	C	W		A	E	SW	SW	
29	NW		C			CSW		ANW	C	W	CW	CSW
30	ANW	./.	CE	A	SW	W		NW	CNW	NW	W	NW
31	NW		E	./.	S	./.	ANW		./.	AW	./.	A

Tab. 2-3: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2007. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-3: Calendar of daily weather types in 2007. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2007	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	1.6	0.8	0.8	0.0	0.5	2.7	3.8	3.6	18.9	32.9
C	0.3	0.5	0.5	0.5	1.6	2.7	2.2	1.9	9.6	20.0
U	3.6	3.8	2.5	1.6	3.3	7.1	13.2	8.8	3.3	47.1
Σ	5.5	5.2	3.8	2.2	5.5	12.6	19.2	14.2	31.8	100

Tab. 2-4: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2007 (%).

Table 2-4: Contingency table of weather types in 2007 (%).

Die Anzahl der Sturmtage war in beiden Jahren mit 38/42 ähnlich und überdurchschnittlich hoch. Die Masse der Sturmtage (53) entfiel dabei mit 27/26 gleichmäßig auf die Herbst/Winter Saison 2006/2007, die sich damit nach der Sturmsaison von 1989/1990 (54) durch das zweitstärkste Sturmaufkommen seit 1948/1949 auszeichnete. Als Folge davon lag die Nordseetemperatur im Dezember und Januar auf bislang ungebrochenen Rekordhöhen (Kap. 3.5.2, S. 142). Die Großräumigkeit des Phänomens wird aus der Tatsache ersichtlich, dass der Januar 2007 für die Nordhemisphäre insgesamt der wärmste Januar im Zeitraum 1881 – 2011 ist; die Abweichung von 1,2 K vom Januarmittel der Basisperiode 1901 – 2000 stellt darüber hinaus die stärkste Warmanomalie unter den 1572 Monatsanomalien der vergangenen 131 Jahre dar (Kap. 2.7, S. 102).

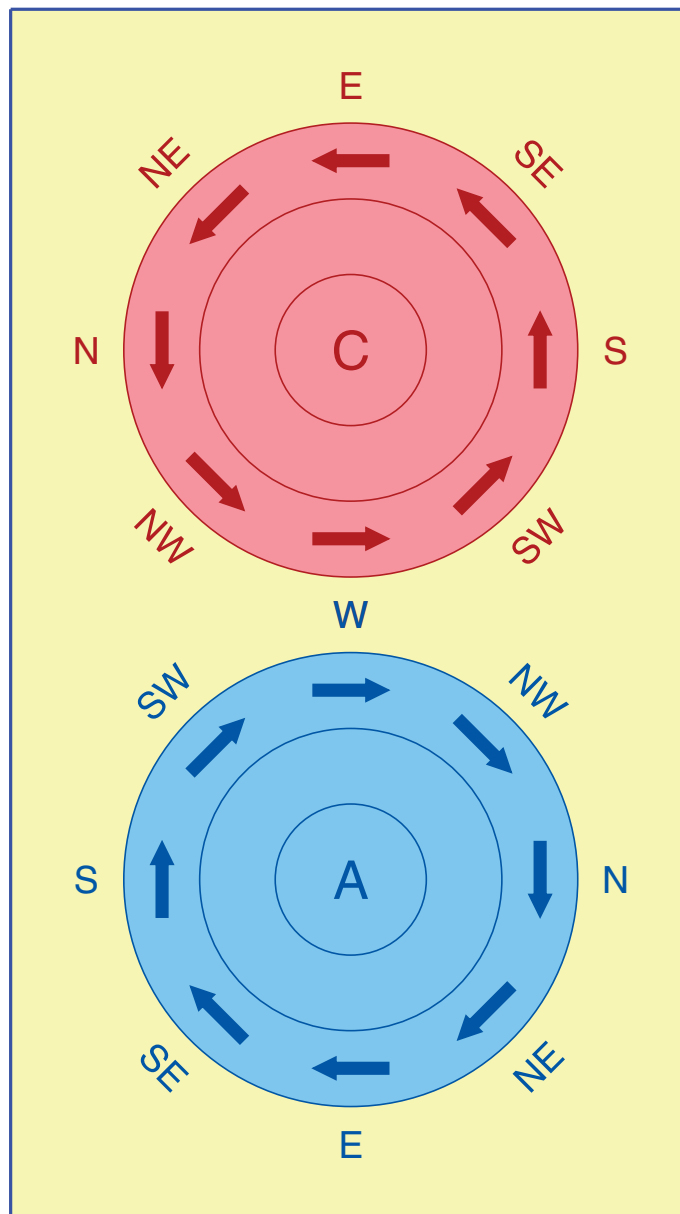


Abb. 2-3: Luftströmung um Hoch (A) und Tief (C).

Fig. 2-3: Air circulation around high (A) and low pressure systems (C).

Den Wetterlagenkalendern beigeordnet sind kompakte Jahresstatistiken in Form von Kontingenztafeln (*Tab. 2-2 & Tab. 2-4*), in denen die relativen Häufigkeiten aller 27 Wetterlagentypen zusammengestellt sind. Die ersten beiden Datenzeilen bis zur Spalte NW enthalten die 16 hybriden Zirkulationsformen (ADIR und CDIR), von denen jede durchschnittlich nur an 5 Tagen (1,5%) 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.

Mit einem Anteil von knapp 20% ist A die mit Abstand häufigste Wetterlage. Die zyklonale Lage C trat in beiden Jahren nur etwa halb so oft ein und belegte damit Rang 3. Die häufigste Richtungslage wechselte von SW (11,5%) im Jahr 2006 auf W (13,2%) im Folgejahr. Von 2006 auf 2007 haben sich NW- und NE-Lagen zusammengenommen auf 12,6% verdoppelt, während sich SW- und SE-Lagen auf 8,7% halbierten.

2.3.3 Reduzierte Wetterlagen

Die Anzahl der hybriden Wetterlagen (16 von insgesamt 27) steht in einem Missverhältnis zu deren Realisierungen übers Jahr: sie treten insgesamt an nur ca. 90 Tagen und damit durchschnittlich jeweils nur 5- bis 6-mal im Jahr ein (z.B. *Tab. 2-4, S. 45*). 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 ± 1 und ± 2 begrenzt werden (vgl. *Abb. 2-2, S. 42*), 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. Ferner 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 Ergebnisse der Reklassifizierung sind in *Tab. 2-6* und *Tab. 2-8* zusammengestellt. Sie bilden den Ausgangspunkt für alle nachstehend beschriebenen statistischen Befunde. Es wurde als zweckmäßig erachtet, den Kalendern vorab die monatlichen Häufigkeitsverteilungen der reduzierten Wetterlagen beizuordnen (*Tab. 2-7 & Tab. 2-9*). Zunächst sollen diese gemeinsam mit saisonalen und jährlichen Häufigkeiten (*Tab. 2-5*) anhand von empirischen Verteilungen für den Referenzzeitraum 1971 – 2000 hinsichtlich bemerkenswerter Abweichungen statistisch eingeordnet werden.

2006	JFM	AMJ	JAS	OND	Yr
A	.28	.23	.26	.26	.26
C	.19	.11	.22	.13	.16
NE	.17	.05	.01	./.	.06
SE	.11	.09	.13	.04	.09
SW	.18	.27	.23	.42	.28
NW	.08	.24	.15	.14	.15

2007	JFM	AMJ	JAS	OND	Yr
A	.14	.29	.17	.42	.26
C	.16	.20	.17	.09	.15
NE	.10	.18	.11	.01	.10
SE	.13	.04	./.	.02	.05
SW	.22	.11	.23	.26	.21
NW	.24	.19	.32	.20	.24

Tab. 2-5: Saisonale und jährliche relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen in den Jahren 2006 und 2007.

Table 2-5: Seasonal and annual relative frequencies of reduced weather types in 2006 and 2007.

2 Atmosphärenphysik

2006	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	C	A	C	SW	SE	NW	A	C	SW	SW	NW	SW
2	A	A	C	C	SW	A	SE	C	SW	C	A	SW
3	A	A	C	C	SW	A	SE	C	NW	C	A	SW
4	A	A	C	NW	SE	NW	SE	NE	NW	NW	NW	SW
5	SE	A	NW	NW	SE	A	C	A	A	SW	NW	SW
6	SE	NW	NW	SW	SE	A	SW	A	SW	C	A	SW
7	SE	NW	A	SW	SE	A	SW	NW	NW	NW	A	SW
8	SE	C	SW	C	SE	A	A	NW	A	A	SW	C
9	A	NW	C	C	NE	A	SW	NW	A	SW	NW	NW
10	SW	NE	C	NW	A	A	SW	C	A	A	A	SW
11	SW	A	NE	SW	A	A	SW	C	SW	SE	NW	SW
12	A	SW	A	SW	NW	SW	A	C	SW	SE	NW	SW
13	A	SW	A	SW	NW	A	A	C	SE	A	SW	SW
14	SW	SW	SE	NW	A	NE	A	C	SE	A	SW	SW
15	SW	SW	SE	A	SE	A	A	C	SE	A	SW	SW
16	SW	SW	NE	SW	C	NW	A	SW	SE	A	SW	NW
17	C	C	NE	NW	SW	NW	A	SE	SE	SE	SW	NW
18	C	C	A	NW	SW	SW	A	C	SW	C	SW	A
19	SW	SE	NE	SW	SW	C	A	C	SW	SE	SW	A
20	C	NE	NE	SW	C	SW	C	C	A	C	SW	A
21	NW	NE	NE	SE	SW	SW	NW	C	SW	C	C	A
22	A	A	A	A	C	SW	A	NW	SE	SW	SW	A
23	A	NE	A	A	NW	NW	NW	SW	SE	C	SW	A
24	SW	SE	SE	A	SW	SW	A	C	SE	C	SW	A
25	NE	NE	SE	SW	NW	C	A	NW	C	A	SW	A
26	NE	NE	SW	SW	NW	NE	A	C	C	C	SW	A
27	NE	NW	SW	NW	SW	NW	SW	NW	A	NW	SW	A
28	A	C	C	NE	NW	A	C	NW	SW	SW	SW	A
29	A	./.	SW	NE	NW	A	A	NW	SW	NW	SW	SW
30	A	./.	C	C	NW	A	SW	NW	SW	SW	A	SW
31	A	./.	C	./.	NW	./.	SW	A	./.	C	./.	SW

Tab. 2-6: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2006.

Table 2-6: Calendar of reduced weather types in 2006.

2006	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
A	12	7	6	4	3	14	15	3	6	7	6	11
C	4	4	9	5	3	2	3	15	2	10	1	1
NE	3	6	6	2	1	2	./.	1	./.	./.	./.	./.
SE	4	2	4	1	7	./.	3	1	8	4	./.	./.
SW	7	5	4	11	8	6	8	2	11	6	17	16
NW	1	4	2	7	9	6	2	9	3	4	6	3

Tab. 2-7: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2006.

Table 2-7: Monthly frequencies of reduced weather types in 2006.

2007	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	NW	A	C	A	A	NE	SW	A	NW	A	NW	SW
2	NW	NW	NW	A	NE	A	C	NW	NW	A	A	C
3	SW	A	C	NE	NE	SE	C	A	NW	A	NW	C
4	NW	A	A	A	NE	NE	C	A	NW	SW	A	NW
5	NW	NW	SW	NW	NE	NE	NW	SW	A	A	SW	SW
6	SW	C	SW	A	SW	NE	C	C	A	A	NW	SW
7	SW	C	SW	A	SW	NE	NW	C	A	A	NW	C
8	SW	SE	A	NW	NW	NE	NW	NE	NW	A	NW	SW
9	SW	SE	SW	NW	NW	NE	NW	NE	A	A	NW	C
10	NW	SE	A	NW	C	NE	NW	NE	NW	A	NW	C
11	SW	SE	A	A	C	NE	NW	NW	NW	SW	NW	A
12	NW	C	SW	A	C	NW	NW	SW	A	NW	NW	A
13	SW	C	A	A	C	NW	SW	SW	A	A	C	A
14	NW	SW	A	A	C	A	SW	SW	NW	A	NE	A
15	SW	A	A	A	NW	SE	A	C	A	SW	A	A
16	SW	SW	NW	NW	NW	C	C	SW	SW	SW	A	A
17	SW	SW	NW	NW	C	C	SW	SW	C	NW	A	A
18	C	NW	NW	A	SW	C	NW	SW	NW	NW	SW	A
19	NW	A	C	NW	SW	A	A	C	SW	A	SE	A
20	SW	SE	NE	A	A	SE	NE	C	SW	A	SE	A
21	C	SE	NE	A	A	C	C	NE	SW	A	C	A
22	NE	SE	NE	SW	A	C	SW	NE	A	A	C	SW
23	NW	SE	NE	SW	A	C	C	NE	SW	A	NW	A
24	NE	C	NE	A	A	C	C	NW	SW	A	SW	SW
25	A	C	SE	SW	NW	C	SW	A	C	A	NW	SW
26	NW	C	SE	A	NW	C	SW	NW	NE	A	NW	SW
27	NW	SW	SE	NE	C	NW	SW	NW	NE	SW	A	SW
28	NW	C	SE	NE	C	NW	NW	A	NE	SW	SW	SW
29	NW	./.	C	A	C	SW	NW	A	C	SW	SW	SW
30	NW	./.	NE	A	SW	SW	NW	NW	NW	NW	SW	NW
31	NW	./.	NE	./.	SE	./.	NW	NW	./.	A	./.	A

Tab. 2-8: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2007.

Table 2-8: Calendar of reduced weather types in 2007.

2007	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
A	1	5	7	17	6	3	2	6	8	20	6	13
C	2	8	4	./.	9	9	8	5	3	./.	3	5
NE	2	./.	7	3	4	9	1	6	3	./.	1	./.
SE	./.	8	4	./.	1	3	./.	./.	./.	./.	2	./.
SW	11	4	5	3	5	2	8	7	6	7	6	11
NW	15	3	4	7	6	4	12	7	10	4	12	2

Tab. 2-9: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2007.

Table 2-9: Monthly frequencies of reduced weather types in 2007.

2.3.4 Häufigkeiten

Die saisonalen und jährlichen Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen sind für die Jahre 2006 und 2007 in *Abb. 2-4, S. 52* zusammengefasst. Zur Identifizierung nennenswerter Abweichungen von normalen Verhältnissen sind sie im Kontext empirischer Häufigkeitsverteilungen¹ für den Zeitraum 1971 – 2000 dargestellt. Die Eigenschaften der Verteilungen werden durch gestapelte Säulen skizziert, die sich über die Extremwerte dieser Periode 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 10. bzw. 90. Perzentil der Verteilungen. 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 10 Januar des Zeitraums 1971 – 2000 und demnach mit einer relativen Häufigkeit von 33% keine SE-Lagen ein, so dass P_{10} und P_{25} mit dem Minimum zusammenfallen und folglich nicht abbildbar sind (*Abb. 2-5, S. 53*).

Zunächst erscheinen einige Bemerkungen zur durch Mediane repräsentierten saisonalen Klimatologie der Wetterlagenhäufigkeiten zweckmäßig (*Abb. 2-4*). Die Mediane der Rotationstypen unterliegen keinem erkennbaren Jahresgang, sondern zeigen lediglich geringfügige Schwankungen um mittlere Werte von 28,2 (A) bzw. 14,1% (C). Dies trifft gleichermaßen für den Richtungstyp SE zu (9,5%), jedoch nicht für die verbleibenden Richtungswetterlagen. Das 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. *Kap. 2.4.2, S. 73*).

Die Klassifizierung stellt per definitionem eine vollständige und überschneidungsfreie Beschreibung der Wetterlage dar: Die Wetterlage befindet sich an jedem Tag eindeutig in einem der 6 möglichen Zustände. Die Begünstigung einer Wetterlage bei der Verteilung der Zeittorte (Monat, Jahreszeit, Jahr) bedingt somit immer auch die Übervorteilung mindestens einer anderen. Dabei ist vielfach ein ungewöhnlich häufiges Auftreten einer Wetterlage mit einem entsprechend verminderten Vorkommen der – hinsichtlich Drehsinn (A vs. C) oder Richtung (z. B. SW vs. NE) – komplementären Wetterlage verbunden und umgekehrt.

Als eindrucksvolle Beispiele hierfür lassen sich die Verhältnisse im Juli und August 2006 anführen (*Tab. 2-7 & Abb. 2-5*). Im Juli traten A- und Südlagen (SW & SE) jeweils 5-mal so häufig auf wie C- und Nordlagen. Dabei erweisen sich insbesondere die hohe Anzahl von A- (15) und die das Minimum des Referenzzeitraums unterschreitende Anzahl von NW-Lagen (2) im Abgleich mit den empirischen Verteilungen als äußerst ungewöhnlich (*Abb. 2-5*). Im Folgemonat August herrschten hingegen vollständig inverse Verhältnisse hinsichtlich A und C (3:15) und nahezu solche (3:10) hinsichtlich der Süd- und Nordlagen (*Tab. 2-7*). Die Häufigkeit der C-Lagen liegt erheblich jenseits des Verteilungsmaximums (11), die der A-Lagen gerade über dem Minimum (2) und

1. Die Verteilungen aller Wetterlagen zeigen erhebliche saisonale Schwankungen hinsichtlich ihrer Spannweite. Ferner sind insbesondere die Verteilungen der weniger häufigen Richtungslagen vornehmlich rechtsschief ($\text{Modus} < \text{Median} < \text{Mittelwert}$), 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 zu Tage treten, sind die für normalverteilte Größen üblichen 2 Standardabweichungen als Signifikanzmaß für Anomalien ungeeignet. U. a. würden sich für negative Anomalien vielfach negative Signifikanzgrenzen ergeben, welche mit positiven Zufallsvariablen nicht vereinbar sind.

die der SW-Lagen auf dem Niveau des 10. Perzentils (2). Die geschilderten Abweichungen fügten sich europaweit zu einer persistenten Hitzewelle im Juli und einem dauerhaft nasskalten August (vgl. *Kap. 2.7, S. 102*).

Durchaus vergleichbare Verhältnisse wie im August 2006 setzten ab Mitte Juni 2007 mit einer langen Kette von Tiefdruckgebieten ein und dauerten den Juli über an (*Tab. 2-8*). In dieser Zeit waren wieder C- (17) und NW-Lagen (14) dominant, während A-Lagen nur 3-mal vorkamen. Praktisch gleichverteilte Häufigkeiten zeugen von einem normal durchwachsenen August 2007 (*Tab. 2-9*).

Die Gleichverteilung von West- (SW & NW: 28%) und Ostlagen (SE & NE: 26%) im Winter 2006 (*Tab. 2-5*) ist ein klares Indiz für eine abgeschwächte Zonalzirkulation im Nordseeraum und überdurchschnittliche Abkühlungsraten der Meerestemperaturen (LOEWE 2009). Als außergewöhnlich hoch erweist sich die Anzahl von NE-Lagen (15), die das Maximum des Referenzzeitraums (9) weit übersteigt (*Abb. 2-4*). Ebenso ungewöhnlich ist, dass diese Wetterlage im Frühjahr nur vereinzelt und im weiteren Verlauf des Jahres nur noch 1-mal vorkam. In der Jahressumme kompensieren sich diese Anomalien nicht nur im Fall der NE-Lage, sondern auch für die SE-Lage.

Im Winter 2007 standen West- und Ostlagen im Verhältnis 2:1. Dieses Ergebnis stellt eine erhebliche Glättung stark gegensätzlicher Bedingungen in den Wintermonaten dar. So lagen im Februar und März ähnlich gleichverteilte Verhältnisse vor wie im Vorjahreswinter, während im Januar 2007 26 Westlagen nur 2 Ostlagen gegenüber standen. Dieses bemerkenswerte Missverhältnis beschränkt sich nicht auf den Januar, sondern betrifft auch die vorausgehenden Monate November (23:0) und Dezember (19:0). In den 3 Monaten traten demnach an 68 Tagen (74%) SW- oder NW-Lagen auf, und zwar in einem Verhältnis 44:24 oder fast 2:1. Allein in der Phase vom 13. Nov. bis 15. Dez. kam es zu 4 dauerhaften SW-Episoden mit einer Gesamtlänge von 29 Tagen (*Tab. 2-6*). Diese Anomalien stehen in Summa für eine intensive Zonalzirkulation (*Kap. 2.6.3, S. 100*), erheblich verminderte Abkühlungsraten der Nordsee (*Kap. 3.5.2, S. 142*) und drastisch zu warme Lufttemperaturen über den Landmassen nördlich 40° N (*Kap. 2.7, S. 102*).

Weitere signifikante Abweichungen resultieren aus dem quasi-permanent überhöhten Vorkommen der NW- und NE-Lagen zu Lasten von SW- und SE-Lagen im Jahr 2007 (*Abb. 2-4*), welches sich als Übergewicht von N- zu S-Lagen in Höhe von 122:93, 4:3 oder 1,31 quantifizieren lässt. Legt man die Jahresmediane des Referenzzeitraums für die 4 Wetterlagen zugrunde, ergibt sich als Normalfall der Kehrwert, d. h. ein Untergewicht von 3:4. Zwar liegen die Jahreshäufigkeiten der NE- und SE-Lagen 2006 auf Medianniveau, die NW-Lagen ereigneten sich jedoch wesentlich seltener, die SW-Lagen wesentlich häufiger als im Normalfall, so dass mit 77:135, 4:7 oder 0,57 eine moderate negative Abweichung vom normalen Untergewicht der N- zu S-Lagen vorliegt. Der hinsichtlich des N:S Verhältnisses erhebliche Kontrast zwischen beiden Jahren (0,57 vs. 1,31) beruht demnach in der Hauptsache auf den von der Klimatologie stark und invers abweichenden Häufigkeiten der N- und S-Lagen im Jahr 2007. Der Zuwachs an N-Lagen gegenüber 2006 beläuft sich auf 58%, der Rückgang der S-Lagen auf -31%. Man könnte versucht sein, aus diesen Gegensätzen hinsichtlich der Nordseetemperatur auf ein im Jahresvergleich warmes 2006 und kühles 2007 zu schließen. Tatsächlich liegen beide Jahrestemperaturen – trotz erheblicher jahreszeitlicher Abweichungen – auf dem Rekordniveau von 11,0 °C (*Kap. 3.5.2, S. 142*).

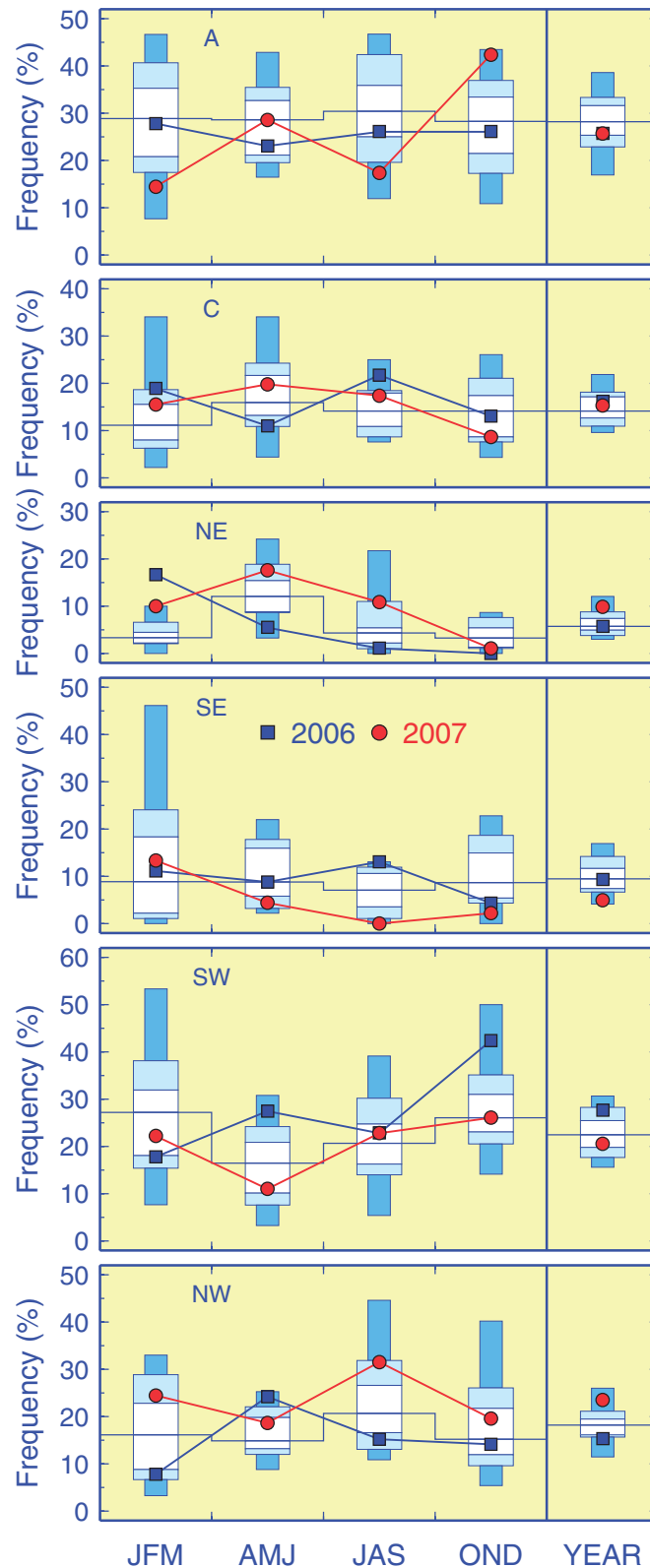


Abb. 2-4: Relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen für 2006 (blau) und 2007 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971 – 2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppenlinie), 75 und 90 %.

Fig. 2-4: Percent frequencies of reduced weather types for 2006 (blue) and 2007 (red) along with empirical distributions for 1971 – 2000 (stacked columns). Percentile range Min to Max, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, continuous stepline), 75 and 90 %.

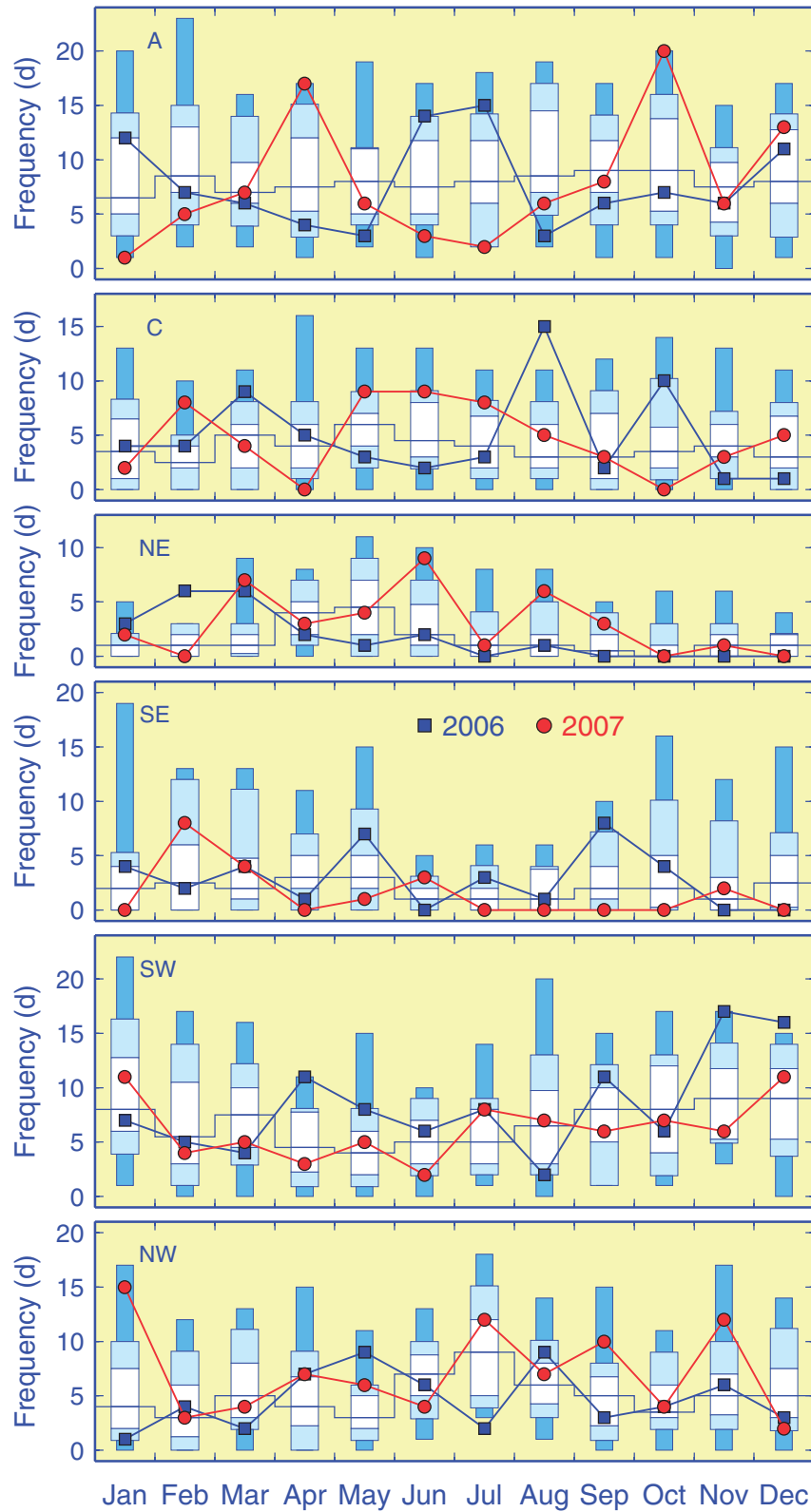


Abb. 2-5: Wie Abb. 2-4, jedoch für monatliche absolute Häufigkeiten (Tage).

Fig. 2-5: As Fig. 2-4, except for monthly absolute frequencies (days).

2.3.5 Lebensdauern

Bereits bei flüchtiger Betrachtung der vereinfachten Wetterlagenkalender sticht hervor (Tab. 2-6, S. 48 & Tab. 2-8, S. 49), dass jede der 6 Wetterlagen eine ausgeprägte Neigung zur Klumpen- oder Sequenzbildung aufweist. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Wetterlage nach ihrem erstmaligen Eintreten einige Tage lang andauert, ist offenbar erheblich höher als aufgrund der Jahreshäufigkeit ihres Auftretens, die in jedem Fall unter 30% lag (Tab. 2-5, S. 47 & Abb. 2-4, S. 52), zu erwarten wäre.

Zur Untersuchung dieses Phänomens wurden zunächst Histogramme der Sequenz-, Episoden- oder Lauflänge (run length) der verschiedenen Wetterlagen für die Jahre 2006 und 2007 berechnet², die Häufigkeiten der Wetterlagenläufe mit gleicher Lauflänge nach fallender Größe sortiert und gestapelt dargestellt (Abb. 2-6). Da die Häufigkeit der Läufe mit zunehmender Lauflänge sehr stark abfällt, wurden die Frequenzen der Histogramme für eine bessere visuelle Greifbarkeit mit der jeweiligen Lauflänge skaliert (run frequency \times run length). Auf diese Weise lässt sich zudem unmittelbar ablesen, wieviel Zeit eines Jahres auf Läufe bestimmter Länge entfällt. Die Gesamtanzahl der Läufe ist für jede Lauflänge oberhalb des Stapels notiert, die wetterlagenspezifische Laufhäufigkeit (sofern > 1) innerhalb der Stapelelemente angegeben. Aus der Analyse der Wetterlagenabfolge im Zeitraum 1971 – 2000 ergeben sich schließlich die Stapelhöhen für ein klimatologisches Jahr, welche zur leichteren Einordnung der Ergebnisse durch Pluszeichen in der Abbildung kenntlich gemacht sind.

Wie schon aufgrund teils erheblicher Differenzen im Vorkommen der Wetterlagen zur Häufigkeitsklimatologie zu erwarten steht (Abb. 2-4, S. 52), weisen beide Stichproben (2006 & 2007) eine Reihe von Abweichungen gegenüber der klimatologischen Lauflängenverteilung auf, die auch in der skalierten Darstellung exponentiell zu hohen Lauflängen hin abfällt. So bildet sich beispielsweise das hohe Aufkommen N-licher Wetterlagen (NE & NW) im Jahr 2007 auch in der Frequenz langer Läufe ab, die gegenüber 2006 und für Lauflängen > 4 Tage von 1 auf 6 anwuchs, während diejenige der S-Lagen (SE & SW) von 7 auf 1 abfiel. Dennoch entspricht die Anzahl aller solcher Läufe (> 4 Tage) mit 14 in beiden Jahren der Klimatologie (13,6). Mit Ausnahme der NW-bedingt stark erhöhten Häufigkeit von 6-tägigen Läufen im Jahr 2007, weichen selbst die für individuelle Lauflängen über die Wetterlagen summierten Frequenzen in diesem Jahr kaum von der Klimatologie ab. Die in Summa stärksten Abweichungen im Jahr 2006 bestehen in der überdurchschnittlichen Häufung von Läufen der Länge 2 Tage und im entsprechend verminderten Vorkommen von Läufen im Bereich von 3 bis 4 Tagen.

In beiden Jahren erreichte jeweils eine A-Lage die höchste Lauflänge, nämlich eine Lebensdauer von 11 Tagen. Im Zeitraum 1971 – 2000 traten 12 Läufe dieses Typs auf, die höhere Lebensdauern zwischen 12 und 18 Tagen erreichten. Von den übrigen Wetterlagen wurden in diesem Alterssegment lediglich 2 SW-Lagen (13 & 17) sowie jeweils eine SE- (13) und C-Lage (14) vorgefunden. Auch die Alterklasse von 9 bis 11 Tagen wird von der A-Lage mit 20 Episoden dominiert, gefolgt von der SW- (13) und NW-Lage (5). Die Wetterlage SE war in dieser Klasse nur 2-mal vertreten, die NE- und C-Lage gar nicht.

Die mittlere Lebensdauer eines Motorrades lässt sich schlicht als Quotient des über alle Motorräder summierten individuellen Verschrottungsalters zur Gesamtzahl der

2. Die ununterbrochene, zeitdiskrete Folge der Wetterlage W , der eine andersartige Wetterlage $!W$ vorausgeht und folgt, wird hier synonym als Sequenz, Episode oder Lauf bezeichnet. Die zeitliche Länge dieser Folge heißt entsprechend Sequenz-, Episoden-, Lauflänge oder Lebensdauer des Individuums W .

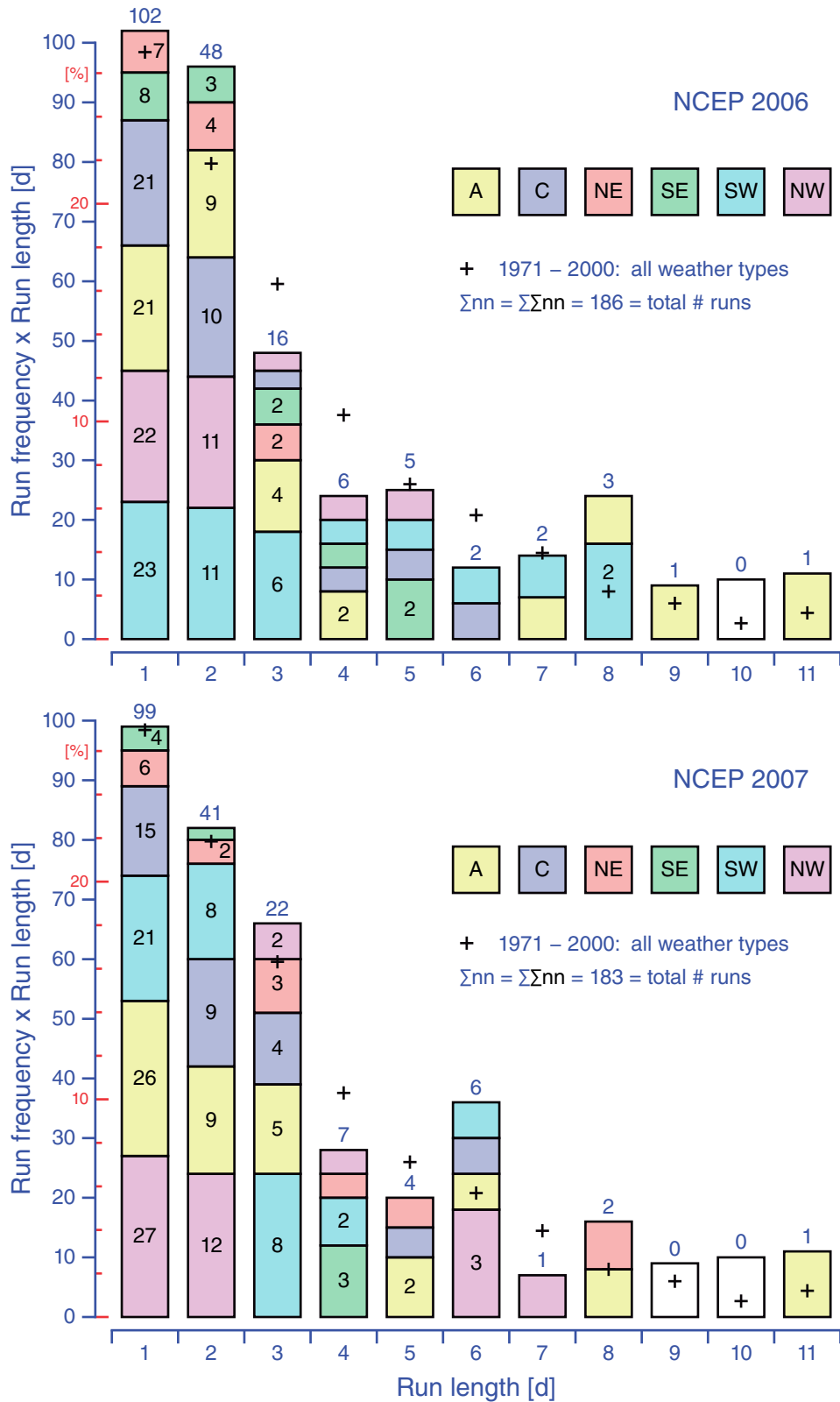


Abb. 2-6: Skalierte Histogramme (gestapelt) für die Lauflänge (rl) der Wetterlagen (w) in den Jahren 2006 & 2007. Basis %-Skala: 365 Tage. Höhe Stapelelemente: rl x Anzahl Läufe r(w,rl). Schwarze Zahlen: r(w,rl), blau: r(rl). + Symbole: rl x r(rl) x 365/10958 d für 1971 – 2000.

Fig. 2-6: Scaled histograms (stacked) of run length (rl) of weather types (w) in 2006 & 2007. Base %-scale: 365 d. Height of column blocks: rl x number of runs r(w,rl). Black figures: r(w,rl), blue: r(rl). + Symbols: rl x r(rl) x 365/10958 d for 1971 – 2000.

Motorräder angeben, die der Untersuchung zugrunde liegen. Entsprechend ist die mittlere Lauflänge oder Lebensdauer eines Wetterlagentyps W das Verhältnis von Gesamtzeit, in der W herrschte, zur Summe der W-Individuen bzw. W-Episoden oder W-Läufe (Runs), welche sich anhand der Wetterlagenkalender als von anderen Wetterlagen begrenzte W-Sequenzen identifizieren und abzählen lassen. Für die Wetterlage A im Jahr 2006, beispielsweise, ergibt sich so – oder indem man die Höhen der gelben Stapelelemente in *Abb. 2-6* addiert und das Resultat durch die Summe der eingeschriebenen Läufe dividiert – eine mittlere Lauflänge oder Lebensdauer von 94/40 oder 2,35 Tagen.

Die wetterlagenspezifischen mittleren Lebensdauern in den Jahren 2006 und 2007 sowie im klimatologischen Zeitraum 1971 – 2000 sind in *Tab. 2-10* zusammengestellt. In der Spalte NN ist darüber hinaus die anonymisierte Lebensdauer der Wetterlage als ›Ding-an-sich‹ angegeben, die sich schlicht als Verhältnis von Länge des Beobachtungszeitraums zur Summe aller Wetterlagenepisoden ergibt. Während demnach das ›Ding-an-sich‹ im Mittel 2 Tage andauert, variiert die mittlere Lebenserwartung gewöhnlich zwischen 2,4 (A) und 1,6 Tagen (NE). Recht hohe Abweichungen hiervon betreffen gerade diese Wetterlagen im Jahr 2007 sowie die NW-Lage im Jahr 2006. Obgleich die klimatologische Rangfolge hinsichtlich Vorkommenshäufigkeit und Episodenanzahl identisch ist, nämlich A-SW-NW-C-SE-NE, ergibt sich für die Lebensdauer die abweichende Rangfolge A-SE-SW-NW-C-NE. Aus *Tab. 2-10* ist ersichtlich, dass Stichprobenvariationen auch mit Verschiebungen im Lebensdauerranking einhergehen.

LIFETIME	A	C	NE	SE	SW	NW	NN
7100	2.42	1.76	1.62	2.13	2.05	1.82	2.02
2006	2.35	1.69	1.62	2.13	2.20	1.56	1.96
2007	2.09	1.87	2.57	2.25	1.88	1.87	1.99

Tab. 2-10: Mittlere Lebensdauer in Tagen für die reduzierten Wetterlagen und das anonyme ›Ding-an-sich‹ (NN) in der Periode 1971 – 2000 und den Jahren 2006 und 2007.

Table 2-10: Mean lifetime in days of reduced weather types and the anonymous ›thing-in-itself‹ (NN) for the period 1971 – 2000 and years 2006 and 2007.

Der exponentielle Charakter des Abfalls der Laufhäufigkeiten mit zunehmender Lauflänge tritt in *Abb. 2-6* besonders deutlich für die anonyme Wetterlage (+) hervor. Demzufolge erscheint die Vermutung naheliegend, dass sich die beobachtete Lauflängenverteilung durch die denkbar einfachste Lebensdauerverteilung – die Geometrische Verteilung – beschreiben lässt. Die GV ist das diskrete Äquivalent der Exponentialverteilung (die beispielsweise radioaktiven Zerfallsprozessen zugrunde liegt) und teilt mit dieser die (ansonsten) singuläre Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit. Diese Eigenschaft beinhaltet, dass der einzige Verteilungsparameter, die Sterbewahrscheinlichkeit p , nicht vom bereits erreichten Alter abhängt, sondern konstant ist. Im Fall der anonymen Wetterlage (Ding-an-sich) entspricht der generierende Prozess dem Glücksspiel Münzwurf, d. h. über die Abfolge der (anonymen) Lauflängen (im Zeitraum 1971 – 2000) wird täglich per Münzwurf entschieden. Abbruch oder Fortsetzung eines Kopflaufes sind dabei von den Eintrittswahrscheinlichkeiten p für Zahl und $1 - p$ für Kopf = !Zahl bestimmt. Die Zufallsvariable Lauflänge oder Lebensdauer L hat die Geometrische Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion $PMF(L=k;p) = p(1 - p)^{k-1}$, in der

$k = \{1, 2, \dots\}$ die jeweils nötige Anzahl von Bernoulliversuchen bis zum Eintreten des Abbruchereignisses bedeutet. Die Sterbewahrscheinlichkeit p ergibt sich schlicht als Kehrwert zum Erwartungswert der Lebensdauer $E(L)$, der bereits weiter oben für den Zeitraum 1971 – 2000 mit 2,02 Tagen abgeschätzt wurde (vgl. *Tab. 2-10*). Somit liegt der Lebensdauererwartungswert der anonymen Wetterlage eine faire oder echte Münze zugrunde ($p = 0,5$). Von 100 Episoden erreichen 50, 25, 12,5 ... ein Lebensalter von 1, 2, 3 ... Tagen.

Wie aus *Tab. 2-10* unmittelbar hervorgeht, haben manche Wetterlagen größeres »Talent«, im Spiel zu bleiben, als andere. Jede von ihnen spielt offenbar mit eigener Falschmünze ($p \neq 0,5$), oder – was dem tatsächlichen Hergang näherkommt – mit eigenem manipulierten Würfel, dessen Flächen jeweils den 6 Wetterlagen zugeordnet sind. Das Abbruchereignis wird dabei realisiert, sobald der Würfel eine andere als die eigene Seite zeigt. Um welche Seite es sich tatsächlich handelt, ist allenfalls insofern von Belang, als es den nächsten Spieler bestimmt. Was zählt, sind auch hier die dichotomen Ereignisse Sterben und Überleben, so dass die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die 5 Abbruchergebnisse nicht im Einzelnen, sondern lediglich in Summa Relevanz haben. Die wetterlagenspezifische Sterbewahrscheinlichkeit p ist der Kehrwert der in Zeile 7100 der *Tab. 2-10* angegebenen mittleren Lebensdauer.

Zur Einschätzung der Brauchbarkeit der so festgelegten individuellen Geometrischen Verteilungen wurde für jede Wetterlage eine sog. P(robability)-P(robability)-Graphik erstellt (*Abb. 2-7*). Die anhand der Stichprobe (1971 – 2000) zu den Lauflängen k ermittelten Überlebensprozentsätze der Episoden sind darin gegen die theoretischen Überlebenswahrscheinlichkeiten aufgetragen, die sich aus der Überlebensfunktion $S(L > k; p) = 1 - \text{CDF} = (1 - p)^k$, dem Komplement der Geometrischen Verteilungsfunktion (CDF), ergeben. Die laterale Position eines Fadenkreuzes entspricht demnach der k -ten Potenz von $1 - p$, wobei der höchste Wert zu $k = 1$ gehört und den Prozentsatz der Episoden angibt, die theoretisch ein Mindestalter von 2 Tagen erreichen. (Natürlich erreichen alle Episoden ($S = 1$) ein Mindestalter von 1 Tag, welches für den Bruchteil p das Höchstalter darstellt.) Bei perfekter Übereinstimmung von Theorie und Beobachtung würden offensichtlich sämtliche Wertepaare auf der Diagonalen $y = x$ zu liegen kommen. Tatsächlich reichen 90 – 98 % der Episoden mit Lebensdauern bis zu 5 – 7 Tagen recht nahe an dieses Ideal heran.

Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich für lange antizyklonale Episoden (A), die mit weiter zunehmendem Alter einen wachsenden Hang zur Langlebigkeit entwickeln und gewissermaßen vergessen, zu sterben. Diese Art von »Gedächtnislosigkeit« steht natürlich im Widerspruch zu derjenigen, die der Geometrischen Verteilung zugrunde liegt. Ursache hierfür sind vermutlich persistente Blockierungen, die den gewöhnlichen Wetterwechsel u. U. wochenlang durcheinanderbringen. Das in ähnlicher Weise abweichende Verhalten alter NW-Episoden steht mutmaßlich ebenfalls mit (antizyklonalen) Blockierungen im Zusammenhang, die dazu eine mindestens zeitweilig gegenüber der Nordseeregion dezentrale, nach SW verschobene Lage einnehmen müssten. Als beispielhafte Belege für derartige Situationen, die durchaus ein langsames Hin- und Herwabern des Hochdruckzentrums zwischen beiden Positionen beinhalten können, lassen sich die Perioden 28. Mai – 11. Jun. 2006 (*Tab. 2-6, S. 48*), 25. Jan. – 5. Feb. oder 24. Aug. – 15. Sep. 2007 anführen (*Tab. 2-8, S. 49*).

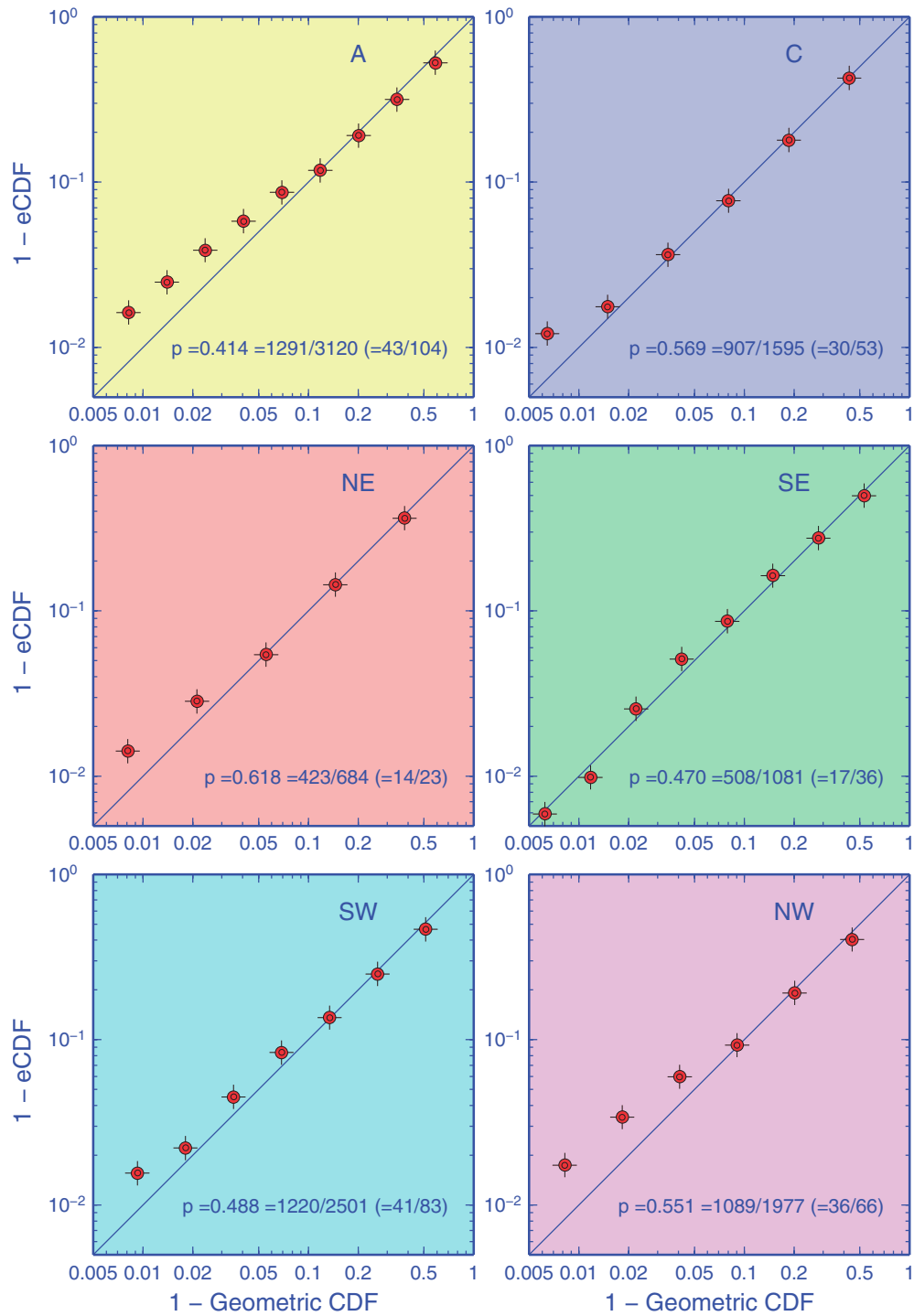


Abb. 2-7: Kumulative empirische vs. geometrische Überlebenswahrscheinlichkeiten (P-P-Plot) für Wetterlagenepisoden (5438 insges.) im Zeitraum 1971 – 2000 (10958 Tage). p ist der Kehrwert der mittleren Lebensdauer (s. Tab. 2-10), $1-p$ die Überlebenswahrscheinlichkeit. Die Potenzen $(1-p)^k$ liefern die lateren Fadenkreuzpositionen zur Überlebensfunktion S ($= 1 - \text{GeoCDF}$). Die Position $k=1$ gibt den Prozentsatz der Episoden, die ein Mindestalter von 2 Tagen erreichen.

Fig. 2-7: Cumulative empirical vs. geometric survival function (PP-Plot) for weather-type runs (5438 altogether) during 1971 – 2000 (10958 d). p is the inverse of the mean life time (cf. Table 2-10), $1-p$ the probability of surviving. Powers $(1-p)^k$ yield the crosshairs lateral position due to the survival function S ($= 1 - \text{GeoCDF}$). The topmost position ($k=1$) gives the percentage of runs or episodes that reach a minimum age of 2 days.

2.3.6 Übergänge

Wir denken uns die Zeitserie der Wetterlagen als Gartenzaun mit 6 verschiedenen Pfostensorten (A, C, NE, SE, SW, NW). Im vorigen Abschnitt sind wir den Zaun abgescritten, um die Anzahl in Reihe stehender, gleichartiger Pfosten abzuzählen. Jetzt sollen die Verbindungslatten durch einen neuen Anstrich verschönert werden, wozu wir so viele unterschiedliche Farben verwenden wollen, wie es unterscheidbare Verbindungen gibt. Für die Anfangsequenz NW–A–A–A–NW–A–SE wären lediglich 4, für den ganzen Zaun jedoch bis zu 36 Farben nötig. Um die einzukaufenden Farbmen-gen abzuschätzen, legen wir eine Häufigkeitstabelle mit 6×6 Feldern an und tragen die Pfostensorten über den Spalten und vor den Reihen ein. Die erste Zaunlatte ist eine NW – A Verbindung, für die das in Zeile NW und Spalte A liegende Feld NWA den ersten Strich erhält. Weiter voranschreitend machen wir 2 Striche im Feld AA, einen im Feld ANW, einen zweiten für NWA, einen für ASE usw., bis die letzte Latte identifiziert und gezählt ist. Die auf ein Standardjahr umgerechneten und auf ganze Zahlen gerundeten Ergebnisse für die 10958 – 1 Latten bzw. Wetterlagenübergänge im Zeitraum 1971 – 2000 sind in der Häufigkeitsmatrix ζ der *Tab. 2-11* zusammengestellt.

Das Auszählen der Verbindungen oder Übergänge lässt sich als Analyse eines Ballspiels interpretieren, bei dem nicht nur die individuellen Ballkontakte, sondern auch das wechselseitige Abspielverhalten aller Spieler ausgewertet werden. Dabei wird in festen Zeitabständen protokolliert, ob der letzte Ballbesitzer weiterhin am Ball ist, oder diesen an einen der 5 Mitspieler abgespielt hat. Nach Spielende liefert die Auszählung der von jedem Spieler wahrgenommenen 6 Optionen in der Summe die Anzahl seiner Ballkontakte, die offensichtlich identisch ist mit der Gesamthäufigkeit, mit der er im Ballbesitz blieb und von Mitspielern angespielt wurde. Die Reihen- oder Spaltensumme zu jeder Wetterlage entspricht der Häufigkeit ihres Vorkommens (Ballkontakte), der Feldeintrag in der Hauptdiagonalen der Häufigkeit ihres Fortbestehens (Am-Ball-Bleibens) und die Inhalte der übrigen Reihen- und Spaltenfelder den Häufigkeiten ihres Übergangs in (Abspiel) und Hervorgehens aus anderen Wetterlagen (Zuspiel). Der Bezug zur früher diskutierten Lebensdauer-Verteilung (*Kap. 2.3.5, S. 54*) zeigt sich darin, dass die Anzahl der Wetterlagenepisoden mit der Summe der Abspielhäufigkeiten übereinstimmt, so dass der p -Parameter der Geometrischen Verteilung als Verhältnis von Abspielhäufigkeiten zu Ballkontakten folgt. Die Häufigkeit des Am-Ball-Bleibens ergibt sich als Summenprodukt aus der Anzahl der Episoden mit Lebensdauer k und der um 1 verminderten Lebensdauer – denn hier wurden ja Latten statt Pfosten gezählt.

Für eine synoptische Veranschaulichung des »Zusammenspiels« der Wetterlagen – d. h. der in der ζ -Matrix erfassten Übergangshäufigkeiten – wurde die Graphikanwendung »Circos« eingesetzt (*Abb. 2-8*), die ursprünglich zur Visualisierung genomischer Datensätze entwickelt worden ist (KRZYWINSKI ET AL. 2009). Die Gesamthäufigkeiten der Wetterlagenübergänge sind darin als Ringsektoren dargestellt, die im Innern in aufsteigender Reihe farbkodierte Zuspielhäufigkeiten enthalten, während die Sockel der Bézierbänder entsprechende Abspielhäufigkeiten wiedergeben. Jedes Bézierband verbindet die der Hauptdiagonalen diametral gegenüberliegenden komplementären Einträge (ζ_{ij} & ζ_{ji}), charakterisiert somit das wechselseitige Abspielverhalten eines Spielerpaares und ist nach dem Spieler eingefärbt, der den Partner häufiger anspielt. Der große freie Bereich jedes Ringsektors ist dem jeweiligen Hauptdiagonalfeld zugeordnet und repräsentiert die Häufigkeit des Am-Ball-Bleibens oder von Selbstübergängen.

2 Atmosphärenphysik

Ç	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	61	3	4	9	18	9	104
C	3	23	5	2	8	12	53
NE	8	2	9	2	0	2	23
SE	4	5	3	19	4	0	35
SW	10	15	0	3	43	13	84
NW	18	5	2	0	11	29	65
CS	104	53	23	35	84	65	364

G	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	30	15	7	10	24	19	104
C	15	8	3	5	12	9	53
NE	7	3	1	2	5	4	23
SE	10	5	2	3	8	6	35
SW	24	12	5	8	19	15	84
NW	19	9	4	6	15	12	65
CS	104	53	23	35	84	65	364

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.59	.03	.04	.09	.17	.09	1
C	.06	.43	.09	.04	.15	.23	1
NE	.35	.09	.39	.09	0	.09	1
SE	.11	.14	.09	.54	.11	0	1
SW	.12	.18	0	.04	.51	.15	1
NW	.28	.08	.03	0	.17	.45	1
π	.29	.15	.06	.10	.23	.18	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.07	.09	.21	.42	.21	1
C	.10	0	.17	.07	.27	.40	1
NE	.57	.14	0	.14	0	.14	1
SE	.25	.31	.19	0	.25	0	1
SW	.24	.37	0	.07	0	.32	1
NW	.50	.14	.06	0	.31	0	1
E	.24	.17	.08	.09	.23	.20	1

P ²	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.41	.08	.05	.11	.22	.13	1
C	.18	.25	.09	.06	.20	.24	1
NE	.38	.10	.18	.11	.10	.12	1
SE	.18	.17	.10	.32	.16	.07	1
SW	.19	.19	.03	.05	.34	.20	1
NW	.32	.11	.04	.04	.22	.27	1
π	.29	.15	.06	.10	.23	.18	1

P ⁶	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.29	.14	.06	.10	.23	.17	1
C	.29	.15	.06	.09	.23	.18	1
NE	.29	.14	.07	.10	.22	.17	1
SE	.28	.15	.07	.11	.22	.17	1
SW	.28	.15	.06	.09	.23	.19	1
NW	.29	.14	.06	.09	.23	.18	1
π	.29	.15	.06	.10	.23	.18	1

Tab. 2-11: Wetterlagenübergänge für Basisperiode 1971 – 2000 (NCEP). Ç: Übergangshäufigkeiten (gerundet) für das klimatologische Jahr. G: Übergangshäufigkeiten für Markovkette (MK) 0. Ordnung, $g_{ij} = RS_i CS_j / 364$. P (= P¹): Übergangswahrscheinlichkeiten für MK 1. O. (aus Ç via ζ_{ij} / RS_i); π: Eigenvektor ($\pi = \pi P$), stationäre (unbedingte, klimatologische) Grenzverteilung. Die p_{ij} (${}_2p_{ij}$, ${}_6p_{ij}$) der Matrix P = P¹ (P², P⁶) sind bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Übergang der Kette vom aktuellen Zustand s_i in den Zustand s_j in 1 (2, 6) Zeitschritten (Tagen). E: ÜW für eingebettete Markovkette ohne Verweilzeiten (aus Ç wie P für $\zeta_{ii} = 0$).

Table 2-11: Weather-type transitions for base period 1971 – 2000 (NCEP). ζ : Count matrix of rounded transition frequencies for the climatological year. G : Transition frequencies for 0. order Markov chain, $g_{ij} = RS_i CS_j / 364$. $P (= P^1)$: Transition matrix of 1. order Markov chain, obtained from ζ via ζ_{ij} / RS_i ; π : Eigenvector ($\pi = \pi P$), stationary (unconditional climatological) distribution. Entries p_{ij} (${}_2 p_{ij}$, ${}_6 p_{ij}$) of matrix $P = P^1$ (P^2, P^6) are conditional probabilities for transitions of the Markov chain from current state s_i to state s_j within 1 (2, 6) time steps (days). E : Embedded transition matrix (without sojourn times, from ζ as P for $\zeta_{ii} = 0$).

Die enorm hohe Häufigkeit der Selbstübergänge und die asymmetrische Matrixstruktur ($\zeta_{ij} \neq \zeta_{ji}$) sind deutliche Anzeichen für serielle Autokorrelation und Persistenz in der Wetterlagenabfolge. Die relative Häufigkeit, dass beispielsweise A auf A folgt, ist mit $61/104 = 0,59$ 3,5-mal so hoch wie diejenige ($43/260 = 0,17$), dass A nach anderen Wetterlagen (nicht A oder kurz: !A) auftritt. Die Differenz von 0,42 entspricht dabei dem Lag-1 Autokorrelationskoeffizienten einer binären Zeitreihe mit $A = 1$ und $!A = 0$. Für die vergleichsweise häufigen Wetterlagen C, SW und NW ergeben sich ähnliche Verhältnisse von etwa 4, während diese im Fall von SE und NE bei 10 liegen. Die binären Autokorrelationen variieren zwischen 0,33 für NW!NW Reihen und 0,49 für SE!SE Reihen. Ähnliche Resultate liefert das sog. Odds Ratio (ALLISON UND LIKER 1982), welches ein von den Randsummen unabhängiges Maß für die Stärke des sequentiellen Zusammenhangs darstellt. Die Odds oder »Gewinnchancen« für die Abfolge AA sind das Verhältnis der Häufigkeiten AA zu A!A ($61/43 = 1,4$), die Odds für die Abfolge !AA $43/217 = 0,2$. Das Odds Ratio von $1,4/0,2 = 7,2$ besagt demnach, dass die Odds für die Abfolge AA 7-mal so hoch sind wie für die Abfolge !AA. Das beliebig große OR lässt sich durch die Transformation $TOR = (OR - 1)/(OR + 1)$ auf den Wertebereich zwischen -1 und 1 beschränken. TOR variiert zwischen 0,71 für NWNW vs. !NWNW und 0,92 für SESE vs. !SESE.

Ein einfacher Test auf serielle Unabhängigkeit der Übergangshäufigkeiten ergibt sich aus der Hypothese, dass die ζ -Matrix unabhängige Verbundereignisse darstellt, wie sie beispielsweise der Wettergott mit einem einzelnen nicht ganz echten Würfel generiert haben könnte. Die in diesem Fall zu erwartenden Übergangshäufigkeiten sind als Matrix G in der Tab. 2-11 wiedergegeben. Die Feldeinträge g_{ij} darin sind schlicht mit der Gesamthäufigkeit (364) multiplizierte Produkte der unbedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten ($RS(i)/364$) und ($CS(j)/364$) für die Wetterlagen i und j . Die Teststatistik ergibt sich als Summe über die 6^2 Glieder $(\zeta_{ij} - g_{ij})^2/g_{ij}$ und ist χ^2 -verteilt mit $(6 - 1)^2$ Freiheitsgraden. Diese Summe liegt mit 309 weit oberhalb des 0,9999 Quantils von 60,14, so dass die Unabhängigkeitshypothese auf einem Niveau $< 0,01\%$ abzulehnen ist. Den Hauptbeitrag in Höhe von 230 oder 74 % liefern die mit Selbstübergängen assoziierten Hauptdiagonalglieder. Eine zweite hohe Teilsumme von 56 (18 %) entsteht durch erhebliche Abweichungen bei den diametralen Übergängen $A \leftrightarrow C$, $NE \leftrightarrow SW$ und $NW \leftrightarrow SE$, die in der ζ -Matrix für beide Richtungen sehr selten oder gar nicht vorkommen, sowie durch die deutlich unterrepräsentierten Übergänge ANW und SWA.

Weit naheliegender und realistischer erscheint die Annahme, dass der ζ -Matrix ein zeit- und zustandsdiskreter stochastischer Prozess zugrunde liegt – nämlich eine Markovkette 1. Ordnung auf dem Zustandsraum $S = \{A, C, NE, SE, SW, NW\}$. Die Wetterlagenübergänge werden als Zustandsänderungen der Kette aufgefasst, wobei die Übergangswahrscheinlichkeit zum unmittelbaren Folgezustand in jedem Zeitpunkt ausschließlich vom aktuellen Zustand abhängt, so dass die Vorgeschichte bzw. der Pfad, auf dem der aktuelle Zustand erreicht wurde, für den künftigen Zustand irrelevant ist. Diese markovsche Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit korrespondiert mit

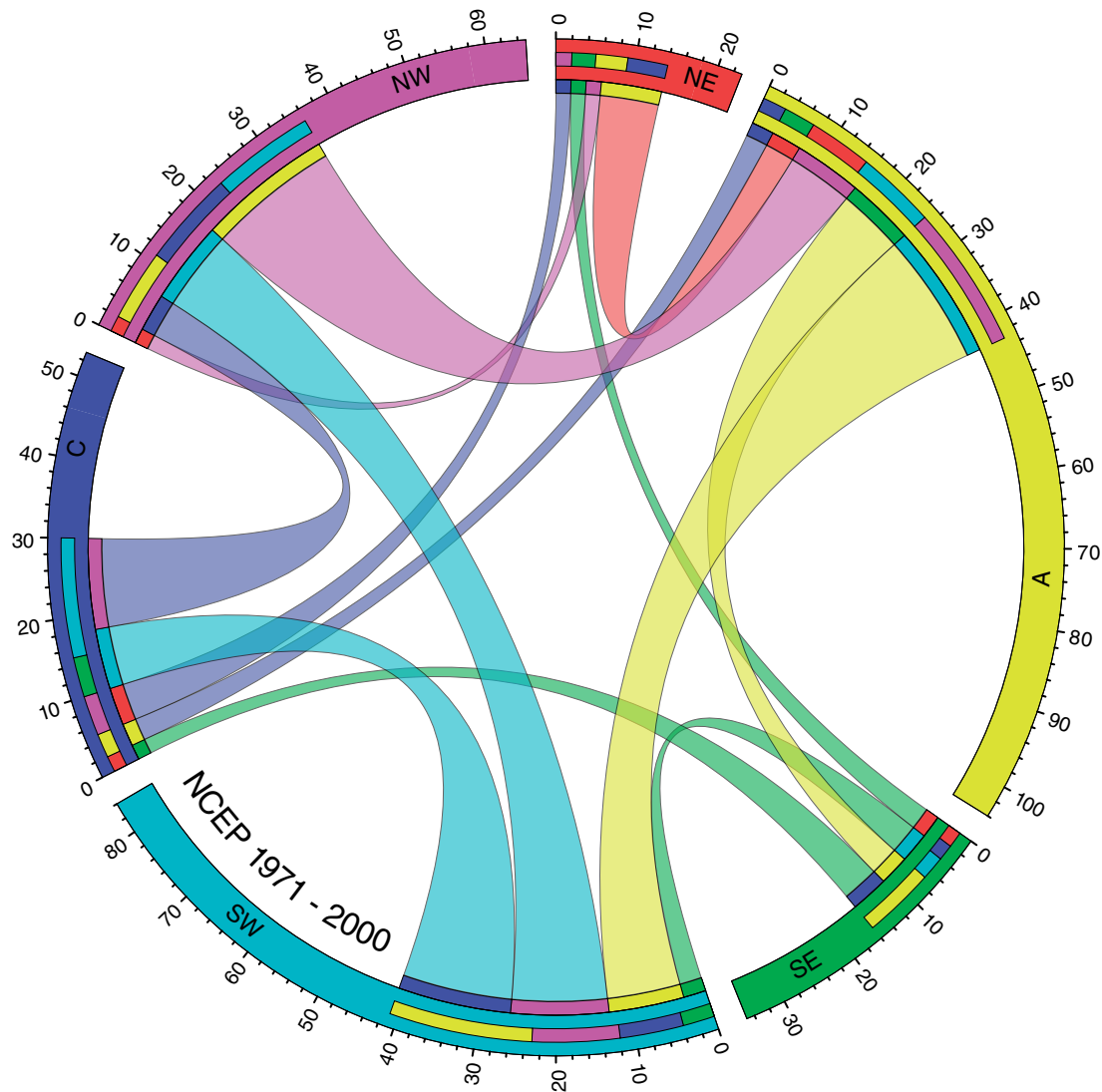


Abb. 2-8: Wetterlagenübergänge, Jahresklimatologie. Die Bogenlänge eines Ringsektors entspricht der Häufigkeit f in Tagen von Wetterlage X , d. h. der jeweiligen Randsumme der Countmatrix ζ in Tab. 2-11. Häufigkeiten der Übergänge $Y \neq X \rightarrow X$ (Spalteneinträge) sind als nach Y eingefärbte Segmente innerhalb Sektor X dargestellt; der freibleibende Sektorbereich entspricht Selbstübergängen $Y=X \rightarrow X$. Die Sockel der Bézierbänder kennzeichnen Übergänge $X \rightarrow Y \neq X$ (Zeileneinträge) und sind wie Wetterlage Y eingefärbt. Die Bézierbänder haben Farbe X , wenn $f(X \rightarrow Y) \geq f(Y \rightarrow X)$, sonst Farbe Y .

Fig. 2-8: Weather-type transitions, annual climatology. The arc length of a ring section reflects the frequency f in days of weather type X (marginal sum of countmatrix ζ in Table 2-11). The segments within section X depict stacked frequencies of transitions $Y \neq X \rightarrow X$ (column entries); they are colored after the preceding weather type and given in ascending order; the leftover portion of section X is associated with self transitions $Y=X \rightarrow X$. Transitions $X \rightarrow Y \neq X$ (row entries), colored after the succeeding weather type, are identified by the sockets of Bézier ribbons. The ribbons have color X , if $f(X \rightarrow Y) \geq f(Y \rightarrow X)$, otherwise color Y .

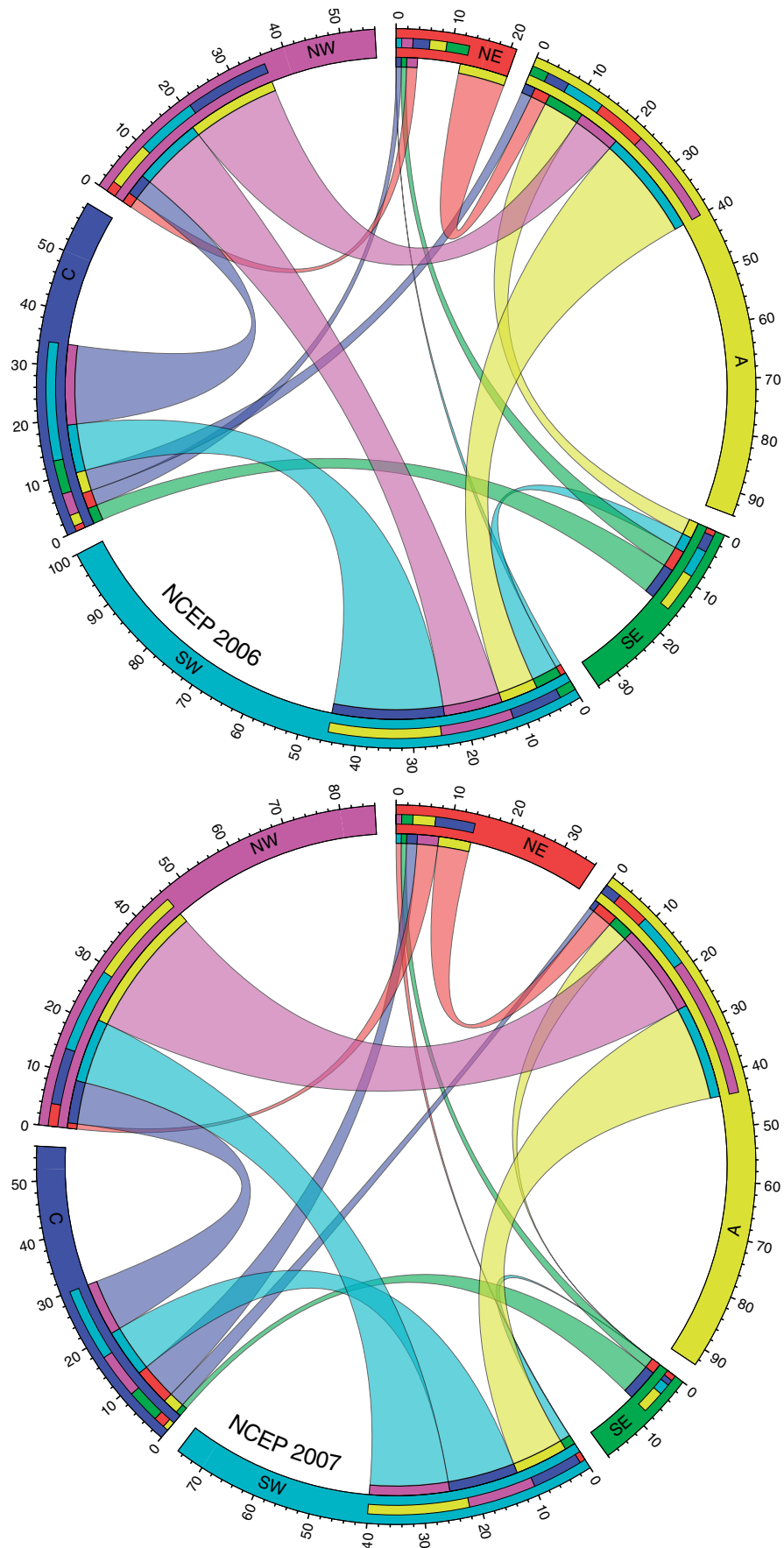


Abb. 2-9: Wie Abb. 2-8, jedoch für die Jahre 2006 und 2007.

Fig. 2-9: Same as Fig. 2-8, except for 2006 and 2007.

der geometrisch verteilten Lebensdauer der Wetterlagen, die sich hier als Verweilzeit des Systems im gleichen Zustand zeigt, wobei die Restverweilzeit unabhängig von der in solchen Zuständen bereits verbrachten Wartezeit ist.

Die Parameter der Markovkette lassen sich aus der ζ -Matrix als auf die jeweilige Zeilensumme bezogene relative Häufigkeiten berechnen, welche Maximum-Likelihood-Schätzer für die 1-Schritt-Übergangswahrscheinlichkeiten darstellen. Die Zeilenvektoren der resultierenden stochastischen P-Matrix (Tab. 2-11) sind demnach bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die im Spaltenkopf angegebenen möglichen Systemzustände zum Zeitpunkt $t + 1$, wenn sich das System gegenwärtig (t) im durch den Zeilenkopf angezeigten Zustand befindet. P lässt sich so als stochastisches Wetterlagenvorhersagemodell interpretieren. Unter der Voraussetzung zeitinvarianter Übergangswahrscheinlichkeiten (zeithomogene MK) ergibt sich eine n-Tagesvorhersage als n-te Potenz von P, die Vorhersage für Übermorgen als $P^2 = ({}_2p_{ij})$ (Tab. 2-11). Die Einträge ${}_2p_{ij}$ dieser Matrix geben die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Kette vom heutigen Zustand s_i in 2 Schritten in den Zustand s_j übergeht. Jeder Eintrag ${}_2p_{ij}$ ist dabei die disjunkte Vereinigung der $k = 6$ Ereignisse bzw. möglichen Pfade zur Realisierung dieses Übergangs und durch das innere Produkt ($\sum_k p_{ik} \times p_{kj}$) von Zeilenvektor i und Spaltenvektor j der P-Matrix bestimmt.

Unabhängig vom Anfangszustand macht die hohe Erhaltungsneigung aller Wetterlagen die Persistenzvorhersage Morgen-wie-Heute mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zwischen 39 (NENE) und 59 % (AA) zur erfolgversprechendsten 1-Tagesvorhersage. Für eine 2-Tagesvorhersage trifft dies für die Wetterlagen C, NE und NW (Anfangszustände), deren mittlere Lebensdauern bzw. Verweilzeiten unter 2 Tagen liegen (vgl. Tab. 2-10, S. 56), nicht mehr zu (vgl. P^2 , Tab. 2-11). So ist die Wahrscheinlichkeit ${}_2NEA$ (38 %) dafür, dass auf NE Übermorgen A folgt, mehr als doppelt so hoch wie ${}_2NENE$ (18 %), die für ${}_2NWA$ höher als ${}_2NWNW$ und ${}_2CNW$ praktisch ebenso groß wie ${}_2CC$ (25 %). Insbesondere sind auch Zustandsänderungen zwischen den selten oder gar nicht kommunizierenden Wetterlagen $C \leftrightarrow A$, $NE \leftrightarrow SW$, $NW \leftrightarrow SE$, die von heute auf morgen praktisch nicht realisiert werden, bis übermorgen immerhin indirekt möglich.

Sollen Selbstübergänge oder Stagnationsperioden (von im Mittel etwa 2 Tagen) außer Betracht bleiben, genügt es die Übergangsmatrix der eingebetteten Markovkette E (Tab. 2-11) zu analysieren (STEWART 2009), die aus ζ nach Nullsetzen der Diagonalfelder und Anpassen der Randsummen auf ansonsten gleiche Weise konstruiert wird wie P und mithin bedingte 1-Schritt-Übergangswahrscheinlichkeiten ohne Wartezeiten darstellt. Schließt man die eher sporadischen Wetterlagen SE und NE als Anfangszustand aus, dann ergibt sich für jeden anderen Anfangszustand als wahrscheinlichste Abfolge die periodische Sequenz A–42–SW–37–C–40–NW–50–A (vgl. a. Abb. 2-8). Diese Übergangskette beschreibt die regionstypische Wetterentwicklung, die durch ständig von Westen heran- (SW, Vorderseite) und durchziehende (NW, Rückseite) Tiefdruckgebiete (C) und nachfolgend unterbrechenden Zwischenhocheinfluss (A) charakterisierbar ist. Grundsätzlich folgen den Nordlagen (NW & NE) am häufigsten A-Lagen (50 & 57 %), den Südlagen (SW & SE) am häufigsten C-Lagen (37 & 31 %). Für die seltenen Ostlagen (SE & NE) sind zwar die Wahrscheinlichkeiten auseinander hervorzugehen sehr hoch (SENE: 19 %, NESE: 14 %), am häufigsten folgen sie jedoch auf C (CNE: 17 %) bzw. A (ASE: 21 %), nämlich 5- bzw. 9-mal, wie aus der ζ -Matrix oder Abb. 2-8 ersichtlich ist.

Die zeithomogene Übergangsmatrix P ist quasipositiv (oder ergodisch), wenn es eine natürliche Zahl $n \geq 1$ gibt, so dass alle Einträge von $P^n > 0$ sind. Dies ist hier für alle

$n \geq 2$ der Fall, so dass eine eindeutige Grenzverteilung $\pi = \pi P$ existiert, gegen die jede Zeile der n -schrittigen Übergangsmatrix für n gegen ∞ konvergiert. π ist mithin die unbedingte (vom Anfangszustand unabhängige) Übergangsverteilung und stimmt hier mit der klimatologischen Verteilung der Wetterlagen überein. (In diesem Zusammenhang ist durchaus bemerkenswert, dass sich die Grenzverteilung ε der Übergangsmatrix E nur wenig von π unterscheidet.) Wie *Tab. 2-11* weiter zu entnehmen ist, wird der stationäre Zustand π praktisch bereits für P^6 erreicht. Die ausschließliche Abhängigkeit der Evolution der Markovkette vom aktuellen Zustand und die vollständige Degeneration des über klimatologische Erwartungen hinausgehenden Vorhersageskills innerhalb von einer Woche stellen markante Parallelen zur numerischen Wettervorhersage dar.

Abschließend sollen die Wetterlagenübergänge in den Jahren 2006 und 2007 untereinander und mit denen des klimatologischen Jahres verglichen werden. Die zugehörigen Übergangshäufigkeiten³ sind gemeinsam mit den 1-schrittigen zeilenstochastischen Matrizen in *Tab. 2-12* wiedergegeben und darüber hinaus als Circosgraphiken visualisiert (*Abb. 2-9*). Die augenfälligsten Unterschiede betreffen die Jahreshäufigkeiten der Richtungswetterlagen, die im Jahr 2006 auf SW und NW beschränkt sind – wie der Vergleich der Bogenlängen der Ringsektoren zeigt (*Abb. 2-8 & Abb. 2-9*) – und erhebliche positive bzw. negative Anomalien darstellen (vgl. *Abb. 2-4, S. 52*). Das Jahr 2007 zeichnet sich demgegenüber durch ebenso starke, aber inverse Anomalien (hinsichtlich SW und NW) aus, wobei zusätzlich ein erheblich erhöhtes bzw. vermindertes Vorkommen von NE- und SE-Lagen offensichtlich ist. Insofern stehen die Eintrittshäufigkeiten der Wetterlagen in beiden Jahren in einem stärkeren Gegensatz zueinander als zum klimatologischen Jahr, was sich insbesondere in den Summenhäufigkeiten der Nord- und Südlagen zeigt (*Abb. 2-9*), für die sich in der Reihenfolge 2006-7100-2007 jeweils 77-88-122 (NW & NE) und 134-119-93 Tage (SW & SE) ergeben.

Die weiter oben beschriebene zyklische Wetterlagenabfolge A–50–SW–47–C–44–NW–47–A, die hier zusammen mit den Übergangswahrscheinlichkeiten der wartezeitfreien E-Matrix für das Jahr 2006 angegeben ist, blieb (auch) in diesem Jahr die wahrscheinlichste Sequenz für alle Anfangszustände außer NE und SE. Für das Jahr 2007 ergibt sich indessen A–41–SW–38–NW–54–A, da die Übergangswahrscheinlichkeit für SWC bei nur 33% liegt. Am häufigsten – und im Wechsel mit inversen Übergängen NWSW – ereigneten sich direkte Übergänge SWNW im Januar 2007 (*Tab. 2-8, S. 49*), als zahlreiche Sturmtiefs die Nordsee in so schneller Folge überquerten (*Tab. 2-3, S. 45; Tab. 2-14, S. 90*), dass sie nicht als C-Wetterlage in Erscheinung traten bzw. registriert wurden. Auch war der Übergang ASW (41%) praktisch gleich wahrscheinlich wie ANW (39%). Diese retrograden Übergänge (ANW), die mit einer SW-Verlagerung des Hochdrucks verbunden sind, ereigneten sich im durch längere Verweilzeiten unterbrochenen Wechsel mit den inversen Übergängen ANW besonders häufig im April (vgl. *Abb. 2-18, S. 82*) sowie in der Zeit vom 24. Aug. bis 15. Sep. 2007 (*Tab. 2-8, S. 49*). Die charakteristische periodische Abfolge tritt deshalb im Jahr 2007 weit weniger klar hervor als im Jahr 2006 oder im klimatologischen Jahr (*Abb. 2-9*).

3. Sofern bei An- und Abpfiff nicht der gleiche Spieler im Ballbesitz ist, gibt der erste (letzte) 1-mal öfter (seltener) ab, als ihm zugespielt wird. Demnach unterscheiden sich die zugehörigen Reihen- und Spaltensummen der ζ -Matrix um 1 ($RS_1 = CS_1 + 1$ bzw. $RS_{365} = CS_{365} - 1$). Dieser Randeffekt wurde wegen technischer Probleme mit ›Circos‹ beseitigt, indem 1. das »Lattenzählen« nicht am Neujahrs-, sondern am Sylvesterpfosten begonnen wurde, und 2. der Feldeintrag in Reihe RS_0 und Spalte CS_{365} um 1 (den virtuellen Übergang zwischen den beiden Sylvesterwetterlagen) vermindert wurde. (Ohne 1. würde sich die Gesamtsumme der Übergänge auf 363 reduzieren.)

2 Atmosphärenphysik

Ç	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	54	2	3	7	20	8	94
C	4	25	3	3	9	15	59
NE	9	1	8	1	0	2	21
SE	3	6	4	18	3	0	34
SW	7	21	1	5	55	11	100
NW	17	4	2	0	13	20	56
CS	94	59	21	34	100	56	364

Ç	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	49	1	4	4	18	17	93
C	3	26	7	1	9	10	56
NE	6	2	22	1	1	4	36
SE	0	6	2	10	0	0	18
SW	10	13	0	2	35	15	75
NW	25	8	1	0	12	40	86
CS	93	56	36	18	75	86	364

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.57	.02	.03	.07	.21	.09	1
C	.07	.42	.05	.05	.15	.25	1
NE	.43	.05	.38	.05	0	.10	1
SE	.09	.18	.12	.53	.09	0	1
SW	.07	.21	.01	.05	.55	.11	1
NW	.30	.07	.04	0	.23	.36	1
TT	.26	.16	.06	.09	.27	.15	1

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.53	.01	.04	.04	.19	.18	1
C	.05	.46	.13	.02	.16	.18	1
NE	.17	.06	.61	.03	.03	.11	1
SE	0	.33	.11	.56	0	0	1
SW	.13	.17	0	.03	.47	.20	1
NW	.29	.09	.01	0	.14	.47	1
TT	.26	.15	.10	.05	.21	.24	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.05	.08	.18	.50	.20	1
C	.12	0	.09	.09	.26	.44	1
NE	.69	.08	0	.08	0	.15	1
SE	.19	.38	.25	0	.19	0	1
SW	.16	.47	.02	.11	0	.24	1
NW	.47	.11	.06	0	.36	0	1
ε	.22	.18	.07	.09	.24	.20	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.02	.09	.09	.41	.39	1
C	.10	0	.23	.03	.30	.33	1
NE	.43	.14	0	.07	.07	.29	1
SE	0	.75	.25	0	0	0	1
SW	.25	.33	0	.05	0	.38	1
NW	.54	.17	.02	0	.26	0	1
ε	.24	.16	.08	.04	.22	.25	1

Tab. 2-12: Wie Tab. 2-11, jedoch für die Jahre 2006 (links) und 2007.

Table 2-12: Same as Table 2-11, except for 2006 (left) and 2007.

Die früher für die Wetterlagen angegebenen mittleren Lebensdauern (*Tab. 2-10, S. 56*), die im Kontext der Markovkette den mittleren Verweilzeiten des Systems in gleichen Zuständen entsprechen, lassen sich in der Circosgraphik als Verhältnis der Bogenlänge eines Ringsektors zur darin enthaltenen Bogenlänge des Übergangsstapels ableiten. Mit $21/13 = 1,6$ (2006) und $36/14 = 2,6$ Tagen (2007) stehen die mittleren Verweilzeiten der NE-Lage in besonders starkem Kontrast (*Abb. 2-9*). Auch die Persistenz (und Häufigkeit) der NW-Lage fiel im Jahr 2007 deutlich höher aus als im Jahr 2006, während das Gegenteil für die SW-Lage zutrifft. Im Mittel über alle Wetterlagen sind die absoluten Abweichungen zwischen beiden Jahren hinsichtlich der Selbstübergänge doppelt so groß wie für alle Übergänge zu anderen Wetterlagen. Im Vergleich zum klimatologischen Jahr ergibt sich hierfür jeweils ein Faktor von fast 3. Die Anomalien im Gesamtvorkommen der einzelnen Wetterlagen sind demnach in erster Linie durch häufigere oder seltenere Selbstübergänge bzw. Fluktuationen der Verweildauer zustande gekommen. Anders und im Bild des Ballspiels ausgedrückt: Ein Spieler hat nicht deshalb ungewöhnlich viele (oder wenige) Ballkontakte, weil er häufiger (seltener) angespielt wird, sondern, weil er länger (kürzer) als normalerweise am Ball bleibt. Inwieweit diese starke Tendenz lediglich eine Besonderheit der Jahre 2006 und 2007 darstellt, wurde bislang nicht geprüft.

2.4 Luftdruckverteilung

Der Kern dieses Beitrags besteht in der Dokumentation der monatlichen und saisonalen räumlichen Luftdruckverteilungen im Meeresniveau für die Jahre 2006 und 2007. Diese MSLP-Verteilungen sind gemeinsam mit den klimatologischen Referenzzuständen des Zeitraums 1971 – 2000 und den Abweichungen der aktuellen Verteilungen von den Klimatologien (Anomalien) in 8 Abbildungen, die jeweils eine Jahreszeit abdecken, fortlaufend ab S. 77 wiedergegeben. Jede dieser Verteilungen wurde in gleicher Weise klassifiziert¹ wie die täglichen MSLP-Felder (Abb. 2-1, S. 41; Tab. 2-1, S. 44), so dass ihr charakteristisches Muster unmittelbar aus diesen Abbildungen abgreifbar ist.

Die täglichen MSLP-Verteilungen repräsentieren aus jeder Tageszeitung oder dem Fernsehen bekannte quasi-synoptische Zirkulationszustände mit Hoch- und/oder Tiefdrucksystemen als zentralen Elementen, deren kurzfristige zeitliche Entwicklung und Verlagerung für einen erfahrenen Synoptiker oder mittels deterministischer Wettervorhersagemodelle mit hoher Zuverlässigkeit vorhersehbar ist. Die langfristigen Mittel solcher Verteilungen stellen demgegenüber keine Wetterlagen mit Vorhersagepotential dar, sondern einen hoffentlich repräsentativen mittleren Zirkulationszustand, der in Hinsicht auf seine Auswirkungen – beispielsweise auf die Temperatur – als »Witterungslage« bezeichnet werden kann.

Im Unterschied zur logischen oder quasi-deterministischen Abfolge der Wetterlagen von Tag zu Tag, besteht eine zwangsläufige Abfolge von Witterungslagen, die jede für sich prinzipiell auf tausenderlei Weise bzw. zahllosen Wetterlagenabfolgepfaden zustande gekommen sein kann, per se nicht. Insofern stellen die insgesamt 24 plus 8 monatlichen und saisonalen MSLP-Verteilungen der Jahre 2006 und 2007 disjunkte »Ereignisse« dar, die zwar aus der konkreten Abfolge der täglichen Wetterlagen resultieren (z. B. Tab. 2-1, S. 44) und sich in vielen Fällen aus den Häufigkeitsverteilungen der Hauptwetterlagen abschätzen lassen (z. B. Tab. 2-7, S. 48), aber darüber hinaus auf Zeitskalen von Monaten oder Jahreszeiten kausal nicht weiter erklärbar sind².

Infolgedessen reduziert sich eine mitteilenswerte Erörterung der Witterungslagen auf deren Auswirkungen auf mittlere Windverhältnisse (Kap. 2.5, S. 85), die Oberflächenzirkulation der Nordsee (Kap. 3.2, S. 117), die Wellenhöhenverteilung (Kap. 3.3, S. 131) oder die Temperaturentwicklung in der Nordsee (Kap. 3.5, S. 142). Da diesen Konsequenzen offensichtlich selbstständige Kapitel gewidmet sind, die im Rahmen der Diskussion anomaler Entwicklungen auf ursächliche Anomalien der MSLP-Verteilungen

1. Im Unterschied zur Klassifizierung täglicher Wetterlagen (vgl. Kap. 2.3.1, S. 40) 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. 2-2, S. 42). 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 dass viele der Frühjahrs- und Sommerverteilungen ohne Unterdrückung des U-Typs als unklassifizierbar einzustufen wären. Aufgrund der damit verbundenen gelegentlichen Überstrapazierung des Verfahrens sollten visuell nicht nachvollziehbare Klassifizierungen nicht überinterpretiert werden. In diesem Zusammenhang sei auch daran erinnert, dass Richtungswetterlagen auf MSLP-Daten an den zentralen Gitterpositionen 4, 5, 8, 9, 12 & 13 fußen, während in Rotationswetterlagen Daten an allen 16 in Abb. 2-1, S. 41 bezeichneten Positionen einfließen.

2. Natürlich haben die in der freien Troposphäre stattfindenden thermo- und hydrodynamischen Prozesse erheblichen Einfluss auf die Luftdruckverteilung im Meeresniveau und deren Entwicklung. Insofern ließe sich das »Nicht-Weiter-Erklärbare« in höhere atmosphärische Stockwerke verlagern, indem etwa der (synchrone) Zusammenhang zu Zirkulationsanomalien im 500 hPa Niveau hergestellt wird. Andererseits sind die Auswirkungen dieser Prozesse in den MSLP-Verteilungen enthalten und nur letztere direkt relevant für das Subsystem Meer im System Nordsee.

zurückverweisen, wird hier im Rahmen der Erörterung der prinzipiell selbsterklärenden MSLP-Verteilungen auf derartige Zusammenhänge nur im Einzelfall hingewiesen.

Die eigentliche Bedeutung der MSLP-Verteilungen besteht in dem, was sie über die Zirkulation (Wind) aussagen. Insofern setzt das Prädikat »selbsterklärend« grundlegende Kenntnisse hinsichtlich der Interpretation der MSLP-Karten voraus. Solche Kenntnisse beinhalten u. a., dass der Wind parallel zu den Linien gleichen Luftdrucks (Isobaren) weht und zwar umso kräftiger, je geringer der räumliche Isobarenabstand ausfällt. Entscheidend für die Windstärke zwischen 2 Orten sind demnach nicht die zugehörigen absoluten Höhen des Luftdrucks sondern die Luftdruckdifferenz. Ferner folgt aus der Seefahrerregel »Den Wind im Rücken, befindet sich der hohe Druck rechter Hand«, dass Hochdruckgebiete im Uhrzeigersinn und Tiefdruckgebiete im Gegenuhrzeigersinn umströmt werden (*Abb. 2-3, S. 46*). Diese Regel trifft gleichermaßen für die Anomalieverteilungen zu, in denen kohärente negative und positive Abweichungen als Tief- und Hochdruckgebiete aufzufassen sind. Schließlich ist der jahreszeitlich veränderliche Temperaturkontrast zwischen Land und Meer zu beachten, wenn es z. B. darum geht, vorherrschende Windrichtungen mit advektiven Temperaturänderungen zu assoziieren.

Die klimatologischen MSLP-Verteilungen des Zeitraums 1971 – 2000 haben grundlegende Bedeutung für die Identifizierung und Einschätzung der Zirkulationsanomalien in den Jahren 2006 und 2007 (*Kap. 2.4.2, S. 73*). Da der früher verwendete UKMO Datensatz nicht länger aktualisiert wird, wurde eine Umstellung der Datenbasis auf MSLP-Felder der NCEP/NCAR Reanalysis I vorgenommen. Eine kaum vermeidliche Diskontinuität in Hinsicht auf bislang veröffentlichte Ergebnisse resultiert dabei vor allem aus der nachstehend beschriebenen Problematik der Druckreduktion im Skandinavischen Gebirge. Eine Abschätzung der damit verbundenen Abweichungen beschränkt sich auf den Vergleich der klimatologischen MSLP-Felder.

2.4.1 MSLP unter den Skanden

Der fiktive Charakter des Luftdrucks im Meeresniveau unter Gebirgen liegt ebenso auf der Hand wie der Nutzen, den Luftdruck auf einem einheitlichen Höhenniveau anzugeben. Seit den Anfängen der Synoptischen Meteorologie in der Mitte des 19. Jahrhunderts haben deshalb zahlreiche, durchaus begründete Hypothesen als Druckreduktionsverfahren Gestalt angenommen (z. B. PAULEY 1998), die jedoch unüberprüfbar bleiben, solange es an Glauben, geologischer Zeit oder praktikablen Methoden fehlt, das Gebirge tatsächlich zu versetzen bzw. durch Luft zu ersetzen. Der naturgemäß fehlende Konsens hinsichtlich der zu verwendenden Methodik leistet einen nicht unerheblichen Beitrag zur Verschiedenheit von MSLP-Verteilungen, wie sie beispielsweise im Rahmen von Modellvergleichsstudien zutage getreten sind (GATES ET AL. 1999).

Im Rahmen vergleichender Untersuchungen zur Umstellung der Datenbasis von UKMO MSLP-Feldern auf entsprechende NCEP/NCAR-Felder (vgl. *Kap. 2.2, S. 39*) wurde die geschilderte Problematik im Bereich der norwegischen Skanden sichtbar. Starke Abweichungen zwischen beiden Datensätzen wurden insbesondere für Grönland bereits von REID ET AL. (2001) festgestellt, die die NCEP/NCAR MSLP-Verteilung hier in den Wintermonaten als unrealistisch hoch einschätzen. Eigene Berechnungen auf Basis von Monatsklimatologien für 1971 – 2000 zeigen, dass der Druck im Meeresniveau auf 40° W/70° N im Winterhalbjahr (O2M) um $14,7 \pm 3,0$ hPa über dem UKMO-Vergleichsdruck liegt, während dieser Überdruck im Sommerhalbjahr auf unbedeutliche $0,1 \pm 0,2$ hPa zusammenschmilzt.

2 Atmosphärenphysik

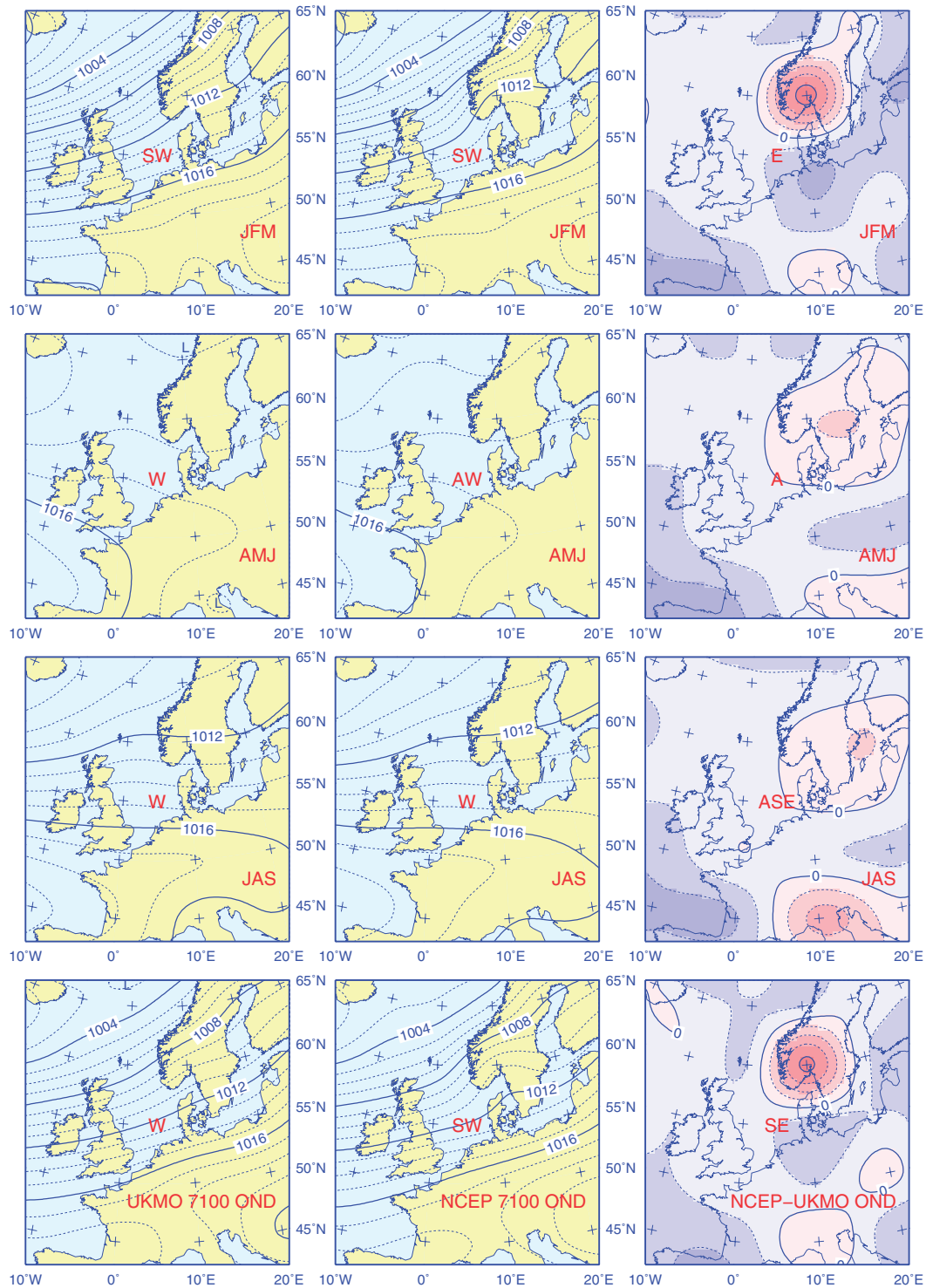


Abb. 2-10: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: UKMO Klimatologie (1971 – 2000), Konturintervall 1 hPa. Mitte: wie links, jedoch für NCEP/NCAR. Rechts: NCEP/NCAR minus UKMO, Konturintervall 0,25 hPa. JFM, AMJ, ... = Winter, Frühling, ... Allen Darstellungen liegen MSLP-Daten in der horizontalen Auflösung der UKMO-Felder zugrunde (5x 10 Grad).

Fig. 2-10: Classified seasonal sea level pressure distributions (hPa). Left: UKMO climatology (1971 – 2000), contour interval 1 hPa. Middle: same as left, except for NCEP/NCAR. Right: NCEP/NCAR minus UKMO, contour interval 0.25 hPa. JFM, AMJ, ... = winter, spring, ... All distributions displayed at the horiz. resolution inherent in the UKMO dataset (5x 10 deg.).

Aus den saisonalen MSLP-Klimatologien für beide Datensätze und speziell den zugehörigen Differenzenfeldern ist ersichtlich (Abb. 2-10), dass in den Skanden (Gitterpunkt 10° E/ 60° N) qualitativ ähnliche Verhältnisse vorliegen. Wenngleich der Überdruck von etwa 1 hPa hier im Winterhalbjahr vergleichsweise unspektakulär erscheint, geht damit doch eine merkliche Verformung des NCEP/NCAR MSLP-Feldes und des zugehörigen geostrophischen Windfeldes im Herbst/Winter gegenüber entsprechenden UKMO-Feldern einher, die im Herbst sogar zu einer abweichenden Klassifizierung des Verteilungsmusters führt.

Für die Berechnung des Windindex, der hier nahezu alle Muster bestimmt, sind nur die Druckwerte p an den Gitterpositionen 4, 5, 8, 9, 12 & 13 relevant (vgl. Abb. 2-1, S. 41 und Fußnote 1, S. 68). Unter der Annahme, dass sich der Druck zwischen beiden Feldern nur am Punkt 5 (10° E/ 60° N) unterscheidet, ergibt sich aus dem Klassifizierungsschema (LOEWE ET AL. 2005) und unter Verwendung des Faktors 0,62 zur Umrechnung in Geschwindigkeitseinheiten (m/s, vgl. Abb. 2-2, S. 42) für die zonalen und meridionalen Windabweichungskomponenten $\Delta u = -0,31 \Delta p_5$ und $\Delta v = 0,27 \Delta p_5$, so dass der Abweichungsvektor für $\Delta p_5 > 0$ einem SE-Wind (139°) der Stärke $0,41 \Delta p_5$ entspricht. Für den typischen Druckunterschied von 1 hPa im Herbst und Winter ergibt sich daraus gegenüber UKMO eine Unterschätzung der Vektorwindgeschwindigkeiten um knapp 5 % und eine Linksdrehung des Windes um ca. 2 Grad. Dass die Herbstverteilungen unterschiedlich klassifiziert werden (Abb. 2-10), erscheint in diesem Licht erstaunlich – zumal die berechneten Vektorwinde von 8,7 m/s und 245° (NCEP/NCAR) gegenüber 9,1 m/s und 248° (UKMO) die Brauchbarkeit der Abschätzung bestätigen, klärt sich aber unmittelbar auf, wenn man sich erinnert, dass dem hier angewendeten (vollständigen) Wetterlagenklassifizierungsverfahren für die Windrichtungen ein 8-Punkte Kompass zugrunde liegt ($W = 270 \pm 22,5^{\circ}$).

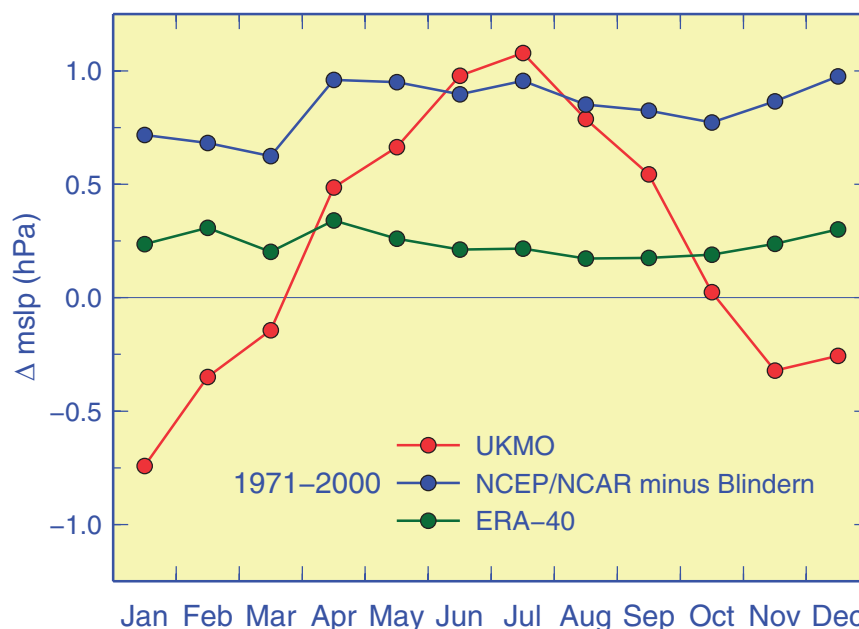


Abb. 2-11: Klimatologische Abweichungen (1971 – 2000) vom »beobachteten« Luftdruck im Meeresniveau auf der WMO-Station 01492 Oslo-Blindern ($59^{\circ} 56' 34''$ N, $10^{\circ} 43' 15''$ E, 94 m ü. d. M.) für UKMO, NCEP/NCAR und ERA-40 MSLP bei 60° N, 10° E.

Fig. 2-11: Climatological departures (1971 – 2000) from »observed« sea level pressure at WMO station 01492 Oslo-Blindern ($59^{\circ} 56' 34''$ N, $10^{\circ} 43' 15''$ E, elevation: 94 m) for UKMO, NCEP/NCAR, and ERA-40 MSLP at 60° N, 10° E.

Ein ergänzender Vergleich, der auch ERA-40 Reanalysen des ECMWF einbezieht, beruht auf Abweichungen der Monatsklimatologien am Punkt (10° E/60° N) von der entsprechenden MSLP-Klimatologie an der WMO-Station Oslo-Blindern (Abb. 2-11). Danach sind beide Reanalysen durch einen praktisch konstanten Offset gegenüber Blindern charakterisiert. Für NCEP/NCAR beläuft sich dieser auf $0,84 \pm 0,12$ hPa; die Standardabweichung aller (normalverteilten) monatlichen MSLP-Differenzen (12×30) vom gleichen Mittelwert ergibt sich zu 0,53 hPa, so dass in den meisten Fällen (95%) $\Delta p > 0$ zutrifft, was einem SE-Vektor im Rahmen der Druckmusterklassifizierung entspricht (s. o.). Weiter fällt auf (Abb. 2-11), dass die UKMO-Abweichungen von Blindern einem erheblichen Jahresgang unterliegen, so dass diese im Jahresmittel (0,23 hPa) ebenso gering sind wie diejenigen für ERA-40 (0,24 hPa). Ähnliches trifft auf die Abweichungen im Winterhalbjahr zu, welche im Durchschnitt (-0,30 hPa) darüber hinaus um etwa 2/3 geringer ausfallen als entsprechende NCEP/NCAR-Abweichungen (0,77 hPa). Insgesamt belegt diese Übersicht, dass die Deformation der MSLP-Felder im Bereich der Skanden im Herbst und Winter zwar im NCEP/NCAR-Fall am stärksten ausgeprägt ist (Abb. 2-10), aber (nachweislich) auch in den ERA-40 Feldern auftritt und schließlich immer noch nicht vollständig verschwände, wenn die MSLP-Werte der Reanalysen auf 10° E/60° N durch die reduzierten Stationsdrucke von Blindern ersetzt würden.

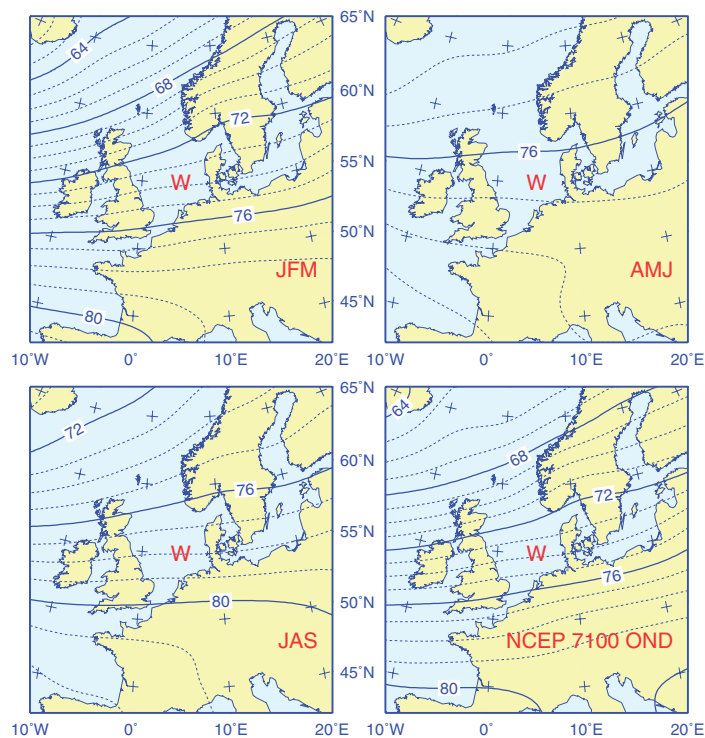


Abb. 2-12: NCEP/NCAR Klimatologie (1971 – 2000) der saisonalen Höhenverteilungen (gpdm) der 925 hPa Fläche. Diese Druckfläche befindet sich im Gipfelniveau der Modell-Skanden (600 – 700 m). Die Isohypsen sind in gleicher Weise zu interpretieren wie die Isobaren in den MSLP-Verteilungen der Abb. 2-10.

Fig. 2-12: NCEP/NCAR climatology (1971 – 2000) of seasonal height distributions (gpdm) of the 925 hPa level. This pressure level has about the same height as the Scandes in the model's orographic representation of this mountain range (600 – 700 m). Isohypses play the same role as isobars in the MSLP distributions of Fig. 2-10.

Eine kritische Beschreibung der Shuell Methode, die den NCEP/NCAR MSLP-Feldern zugrunde liegt, findet sich bei MOHR (2004). Die UKMO MSLP-Analysen, die bis ins Jahr 1873 zurückreichen, beruhen auf unterschiedlichsten Quellen (JONES 1987), so dass von einer Recherche bzgl. des oder der verwendeten Druckreduktionsverfahren Abstand genommen wurde. Dessen ungeachtet, erscheint der Isobarenverlauf der UKMO-Analysen im Bereich der Skanden philosophisch-physikalisch plausibler als der gebirgsgestörte Verlauf auf Basis der NCEP/NCAR Reanalysen (Abb. 2-10). Diese Auffassung geht konform mit den Vorstellungen von MESINGER UND TREADON (1995), die »arriving at a pressure field appropriate to sea level that to the extent possible maintains directions and reflects the magnitude pattern of the surface horizontal pressure gradients« als Ziel der Druckreduktion auf Meeressniveau konstatieren. Dass diese Zielsetzung im Bereich der Skanden eher schlecht realisiert ist, zeigt sich in den NCEP/NCAR Höhenverteilungen der 925 hPa Fläche (Abb. 2-12), die weit besser zu den UKMO MSLP-Verteilungen passen.

Für ein einzelnes Jahr (2005) wurden tägliche NCEP/NCAR MSLP-Werte an der Gitterposition 5 durch solche von Blindern ersetzt, um die aus dem Wetterlagenklassifizierungsverfahren resultierenden Muster mit solchen aus unmanipulierten Feldern zu vergleichen. Windrichtungsabweichungen waren zu 88 % (96 %) auf das Intervall $\pm 5^\circ$ ($\pm 10^\circ$) beschränkt. Geschwindigkeitsabweichungen blieben zu 79 % (95 %) im Intervall $\pm 0,5$ m/s ($\pm 1,0$ m/s). Die Wetterlagen selbst wurden zu 93 % identisch gleich klassifiziert. Da sich die Nutzung der NCEP/NCAR MSLP-Felder hier letztlich auf Analysen beschränkt, denen das Wetterlagenklassifizierungsverfahren zugrunde liegt, erscheint ein Festhalten an den originären Feldern als unkritisch.

2.4.2 MSLP-Verteilungen 2006 & 2007

Das selbst in der belebten Natur zu beobachtende Gleichgewichtsstreben (Le Chatelier Prinzip, SCHNEIDER UND KAY 1994) manifestiert sich in gemäßigten Breiten in Form von mäandrierenden planetarischen Wellen und Wirbeln, die den meridionalen Temperaturkontrast zwischen Tropen und Polargebieten auszugleichen suchen. Auf Grund der sich irregulär ändernden Anzahl, Amplitude, und geographischen Position von Wellenberg und -tälern, müsste das Langzeitmittel eine perfekte – infolge der Erddrehung von West nach Ost gerichtete – zonalsymmetrische Strömung anzeigen. Thermische (Land-See-Verteilung) und dynamische Störfaktoren (Gebirgsketten) führen jedoch zu Abweichungen, die in den klimatologischen MSLP-Feldern des hier relevanten weiteren Nordseeraums als quasistationäre Druckgebilde – nämlich Islandtief und Azorenhoch – sichtbar werden. Die jahreszeitlichen Veränderungen unterworfenen Abweichungen von einer reinen Westströmung, die im Jahresgang der Monatsklimatologien besonders deutlich hervortreten (s. a. Abb. 2-22, S. 89), sollen nachfolgend kurz skizziert werden, bevor die in den Jahren 2006 und 2007 eingetretenen Besonderheiten erörtert werden.

Gleichförmig starke Druckgradienten über der Nordsee im Herbst und Winter stehen in klarem Zusammenhang mit der Tiefdruckaktivität im Nordatlantik (vgl. Abb. 2-10, S. 70). Die durchweg SW-lichen Verteilungsmuster bilden dabei NE-wärts wandernde Zyklonenfamilien ab, die in ihrer Gesamtheit bzw. im Langzeitmittel als von der Labradorsee bis zum Karischen Meer ausgedehntes »Islandtief« in Erscheinung treten. 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 (Abb. 2-14, S. 78). Die im Frühsommer im

Nordseeraum vorherrschende schwachwindige NW-Zirkulation ist an die Ausdehnung des Azorenhochs nach Westeuropa gebunden. Der graduelle Übergang zu einer starken SW-Drift im Herbst 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, der sich in der wechselnden Dominanz von Islandtief bzw. Azorenhoch widerspiegelt. 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 (z. B. *Tab. 2-2, S. 44*)

Monatliche und saisonale MSLP-Verteilungen für die Jahre 2006 und 2007 sind in *Abb. 2-13 ff.* gemeinsam mit den klimatologischen Referenzzuständen des Zeitraums 1971 – 2000 sowie den Abweichungen von dieser Klimatologie (Anomalien) dargestellt. Die Abbildungen decken jeweils eine Jahreszeit ab und sind für die Jahre 2006 und 2007 fortlaufend ab *S. 77* wiedergegeben. Die aktuellen Verteilungsmuster lassen sich als Überlagerungen der Klimatologie- und Anomalieverteilungen auffassen. So resultiert beispielsweise die S-Anströmung im Winter 2006 als qualitative Vektorsumme der Komponenten SW und E (*Abb. 2-13*).

Auf jahreszeitlichen Zeitskalen belegen identische oder ähnliche Klassifizierungen der aktuellen und klimatologischen MSLP-Felder insgesamt geringe Unterschiede hinsichtlich des Verteilungsmusters. Die stärksten Richtungsabweichungen ergeben sich für das Winterquartal 2006 (S vs. SW) und das Frühjahr 2007 (ANW vs. AW). Die meist schwach ausgeprägten Anomalieverteilungen zeigen darüber hinaus an, dass auch hinsichtlich der Intensität der Verteilungen kaum nennenswerte Unterschiede bestehen. Insofern entsprechen die Druckverteilungen – außer im Winter und Herbst 2006 – auf der saisonalen Zeitskala »normalen« Verhältnissen.

Schon aufgrund der Ergebnisse der Wetterlagenstatistik (*Kap. 2.3.4, S. 50*) ist klar, dass diese Normalität kaum Ausdruck intrasaisonal durchgängig normaler Bedingungen ist, sondern vielmehr aus der Kompensation teils erheblicher, entgegengesetzter Anomalien auf kürzeren, monatlichen Zeitskalen resultiert, die u. a. mit entsprechenden regionalen Temperaturanomalien einhergehen. Wie bereits in der Vorrede kurz angesprochen, sind diese Verteilungen unkorreliert (s. a. VAN DEN DOOL UND LIVEZEY 1984) und daher buchstäblich nicht ohne Weiteres auseinander (z. B. von Monat zu Monat) erklärbar – geschweige denn vorhersagbar (z. B. LORENZ 1993). Deshalb sind die nachstehenden Beschreibungen von dokumentarischem Charakter und auf eine Auswahl interessanterer Konstellationen fokussiert. Gelegentlich werden dazu Ergebnisse einbezogen, die in den monatlichen CLIMATE DIAGNOSTICS BULLETINS des CPC veröffentlicht wurden (BELL 2006/2007).

Im Winter 2006 lag insgesamt eine N-wärts gerichtete Meridionalzirkulation vor, die sich gegenüber der Klimatologie in starken E-lichen Anomaliefeldern ausdrückt (*Abb. 2-13, S. 77*). Letzteren ist zu entnehmen, dass sich im Februar und besonders im März die Nordatlantische Oszillation – dazu passend – tatsächlich im negativen Mode befunden hat, denn dieser zeichnet sich durch anomal hohen/tiefen Druck bei Island bzw. den Azoren aus. Im Januar traf dies trotz S-licher Anströmung nicht zu. Stattdessen herrschte extrem hoher Druck über Skandinavien, der sich nach Westen bis über die Britischen Inseln hinaus erstreckte, die Tiefdruckstörungen weit nach Norden und Nordafrika ablenkte und so das Eindringen maritimer Luftmassen in den Nordseeraum blockierte.

Die schwachen klimatologischen Luftdruckgegensätze im April und Mai (*Abb. 2-14, S. 78*) sind Ausdruck langfristig gleichverteilter Richtungswetterlagen. Individuelle monatliche MSLP-Verteilungen sind meist – wie in den Jahren 2006 und 2007 – weit weniger diffus und bilden sich in dieser Jahreszeit folglich fast unverändert in den Anomalie Mustern ab.

Besonders markante intrasaisonale Unterschiede, die sich im jahreszeitlichen Mittel fast aufheben, weisen die MSLP-Verteilungen im Sommer 2006 auf (*Abb. 2-15, S. 79*). Die Höhenzirkulation (500 hPa) hatte Wellenzahl-5-Struktur mit persistenten Hochdruckrücken über Mittelsibirien, dem zentralen Nordpazifik, dem Westen Nordamerikas, dem nordwestlichen Atlantik und in besonders starker Ausprägung über Europa (vgl. BELL 2006). Diese Struktur spiegelt sich in positiven Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung der mittleren Breiten wider (*Abb. 2-28, S. 105*) und leitete die wärmste 1-jährige Periode nicht nur für die Nordseeregion sondern die Nordhemisphäre insgesamt ein. Zum Monatsende hin bildete sich SW-lich Islands das Sturmtief ›Xaviera‹. Dieses erreichte am 1. August die Nordsee (*Tab. 2-1, S. 44*) und etablierte eine dauerhafte Troglage über Zentraleuropa, die sich im Meeresniveau als CNW-Muster zeigt (*Abb. 2-15, S. 79*) und hier zu gegenüber dem Vormonat inversen Temperaturanomalien führte. Die Verschiebung von Wellenbergen und -tälern betraf den gesamten eurasischen Kontinent N-lich 40° N und schloss die Umkehrung der Temperaturanomalien zwischen Greenwich und Datumsgrenze ein. Die Nordseetemperatur fiel zwar unter den Ende Juli erreichten Höchststand zurück, blieb aber thermisch träge auf anomal hohem Niveau (*Abb. 3-13, S. 143*).

HURRELS³ und OSBORNS⁴ NAO-Indizes zeigen von August bis Oktober 2006 bei Mittelwerten von etwa –2,1 respektive –1,8 einen durchgängig negativen NAO-Zustand an. Maßgebend für die recht kräftige SW-Anströmung im Nordseeraum im September und Oktober war jedoch ein ausgeprägtes Ostatlantikmuster (*Abb. 2-16, S. 80*), das sich im vorliegenden positiven Mode durch tiefen Druck W-lich der Britischen Inseln und einen starken SE-lich orientierten Druckgradienten über Westeuropa auszeichnet (BARNSTON UND LIVEZEY 1987). Ebenso starken Anteil an der Aufrechterhaltung der Nordseewarmanomalie hatte die intensive W-Zirkulation, die von November 2006 bis Januar 2007 (*Abb. 2-17, S. 81*) andauerte und durch einen stark positiven NAO-Mode von 2,2 treffend charakterisiert ist. MSLP-Konstellation und Anströmung im Februar 2007 entsprachen praktisch denjenigen im März des Vorjahres (*Abb. 2-13, S. 77*); die Kombination von negativem NAO-Mode und stark positivem Ostatlantik-Mode in Verbindung mit dem erheblichen Druckanstieg über Skandinavien gegenüber Januar 2007 bedingten dabei die S-liche Anströmung im Nordseeraum (*Abb. 2-17, S. 81*)⁵. Die Rückkehr der NAO im März 2007 in einen stark positiven Mode (HURRELL: 3,1, OSBORN: 2,0) wirkte sich im Nordseeraum nicht in entsprechender Stärke aus; Ursache hierfür sind das annähernd gleich häufige Vorkommen der 6 Hauptwetterlagen (*Tab. 2-9, S. 49*) und speziell die Häufung von NE- und SE-Lagen in der 3. Dekade, die Hochdruck in der nördlichen Nordsee oder Skandinavien und Tiefdruck südlich davon implizieren.

3. <http://climatedataguide.ucar.edu/guidance/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>

4. <http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/datapages/naoi.htm>

5. Der Vorzeichenwechsel der NAO und insbesondere der Arktischen Oszillation in der 3. Januardekade beinhaltet die Umstellung der bis dahin zonal symmetrischen zu einer stark mäandrierenden zirkumpolaren Zirkulation. Die damit einhergehenden zahlreichen polaren Kaltluftausbrüche führten im Februar zu einer Invertierung der extremen Warmanomalie über den nordhemisphärischen Landmassen (vgl. *Abb. 2-28, S. 105* und L'Heureux et al. 2008).

Im April 2007 stellte sich in Mitteleuropa erneut ein im Westen und Osten von Tiefdruck flankierter persistenter Omegablock ein (Abb. 2-18, S. 82), der hier strahlungsbedingt zu ähnlichen Rekordanomalien der Oberflächentemperaturen führte wie die Omegalage im Juli 2006. Im Einklang mit HURRELS NAO-Index von 2,9, stand die Nordseeregion im Mai wieder unter dem Einfluss milder Meeresluft aus W. Die übliche NE-Ausdehnung des Azorenhochs blieb im Juni aus. Stattdessen herrschte im Nordmeer anomal hoher Druck, der zunächst in der eigentlichen Nordseeregion eine persistente NE-Anströmung bedingte (Tab. 2-8, S. 49) und ab der Monatsmitte einer Tiefdruckrinne zwischen Azoren- und »Islandhoch« Raum bot, die sich von W-lich Irland bis ins Baltikum erstreckte (Abb. 2-18, S. 82). Die unbeständige Witterung setzte sich im Juli fort, als ähnlich wie im August 2006 ein tiefer Höhentrog über Nordeuropa lag, der sich im Meeresniveau der Nordsee als intensive W-Anströmung abbildet (Abb. 2-19, S. 83). Die Troglage dauerte im August und September an und wurde in dieser Zeit von stark ausgeprägten Hochdruckrücken über dem zentralen Nordatlantik und Zentralrussland benachbart. Das beim Vordringen nach NE an Stärke zulegende Azorenhoch führte zur Verschärfung der NW-lich orientierten Frontalzone über der Nordsee mit entsprechend intensiviertem Einstrom kühler Meeresluft aus NW, welcher für den Sommer 2007 insgesamt charakteristisch war (Abb. 2-19, S. 83).

Im Oktober 2007 kam es zur hochreichenden Vereinigung des mit Kern über dem Rheindelta liegenden Subtropenhochs (Abb. 2-20, S. 84) mit dem ausgedehnten eurasischem Hochdruckgebiet über Zentralrussland. Das dauerhaft milde Hochdruckwetter führte zu einer leichten Verstärkung der Nordseeoberflächentemperaturanomalie, die seit Juli mit 0,5 K auf dem gleichen Niveau gelegen hatte wie diejenige im Nordostatlantik (REYNOLDS UND XUE 2008). Die ungewöhnliche NW-Anströmung im November ging mit der Rückkehr des bereits im August und September beobachteten Zirkulationsmusters einher. Im Dezember entsprach die Zirkulation großräumig und über der Nordsee der Klimatologie und war durch einen moderat positiven Mode der NAO gekennzeichnet (HURREL: 0,9, OSBORN: 1,4).

Vorstehend wurden die wesentlichen Abweichungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster in den Jahren 2006 und 2007 von den klimatologischen Verhältnissen herausgearbeitet. Die Intensität der Zirkulation und Zirkulationsanomalien ließ sich anhand der jeweiligen Druckverteilungen nur visuell abschätzen. Da sich hybride und wirbelhafte Zirkulationsmuster auf monatlichen und längeren Zeitskalen tendenziell herausmitteln, sind die Verteilungsmuster maßgeblich durch den Windindex bestimmt. Einen effizienten, quantitativen Zugang eröffnet die nachfolgend präsentierte Analyse des geostrophischen »Nordseewindes«, der in direkt proportionaler Beziehung zum Druckgradienten steht.

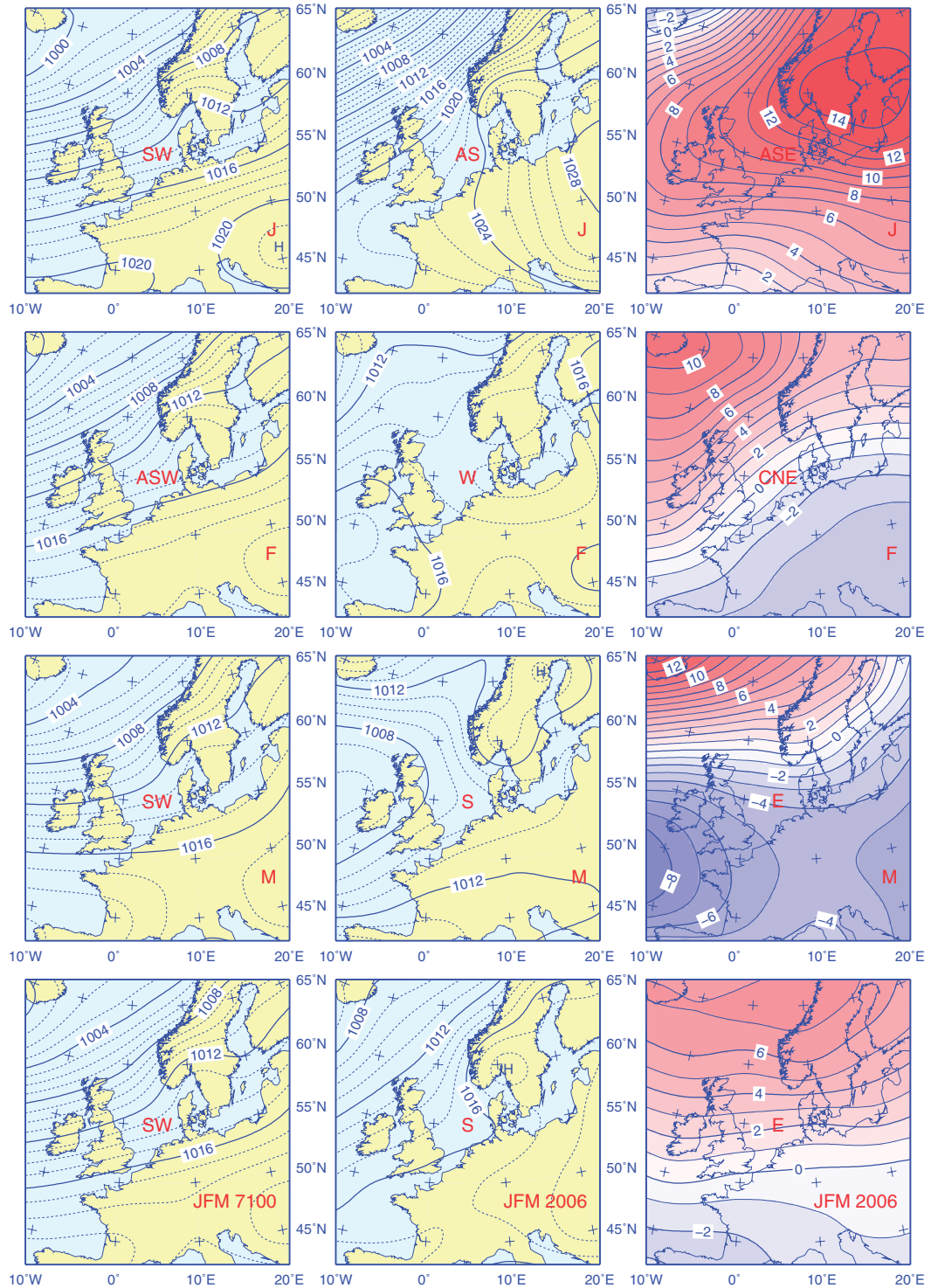


Abb. 2-13: Winter: Monatliche/saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: NCEP/NCAR Klimatologie (1971 – 2000). Mitte: 2006. Rechts: Anomalien. J, F, M, JFM = Januar, Februar ...

Fig. 2-13: Winter: classified monthly/seasonal sea level pressure distributions (hPa). Left: NCEP/NCAR climatology (1971 – 2000). Middle: 2006. Right: anomalies. J, F, M, JFM = January, February ...

2 Atmosphärenphysik

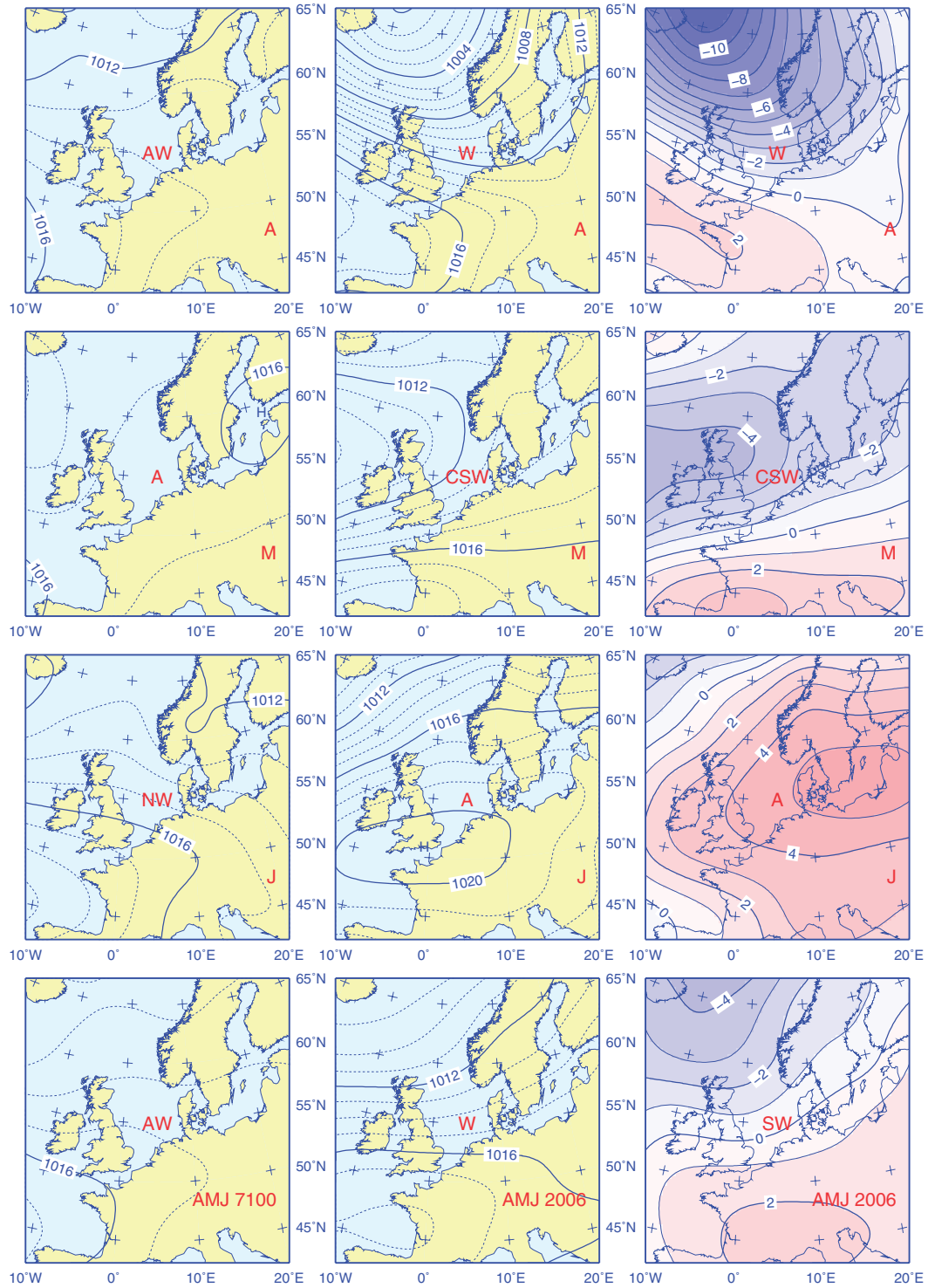


Abb. 2-14: Wie Abb. 2-13, jedoch für Frühling 2006.

Fig. 2-14: As Fig. 2-13, except for spring 2006.

2.4 Luftdruckverteilung

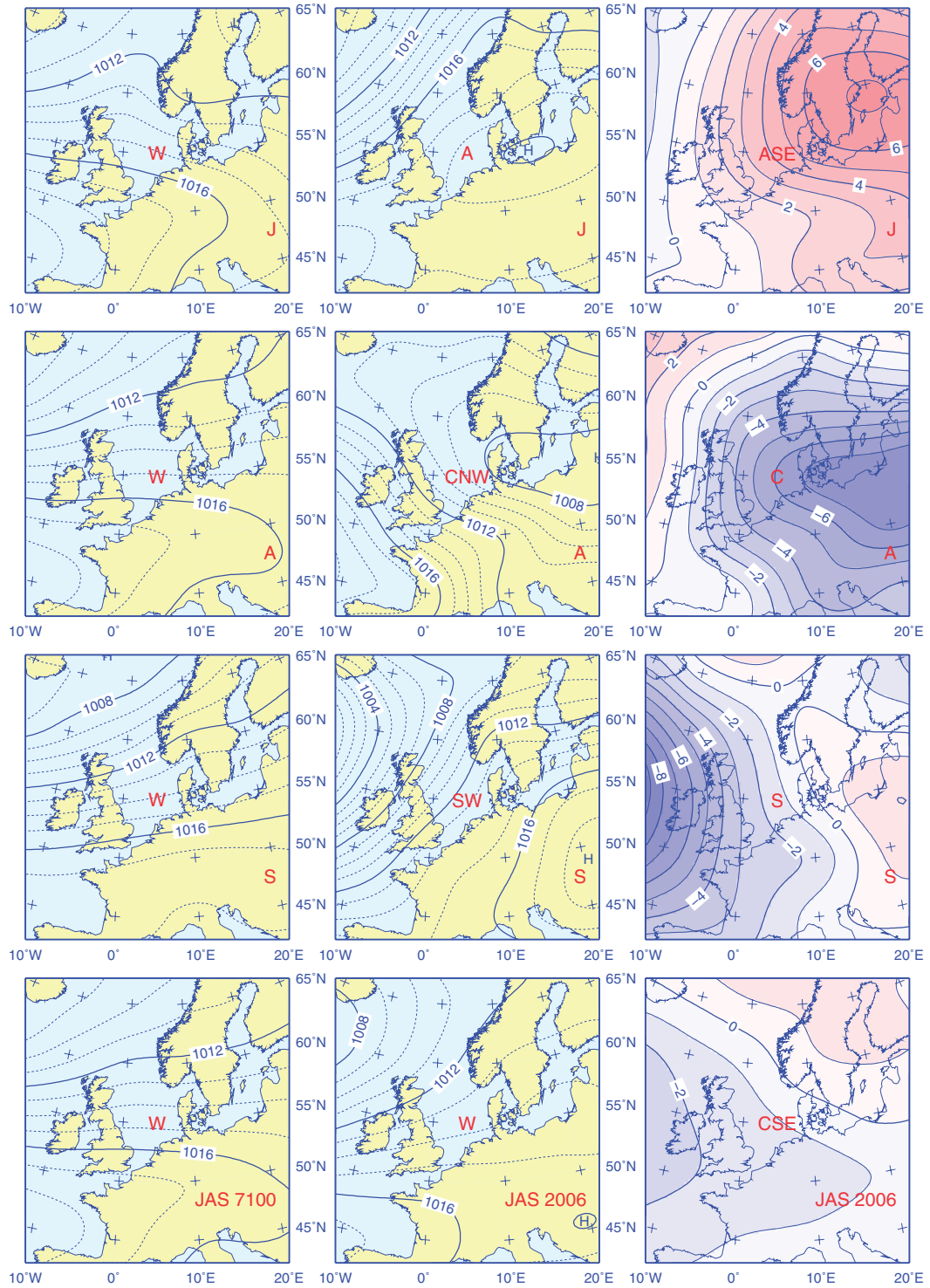


Abb. 2-15: Wie Abb. 2-13, jedoch für Sommer 2006.

Fig. 2-15: As Fig. 2-13, except for summer 2006.

2 Atmosphärenphysik

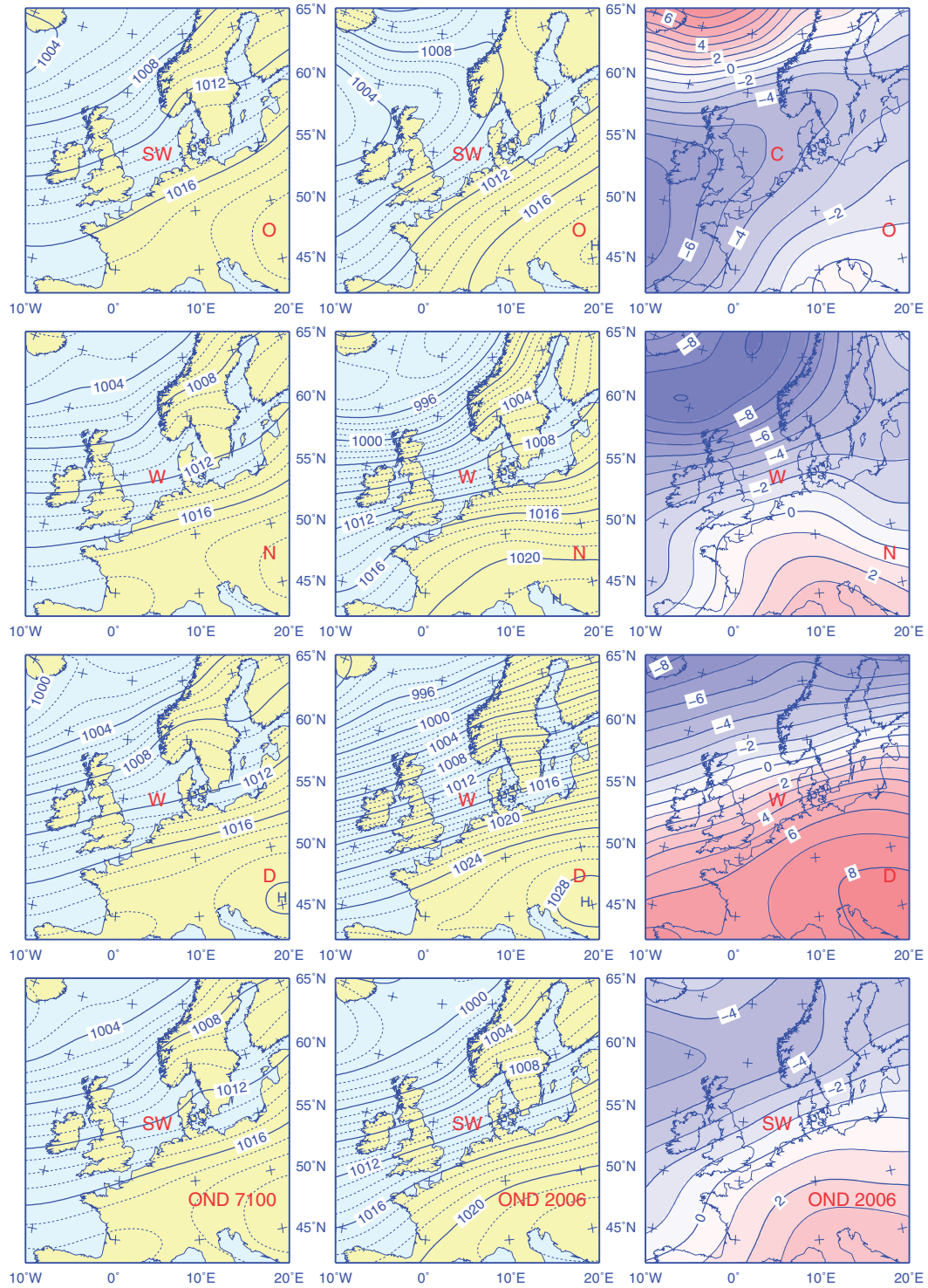


Abb. 2-16: Wie Abb. 2-13, jedoch für Herbst 2006.

Fig. 2-16: As Fig. 2-13, except for fall 2006.

2.4 Luftdruckverteilung

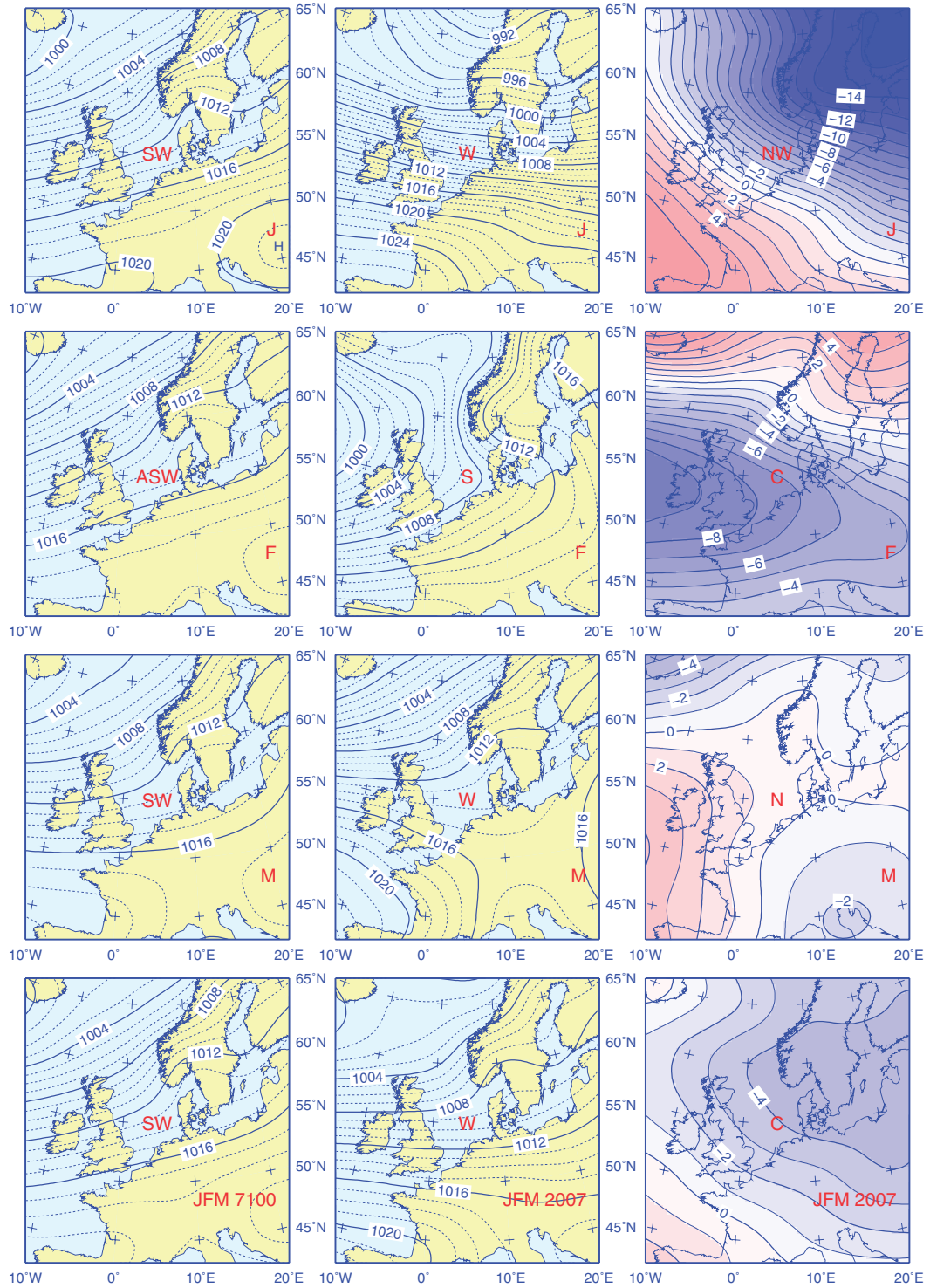


Abb. 2-17: Wie Abb. 2-13, jedoch für Winter 2007.

Fig. 2-17: As Fig. 2-13, except for winter 2007.

2 Atmosphärenphysik

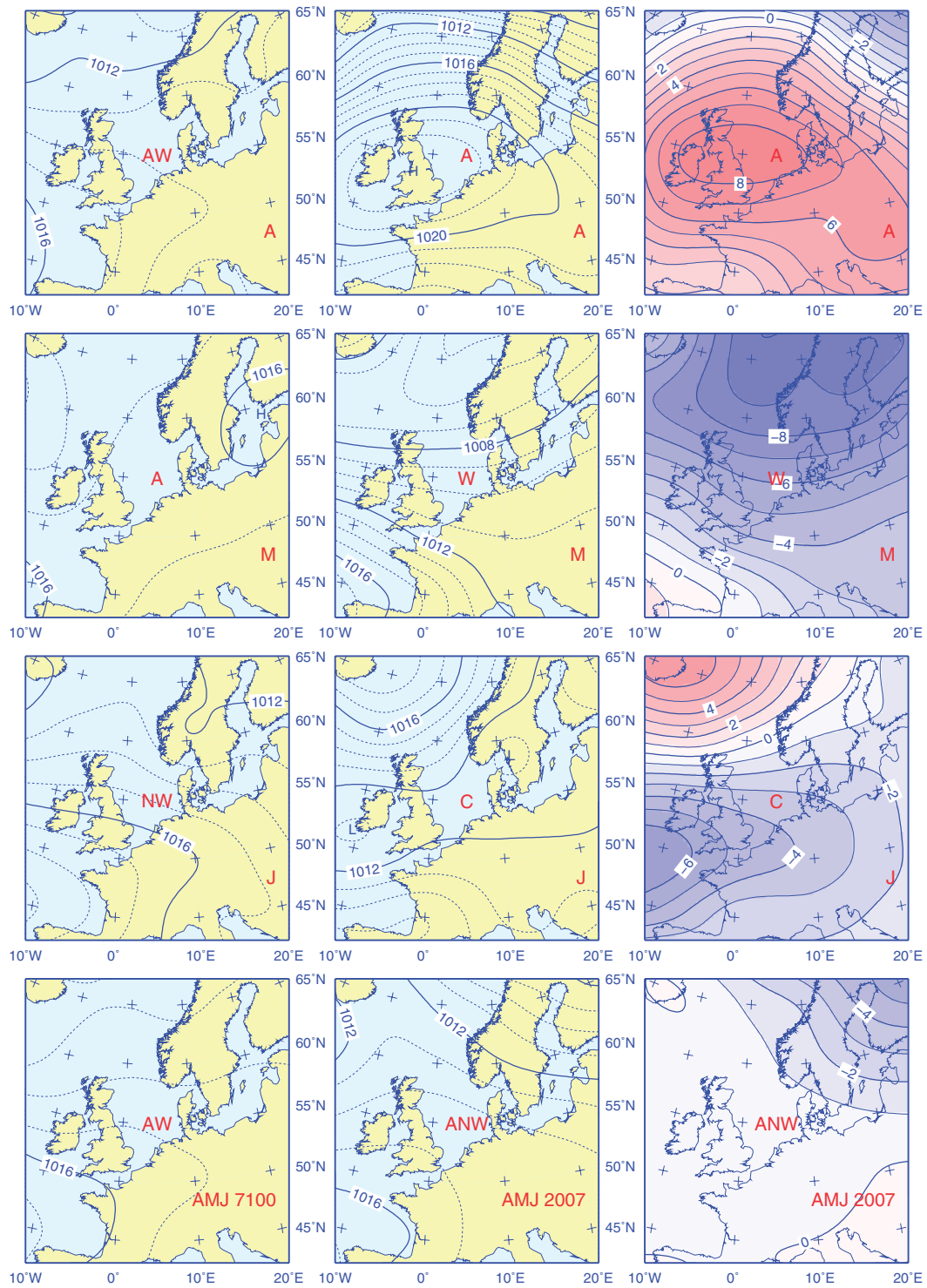


Abb. 2-18: Wie Abb. 2-13, jedoch für Frühling 2007.

Fig. 2-18: As Fig. 2-13, except for spring 2007.

2.4 Luftdruckverteilung

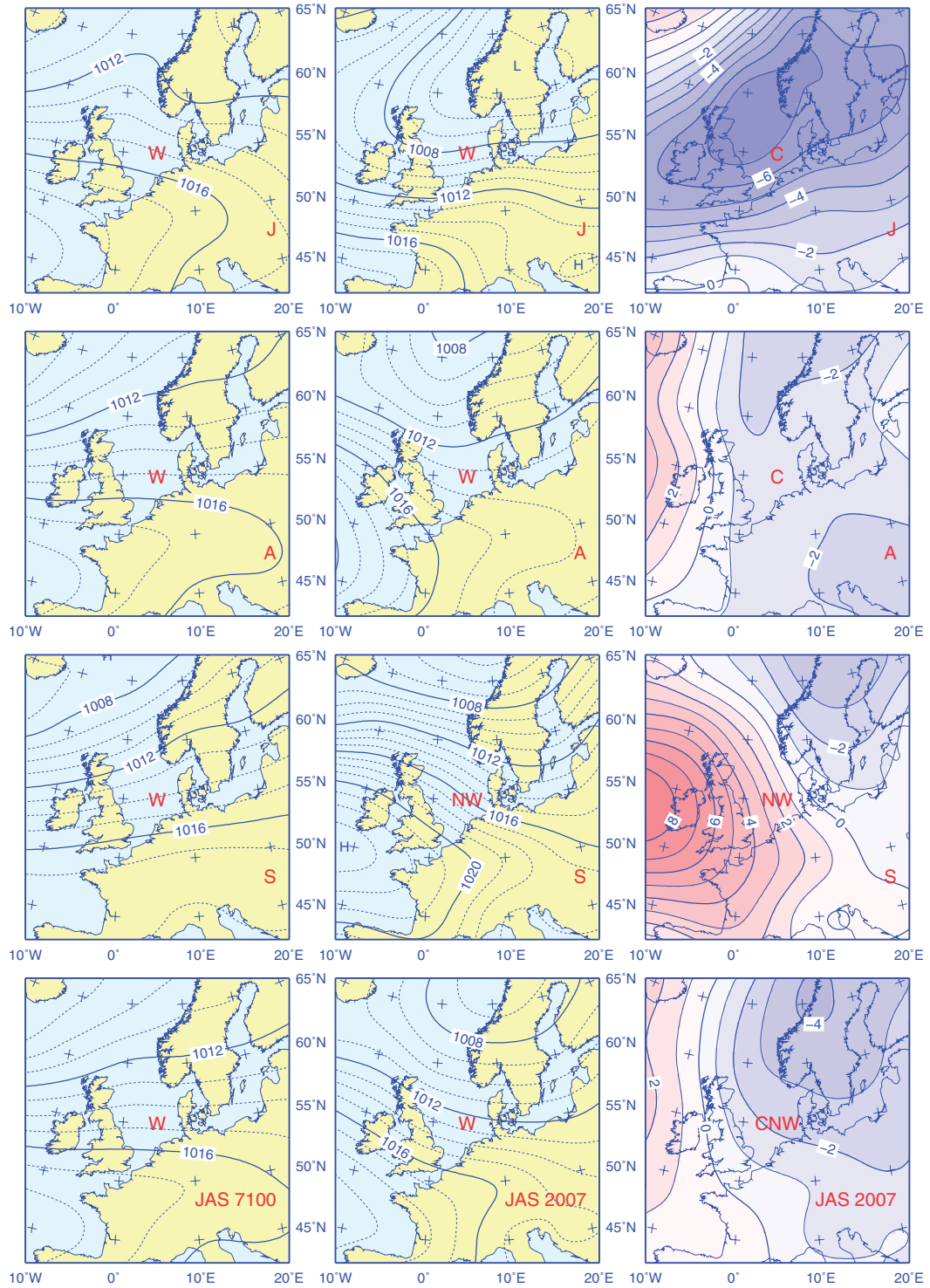


Abb. 2-19: Wie Abb. 2-13, jedoch für Sommer 2007.

Fig. 2-19: As Fig. 2-13, except for summer 2007.

2 Atmosphärenphysik

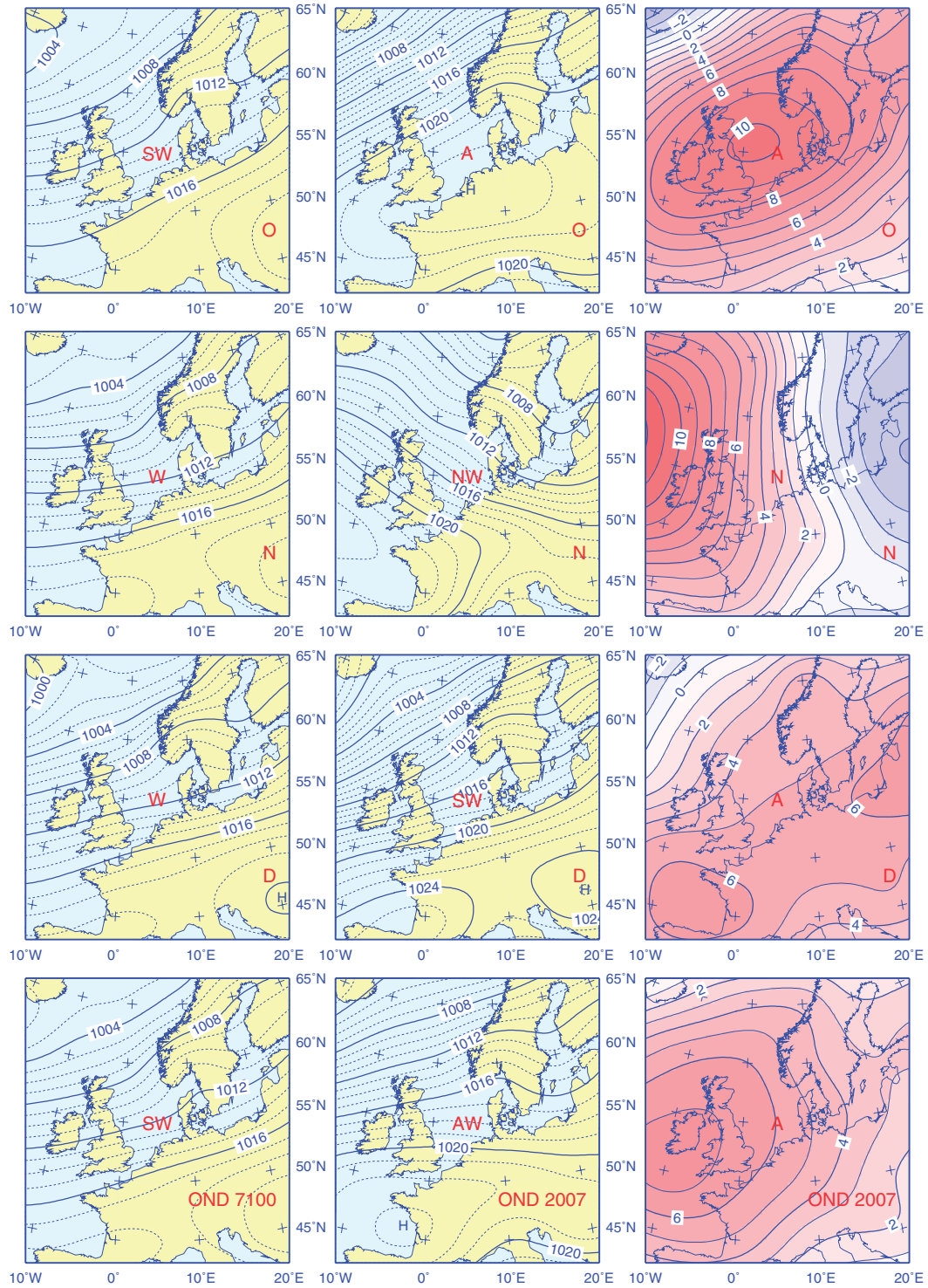


Abb. 2-20: Wie Abb. 2-13, jedoch für Herbst 2007.

Fig. 2-20: As Fig. 2-13, except for fall 2007.

2.5 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. 2-1, S. 41). Um einen Eindruck von der zwischenjährlichen Variabilität der Windverhältnisse zu geben, wird hier zunächst ein Vergleich des saisonalen Nordseewindes für die Jahre 2006 und 2007 geboten. Anschließend wird die zeitliche Entwicklung des vektoriiellen Nordseewindes anhand von virtuellen Trajektorien diskutiert.

2.5.1 Saisonale Vektorwinde

Abb. 2-21 zeigt saisonale Wahrscheinlichkeitsellipsen des täglichen vektoriiellen Nordseewindes für die Jahre 2006 und 2007, die unter der Annahme einer bivariaten Gauß-Verteilung konstruiert wurden. Für eine detaillierte Beschreibung des statistischen Verfahrens wird auf LOEWE ET AL. (2005) verwiesen.

WIND	u	s _u	v	s _v	V	V _{DIR}	VEL	PERS	FE ₅₀
2006	3.6	6.1	1.9	6.4	4.0	242|WSW	8.4	48	168
JFM	0.7	6.3	2.4	7.2	2.5	197|SSW	8.8	28	191
AMJ	3.2	5.0	0.6	5.6	3.2	260|W	7.3	44	122
JAS	2.0	4.1	0.8	4.7	2.1	249|WSW	5.8	37	84
OND	8.3	6.1	3.9	7.3	9.1	245|WSW	11.9	77	190
2007	4.2	6.9	0.0	6.3	4.2	270|W	8.9	47	188
JFM	6.0	9.3	1.3	7.5	6.1	258|WSW	12.2	50	299
AMJ	1.4	5.3	-0.8	4.2	1.6	299|WNW	6.2	25	96
JAS	4.4	5.1	-1.0	5.7	4.5	283|WNW	8.2	54	124
OND	5.0	6.3	0.5	7.0	5.0	265|W	9.1	55	190

Tab. 2-13: Nordseewindstatistik. Mittelwerte und Standardabweichungen (m/s) für zonale (u, s_u) und meridionale (v, s_v) Windkomponenten, Vektorwind und -richtung (V, V_{DIR}), skalarer Wind (VEL), Persistenz (V/VEL in %) und »Fläche« der 50%-Wahrscheinlichkeitsellipse ($FE_{50} = 1,3863 \pi s_a s_b$ in J/kg).

Table 2-13: North Sea Wind statistics. 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).

Im Zentrum der Ellipsen und in Richtung der großen Halbachse ist die jeweilige Jahreszeit angegeben (1 = JFM = Winter, 2 = AMJ = Frühling, etc.). Der aus den täglichen u- und v-Komponenten bestimmte mittlere Vektorwind ist vom Ellipsenzentrum zum Ursprung (0,0) gerichtet. Die Orientierung der Hauptachsen ist durch die Richtungen statistisch unabhängiger (unkorrelierter) Windkomponenten festgelegt. Die Länge der Ellipsenhalbachsen 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 entsprechen 1,1774 Standardabweichungen der zonalen (u) und meri-

dionalen (v) Windkomponenten. Winde außerhalb der Ellipsen sind durch Fadenkreuze gekennzeichnet und lassen sich über die Farbe den Jahreszeiten zuordnen. Zur Unterstützung der nachfolgenden Diskussion wurden einige statistische Kenngrößen des Nordseewindes in *Tab. 2-13* zusammengestellt.

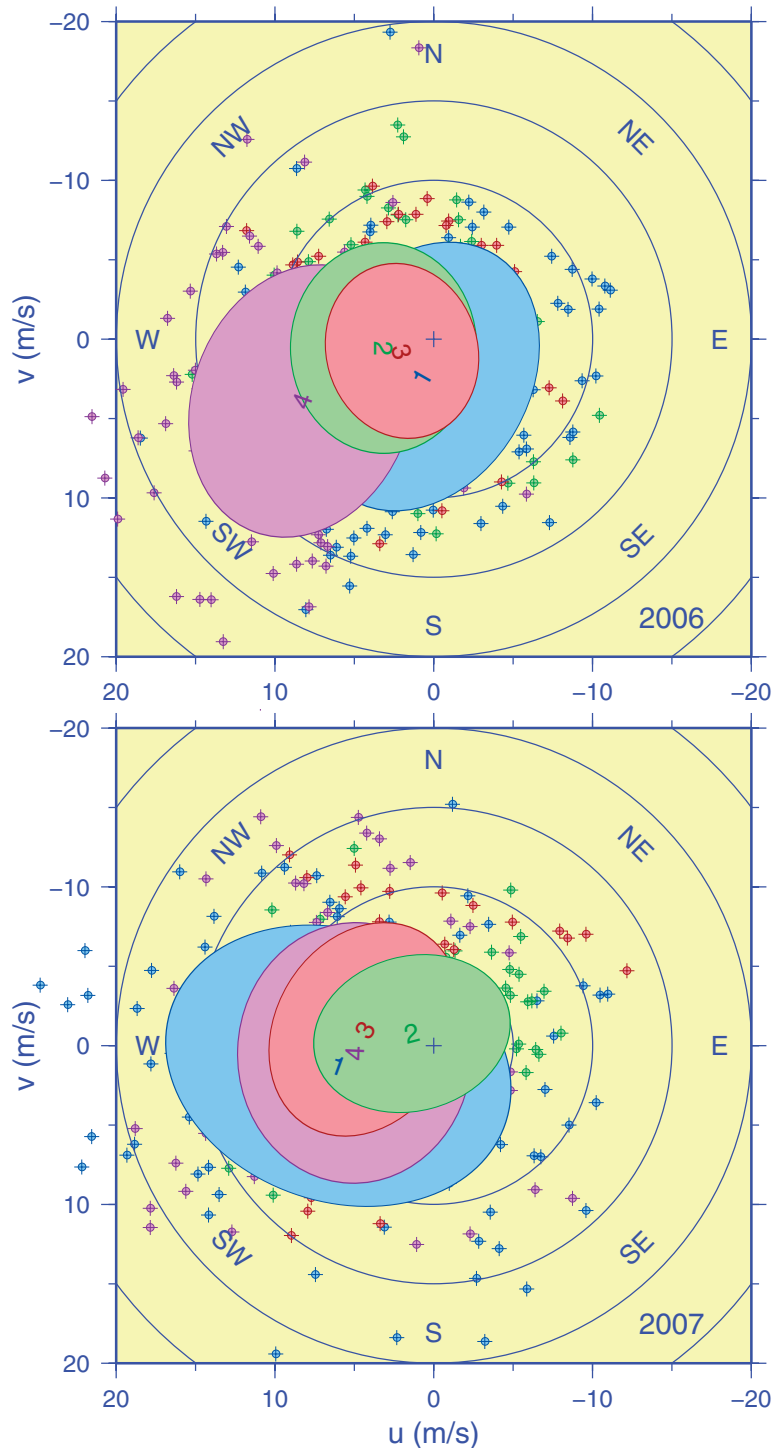


Abb. 2-21: Saisonale 50%-Wahrscheinlichkeitsellipsen des ›Nordseewindes‹ (1 = Winter = JFM, 2 = Frühling, etc.); oben: 2006, unten: 2007.

Fig. 2-21: Seasonal 50% probability ellipses for the ›North Sea Wind‹ (1 = winter = JFM, 2 = spring, etc.); top: 2006, bottom: 2007.

Die exzentrische Lage der Windellipsen im 2. und 3. Quadranten verdeutlicht (Abb. 2-21), was bereits im Rahmen der Verteilung der Zirkulationszustände (Abb. 2-2, S. 42) angesprochen wurde: die Nordsee befindet sich in der Breitenzone ostwärts wandernder Wellen und Wirbel. Diese bedingen eine Vorherrschaft von Winden aus der westlichen Hemisphäre, wie relative Häufigkeiten von 73/72 % (2006/2007) belegen. Die Vektorwindgeschwindigkeiten (V) sind von der zonalen Windkomponente (u) dominiert (Tab. 2-13), 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 entsprechende Mittelwerte des skalaren Windes (VEL) ausfallen. Die Richtungsstabilität oder Persistenz (V/VEL) liegt in der Größenordnung von 50 % und ist gewöhnlich im Frühjahr am geringsten, wenn auch der 1. (NE) und 4. (SE) Quadrant eine relativ hohe Zustandsdichte aufweisen (Abb. 2-21). Abweichend hiervon waren die Windverhältnisse im Frühjahr 2006 ungewöhnlich stabil, während sich im vorausgehenden Winter bei stark abgeschwächter Westzirkulation keine ausgesprochene Vorzugswindrichtung eingestellt hatte (Abb. 2-21, Tab. 2-13).

Die Zustandsdichte im SW-Quadranten ist übers Jahr von 43 % (2006) auf 35 % (2007) gefallen und lag damit fast gleichauf mit derjenigen im NW-Quadranten. Der SW-Quadrant ist gewöhnlich im Herbst und Winter deutlich stärker und in den verbleibenden Jahreszeiten etwa gleich stark besetzt wie der NW-Quadrant. Im Herbst 2006 lagen die jeweiligen Besetzungsdichten bei 59 % (SW) gegenüber 30 % (NW), was wesentlich zum Fortbestand der starken Warmanomalie des Sommers 2006 beigetragen hat (vgl. z. B. Abb. 2-27, S. 104). Im Winter 2007 waren beide Dichten mit 36 % gleich hoch, während sich im Frühjahr ein NW-Übergewicht einstellte (29 vs. 23 %), das sich im Sommer auf 47 vs. 35 % auswuchs und so zu einer Normalisierung der Temperaturverhältnisse im Nordseeraum führte.

Der Anteil von Starkwinden (Windstärken > 5 Bft oder 10 m/s, außerhalb Ring 2 in Abb. 2-21) lag im Herbst/Winter 2006/2007 mit 59/62 % erheblich über entsprechenden Werten für den Herbst 2007 (42 %) und den Winter 2006 (39 %). Im Frühjahr und Sommer treten Starkwindereignisse naturgemäß wesentlich seltener ein. Mit 26 und 10 % verhielten sich die Häufigkeiten solcher Ereignisse 2006 annähernd invers zu denen in den entsprechenden Jahreszeiten des Jahres 2007 (13 und 30 %); dabei begünstigten die schwachwindigen Verhältnisse im Frühjahr 2007 den Fortbestand der bereits erwähnten Warmanomalie, während entgegengesetzte Bedingungen im anschließenden Sommer zu deren Auflösung beitrugen. Übers Jahr ergab sich eine geringe Zunahme von Starkwinden von 33 auf 37 %. Starkwinde im NE- und SE-Quadranten blieben mit insgesamt 17/20 Ereignissen oder 5 % in beiden Jahren selten.

Die Windverhältnisse im Jahr 2006 waren auf den betrachteten Zeitskalen gegenüber denen des Jahres 2007 merklich meridional geprägt. Dieser Umstand ist unmittelbar ersichtlich aus in Relation zur Zonalkomponente durchweg hohen, im Winter 2006 (SSW) sogar dominanten Südkomponenten des Vektorwindes (Tab. 2-13). Der resultierende Wind kam 2006 aus WSW und war mit 4,0 m/s etwa gleich stark wie der reine Zonalwind (W , 4,2 m/s) im Jahr 2007. Die insgesamt dennoch geringe Schwankungsbreite der saisonalen Windrichtungen ($V_{DIR} = 266 \pm 19^\circ$, ohne Winter 2006) täuscht über eine immerhin aus der geringen Richtungsstabilität (PERS) ersichtliche hohe intrasaisonale Variabilität hinweg, der im folgenden Kapitel nachgegangen wird.

2.5.2 Zeitliche Entwicklung

Die zeitliche Entwicklung des Nordseewindes lässt sich in einem progressiven Vektordiagramm gut veranschaulichen. *Abb. 2-22* zeigt virtuelle Trajektorien für die Jahre 2006 und 2007 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. 2-22* tatsächlich die Dimension einer Länge haben. Die virtuellen Trajektorien lassen sich demnach als scheinbare Versetzungen auffassen, wobei eine Einheit von $1 \text{ m/s} \times \text{Tag}$ einer Distanz von $86,4 \text{ km}$ entspricht.

Die Zeitmarken 1, 2, 3, ..., O, N, D bezeichnen die Monatsanfänge (Januar, Februar, etc.). Der (geradlinige) Abstand zwischen zwei konsekutiven Zeitmarken dividiert durch die Monatslänge in Tagen liefert den monatlichen Vektorwind in m/s . Die scheinbare Nettoversetzung von $35\,505 \text{ km}$ im Januar 2007 beispielsweise entspricht einer Windstärke von $13,3 \text{ m/s}$ aus W (276°), während sich aus der Bruttoversetzung (Weglänge entlang der Trajektorie) von $41\,158 \text{ km}$ eine mittlere Windgeschwindigkeit (VEL) von $15,4 \text{ m/s}$ oder 7 Bft (»steifer Wind«) ergibt. Grundverschiedene Verhältnisse herrschten im Januar 2006 mit einem Vektorwind von $4,9 \text{ m/s}$ ($13\,136 \text{ km}$) aus SSW (200°) und einer mittleren Geschwindigkeit von $9,0 \text{ m/s}$ ($24\,069 \text{ km}$) bzw. 5 Bft (»frische Brise«). Eine Übersicht der monatlichen Windverhältnisse in beiden Jahren bietet *Tab. 2-14, S. 90*.

Die Nettoversetzung im Jahr 2006/2007 entspricht einem mittleren Vektorwind von $4,0/4,2 \text{ m/s}$ aus WSW/W ($242/270^\circ$) und Rang 24/26 im Gesamtensemble (37), welches den Wertebereich von $1,7$ (1996) bis $5,7 \text{ m/s}$ (1990) abdeckt. Beide Trajektorien enden abseits bzw. Richtung N/SE vom klimatologischen »Schwerpunkt« ($3,5 \text{ m/s}$, 253° , *Abb. 2-22*). Das Jahresmittel der skalaren Windgeschwindigkeit lag im Jahr 2006/2007 bei $8,4/8,9 \text{ m/s}$ und nahm Rang 12/29 im Gesamtensemble ein. Die geringste Windgeschwindigkeit trat mit $7,7 \text{ m/s}$ 1987 auf, die höchste mit $9,7 \text{ m/s}$ 1990.

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 Endpunkt 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. 2-22*). Wie für die jährlichen Trajektorien lassen sich mittlere Vektorwinde aus den (geradlinigen) Abständen zwischen beliebigen Zeitmarken ableiten. Während sich jedoch für jene aus der Bruttoversetzung auch die mittlere Windgeschwindigkeit ergibt, trifft dies für die klimatologische Trajektorie nicht zu¹.

Die klimatologische Trajektorie bietet eine kompakte Zusammenschau der jahreszeitlichen Veränderungen der atmosphärischen Aktionszentren (Islandtief und Azoren-

1. Bei einer Gesamtlänge von $1439 \text{ m/s} \times \text{Tag}$ ergäbe sich beispielsweise im Jahresmittel eine Windgeschwindigkeit von nur $3,9 \text{ m/s}$, welche die aus dem 30-jährigen Mittel der Weglängen der Einzeltrajektorien berechnete korrekte Geschwindigkeit von $8,6 \text{ m/s}$ 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 auf eine Länge von $3151 \text{ m/s} \times \text{Tag}$ (schwarz in *Abb. 2-22*), die zur korrekten mittleren Windgeschwindigkeit passt.

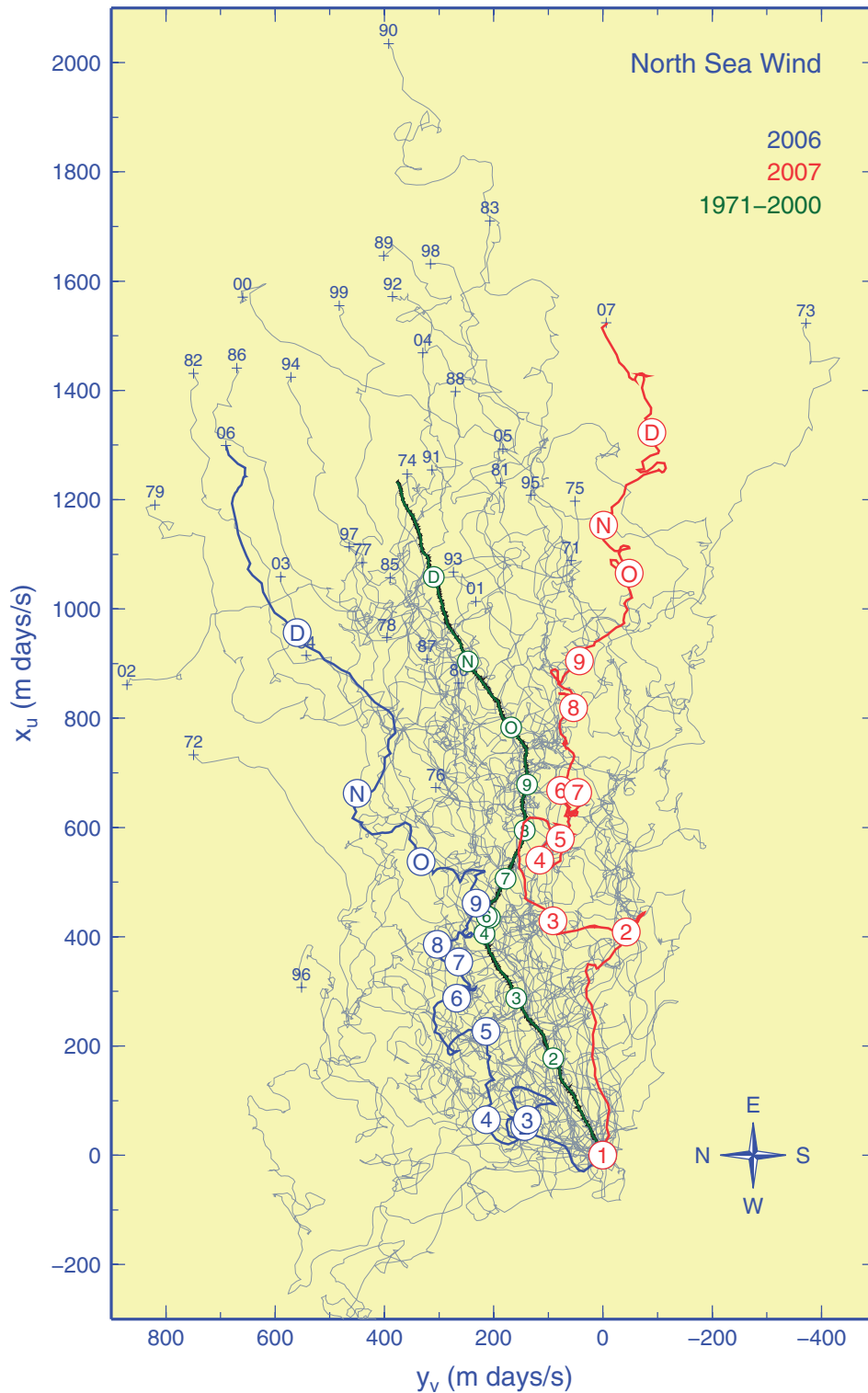


Abb. 2-22: Virtuelle Trajektorie des ›Nordseewindes‹ mit Ensemble und Klimatologie. Zeitmarken kennzeichnen Monatsanfänge, Jahreszahlen die Endpunkte der Ensemblemitglieder.

Fig. 2-22: 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.

hoch) im Nordatlantik. Die Variationen bzgl. Lage und Intensität dieser quasipermanenten Druckgebilde, die sich im Verlauf der Trajektorie spiegeln, wurden bereits im Rahmen der Diskussion der klimatologischen Luftdruckverteilungen erörtert (vgl.

5.73). 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 2006 oder 2007 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 allenfalls im Juni 2006 sowie im Frühjahr (AMJ), August und Dezember 2007 zu.

WIND	2006: VDIR	V	VEL	PERS	2007: VDIR	V	VEL	PERS
JAN	200|SSW	4.9	9.0	55	276|W	13.3	15.4	86
FEB	290|WNW	0.5	9.2	5	189|S	4.9	9.8	49
MAR	180|S	2.4	8.2	29	258|WSW	3.7	11.3	32
APR	270|W	5.4	8.0	68	314|NW	1.8	7.0	26
MAY	228|SW	2.6	8.5	31	270|W	2.9	6.6	44
JUN	273|W	2.2	5.5	41	187|S	1.0	4.9	21
JUL	220|SW	1.6	3.8	43	267|W	5.0	7.3	69
AUG	313|NW	3.3	5.8	57	277|W	2.8	7.4	38
SEP	217|SW	4.2	7.7	55	299|WNW	6.1	10.1	61
OCT	227|SW	5.5	8.4	65	242|WSW	3.2	6.1	52
NOV	249|WSW	10.5	14.1	74	298|WNW	6.4	11.3	56
DEC	249|WSW	11.8	13.2	90	247|WSW	7.0	9.8	72

Tab. 2-14: Nordseewind. Monatsstatistik: Windrichtung, vektorielle (V) und skalare (VEL) Windgeschwindigkeit (m/s) und Persistenz (V/VEL in %).

Table 2-14: North Sea Wind. Monthly statistics: Wind direction, vector (V) and scalar (VEL) wind speed (m/s) and persistence (V/VEL in %).

Zu den gravierendsten Abweichungen von der Klimatologie zählt die klar abgeschwächte Zonalzirkulation im Winter 2006. Während im Januar noch recht stabile, fast S-liche Winde vorherrschten, waren die Windrichtungen vor allem im Februar bei einer Persistenz von 5% extrem variabel, so dass der Vektorwind von 4,9 auf 0,5 m/s abfiel, während die monatlichen skalaren Geschwindigkeiten bei 8 – 9 m/s stagnierten – und das bis einschließlich Mai (Tab. 2-14). Erst im April stellte sich eine für diesen Monat untypische, persistente (68%) und kräftige Westströmung ein (Abb. 2-22). Wie auch dem Wetterlagenkalender zu entnehmen ist (Tab. 2-1, S. 44), waren Juni und Juli durch schwachwindiges Hochdruckwetter geprägt, welches eine europaweite Hitzewelle (Kap. 2.7, S. 102) und einen rasanten Anstieg der Nordseetemperaturen verursachte (Kap. 3.5, S. 142); der skalare Wind fiel im Juli auf ein Jahresminimum von 3,8 m/s (»schwache Brise«). Zyklonales, wolkenreiches, wechselhaftes Wetter führte im August kühle Meeresluft aus NW heran, so dass die Lufttemperaturen (z. B. auf Norderney) im Unterschied zu den träger ansprechenden Meerwassertemperaturen deutlich einbrachen.

Im September setzte eine SW-Anströmung ein, die unter allmählicher Drehung auf W bis einschließlich Januar 2007 andauerte, dabei aber ständig an Intensität und Stabilität zulegte: die vektoriellen/skalaren Windstärken kletterten von 4,2/7,7 m/s (55%) über 11,8/13,2 m/s (90%) im Dezember auf 13,3/15,4 m/s (86%) im Januar (Tab. 2-14). Diese Phase, die sich hinsichtlich des außerordentlich hohen Sturmauftommens bis zum Ende des Winters fortsetzte, führte zu dauerhaft überhöhten Lufttemperaturen und zur Persistenz der im Juli 2006 entstandenen extremen Warmanomalie der Nordsee. An dieser Situation änderte sich auch im Frühjahr 2007 nichts, das sich durch wenig stabile Windverhältnisse von lediglich 25% auszeichnete; das schwachwindige und strahlungsintensive Hochdruckwetter im April (Abb. 2-18, S. 82) verursachte sogar eine Verstärkung der Nordseewarmanomalie, die erst infolge der ständigen zyklonalen Störungen im Juli deutlich an Intensität verlor. Auch der September zeichnete sich durch recht hohe und stabile Winde aus, die zudem – und ähnlich wie im November – abweichend von der Klimatologie und den Verhältnissen im Jahr zuvor eine starke Nordkomponente aufwiesen. Der Oktober war aufgrund stationären Hochdruckwetters (Abb. 2-5, S. 53) uncharakteristisch windschwach, während sich die Windverhältnisse im Dezember 2007 wenig von den klimatologischen unterscheiden (Abb. 2-22).

2.6 Sturm

Wie bereits weiter oben erläutert (*Kap. 2.3.1, S. 40*), beruht die Klassifizierung der Wetterlagen im Nordseeraum auf einfachen Relationen zwischen Vorticity- und Windindex, wobei letztere sich unter Ausnutzung der geostrophischen Beziehung aus räumlichen Ableitungen des Luftdruckfeldes im Meeresniveau ergeben (vgl. LOEWE ET AL. 2005). Diese Indexpaare wurden von JENKINSON UND COLLISON (1977) in einer Ellipsengleichung kombiniert

$$G^* = (V^{*2} + \frac{1}{4} \zeta^{*2})^{1/2},$$

die den Sturmindex G^* definiert. Wind-Vorticity-Zustände werden sodann als Sturm (G), schwerer Sturm (SG) oder sehr schwerer Sturm (VSG) diagnostiziert, wenn der Sturmindex bestimmte Schwellwerte überschreitet (vgl. *Abb. 2-2, S. 42*). Die hier bislang verwendeten Schwellwerte wurden auf der Grundlage des UKMO MSLP-Datensatzes bestimmt und mit 30, 40 und 50 hPa angegeben (JENKINSON UND COLLISON 1977).

Die Umstellung der Quelldaten auf MSLP-Felder der »NCEP/NCAR Reanalysis I (1948-present)« (KALNAY ET AL. 1996) erfordert aus den in *Kap. 2.2, S. 39* niedergelegten Gründen eine Anpassung der Schwellwerte, die nachfolgend dokumentiert wird. Im Anschluss werden Sturmkataloge für den Zeitraum 1948 – 2010 präsentiert und die Sturmjahre 2005/06 sowie 2006/07 statistisch eingeordnet.

2.6.1 Schwellwerte

Die grundsätzliche Vorgehensweise besteht darin, die zu den bisherigen Schwellwerten gehörigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten der G^* -Verteilung des UKMO-Datensatzes zu bestimmen und daran anschließend und umgekehrt, die zu diesen Wahrscheinlichkeiten gehörigen Schwellwerte der G^* -Verteilung des NCEP-Datensatzes zu ermitteln. Den dazu abzuschätzenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen liegen jeweils 10958 tägliche Sturmindices des Zeitraums 1971 – 2000 zugrunde.

Auf Basis empirischer kumulativer Verteilungen (eCDF) für beide Datensätze wurden zunächst die Prozentsätze des Sturmindex bestimmt, welche die Jenkinson-Collison Sturmquantile überschreiten (*Tab. 2-15, S. 94*). Die relativen Abweichungen der Überschreitungswahrscheinlichkeiten NCEP/UKMO – 1, die sich für die Sturmklassen insgesamt auf –27% und individuell auf –25 (G), –29 (SG) und –81% (VSG) belaufen, belegen die erhebliche Unterschätzung aller Sturmklassen für den NCEP-Datensatz, wenn eine Anpassung der Schwellwerte unterbleibt (*Abb. 2-23, S. 93*).

Wegen des geringen Unterschieds zwischen berechneten und »runden« Überschreitungswahrscheinlichkeiten wurden solche in Zeile 3 der *Tab. 2-15* zur Ableitung neuer Sturmschwellwerte festgelegt. Die Geringfügigkeit dieser Modifizierung zeigt sich durch Vergleich der zugehörigen empirischen mit den originären Schwellwerten (Zeile 4 vs. 1, nur UKMO). Abkürzend könnten zur täglichen Sturmidentifizierung mittels der elliptischen G^* -Beziehung (s.o.) die entsprechenden Schwellwerte der empirischen NCEP-Verteilung herangezogen werden, durch die die Sturmklassen G, SG und VSG den Überschreitungsintervallen (0,1, 0,02], (0,02, 1/365] , (1/365, 0] zugeordnet sind.

Für eine kompakte parametrische Beschreibung beider Datensätze wurden versuchsweise Gamma-Verteilungen angepasst, deren Form- (a), Skalierungsparameter (b)

und Verlauf Abb. 2-24, S. 95 zu entnehmen sind. Die Gammaverteilung stellt über weite G^* -Bereiche eine brauchbare theoretische Approximation der eCDF dar, führt aber insbesondere im NCEP-Fall zu einer Überschätzung der empirischen Sturmquantile (s. a. Tab. 2-15).

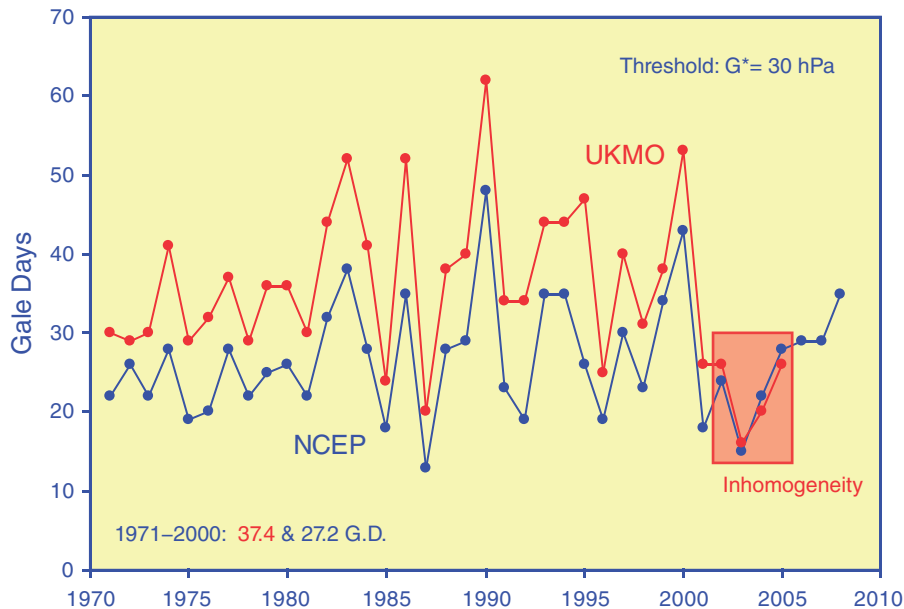


Abb. 2-23: UKMO vs. NCEP: Gesamtanzahl jährlicher Sturmtage für einen Schwellwert G^* von 30 hPa. Die Mittelung der SLP-Daten über 4 Tagetermine im NCEP-Fall verursacht eine systematische Unterschätzung von Stürmen um -27% gegenüber UKMO (nur 0Z-Termin). Das Verschwinden des Offset ab 2002 weist auf eine Inhomogenität der UKMO-Daten hin.

Fig. 2-23: UKMO vs. NCEP: Total number of annual gale days for threshold $G^* = 30$ hPa. The systematic offset of -27% in NCEP storm frequency vanishes after 2001 thus disclosing an inhomogeneity in the UKMO dataset. The offset results from the fact that NCEP-SLPs are daily means of 4 states (0, 6, 12 & 18Z), while UKMO-SLPs reflect the state at 0Z, only.

Eine verbesserte Schätzung der Sturmquantile wurde mittels des sog. ›Peak-Over-Threshold‹ Verfahrens (POT, SIMIU UND HECKERT 1996, PALUTIKOF ET AL. 1999) durch Anpassung der Verallgemeinerten Paretoverteilung (GPD) an den rechten Verteilungsschwanz – hier die höchsten 15% der G^* -Daten – erreicht. Der recht hohe Prozentsatz mit zugehörigen Überschreitungsquantilen $\theta = 27,2$ (UKMO) bzw. 25,9 hPa (NCEP) ist dabei der Notwendigkeit geschuldet, diesen oberhalb der Überschreitungswahrscheinlichkeiten für die abzuschätzenden Sturmschwellwerte anzusetzen (Abb. 2-24, S. 95). Außer durch den den Definitionsbereich einschränkenden Parameter θ ist die GPD (wie die Gammaverteilung, die zum Anziehungsbereich der Gumbelverteilung gehört) durch einen Skalierungs- (σ) und Formparameter (k) definiert. Als sog. Schwanzindex charakterisiert k die Natur des Schwanzverhaltens der in der GPD vereinigten drei Verteilungsfamilien, nämlich neben den Exponentialverteilungen ($k = 0$) die flacher abfallenden, schwertschwänzigen Pareto- ($k < 0$) und die steiler abfallenden Pareto-Typ-2-Verteilungen ($k > 0$). Diese korrespondieren in der angegebenen Reihenfolge und unter geeigneten Voraussetzungen (HOSKING UND WALLIS 1987) mit den Fisher-Tippett Typen I bis III der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV, JENKINSON 1955), die als Gumbel-, Frechet-, und negative (am Lageparameter gespiegelte) Weibullverteilungen bekannt sind.

THRESHOLDS	UKMO			NCEP		
G*(JC77)	30	40	50	30	40	50
1-ECDF	0.1024	0.0163	0.0026	0.0745	0.0102	0.0005
1-CDF	1/10	1/50	1/365	1/10	1/50	1/365
G*(ECDF)	30.1	39.0	49.8	28.3	36.4	45.0
G*(GAMMA)	30.1	40.2	51.5	28.4	37.8	48.1
G*(GPD)	29.9	39.7	49.9	28.3	36.6	44.6

Tab. 2-15: Überschreitungswahrscheinlichkeiten der empirischen kumulativen Verteilung (Reihe 2) für originäre Jenkinson-Collision Sturmschwellwerte (R. 1) und Sturmschwellwerte (R. 4 bis 6) für »runde« Überschreitungswahrscheinlichkeiten (R. 3) verschiedener Verteilungen.

Table 2-15: Excess probabilities of the empirical cumulative distribution function (row 2) for Jenkinson-Collision gale thresholds (row 1) and gale thresholds (row 4 – 6) for »trimmed« excess probabilities (row 3) of various distributions.

RET. PERIOD T [YR]	UKMO			NCEP		
	G* [hPa]	V [m/s]	|ζ| [RPD]	G* [hPa]	V [m/s]	|ζ| [RPD]
10/365	29.9	18.6	0.45	28.3	17.5	0.43
50/365	39.7	24.6	0.60	36.6	22.7	0.55
1	49.9	30.9	0.75	44.6	27.7	0.67
10	59.6	37.0	0.90	51.5	31.9	0.78
30	63.6	39.4	0.96	54.0	33.5	0.82
50	65.3	40.5	0.99	55.1	34.2	0.83
100	67.6	41.9	1.02	56.4	35.0	0.85
1.E99	101.8	63.1	1.54	69.2	42.9	1.05

Tab. 2-16: Wiederkehrzeiten für Stürme der Mindeststärke G* aufgrund der GPD. V und ζ sind zugehörige, durch die Halbachsen der Sturmellipsen (G* = b* = a*/2) festgelegte, maximale Windgeschwindigkeiten und Wirbelstärken (rpd = Umdrehungen/Tag). Die NCEP-Schwellwerte für Sturm (G), schweren (SG) und sehr schweren Sturm (VSG) sind fett gedruckt. Aufgrund der positiven Formparameter der GPDs sind Stürme oberhalb der in der letzten Zeile angegebenen Stärke nicht möglich.

Table 2-16: Return periods for storms of minimum severity G* due to the GPD. V and ζ are associated maximum windspeeds and vorticities (rpd = revolutions per day) as given by the half-axes of the storm ellipses (G* = b* = a*/2). NCEP-thresholds for gales (G), severe gales (SG), and very severe gales (VSG) are in bold print. Severities beyond those of the last row are impossible on account of the GPD's positive shape parameters.

Die GPD-Verteilungsfunktion ist gegeben durch

$$F(G^*; k, \sigma, \theta) = \begin{cases} 1 - [1 - (k/\sigma)(G^* - \theta)]^{1/k} & \text{für } k \neq 0 \\ 1 - \exp[-(G^* - \theta)/\sigma] & \text{für } k = 0 \end{cases}$$

wobei für $k \leq 0$ der Wertebereich von G^* mit $[\theta, \infty)$ rechtsseitig unbeschränkt ist, während für $k > 0$ eine obere Schranke bei $\theta + \sigma/k$ existiert. Die mit der ML-Methode durchgeführte Parameteranpassung liefert sowohl für die UKMO-, als auch die NCEP-Daten eine Pareto-Typ-2-Verteilung ($k > 0$, Abb. 2-24). Dieses Ergebnis erscheint physikalisch plausibel, da beliebig hohe Geschwindigkeiten und Wirbelstärken schwer vorstellbar sind (SIMIU UND HECKERT 1996).

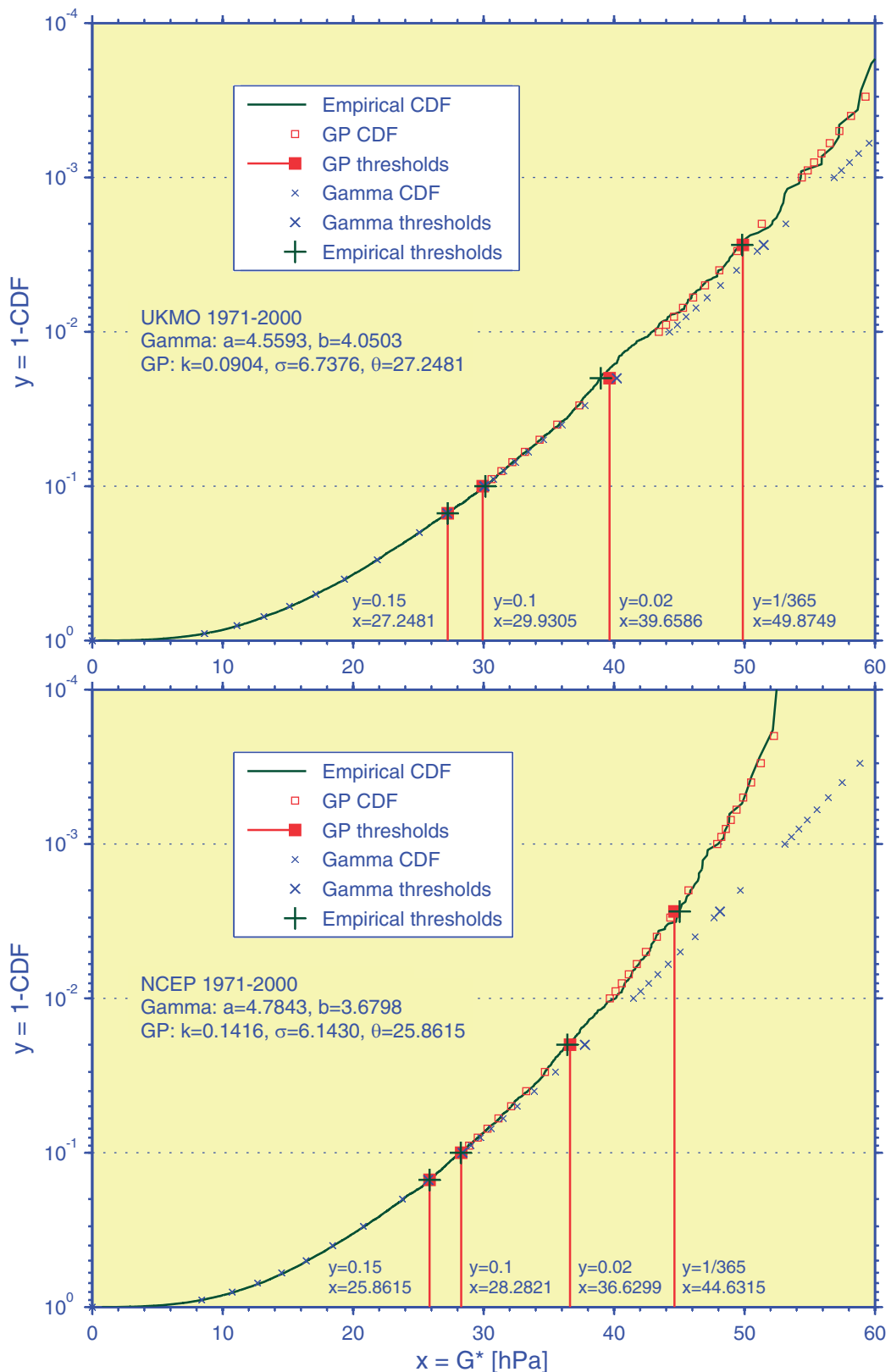


Abb. 2-24: Sturmquantile für feste Überschreitungswahrscheinlichkeiten ($1 - \text{CDF}$) aufgrund der empirischen, der Gamma- und der Verallgemeinerten Pareto-Verteilung (GPD) für den Sturmindex G^* im Zeitraum 1971 – 2000. Oben: UKMO, unten: NCEP.

Fig. 2-24: Gale quantiles for fixed exceedance probabilities ($1 - \text{CDF}$) due to the empirical, the Gamma-, and the Generalized Pareto Distribution (GPD) for the gale index G^* during 1971 – 2000. Top: UKMO, bottom: NCEP.

Invertierung der Verteilungsfunktion liefert den zugehörigen Quantilschätzer

$$G^*(F) = \theta + (\sigma/k) [1 - (1 - F)^k],$$

bei dessen Auswertung für $1 - F$ nicht die in Zeile 3 der *Tab. 2-15* angegebenen Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Gesamtverteilung anzusetzen sind, sondern auf die Exzessverteilung bezogene Überschreitungswahrscheinlichkeiten, die sich aus den angegebenen nach Division durch 0,15 ergeben.

Schließlich lassen sich die Sturmquantile (oder extremere, bisher nicht aufgetretene Sturmstärken) auch als Wiederkehrwerte in Abhängigkeit von mittleren Wiederkehr- oder Wartezeiten angeben. Bei einer durchschnittlichen Anzahl von ω ($= 0,15 \times 365$) Überschreitungen pro Jahr ergibt sich für nur eine Überschreitung in T Jahren eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von $(\omega T)^{-1}$, so dass

$$G^*(T) = \theta + (\sigma/k) [1 - (\omega T)^{-k}].$$

Eine Auswertung dieser Beziehung bietet *Tab. 2-16, S. 94*.

Es macht Sinn, zu betonen, dass die angegebenen mittleren Wartezeiten T bis zum Eintritt des nächsten Sturmereignisses der Mindeststärke G^* (Wiederkehrwert) keineswegs beinhalten, dass dieses Ereignis mit Ablauf von T oder überhaupt innerhalb von T eintritt (WILKS 2011). Beispielsweise kann sich ein Jahrhundertsturm in jedem beliebigen Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 1/T = 1/100$ ereignen. Dieses Ereignis innerhalb irgendeiner Sequenz von n Jahren aufzufinden bzw. anzutreffen, lässt sich als Bernoulli-Versuchsreihe auffassen, deren Erfolgswahrscheinlichkeit sich aus der Geometrischen Verteilung für n Versuche zu $1 - (1 - p)^n$ ergibt (z.B. WIGLEY 2009). Die Wahrscheinlichkeit für das Nichteintreffen eines Jahrhundertsturms innerhalb einer 100-jährigen Zeitspanne ist demnach immerhin 0,37 und somit gleich groß wie seine Eintrittswahrscheinlichkeit innerhalb von nur $n = 46$ Jahren. Für $n = 300$ und 5 reduzieren sich diese Aussichten auf 0,05, was die Breite der Wartezeitverteilung weiter unterstreicht.

Die in *Tab. 2-16* angegebenen maximalen Windgeschwindigkeiten und Wirbelstärken entsprechen den Halbachsen der Sturmellipsen (*Abb. 2-2, S. 42*), die aus $b^* = V^* = G^*$ und $a^* = \zeta^* = 2G^*$ nach Multiplikation mit 0,62 bzw. 2,72/360 folgen, wenn der jeweils andere Index verschwindet (LOEWE 2009). Die Mindeststurmstärke G^* ist also durch beliebige Indexpaare ($V^*[0, b^*]$, $\zeta^*[-a^*, a^*]$) realisierbar, sofern diese die Ellipsengleichung erfüllen.

2.6.2 Sturmkataloge

Zur Identifizierung und Klassifizierung von Sturmtagen für die Wetterlagenkalender (*Tab. 2-1, S. 44 & Tab. 2-3, S. 45*), aber auch für die hier präsentierten monatlichen, saisonalen und jährlichen Sturmstatistiken wurden im vorigen Abschnitt für die SLP-Reanalysen des NCEP auf Basis einer Pareto-Typ-2 Exzessverteilung für den Sturmindex G^* neue Schwellwerte festgelegt. Diese Schwellwerte sind den Überschreitungswahrscheinlichkeiten 0,1, 0,02 und 1/365 der G^* -Gesamtverteilung im Zeitraum 1971 – 2000 zugeordnet und liegen für Stürme (G), schwere Stürme (SG) und sehr schwere Stürme (VSG) bei $G^* = 28,3, 36,6$ und $46,6$ hPa (vgl. *Tab. 2-15, S. 94*).

Zunächst sind in *Tab. 2-17* die 10 schwersten Stürme des Zeitraums 1948 – 2011 aufgelistet. Jeder Einzelne gehört zur Kategorie VSG ($G^* > 46,6$ hPa), hat zyklonalen

Charakter ($\zeta > 0$) und zeichnet sich durch eine Windrichtung aus der westlichen Hemisphäre aus ($V_{dir} > 180^\circ$), auch wenn sich beide Eigenschaften nicht in allen Fällen in der Typisierung ausprägen. Stürme mit Wiederkehrzeiten oberhalb von 10 Jahren traten 7-mal auf, während nur ein Sturmereignis eine Stärke erreichte, die sowohl den 30- als auch den 50-jährigen Wiederkehrwert überschritt (vgl. *Tab. 2-16*). Windgeschwindigkeiten und Wirbelstärken blieben meist unterhalb der zum VSG-Schwellwert mit 1-jähriger Wiederkehrzeit gehörigen Maximalwerte. Die Stürme 5 bis 7 entfallen demnach auf die Fläche im 2. Quadranten der *Abb. 2-2*, S. 42, die zwischen der VSG-Ellipse und einem umschreibenden Rechteck $V_{max} \times \zeta_{max}$ entsteht; die Stürme 4 und 8 bis 10 liegen wenig außerhalb davon.

RANK	DATE	TYPE	G* [HPA]	RET.P. [YR]	VDIR [DEG]	V [M/S]	RDV ₁ [%]	ζ [RPD]	RDζ ₁ [%]
1	1966-12-02	C	55.3	54.0	212	12.3	-55	0.78	15
2	1962-02-16	NW	53.7	25.4	295	31.4	13	0.27	-60
3	1981-11-24	NW	52.7	16.8	303	30.3	9	0.30	-55
4	1962-02-12	CW	52.7	16.7	289	28.5	3	0.39	-42
5	1999-12-25	CSW	52.5	15.2	235	26.5	-4	0.46	-32
6	1984-01-03	CW	52.2	13.2	259	25.8	-7	0.48	-30
7	1959-10-27	C	52.0	12.6	226	19.0	-31	0.64	-6
8	2000-01-29	W	51.2	8.8	268	28.5	3	0.34	-50
9	1965-12-10	C	50.7	7.5	324	13.4	-52	0.69	3
10	1983-02-01	C	50.5	6.9	265	13.6	-51	0.69	2

Tab. 2-17: Die 10 schwersten Stürme im Zeitraum 1948 – 2011 (NCEP). $rdV_1 = V/V_{max}(T_1) - 1$ ist die relative Abweichung der Windgeschwindigkeit von der zum VSG-Schwellwert (Wiederkehrzeit 1 Jahr) gehörigen Maximalgeschwindigkeit (s. *Tab. 2-16*, S. 94).

Table 2-17: The 10 most severe gales during 1948 – 2011 (NCEP). $rdV_1 = V/V_{max}(T_1) - 1$ is the relative departure of windspeed from max. possible windspeed associated with VSG threshold (return period 1 yr, cf. *Table 2-16*).

Mit Ausnahme von 1 und 7¹ verursachten alle Stürme an der deutschen Nordseeküste Sturmfluten oder sogar schwere Sturmfluten (2, 3, 8, 10). Sturm 4 und der NW-Orkan ›Vincinette‹ (2) ragen aus einer 7-tägigen Sturmsequenz (G-VSG-G-G-NIL-VSG-SG) heraus, die am 16./17. Februar 1962 in Hamburg mit der größten Sturmflutkatastrophe seit 1825 endete. Auch der NW-Orkan vom 24. November 1981 generierte 4 Sturmfluten in Folge – die ›Nordfrieslandflut‹. Wie der Orkan selbst (G-VSG-G), waren die mittleren schweren Sturmfluten von regulären Sturmfluten flankiert. Die bis heute höchste Sturmflut an nahezu allen Pegeln der deutschen Nordseeküste trat am 3. Januar 1976 als Folge des ›Capella‹ Orkantiefs ein, der mit $G^* = 50,2$ hPa in einer erweiterten *Tab. 2-17* Rang 12 einnehmen würde.

Eine Aufstellung aller identifizierten schweren (SG) und sehr schweren Stürme (VSG) im Zeitraum 1948 – 2010 bietet *Tab. 2-18*.

Eine entsprechende Aufstellung für die Gesamtheit aller Sturmklassen bietet *Tab. 2-19*.

1. Die befürchteten schweren Sturmfluten blieben in beiden Fällen aus, wie auf den Titelseiten des Hamburger Abendblatts vom 28. Oktober 1959 (S.1 & 20) und 3./4. Dezember 1966 (S.1) nachzulesen ist (<http://suche.abendblatt.de/ashao/calendar.do>). Vgl. a. ›Kyrill‹ (S. 101) und Kap. 3.4.5, S. 139.

2 Atmosphärenphysik

YEAR	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	OND	JFM	O2M	SUM
47/48	./.	./.	./.	./.	./.	./.	1			1			./.	1	./.	./.
48/49							3		1					4	4	4
49/50				1				1					1	1	2	2
50/51					2			2	1				2	3	5	5
51/52						3	1						3	1	4	4
52/53						1	1	2|1					1	2|2	2|3	5
53/54					1		1		1				1	2	3	3
54/55					3	2|1							5|1		5|1	6
55/56				1		2			1				3	1	4	4
56/57					1	1	2						2	2	4	4
57/58			1				1							1	1	2
58/59							1							1	1	1
59/60				1	1	2		1					3|1	1	4|1	5
60/61					1	1	2						2	2	4	4
61/62				1		1	2	1|2					2	3|2	5|2	7
62/63																
63/64																
64/65						3	1|1	2					3	3|1	6|1	7
65/66					2|1	1			1|1				2|2	1|1	3|3	6
66/67					1|1	1|1		1	2				2|2	3	5|2	7
67/68				3	1	1	1	1	3				5	5	10	10
68/69							2							2	2	2
69/70							1							1	1	1
70/71				1	2			1					3	1	4	4
71/72					2		1						2	1	3	3
72/73					1	1		1					2	1	3	3
73/74					2	2|1		1					4|1	1	5|1	6
74/75				1	3	2	2			1			6	2	8	9
75/76					1	2	1|2						3	1|2	4|2	6
76/77			1	1			1						1	1	2	3
77/78				1	2|2	2	1|2						5|2	1|2	6|4	10
78/79					1				1				1	1	2	2
79/80						2|1	1|1						2|1	1|1	3|2	5
80/81				1	2		3	1					2|1	4	6|1	7
81/82			1		1				2		1		1	2	2|1	5
82/83				1	1	4|1	4	2|1			1		6|1	6|1	12|2	14
83/84				1		1	3|2	2					1|1	5|2	6|3	9
84/85				1			1						1	1	2	2
85/86					3		5						3	5	8	8
86/87				1	1				1|2				2	1|2	3|2	5
87/88				1|2				3|2					1|2	3|2	4|4	8
88/89				2		2	1|1	2	1				4	4|1	8|1	9
89/90						1	4	5|2	1				1	10|2	11|2	13
90/91				1	5		3						5|1	3	8|1	9
91/92				1|1	2	1	3	1	1				4|1	5	9|1	10
92/93						2	8|1						2	8|1	10|1	11
93/94						2	2		1	1			2	3	5	6
94/95			1|1			1	7|2	2	1				1	10|2	11|2	15
95/96								2						2	2	2
96/97				1	1	1		3	1				3	4	7	7
97/98					1		1	1					1	2	3	3
98/99				3		1	1	1|1					4	2|1	6|1	7
99/00					1	3|2	1		1				4|2	1|1	5|3	8
00/01				3|1	2	1	1						6|1	1	7|1	8
01/02							1	1|1						2|1	2|1	3
02/03							2							2	2	2
03/04						1|1							1|1		1|1	2
04/05							6	1						7	7	7
05/06					1	1							2		2	2
06/07				1		4	7		1				5	7|1	12|1	13
07/08					1	1	3|1	1|1	1|1				2	5|3	7|3	10
08/09				1		1	2						2	2	4	4
09/10				1	3								4		4	4

Tab. 2-18: Anzahl der Tage mit starkem bzw. sehr starkem Sturm (SG|VSG).

Table 2-18: Number of severe and very severe gale days (SG|VSG).

YEAR	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	OND	JFM	O2M	J2J
47/48	./.	./.	./.	./.	./.	./.	5	1	3	3			./.	9	./.	./.
48/49			1	3	3	8	10	7	2	3			14	19	33	37
49/50		1		3	4	5		6	3	3			12	9	21	25
50/51			4	1	6	2	3	7	2	2			9	12	21	27
51/52					6	9	8	5	2				15	15	30	30
52/53			2	3		2	3	6	2				5	11	16	18
53/54			1		4	1	7	5	2	1	1		5	14	19	22
54/55			2	1	7	11		2	2		2		19	4	23	27
55/56				2	1	9	6		2				12	8	20	20
56/57	1		1		4	9	10	4					13	14	27	29
57/58		1	4		4	6	8	3	2				10	13	23	28
58/59			1			1	6	5		1			1	11	12	14
59/60				2	4	11	1	3	2	3		1	17	6	23	27
60/61				2	4	5	5	3	3				11	11	22	22
61/62				3	3	3	11	6	1	1			9	18	27	28
62/63	1		1	1	1	7	3		2				9	5	14	16
63/64			2		5	4	1	3	2				9	6	15	17
64/65	1			2	4	8	6	2		1	1		14	8	22	25
65/66			3	4	7	6	3		5		1	1	17	8	25	30
66/67					4	10	3	10	14	3			14	27	41	44
67/68			1	7	6	7	8	4	5	2			20	17	37	40
68/69			1	1	1	3	4	1	5	3			5	10	15	19
69/70			1	4	9	4	3	4	4	2			17	11	28	31
70/71			1	6	6	1	6	4	1				13	11	24	25
71/72				4	7	5	6	1	3	2	2		16	10	26	30
72/73					10	9	2	5		2			19	7	26	28
73/74			2		9	10	9	5	1				19	15	34	36
74/75			2	5	7	11	12	2		1			23	14	37	40
75/76			1	1	4	9	10	2	7	1			14	19	33	35
76/77			1	2	2	4	5	3	3	2			8	11	19	22
77/78			2	3	10	6	6	1	4				19	11	30	32
78/79			2	1	7	8	3	2	10	1			16	15	31	34
79/80		1		2	3	10	4		1	2			15	5	20	23
80/81		2	2	6	7	11	5	7	2				24	14	38	42
81/82			1	5	7	3	2	2	10	2	2		15	14	29	34
82/83				4	12	7	21	4	4				23	29	52	52
83/84			5	11	1	8	15	5	2				20	22	42	47
84/85			2	5	8	1	4	3	2	2			14	9	23	27
85/86		1	1		5	2	12	1	6	2			7	19	26	30
86/87		2		2	8	10	2	3	6	1			20	11	31	34
87/88				5	2	1	10	11	4				8	25	33	33
88/89	1		2	4	1	7	9	14	5	1			12	28	40	44
89/90		1	1	2		5	15	18	14	1			7	47	54	57
90/91	1	1	3	3	1	7	6	2	1	2			11	9	20	27
91/92			1	5	10	7	4	4	4	1			22	12	34	36
92/93				2	6	5	18	5	4				13	27	40	40
93/94			2	2	4	9	11	2	11	5			15	24	39	46
94/95			2	5	3	8	16	10	10	2			16	36	52	56
95/96				1			8	10	1				1	19	20	20
96/97			2	2	5	2	1	18	6	1			9	25	34	37
97/98			1		6	5	5	7	1	3			11	13	24	28
98/99				6	1	8	7	6	4	1			15	17	32	33
99/00			1	2	6	12	10	9	5				20	24	44	45
00/01	1			6	9	8	6	2	3				23	11	34	35
01/02			3	4	2	4	8	9	2	1			10	19	29	33
02/03				6	1	5	9	2	1	1			12	12	24	25
03/04				1	4	6	5	4	3	1		2	11	12	23	26
04/05			4	6		6	16	4	1	2			12	21	33	39
05/06				1	5	6	4	4	3				12	11	23	23
06/07				3	10	14	12	8	6			1	27	26	53	54
07/08		1			3	11	13	8	7				14	28	42	43
08/09				5	7	6	10	1	3				18	14	32	32
09/10			2	2	11	2	1		1				15	2	17	19

Tab. 2-19: Anzahl Sturmtage (G+SG+VSG).

Table 2-19: Total number of gale days (G+SG+VSG).

2.6.3 Sturmaufkommen 2005/06 & 2006/07

Analog zu der im Rahmen der Häufigkeitsanalysen der reduzierten Wetterlagen geschilderten Verfahrensweise (Kap. 2.3.4, S. 50) wurden zur statistischen Einordnung des Sturmaufkommens in den jahresübergreifend definierten Saisons 2005/06 und 2006/07 empirische Verteilungen für den Zeitraum 1971 – 2000 anhand der Gesamthäufigkeit aller Sturmklassen (Tab. 2-19) bestimmt. Die mit den Tabellenspalten korrespondierenden Verteilungen sind in Abb. 2-25 dem in den Zeilen 05/06 und 06/07 angegebenen jahreszeitlichen Gang des Sturmaufkommens unterlegt. Die absolute Häufigkeitsskala ist dabei ausschließlich für die Monatsstatistiken gültig, während umgekehrt alle saisonalen Häufigkeiten relativ zur jeweiligen Saisonlänge angegeben sind.

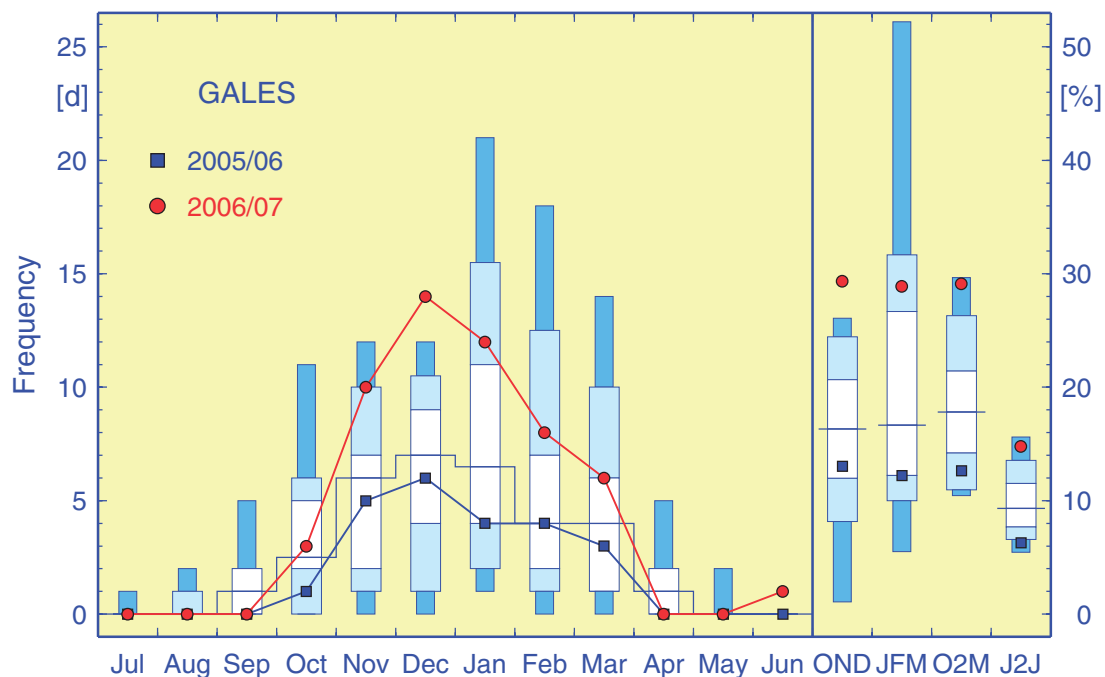


Abb. 2-25: Sturmhäufigkeiten für 2005/06 (blau) und 2006/07 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971 – 2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppelinie), 75 und 90 %.

Fig. 2-25: Gale frequencies for 2005/06 (blue) and 2006/07 (red) along with empirical distributions for 1971 – 2000 (stacked columns). Percentile range Min to Max, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, continuous stepline), 75 and 90 %.

Das auf Monatssicht lediglich unterdurchschnittliche Sturmaufkommen in der Saison 2005/06 erweist sich infolge seiner hohen Beständigkeit bei Erweiterung des Zeitfensters auf Quartals-, Halbjahres- und schließlich Jahreslänge (J2J: Juli bis Juni) als ungewöhnlich gering. Demgegenüber fallen bereits die monatlichen Sturmhäufigkeiten 2006/07 von Oktober bis März fast ausnahmslos ins oberste Viertel der Verteilungen, so dass sich etwa für das Herbstquartal (OND) eine Rekordhäufigkeit von 27 Sturmtagen ergibt, die sogar im Gesamtzeitraum (1948 – 2009) nie mehr erreicht wurde. Bemerkenswert ist weiter, dass sich praktisch gleich viele Sturmtage (26) im Winter 2007 ereigneten, diese Anzahl jedoch weit hinter den singulären Häufigkeiten von 1990 (47) oder 1995 (36) zurückbleibt. Da in den vorausgehenden Herbstmonaten nur

sehr wenige (1989: 7) bzw. durchschnittlich viele Stürme eintraten (1994: 16), liegt die Sturmsaison 2006/07 mit insgesamt 54 Sturmtagen auf Rang 3 in der Gesamtstatistik (Tab. 2-19, S. 99) und dicht auf zu denen von 1989/90 (57) und 1994/95 (56).

Die hohe Beständigkeit im unterdurchschnittlichen (2005/06) und deutlich erhöhten (2006/07) Sturmaufkommen von Monat zu Monat korrespondiert mit der im jeweiligen Winterhalbjahr prinzipiell abgeschwächten bzw. verstärkten Zonalzirkulation, die sich beispielsweise in den Moden der Arktischen Oszillation (WALLACE 2000, GREAT-BATCH 2000) widerspiegelt. So entfielen in der Sturmsaison 2006/07 11 von insgesamt 13 schweren Stürmen auf die Monate Dezember und Januar (Tab. 2-18, S. 98), als der AO-Index des CLIMATE PREDICTION CENTERS² eine Rekordhöhe von 2,28 (Dez.) erreichte, respektive mit 2,03 (Jan.) den vierthöchsten Wert in den Monatsstatistiken des Zeitraums 1950 – 2010 annahm. Der relative Anteil schwerer Stürme am Gesamtsturmaufkommen lag bei 29 und 58%, zusammengenommen bei 42%. Der ›Nordseewind‹ zeichnete sich in beiden Monaten durch sehr hohe und extrem richtungsstabile Windgeschwindigkeiten aus WSW bis W aus (Tab. 2-14, S. 90).

Den Wetterlagenkalendern (Tab. 2-1, S. 44; Tab. 2-3, S. 45) sind nicht nur eine taggenaue Zuordnung und die Sturmklasse der in den Jahren 2006 und 2007 eingetretenen Stürme zu entnehmen, sondern gleichzeitig anhand des Wetterlagentyps die ungefähre Lage der Sturmtiefs im Nordseeraum (vgl. Abb. 2-3, S. 46). Besonders erwähnenswert erscheinen die Orkane ›Britta‹ (1. 11. 2006, N, s. a. Kap. 3.3.3, S. 134), ›Franz‹ (12. 1. 2007, W+), ›Orkun‹ (18. 3. 2007, CW++, Abb. 2-1, S. 41) und ›Tilo‹ (9. 11. 2007, NW), die am Pegel Cuxhaven als Sturmfluten mit Hochwasserständen von 239, 223, 227 und 290 cm über MHW registriert wurden. Mit etlichen Rekordhochwasserständen, erheblichen Dünenabbrüchen auf den ostfriesischen Inseln und starken Lahnungsschäden zählten die durch die Orkane ›Britta‹ (Allerheiligenflut) und ›Tilo‹ verursachten Sturmfluten zu den schwersten der letzten 100 Jahre an der niedersächsischen Küste (HEYKEN 2007, 2008). Beim entgegen anfänglicher Vorhersagen beschleunigten Durchzug des Orkantiefs ›Kyrill‹ (18. 1. 2007, CW+), der Bahnhöfe in ganz Deutschland zu Wartesälen machte, wurden hingegen wegen mangelnder Synchronisation von Sturmintensität und Hochwassereintrittszeiten in der Deutschen Bucht Sturmflutwasserstände nur an wenigen Pegeln erreicht (Ems, Bremen). Ob, wann und wo Orkane ihr Sturmflutpotenzial realisieren, ist aufgrund der hohen Anforderungen an die kleinräumige Zuverlässigkeit der Vorhersagen oftmals erst sehr spät absehbar. Die Tatsache, dass sich beispielsweise in Cuxhaven in den Sturmsaisons 2005/06 und 2006/07 jeweils 2 und 4 Sturmfluten gegenüber 0 und 10 in Husum ereigneten, verdeutlicht die Problematik (s. a. Kap. 3.4.5, S. 139).

Eine umfangreiche Sammlung von Medienberichten zu zahlreichen Sturmereignissen findet der interessierte Leser auf der von THOMAS SÄVERT unterhaltenen Webseite ›Naturgewalten‹³. Ausführliche meteorologische Sturmanalysen von STEFAN LAPS werden seit der Sturmsaison 2006/07 auf der Webseite der METEOMEDIA GMBH im Bereich F&E/Unwetterereignisse⁴ vorgehalten.

2. www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml

3. www.saevert.de/wintersturm.htm

4. www.meteomedia.de/index.php?id=221

2.7 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 der Globalstrahlung auf Norderney ist für 2006 und 2007 in *Abb. 2-26* gemeinsam mit der Klimatologie des Zeitraums 1971 – 2000 dargestellt.

Nennenswerte Abweichungen vom »normalen« Verlauf ergaben sich für die Sonneneinstrahlung im Jahr 2006 lediglich in den Sommermonaten. Strahlungsüberschüsse kamen dabei durch stabile Hochdruckwetterlagen bis Mitte Juni bzw. ab der 2. Julidekade zustande (*Tab. 2-1, S. 44*). A-Häufigkeiten auf der Schwelle zum (Juni) bzw. jenseits des 90% Perzentils (Juli) belegten deren Persistenz (*Abb. 2-5, S. 53*), die sich auch in den monatlichen Luftdruckfeldern ausprägte (z. B. *Abb. 2-15, S. 79*). Während die Strahlungsflussdichte im Juli mit 269 Wm^{-2} den klimatologischen Mittelwert um 1,9 Standardabweichungen oder 53 Wm^{-2} übertraf, fiel sie im August mit 154 Wm^{-2} um $-1,5$ Standardabweichungen oder -31 Wm^{-2} geringer aus. Dieses Einbrechen der Globalstrahlung im Hochsommer war Folge einer Vielzahl transienter zyklonaler Störungen, die sich in einer Rekordhäufung der C-Wetterlagen spiegelt, welche mit 15 Tagen das Maximum des Referenzzeitraums deutlich überstieg (*Abb. 2-5, S. 53*). Nach dieser unbeständigen Witterungsphase geriet die Nordsee Anfang September erneut unter Hochdruckeinfluss, der meist mit einer SE-Anströmung trockenwarmer Festlandsluft einherging (*Tab. 2-6, S. 48*). Der resultierende Strahlungsüberschuss betrug im September 14 Wm^{-2} und lag um 1,1 Standardabweichungen über dem Klimanormal von 119 Wm^{-2} (*Abb. 2-26*).

Abgesehen von moderaten Strahlungsdefiziten im Mai und Juni des Jahres 2007, sind allein die Überschüsse im März und April bemerkenswert (*Abb. 2-26*). Letztere lagen mit $2,1/2,2$ Standardabweichungen bzw. $27/44 \text{ Wm}^{-2}$ erheblich über den Mittelwerten von 99 und 166 Wm^{-2} . Im März dürften günstige Einstrahlungsbedingungen insbesondere in der 2. Dekade sowie zum Monatsende hin bei SE-licher Anströmung und hohem Druck über Mittelschweden vorgelegen haben (*Tab. 2-3, S. 45*). Das Surplus im April lässt sich eindeutig auf das für diesen Monat untypische, beständige Hochdruckwetter zurückführen (*Abb. 2-5, S. 53*), das sich im Mittel als ausgedehnte Antizyklone mit Kern über England manifestierte (*Abb. 2-18, S. 82*). Zwar haben im Oktober 2007 ähnlich gute atmosphärische Bedingungen bestanden (*Abb. 2-20, S. 84*) und auch zu einem Strahlungsüberschuss (7 Wm^{-2}) geführt; naturgemäß sind die möglichen Überschüsse zu dieser Jahreszeit jedoch energetisch unbedeutend (*Abb. 2-26*).

Anhand von *Abb. 2-27* ist ein Vergleich der Lufttemperaturentwicklung in den Jahren 2006 und 2007 mit dem klimatologischen Jahresgang möglich. Die soeben diskutierten Einstrahlungsanomalien spiegeln sich in entsprechenden Auslenkungen der

Lufttemperatur wider. Durchaus nennenswerte Abweichungen vom normalen Temperaturgang traten darüber hinaus im Winter (JFM) 2006 auf, der mit 1,7 °C und Rang 32 zum kalten Viertel aller Winter des Zeitraums 1971 – 2010 zählt. Ursache war die deutlich abgeschwächte Zonalzirkulation, die sich in einer E-lichen Luftdruckanomalieverteilung (*Abb. 2-13, S. 77*), einer weit in die E-liche Hemisphäre hineinreichenden Nordseewindellipse (*Abb. 2-21, S. 86*) oder einem schwachen resultierenden Nordseewind von 2,5 m/s aus SSW zeigt (*Tab. 2-13, S. 85*).

Herausragend und ohne Beispiel sind Andauer und Intensität der im Juli 2006 einsetzenden extremen Warmanomie, die erst im Juli des Folgejahres abbrach. Die mittlere Temperatur dieser 12-monatigen Warmphase liegt mit 12,3 °C um 3,8 Standardabweichungen über dem Klimamittel (1971 – 2000: 9,3 °C) und weit über den Rekordtemperaturen für 2006 und 2007 von 10,6 °C und 11,0 °C – den höchsten regulären Jahresmitteltemperaturen im Zeitraum 1971 – 2010. Die saisonalen Lufttemperaturen der Warmperiode belegen jede für sich Rang 1, während sich für die Ränge der zugehörigen Monatstemperaturen (Juli bis Juni) die Abfolge 1-20-1-2-1-1-1-7-2-1-9-3 ergibt. Die nominell höchsten Temperaturabweichungen wurden im Dezember (3,9 K) und Januar (4,8 K), die signifikantesten im September (3,5 K) und April (3,7 K) erreicht (*Abb. 2-27*). Die sehr gleichförmige Stärke der monatlichen Anomalien ($3,0 \pm 1,2$ K) rechtfertigt die Behauptung, dass die jahreszeitliche Temperaturentwicklung insgesamt auf einem gegenüber dem klimatologischen Jahreszyklus um 3 K höheren Niveau ablief.

Der geschilderte abnorme Temperaturgang auf Norderney weist markante Parallelen zum Temperaturgang in der Nordhemisphäre auf. Dieser wie jener lässt sich auf anomale Strukturen der großräumigen atmosphärischen Zirkulation zurückführen. Wie *Abb. 2-28* zu entnehmen ist, sind die hohen Julitemperaturen auf Norderney im Rahmen einer europaweiten Hitzewelle eingetreten und Folge eines stationären Omega-blocks¹, der gleichzeitig die inversen Temperaturanomalien jenseits der Linie Nordkap – Schwarzes Meer verursachte. Die Auswirkungen der massiven Zonalströmung von November 2006 bis Januar 2007 (*Abb. 2-22, S. 89*) waren ebenfalls nicht auf Norderney oder die Nordsee beschränkt, sondern betrafen die gesamte Landmasse nördlich 40° N (*Abb. 2-28*). Die Temperaturabweichung in Höhe von 0,99 K vom Klimamittel (1971 – 2000)² im Januar 2007 stellt eine Rekordwarmanomie dar, die in keinem anderen Monat des Zeitraums 1880 – 2011 erreicht oder übertroffen wurde.

Für die nördliche Hemisphäre waren 2006 (0,49 K) und 2007 (0,54 K) das 4.- und 3.-wärmste Jahr nach 2010 (0,58 K) und 2005 (0,56 K). Die Periode Juni 2006 bis Mai 2007 war mit 0,61 K die wärmste 1-jährige Phase im Datensatz (1880 – 2011). Wie auf Norderney wurden im Dezember 2006 sowie im Januar und April 2007 Rekordtemperaturen erreicht. Für die Ränge der Jahreszeiten (JAS, OND, ...) ergibt sich die Abfolge 5-1-2-3, für den Herbst/Winter 2006/07 (O2M) bei 0,67 K Rang 1.

LUTERBACHER ET AL. (2007) zufolge war der Herbst/Winter 2006/07 höchstwahrscheinlich für Europa das wärmste Winterhalbjahr in über 500 Jahren. Auf der Grundlage einer Analyse ähnlicher atmosphärischer Zirkulationsregimes bezweifeln YIOU ET AL. (2009), dass diese außergewöhnliche Warmanomie ausschließlich den günstigen atmosphärisch-dynamischen Bedingungen zuzuschreiben ist, und sehen in den Temperaturverhältnissen im Herbst/Winter 2006/07 einen Vorläufer des künftigen europäischen Regionalklimas in diesen Jahreszeiten.

1. Von Tiefdruck im Westen und Osten flankiertes Hochdruckgebiet (T-H-T).

2. Für den Referenzzeitraum 1901 – 2000 ergibt sich eine Abweichung in Höhe von 1,19 K.

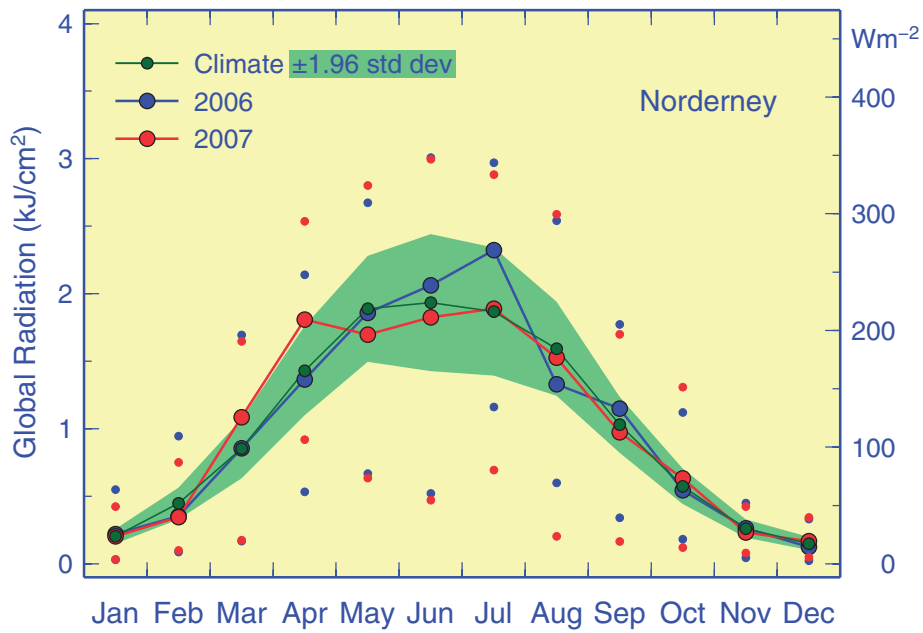


Abb. 2-26: Jahresgänge der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonthlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971 – 2000) mit 95%-Band ($\pm 1,96$ zwischenjährliche Standardabweichungen). 1 kJcm^{-2} entspricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm^{-2} . Rohdaten: DEUTSCHER WETTERDIENST.

Fig. 2-26: Seasonal cycles of monthly averaged daily global radiation totals at Norderney together with intramonthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means, and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). 1 kJcm^{-2} is equivalent to a radiation flux density of 116 Wm^{-2} . Raw data: DEUTSCHER WETTERDIENST.

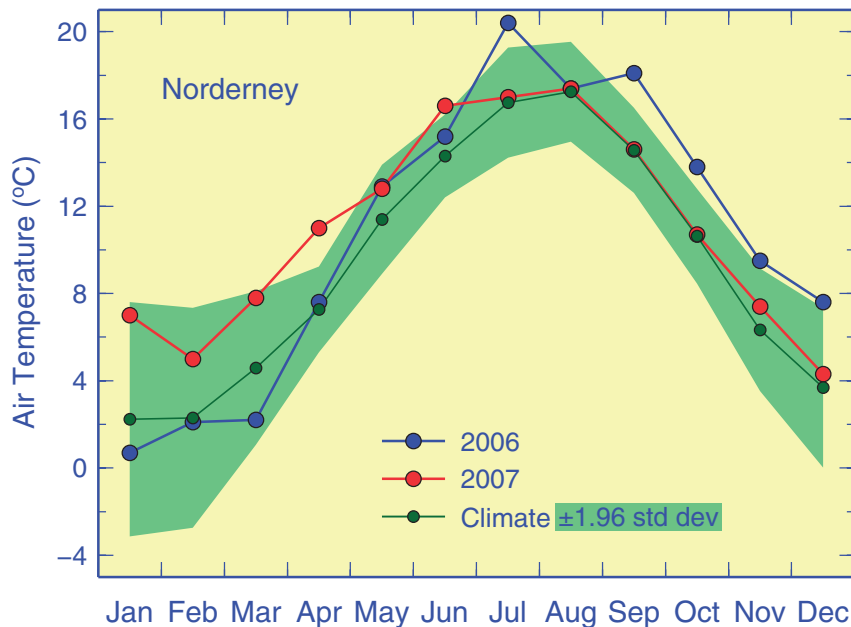


Abb. 2-27: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ zwischenjährliche Standardabweichungen). Rohdaten: DWD.

Fig. 2-27: Monthly air surface temperatures at Norderney with 1971 – 2000 base period means, and 95%-band (climatology ± 1.96 std. deviations). Raw Data: DEUTSCHER WETTERDIENST.

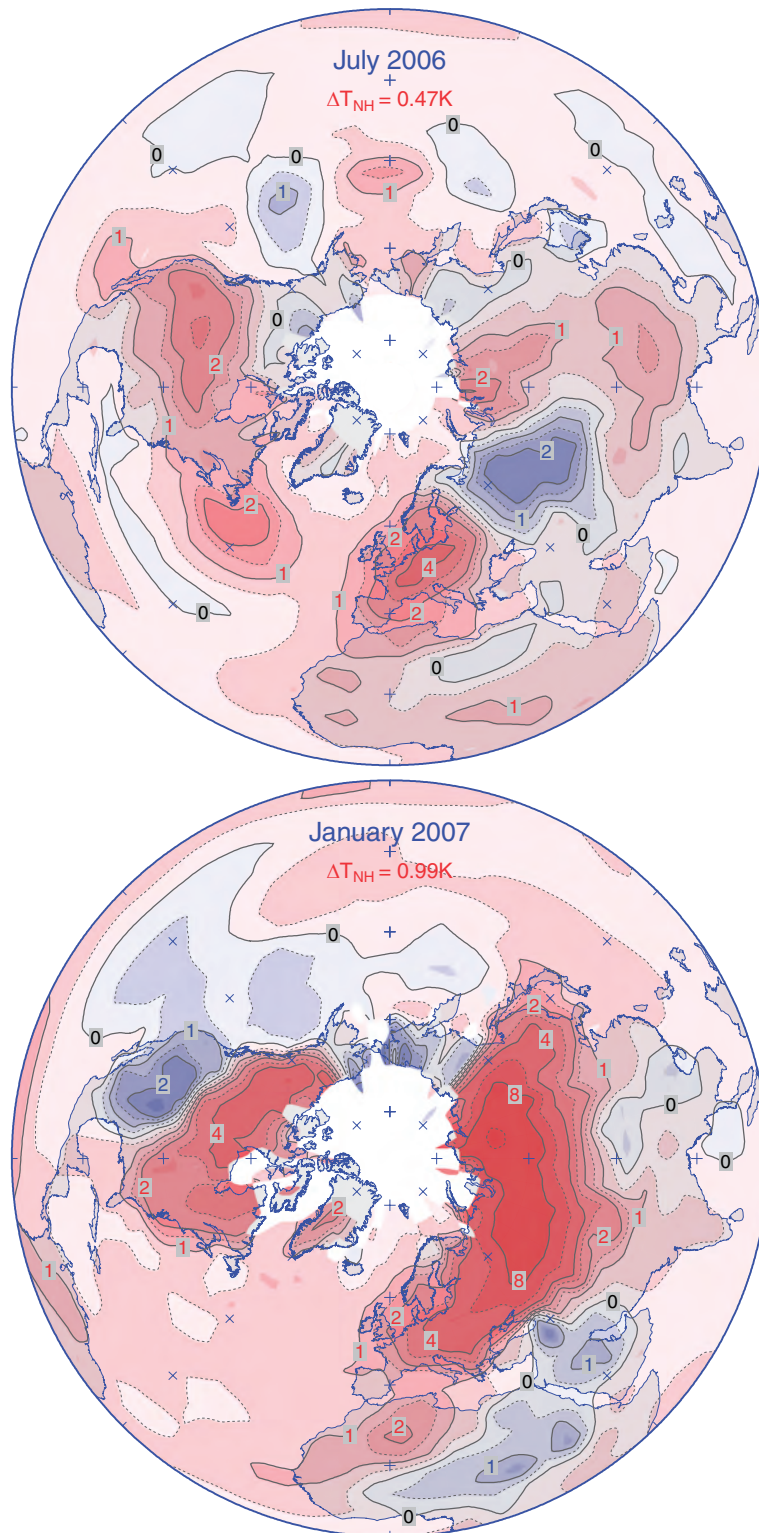


Abb. 2-28: Hemisphärische Temperaturanomalien (K) für Juli 2006 (oben) und Jan. 2007. Basisperiode 1971 – 2000. Konturen, voll: 0 & $\pm 2^k$, gestrichelt: $\pm 0,5$ & $\pm 3 \times 2^{k-1}$, $k=0, 1, 2, 3$; Label, rot/blau: +/- . Quelldaten: NCDC, merged land-ocean sfc. temp. (GHCN-M v3.1.0 & ICOADS/ERSST v3b), www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-products.php.

Fig. 2-28: Hemispheric temperature anomalies (K) in July 2006 (top) and Jan. 2007. Base period 1971 – 2000. Contours, solid: 0 & $\pm 2^k$, stippled: ± 0.5 & $\pm 3 \times 2^{k-1}$, $k=0, 1, 2, 3$; red/blue labels: +/- . Source data: NCDC, merged land-ocean sfc. temperatures (GHCN-M v3.1.0 & ICOADS/ERSST v3b), www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-products.php.

2.8 Zusammenfassung

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 bioökologischen Veränderungen erstrecken. Der Zirkulationszustand selbst wird hier aus differenzierten Analysen der großräumigen Luftdruckverteilung im Meeresniveau abgeleitet. Die Umstellung der primären Datenbasis auf NCEP/NCAR Reanalysen stellt deshalb eine der wichtigsten Neuerungen dar.

□ Wetterlagen (S. 40 ff.)

Aus täglichen Luftdruckfeldern im Meeresniveau für die Jahre 2006 und 2007 abgeleitete Wetterlagenkalender und darin eingebettete Sturmereignisse sind ein kompaktes, wichtiges Hilfsmittel zur Identifizierung und Interpretation anomaler Zustände und Ereignisse in atmosphärischen, ozeanographischen und chemischen Systemvariablen der Nordseeregion, die (un)mittelbar mit der atmosphärischen Zirkulation in Zusammenhang stehen.

Für robuste Statistiken wurden die 27 Wetterlagenklassen auf eine überschaubare Zustandsmenge reduziert, die sich aus den anti-/zyklonalen Rotationstypen A und C sowie den Richtungslagen NE, SE, SW und NW zusammensetzt. Diese Untersuchungen erstrecken sich von Häufigkeitsanomalien über charakteristische Lebensdauern der einzelnen Wetterlagen bis hin zu Wetterlagenübergängen im Kontext von Markovketten.

Häufigkeitsanomalien der 6 Hauptwetterlagen in den Jahren 2006 und 2007 wurden auf monatlichen, saisonalen und jährlichen Zeitskalen anhand klimatologischer Häufigkeitsverteilungen des Zeitraums 1971 – 2000 bestimmt, statistisch eingeordnet und interpretiert. Beispielsweise zeigt die ungewöhnliche Gleichverteilung von W- (SW & NW) und E-Lagen im Winter 2006 eine abgeschwächte Zonalzirkulation und überdurchschnittliche Abkühlungsraten der Meerestemperaturen an, während entgegengesetzte Implikationen aus dem Missverhältnis von 68 W-Lagen zu 2 E-Lagen für den Zeitraum Nov. 2006 bis Jan. 2007 folgen. Die Häufungen von A- (15) und S-Lagen (11) im Juli 2006 und C (15) und N-Lagen (10) im August 2006 offenbaren diametral verschiedene Temperaturverhältnisse. Ein weiterer markanter Unterschied besteht im Verhältnis von N- zu S-Lagen, welches von 0,57 im Jahr 2006 auf 1,31 im Jahr 2007 anstieg und damit erheblich über dem klimatologischen Proporz von 0,75 lag.

Schlichtes Abzählen von Episodenanzahl und Episodenlänge anhand der Wetterlagenabfolge im Zeitraum 1971 – 2000 führt auf wetterlagenspezifische mittlere Lebensdauern, die zwischen 1,6 (NE) und 2,6 Tagen (A) variieren. Die exponentielle Abnahme der Episodenanzahl mit zunehmender Episodenlänge erinnert an radioaktive Zerfallsprozesse und impliziert als denkbar einfachste Lebensdauerverteilung die Geometrische Verteilung (GV), die sich durch die einzigartige Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit auszeichnet. Diese Eigenschaft resultiert aus der Invarianz der Sterbewahrscheinlichkeit (dem Kehrwert der mittleren Lebensdauer und einzigen Verteilungsparameter) und beinhaltet, dass die Wahrscheinlichkeiten für Abbruch oder Fortbestehen einer Wetterlagenepisode unabhängig vom bislang erreichten Lebensalter sind. Die GV erweist sich für Lebensdauern bis zu einer Woche als adäquates Modell. Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich für langlebige A-Lagen, die als

persistente Blockierungen den gewöhnlichen Wetterwechsel wochenlang stören können. Für anonymisierte Episoden – oder die Wetterlage als ›Ding-an-sich‹ – wurde eine mittlere Lebensdauer von 2 Tagen bestimmt. Die zugehörige GV (mit gleich hohen Sterbe- und Überlebenswahrscheinlichkeiten von 0,5) entspricht der Sequenzlängenverteilung, die ein Wettergott durch fortwährendes Werfen einer idealen Münze produzieren würde. Die Tatsache, dass manche Wetterlagen größeres »Talent« zeigen, am Leben zu bleiben, als andere, spricht für 6 Wettergötter, die mit Falschmünzen spielen.

Die Altersklasse ≥ 9 Tage war im Zeitraum 1971 – 2000 mit 32 Episoden und dem ältesten »Individuum« (18 Tage) von der A-Lage dominiert und ansonsten nur von SW-, NW- und SE-Lagen mit 15, 5 und 3 Episoden belegt. In den Jahren 2006 und 2007 war dieses Segment allein durch 2 bzw. 1 A-Episode besetzt, von denen jeweils eine ein Höchstalter von 11 Tagen erreichte. Das hohe Aufkommen N-licher Wetterlagen (NE & NW) im Jahr 2007 bildete sich auch in der Häufigkeit langer Episoden in der Klasse 5 – 8 Tage ab, die gegenüber 2006 von 1 auf 6 anwuchs, während diejenige der S-Episoden von 7 auf 1 zurückfiel. Die Gesamtzahl aller Episoden mit Lebensdauern ≥ 5 Tage lag in beiden Jahren mit 14 auf dem Niveau des klimatologischen Mittels (13,6) und somit wie dieses etwas oberhalb der für eine mittlere Lebensdauer von 2 Tagen aufgrund der GV erwarteten Höhe von 11,4 ($= 182,5 \times 0,5^4$). Die zugehörige kumulative Lebensdauer beträgt 95 (2006), 90 (2007), 90,7 (kM) und 68,4 Tage (GV). Auch die Gesamtzahl aller Episoden (186, 183 und 181,1/Jahr) und folglich die mittleren Lebensdauern von ≈ 2 Tagen waren auffällig stabil.

Das Auszählen der 6^2 unterscheidbaren Übergänge von Tag zu Tag stellt für die 30-jährige Zeitserie der 6 Wetterlagen eine dritte Abzählmethode dar, die nicht nur Informationen zu Gesamtvorkommen und Lebensdauer enthält, sondern auch Aufschluss über typische und untypische Abfolgemuster gibt. Im Bild einer Ballspielanalyse entsprechen diese Elemente der individuellen Gesamtzeit des Ballbesitzes und den darin enthaltenen Zeiten und Zeitpunkten des Am-Ball-Bleibens und Abspiels. Die resultierende quadratische Matrix der Übergangshäufigkeiten ist hochgradig asymmetrisch und in der Hauptdiagonalen, die Selbstübergänge (Am-Ball-Bleiben) repräsentiert, am stärksten besetzt. Dies bedeutet einerseits, dass sich das wechselseitige Abpielverhalten der Spieler nicht im Gleichgewicht befindet, und andererseits, dass jeder Spieler selbstverliebt lieber am Ball bleibt als abzuspielen. Insbesondere der 2. Aspekt zeigt hohe serielle Autokorrelation an, die gemeinsam mit geometrisch verteilten Verweilzeiten in unveränderten Zuständen zu den inhärenten Eigenschaften einer Markovkette 1. Ordnung zählt.

Die Anpassung dieses stochastischen Prozesses an die Daten besteht in der zeilenweisen Normierung der Übergangshäufigkeiten mit den individuellen Gesamthäufigkeiten der 6 Wetterlagen. Jeder Zeilenvektor der Übergangsmatrix stellt eine bedingte 1-schrittige Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Eintreten irgendeiner der 6 Wetterlagen am Folgetag dar, sofern aktuell die dem Zeilenvektor zugeordnete Wetterlage herrscht. Die Gedächtnislosigkeit der MK besteht dabei darin, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten ausschließlich vom aktuellen Zustand abhängen und demnach nicht davon, auf welchem verschlungenen Pfaden auch immer der aktuelle Zustand erreicht worden ist. Bemerkenswert ist ferner, dass die vorliegende MK für stochastische Vorhersagezeiträume von einer Woche gegen eine eindeutige, vom Anfangszustand unabhängige, stationäre Grenzverteilung konvergiert, die mit der klimatologischen Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen übereinstimmt. Die schnelle Degeneration des Vorhersagepotentials auf das klimatologische Niveau und die Markovsche Eigen-

schaft der Gedächtnislosigkeit – gleichbedeutend mit der ausschließlichen Abhängigkeit der Zukunft von der Gegenwart – bilden beachtliche Parallelen zur numerischen Wettervorhersage mit physikbasierten Modellen.

Die starke Erhaltungsneigung macht die Persistenzvorhersage Morgen-wie-Heute mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zwischen 39 (NENE) und 59% (AA) zur bestmöglichen. Von im Mittel etwa 2 Tage andauernden Stagnationsperioden abgesehen, besteht die wahrscheinlichste Wetterlagenabfolge für beliebige Anfangszustände (außer SE & NE) in der periodischen Sequenz A-SW-C-NW-A, welche das regionstypische Durchziehen von Tiefdruckstörungen beschreibt, denen Zwischenhochs vorausgehen und folgen. Die seltenen Wetterlagen SE und NE sind ebenso wie ihre Cousins (SW & NW) am häufigsten in Sequenzen A-SE-C bzw. C-NE-A eingebunden. Die wechselweisen Übergänge C<>A, NE<>SW, und NW<>SE werden von heute auf morgen nur selten oder gar nicht realisiert.

Im Vergleich zur Klimatologie traten die Richtungswetterlagen NW und SW im Jahr 2006 wesentlich seltener bzw. häufiger ein, wobei diese Abweichungen hauptsächlich durch geringere bzw. häufigere Selbstübergänge und speziell das seltene (1) bzw. hohe Vorkommen (7) von langlebigen Episoden (≥ 5 Tage) zustande gekommen sind. Im Jahr 2007 lagen bzgl. NW und SW praktisch inverse Verhältnisse vor. Zusätzlich traten NE-Lagen aus gleichem Grunde erheblich häufiger ein, während SE-Lagen insgesamt, hinsichtlich der Selbstübergänge, aber auch hinsichtlich der echten Übergänge zu anderen Wetterlagen auf die Hälfte zurückfielen. Die Anzahl aller Wetterlagenepisoden – oder gleichbedeutend die Gesamthäufigkeiten der echten Wetterlagenwechsel – unterlagen nur geringen Schwankungen (s. o.). Dieses Ergebnis trifft anscheinend auch weitgehend auf die Episodenanzahl individueller Wetterlagen zu, so dass Anomalien im Gesamtvorkommen der einzelnen Wetterlagen vor allem Anomalien im Vorkommen langlebiger Episoden widerspiegeln. Im Unterschied zum Jahr 2006 reduzierte sich der periodische Zyklus im Jahr 2007 auf die Abfolge A-SW-NW-A. Dieser war zudem wenig stabil, denn die Übergänge ASW und ANW ereigneten sich nahezu gleich oft, was ebenso auf die Übergänge SWNW und SWC zutrifft. Die Ursachen hierfür wurden anhand der reduzierten Wetterlagenkalender erläutert.

□ Luftdruckverteilung (S. 68 ff.)

Luftdruckverteilungen im mittleren Meeresniveau (MSLP) repräsentieren die großskalige atmosphärische Zirkulation im Nordseeraum, denn sie implizieren die geostrophische Vektorwindverteilung an der Oberfläche.

Der grundsätzliche klimatologische Jahrgang ist durch eine kräftige SW-liche Anströmung im Herbst und Winter charakterisiert, die sich im Frühjahr abschwächt, im Frühsommer auf eine NW-Strömung umstellt und schließlich unter Rückdrehung auf W und Intensivierung wieder in den Herbstmodus übergeht. Dieser Ablauf ergibt sich aus der jahreszeitlich wechselnden Dominanz von Islandtief und Azorenhoch und ist an die meridionale Verlagerung der Frontalzone um etwa 10 Breitengrade gekoppelt. Diese geht mit der Abschwächung des Islandtiefs und NE-Ausdehnung des Azorenhochs im Verlauf des Frühjahrs einher und kehrt sich mit dem Wiedererstarken des subpolaren Tiefs und dem Rückzug des Azorenhochs in die Subtropen zum Ende des Sommers um.

Monatliche und saisonale Druckmuster der Jahre 2006 und 2007 wurden wie tägliche MSLP-Verteilungen mittels des vollständigen Wetterlagenklassifizierungsverfahrens typisiert und mit entsprechenden Klimatologien des Zeitraums 1971 – 2000 vergli-

chen. Im Unterschied zu den synoptischen Verteilungen stellen diese Druckfelder keine Wetterlagen sondern Witterungslagen dar, deren Abweichungen von der Klimatologie als Manifestationen der chaotisch dynamischen Entwicklung einer gedächtnislosen Atmosphäre auf diesen Zeitskalen unkorreliert, nicht auseinander herleitbar und lediglich einer Dokumentation zugänglich sind.

Die saisonalen MSLP-Verteilungen setzen sich häufig aus kurzfristigeren komplementären Zirkulationsanomalien zusammen, die einander auf dieser Zeitskala auslöschen. Im Gegensatz zu den Monatsverteilungen entsprechen die saisonalen Verteilungen deshalb meist weitgehend der Klimatologie. Ausnahmen hiervon bildeten der Winter 2006, der durch eine S-liche Meridionalzirkulation charakterisiert war, sowie der Herbst des gleichen Jahres, in dem eine erheblich verstärkte SW-Zirkulation vorherrschte. Demgegenüber waren besonders markante intrasaisonale Unterschiede kennzeichnend für den Sommer 2006 und den Winter 2007, die sich in inversen Lufttemperaturanomalien über den nordhemisphärischen Landmassen der mittleren Breiten ausprägten, was die Eingebundenheit großräumiger atmosphärischer Zirkulationsanomalien in das erdumspannende Wellen- und Wirbelsystem dieser Breitenzone dokumentiert. Der gerne als Indikator für die atmosphärische Zirkulation herangezogene Index der Nordatlantischen Oszillation reicht für eine zuverlässige Charakterisierung der Anströmung im Nordseeraum nicht immer hin. So war beispielsweise die verstärkte SW-Zirkulation im September und Oktober 2006 Konsequenz eines entsprechend starken, positiven Modes des Ostatlantikmusters und mit einer von verschiedenen NAO-Indizes angezeigten abgeschwächten Zonalzirkulation nicht vereinbar.

Im Zuge der Umstellung der Datenbasis auf MSLP-Verteilungen der NCEP/NCAR Reanalysen wurde die Druckreduktionsproblematik in Gebirgsregionen im Bereich der norwegischen Skanden sichtbar. Gegenüber früher verwendeten störungsfreien Druckfeldern des UK MET OFFICE weisen die Verteilungen hier im Herbst und Winter Deformationen auf, die gewöhnlich als artifizielle SE-liche Windabweichung in Erscheinung treten. Die MSLP-Verteilungen werden lediglich für diagnostische Analysen genutzt, denen letztlich das Wetterlagenklassifizierungsverfahren zugrunde liegt; da die Ergebnisse des Verfahrens durch dieses Artefakt auf keiner der relevanten Zeitskalen in unerträglicher Weise beeinträchtigt werden, wurde an den unmanipulierten Feldern des NCEP/NCAR festgehalten.

□ Nordseewind (S. 85 ff.)

Der Nordseewind ist als Beiprodukt der Wetterlagenklassifizierung ein zum Windindex proportionaler geostrophischer Wind, der die charakteristische Windstärke und -richtung im Nordseeraum angibt. Auf Basis täglicher Vektorwinde wurden Windellipsen und virtuelle Trajektorien konstruiert, welche die saisonalen Zustände und jahreszeitlichen Entwicklungen der Windverhältnisse in den Jahren 2006 und 2007 veranschaulichen. Vektorielle und skalare Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und Richtungsstabilitäten wurden als monatliche, saisonale, und jährliche Mittelwerte tabellarisch dokumentiert.

Die Vorherrschaft von Winden aus der westlichen Hemisphäre schlug sich in beiden Jahren in einem W:E-Verhältnis des Zonalwindes von knapp 3:1 nieder. Das S:N-Verhältnis des Meridionalwindes war 2006 mit 3:2 deutlich unausgeglichener als gewöhnlich und im Jahr 2007 (1:1). Das Verhältnis von vektorieller zu skalarer Windgeschwindigkeit ist ein Maß für die Windrichtungsstabilität bzw. Persistenz und liegt für saisonale und jährliche Mittelwerte typischerweise bei 1:2 – im Frühjahr jedoch bei

1:4. Erhebliche Abweichungen hiervon ergaben sich für Winter (1:4), Frühjahr (1:2) und Herbst 2006 (3:4). Starkwinde (> 10 m/s) traten im Herbst/Winter 2006/07 mit 60% wesentlich öfter auf als im Winter 2006 und Herbst 2007 (je 40%). Gegenüber den Verhältnissen im Frühjahr (26%) und Sommer 2006 (10%) halbierte bzw. verdreifachte sich 2007 das Vorkommen von Starkwinden in den entsprechenden Jahreszeiten.

Die virtuelle klimatologische Trajektorie des Nordseewindes illustriert den jahreszeitlich wechselnden Einfluss von Islandtief und Azorenhoch. 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 Vorzugwindrichtung angeben lässt. 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.

Zu den markantesten Abweichungen von der klimatologischen Trajektorie zählt der SSW-liche Verlauf im Winter 2006 mit insgesamt dominantem Meridionalwind, aber extrem geringer Richtungsstabilität von 0,5:9,2 oder 5% im Februar. Bemerkenswert sind ferner die für April untypische, kräftige und persistente (68%) Westströmung, der ausgesprochen schwache SW-Wind im Juli sowie die intensive Zonalzirkulation von November 2006 bis Ende Januar 2007 mit mittleren skalaren Windgeschwindigkeiten über 15 m/s (Jan.) und Richtungsstabilitäten bis zu 90% (Dez.). Im Juli 2007 erreichte der W-Wind skalare und vektorielle Windgeschwindigkeiten, die doppelt bzw. 3-mal so hoch waren wie im Vorjahresmonat. Im September und November stand ein NW-licher Trajektorienverlauf im Gegensatz zur Klimatologie und SW-lichen Winden des Vorjahres. Nicht nur die erheblichen Unterschiede in der jahreszeitlichen Entwicklung beider Jahre, sondern auch deren Abweichungen von der Klimatologie verschwimmen bei Betrachtung von mittleren skalaren (8,4, 8,9, 8,6 m/s) und vektoriellen (4,0, 4,2, 3,5 m/s) Windgeschwindigkeiten für 2006, 2007 und den Zeitraum 1971 – 2000. Die vielleicht augenfälligsten Unterschiede bestehen hinsichtlich der Windrichtungen (242° , 270° , 253°).

□ Sturm (S. 92 ff.)

Die Sturmidentifizierung basiert auf einem Schwellwertverfahren für den Sturmindex G^* , der über die im Rahmen der Wetterlagenklassifizierung bestimmten Indizes für Windgeschwindigkeit und Vorticity definiert ist. Die Umstellung der Datenbasis auf tägliche Luftdruckfelder der NCEP/NCAR Reanalysis I, die im Unterschied zu den früher verwendeten Feldern des UK MET OFFICE nicht auf einem Einzeltermin beruhen, sondern über 4 Termine geglättete Tagesmittel darstellen, machte eine Neukalibrierung der Schwellwerte erforderlich, um eine Unterschätzung der Sturmhäufigkeiten um knapp 30% auszuschließen. Die Anpassung einer Verallgemeinerten Paretoverteilung an G^* im Zeitraum 1971 – 2000 ergab, dass der Sturmindex Pareto-Typ-2 verteilt ist mit oberer Schranke bei 69,2 hPa und zugehörigen Maxima für Windgeschwindigkeit (V) und Vorticity (ζ) von 42,9 m/s und 1,05 Umdrehungen pro Tag. Die zu den Überschreitungswahrscheinlichkeiten 0,1, 0,02 & 1/365 bestimmten neuen Schwellwerte (28,3, 36,6 & 44,6 hPa) der 3 Klassen ›Sturm‹ (G), ›starker Sturm‹ (SG) und ›sehr starker Sturm‹ (VSG) sind mit Grenzwerten für V und ζ von 17,5, 22,7 & 27,7 m/s und 0,43, 0,55 & 0,67 UpT verknüpft.

Die beiden stärksten Stürme ereigneten sich am 2. 12. 1966 ($G^* = 55,3$ hPa) und 16. 2. 1962 ($G^* = 53,7$ hPa, ›Vincinette‹, Hamburger Sturmflutkatastrophe). Der Dezembersturm hält gleichzeitig den Rotationsgeschwindigkeitsrekord (0,78 UpT), wäh-

rend ›Vincinette‹ die bislang höchste Windgeschwindigkeit (31,4 m/s) erreichte. Das kalibrierte Sturmidentifizierungsverfahren wurde ferner zur Erstellung von Sturmkatalogen genutzt, welche die Häufigkeiten der 3 Sturmklassen für jeden Monat des Zeitraums 1948 – 2010 dokumentieren. Auf der Grundlage dieser Kataloge wurde eine Bewertung des Sturmaufkommens in den gegenüber dem Kalenderjahr um 6 Monate verschobenen Sturmjahren 2005/06 und 2006/07 vorgenommen.

Abgesehen vom Sturmtief ›Uriah‹, das am 26. 6. 2007 zu einer Rekord-Sommersturmflut im Emsbereich führte, kamen Stürme in beiden Saisons nur von Oktober bis März vor. Das Sturmaufkommen in der Saison 2005/06 war auf Monatssicht durchweg unterdurchschnittlich und zusammengenommen mit 23 Sturmtagen – von denen nur 2 zur SG-Klasse zählten – ungewöhnlich gering. Die Anzahl von G- und SG-Stürmen in der Saison 2006/07 war demgegenüber mit 40 und 12 doppelt bzw. 6-mal so hoch. Mit insgesamt 54 Sturmtagen liegt das Sturmjahr 2006/07 auf Rang 3 hinter 1994/95 (56) und 1989/90 (57). Neue Rekordhäufigkeiten wurden im Herbst (OND) und Dezember erreicht (27 & 14). Die Sturmfrequenz für Dezember und Januar (14+12) wurde nur 1982/83 (7+21) übertroffen und trat gleichzeitig mit Rekordwerten des Arktischen Oszillationsindex von über 2 auf. Die Orkane ›Britta‹ (1. 11. 2006), ›Franz‹ (12. 1. 2007), ›Orkun‹ (18. 3. 2007) und der bereits zur Saison 2007/08 zählende Orkan ›Tilo‹ (9. 11. 2007) verursachten an der deutschen Nordseeküste Sturmfluten mit Hochwasserständen meist deutlich oberhalb 200 cm über MHW.

□ Lufttemperatur und Strahlung (S. 102 ff.)

Die hier erarbeiteten Befunde basieren auf Beobachtungen des DWD zur Globalstrahlung und Lufttemperatur auf Norderney – sind jedoch von überregionaler Bedeutung. Die in den Jahren 2006 und 2007 eingetretenen Abweichungen vom jeweiligen klimatologischen Jahresgang wurden auf Zirkulationsanomalien zurückgeführt und dabei nicht nur miteinander, sondern auch mit den nordhemisphärischen Temperaturen des NCDC der NOAA in Beziehung gesetzt.

Zu den markantesten Strahlungsanomalien zählen die drastischen Überschüsse im Juli und ähnlich hohe Defizite im August 2006. Diese Dichotomie, die sich auch in entgegengesetzten krassen Temperatúrauslenkungen spiegelt, war Ergebnis einer dauerhaft quasistationären Hochdrucklage (Omegablock), die zur Monatswende durch eine ebenso persistente Troglage abgelöst wurde. Ein weiterer Omegablock führte im April 2007 erneut zu signifikanten Strahlungsüberschüssen.

Mit 10,6 und 11,0 °C sind 2006 und 2007 für Norderney die wärmsten Kalenderjahre im Zeitraum 1971 – 2010. In den Schatten gestellt werden diese Rekorde von der im Juli 2006 mit der europaweiten Hitzewelle einsetzenden 12-monatigen extremen Warmperiode, in der die Temperatur mit 12,3 °C um 3 K über dem Klimamittel lag. Alle saisonalen Temperaturen (JAS, OND etc.) erreichten neue Rekordhöhen, so dass der Jahresgang insgesamt auf einem um 3 K erhöhten Niveau ablief. Maßgebend für die Persistenz der Anomalie waren eine starke S-liche Anströmungskomponente ab September, das immense Sturmaufkommen von Oktober bis März, die extreme Zonalzirkulation von November bis Januar, die außergewöhnliche Einstrahlung im April und ein sommerartig schwachwindiges Frühjahr. Der großräumige Einfluss der atmosphärischen Zirkulationsanomalien spiegelt sich in der Tatsache, dass die Temperatur der Nordhemisphäre seit mindestens 130 Jahren in keiner 12-Monatsperiode so warm oder wärmer war wie im fast identischen Zeitfenster von Juni 2006 bis Mai 2007.

2.9 Literatur

Allison, P. D. und J. K. Liker, Analyzing sequential categorical data on dyadic interaction: A comment on Gottman, *Psych. Bull.*, 91, 393-403, 1982.

Barnston, A. G. und R. E. Livezey, Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *MWR*, 115, 1083-1126, 1987.

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

Bell, G. D. (Ed.), Climate Diagnostics Bulletin – Near real-time ocean/atmosphere monitoring, assessments, and prediction, *NOAA/NWS/NCEP Climate Prediction Center*, U. S. Dept. of Comm., Camp Springs, MD, 2006/2007.

www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CDB

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

Gates, W. L., J. S. Boyle, C. Covey, C. G. Dease, C. M. Doutriaux, R. S. Drach, M. Fiorino, P. J. Gleckler, J. J. Hnilo, S. M. Marlais, T. J. Phillips, G. L. Potter, B. D. Santer, K. R. Sperber, K. E. Taylor, D. N. Williams, An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I), *Bull. Am. Met. Soc.*, 80, 29-55, 1999.

Greatbatch, R. J., The North Atlantic Oscillation, *Stoch. Env. Res. Risk A.*, 14, 213-242, 2000.

Heyken, H., Küstenschutz: Sturmfluten waren Belastungsprobe für Festland und Inseln. 10-11 in: NLWKN (Hrsg.), *Jahresbericht 2006*, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2007.

www.nlwkn.niedersachsen.de/download/22820/Jahresbericht_2006_des_NLWKN.pdf

Heyken, H., 15 Sturmfluten sind keine Boten des Klimawandels. 14-15 in: NLWKN (Hrsg.), *Jahresbericht 2007*, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2008.

www.nlwkn.niedersachsen.de/download/24153/Jahresbericht_2007_des_NLWKN.pdf

Hosking, J. R. M. und J. R. Wallis, Parameter and quantile estimation for the Generalized Pareto Distribution, *Technometrics*, 29, 339-349, 1987.

Jenkinson, A. F., The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, *Q. J. R. Met. Soc.*, 81, 158-171, 1955.

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., The early twentieth century Arctic high – fact or fiction?, *Clim. Dyn.*, 1, 63-75, 1987.

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.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Y. A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, D. Joseph, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471, 1996.

- Klein Tank, A. M. G., J. B. Wijngaard, G. P. Können, R. Böhm, G. Demarée, A. Gocheva, M. Mileta, S. Pashiardis, L. Hejkrlik, C. Kern-Hansen, R. Heino, P. Bessemoulin, G. Müller-Westermeier, M. Tzanakou, S. Szalai, T. Pálsdóttir, D. Fitzgerald, S. Rubin, M. Capaldo, M. Maugeri, A. Leitass, A. Bukantis, R. Aberfeld, A. F. V. van Engelen, E. Forland, M. Miletus, F. Coelho, C. Mares, V. Razuvaev, E. Nieplova, T. Cegnar, J. Antonio López, B. Dahlström, A. Moberg, W. Kirchhofer, A. Ceylan, O. Pachaliuk, L. V. Alexander, P. Petrovic, Daily dataset of 20th-Century surface air temperature and precipitation series for the European climate assessment, *Int. J. Climatol.*, 22, 1441-1453, 2002. Data and metadata available at www.ecad.eu.
- Krzywinski, M., J. Schein, I. Birol, J. Connors, R. Gascoyne, D. Horsman, S. J. Jones, M. A. Marra, Circos: An information aesthetic for comparative genomics, *Genome Res.*, 19, 1639-1645, 2009.
- Lamb, H. H., Types and spells of weather around the year in the British Isles, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 76, 393-438, 1950.
- L'Heureux, M. L., J. C. Gottschalck, M. S. Halpert, Major modes of Northern Hemisphere variability: The Arctic Oscillation and the Pacific-North American pattern, S33-S36 in: Levinson, D. H. und J. H. Lawrimore (Eds.), State of the climate in 2007, Special Suppl. to the *Bull. Am. Met. Soc.*, 89, S1-S179, 2008.
- 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, BSH, Hamburg & Rostock, 2005.
www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/_Bericht38/index.jsp
- Loewe, P. (Ed.), System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen, *Berichte des BSH*, Nr. 44, 261pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2009.
www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/_Bericht44/index.jsp
- Lorenz, E. N., The essence of chaos, *UW Press*, Seattle, 227 pp., 1993.
- Luterbacher, J., M. A. Liniger, A. Menzel, N. Estrella, P. M. Della-Marta, C. Pfister, T. Rütishauser, E. Xoplaki, Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12704, 1-6, 2007.
- Mesinger, F. und R. E. Treadon, »Horizontal« reduction of pressure to sea level: Comparison against the NMC's Shuell method, *MWR*, 123, 59-68, 1995.
- Mohr, M., Problems with the mean seal level pressure field over the western United States, *MWR*, 132, 1952-1965, 2004.
- 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.
- Palutikof, J. P., B. B. Brabson, D. H. Lister, S. T. Adcock, A review of methods to calculate extreme wind speeds, *Meteorol. Appl.*, 6, 119-132, 1999.
- Pauley, P. M., An example of uncertainty in seal level pressure reduction, *Weather and Forecasting*, 13, 833-850, 1998.
- Reid, P. A., P. D. Jones, O. Brown, C. M. Goodess, T. D. Davies, Assessments of the reliability of NCEP circulation data and relationships with surface climate by direct comparisons with station based data, *Clim. Res.*, 17, 247-261, 2001.

Reynolds, R. W. und J. Xue, Sea surface temperatures in 2007, S37-S39 in: Levinson, D. H. und J. H. Lawrimore (Eds.), State of the climate in 2007, Special Suppl. to the *Bull. Am. Met. Soc.*, 89, S1-S179, 2008.

Schneider, E. D. und J. J. Kay, Life as a manifestation of the Second Law of Thermodynamics, *Math. and Comp. Mod.*, 19, 25-48, 1994.

Simiu, E. und N. A. Heckert, Extreme wind distribution tails: A peaks over threshold approach, *J. Struct. Eng.*, 122, 539-574, 1996.

Smith, T. M., R. W. Reynolds, T. C. Peterson, J. Lawrimore, Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006), *J. Clim.*, 21, 2283-2296, 2008.

Stewart, W. J., Probability, Markov Chains, queues, and simulation: The mathematical basis of performance modeling, *Princeton University Press*, Princeton, NJ, USA, 776pp, 2009.

UK Meteorological Office, Northern Hemisphere Mean Sea Level Pressure (MSLP) fields (1873-2005), [Internet]. NCAS British Atmospheric Data Centre, 2001, Date of citation: 2012. Available from:

http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_MSLP

Van den Dool, H. M. und Livezey R. E., Geographical distribution and seasonality of month-to-month correlation of monthly mean 700 mb heights, *MWR*, 112, 610-615, 1984.

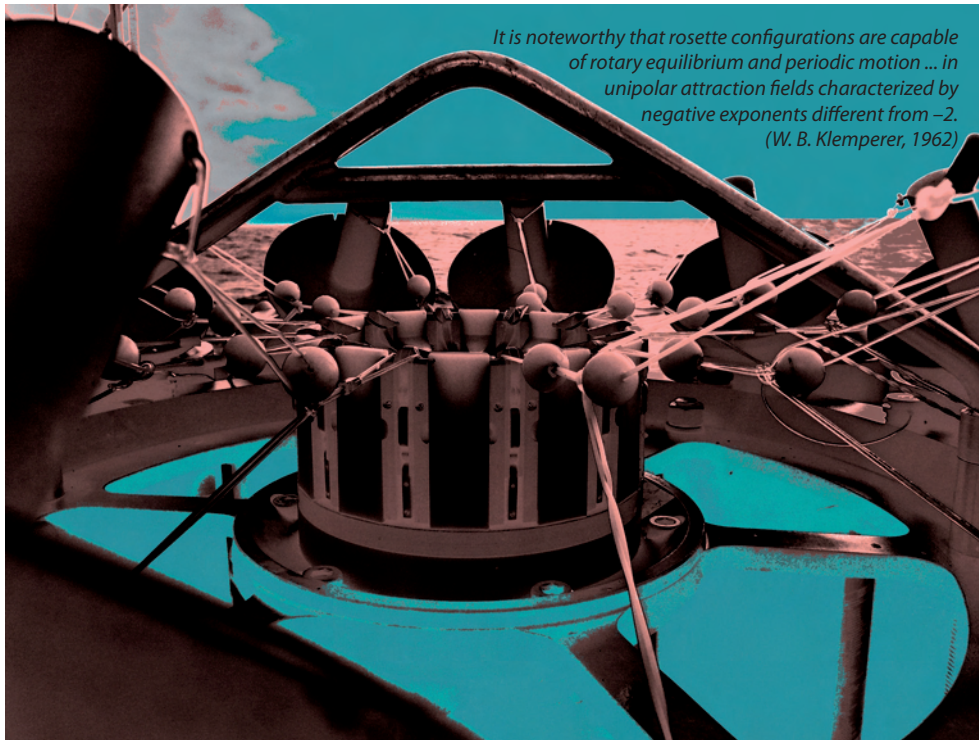
Wallace, J. M., North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms - one phenomenon, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, 791-805, 2000.

Wigley, T. M. S., The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events, *Climatic Change*, 97, 67-76, 2009.

Wilks, D. S., Statistical methods in the atmospheric sciences (3rd ed.), *Int. Geophys. Ser.*, 100, 704pp., Academic Press, 2011.

Yiou, P., R. Vautard, P. Naveau, C. Cassou, Inconsistency between atmospheric dynamics and temperatures during the exceptional 2006/2007 fall/winter and recent warming in Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21808, 1-7, 2007.

3 Meeresphysik



CTD-Rosette / Rosary Beads in a Ringworld (PL 2010)

<•> H. Klein & P. Loewe

- 3.1 Einführung ... 116
 <•> P. Loewe & H. Klein
- 3.2 Strömung ... 117
 <•> F. Janssen, H. Klein & P. Loewe
- 3.3 Seegang ... 131
 <•> D. Schrader
- 3.4 Wasserstand ... 137
 <•> S. Müller-Navarra
- 3.5 Temperatur ... 142
 <•> P. Loewe, H. Klein, A. Frohse, A. Schulz & N. Schmelzer
- 3.6 Salzgehalt ... 156
 <•> H. Klein, P. Loewe, A. Frohse & A. Schulz
- 3.7 Literatur ... 165

3.1 Einführung

<•> P. Loewe & H. Klein

Die Nordsee ist ein 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 Einstrom salzreichen Atlantikwassers, andererseits durch erhebliche Süßwasserzuflüsse und den Einstrom salzarmen Ostseewassers über das Kattegat und das 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 Oberflächenschicht auswirkt, eine thermische Schichtung aus. Im Übergangsbereich zwischen Oberflächen- und Bodenschicht werden starke vertikale Temperaturgradienten beobachtet. Tiefe und Ausprägung dieser Temperatursprungschicht bilden in der »Vegetationsperiode« wichtige Randbedingungen 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 6 Messstationen in der Deutschen Bucht, über eine Vielzahl von Küsten- und Hochseepegeln und Eisbeobachtungsstationen, aber auch durch Nutzung der Fernerkundung für den Nordseezustand relevante Messdaten. Unverzichtbar für die interdisziplinäre Interpretation und Bewertung ist die schiffsgebundene räumliche Umweltüberwachung, bei der viele physikalische und chemische (auch biologische) Variablen gleichzeitig an identischen Positionen bestimmt werden. Zentrale Bedeutung kommt dabei der seit 1998 in den Sommermonaten zum Zeitpunkt maximaler Schichtung durchgeführten Beprobung der gesamten Nordsee zu. Durch solche quasi-synoptischen und systematischen Beobachtungen wird eine Datenbasis geschaffen, die nicht nur die raumzeitlichen Veränderungen des Nordseezustands dokumentiert und interpretierbar macht, sondern auch für die Validierung hydrodynamischer und ökologischer Modelle Relevanz hat.

Für die Jahre 2006 und 2007 werden die Besonderheiten der wesentlichen ozeanographischen Zustandsvariablen – nämlich Strömung, Temperatur und Salzgehalt – dokumentiert und eingeordnet. Ferner werden Seegangs- und Meereisverhältnisse, aber auch integrale Zustandsgrößen wie Volumentransporte durch ausgewählte Querschnitte in der Nordsee 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. Auch die Ausführungen zu Wasserstandsschwankungen, Gezeiten, Windstau und Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste zielen auf ein systemisches Verständnis ab.

3.2 Strömung

<•> F. Janssen, H. Klein & P. Loewe

3.2.1	Einführung	... 117
3.2.2	Geographische Verteilungen	... 117
3.2.3	Wassertransporte	... 122
3.2.4	Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht	... 125
3.2.5	Zusammenfassung	... 130

3.2.1 Einführung

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). Die Intensität der Nordseezirkulation wird von der großräumigen atmosphärischen Zirkulation über dem Nordatlantik und der Nordsee selbst gesteuert. Sie unterliegt darum erheblichen saisonalen Schwankungen (Kap. 3.2.2), die sich auch im Volumentransport von Atlantik- und Ostseewasser in die Nordsee zeigen (Kap. 3.2.3, S. 122). In Abschnitt 3.2.4, S. 125 wird eine Klassifizierung der täglichen Reststrommuster in der Deutschen Bucht für die Jahre 2006 und 2007 präsentiert, die in engem Zusammenhang zu den Wetterlagen über der Nordsee steht (Kap. 2.3.2, S. 43). Datenbasis für alle Beiträge sind Strömungsdaten des operationellen BSH-Modells ›BSHcmod‹ (DICK ET AL. 2001).

3.2.2 Geographische Verteilungen

Die Oberflächenzirkulation der Nordsee wird mittels monatlicher Strömungsfelder für die Jahre 2006 (Abb. 3-1) und 2007 (Abb. 3-2, S. 120) dokumentiert. Die Verteilungsmuster zeigen durch Windantrieb und Dichteverhältnisse generierte Restströme, denn periodische Gezeitenströme wurden durch den Mittelungsprozess weitgehend eliminiert. Da eine Strömungsklimatologie für das BSH-Modell derzeit noch nicht vorliegt, lehnt sich die Einordnung der Strömungszustände an Besonderheiten und Anomalien der atmosphärischen Zirkulation, insbesondere der Luftdruckverteilung (vgl. Kap. 2.4, S. 68), an.

Der Winter 2006 war durch eine schwache Meridionalzirkulation charakterisiert (Abb. 2-13, S. 77), die sich im ›Nordseewind‹ – insbesondere im Januar und März – als Südwindniederschlag (Abb. 2-22, S. 89). Demzufolge konnte sich ein für diese Jahreszeit typisches nordseeweites zyklonales Strömungsmuster nicht ausprägen. Stattdessen bedingte der südliche Windantrieb im Kattegat und Skagerrak eine erhebliche Intensivierung des Baltischen Ausstroms und eine starke, nordwärts setzende Oberflächen-

3 Meeresphysik

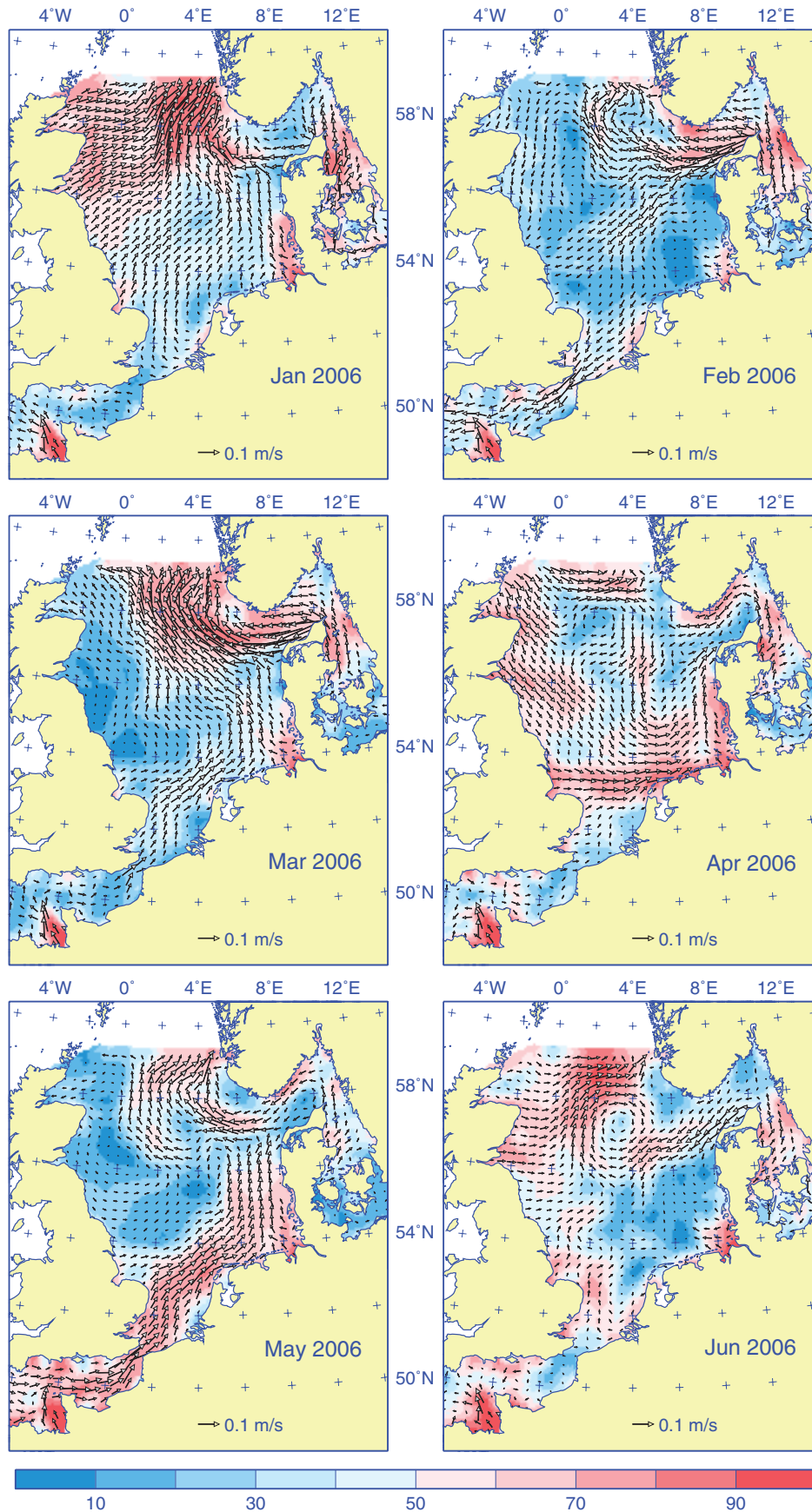


Abb. 3-1: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2006. Vektormittel aus Strömungsfeldern des »BSHcmod«. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.

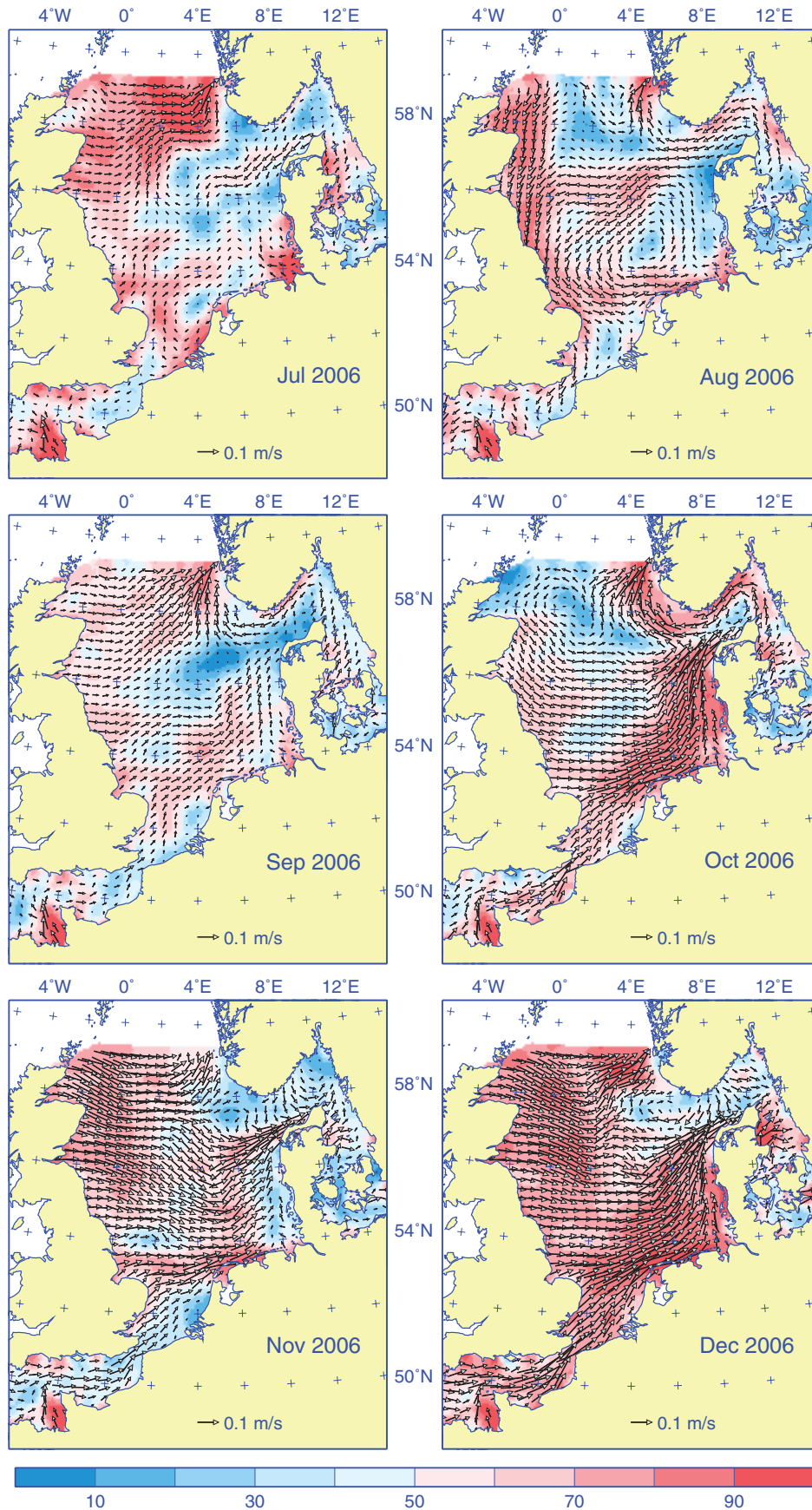


Fig. 3-1: Monthly surface circulation of the North Sea in 2006. Vector mean currents from BSH-cmod. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

3 Meeresphysik

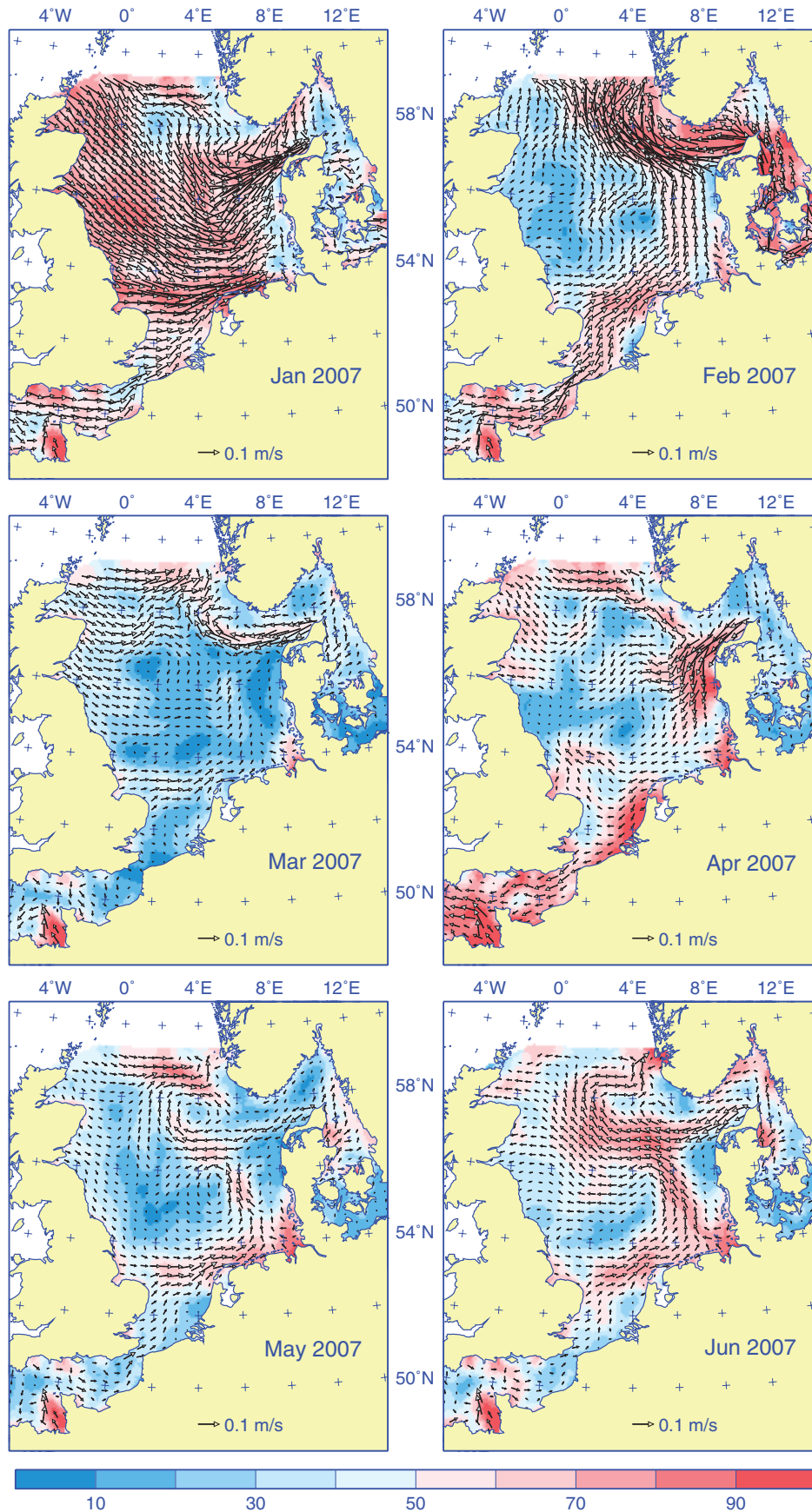


Abb. 3-2: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2007. Vektormittel aus Strömungsfeldern des »BSHcmod«. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel.

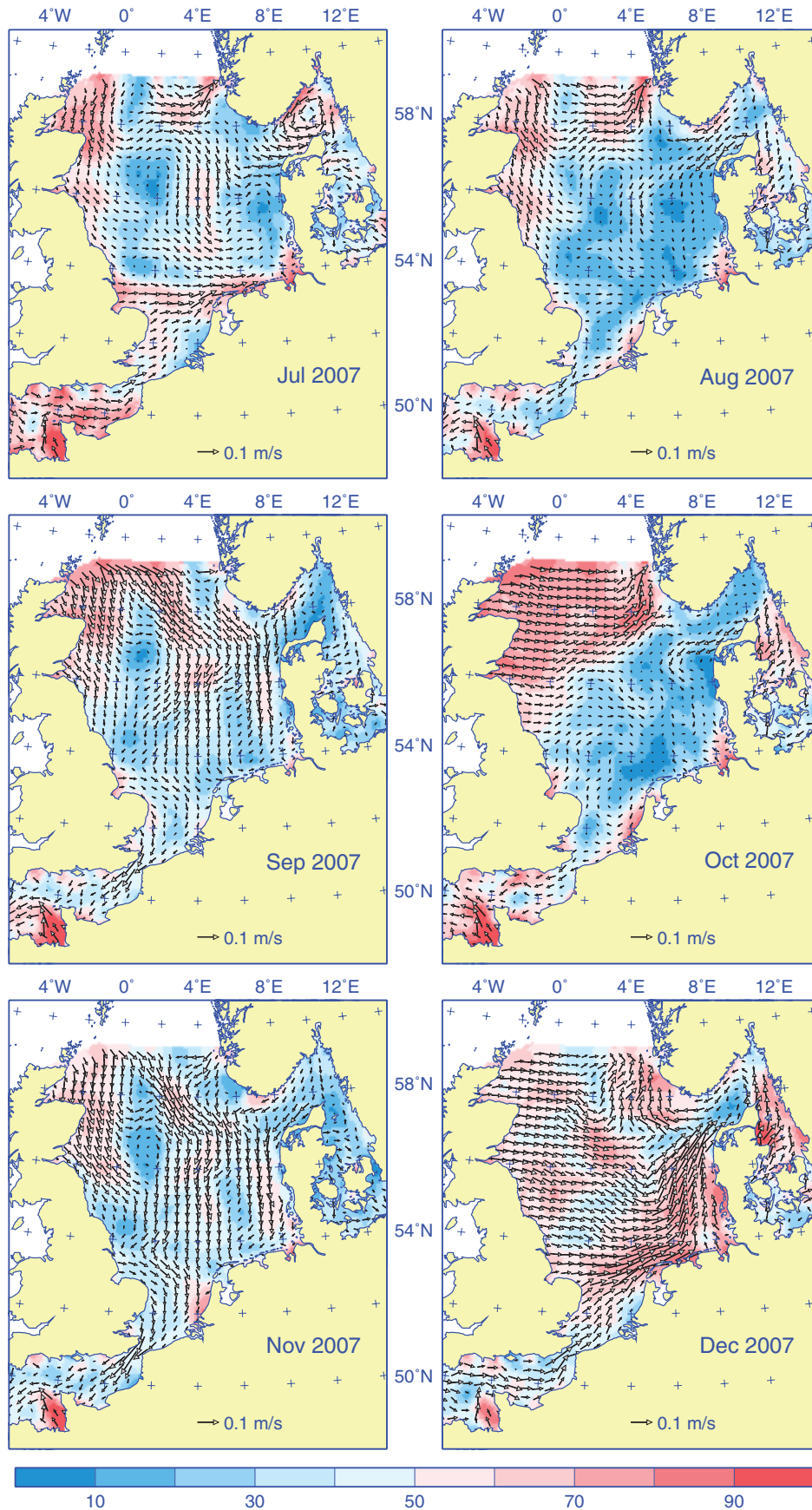


Fig. 3-2: Monthly surface circulation of the North Sea in 2007. Vector mean currents from »BSH-cmod«. Stability (%; colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

strömung entlang der norwegischen Küste. Auch im Frühjahr und Sommer 2006 waren die Strömungsfelder wenig stabil und wiesen kaum überregionale Strukturen auf. Derart diffuse Strömungsverhältnisse sind als Folge schwacher und wechselhafter Luftdruckgegensätze über der Nordsee in diesen Jahreszeiten nichts Ungewöhnliches.

Bemerkenswert sind die Auswirkungen der starken atmosphärischen Zonalzirkulation im Herbst/Winter 2006/07 (*Abb. 2-22, S. 89*), die mit einem der höchsten Sturm aufkommen im Zeitraum 1948 – 2010 verbunden war (*Tab. 2-19, S. 99*). Andauernde Winde aus SW-lichen, später W-lichen Richtungen und ab Mitte November nochmals zunehmende Windstärken bildeten sich in einer nordseeweiten, starken und persistenten zyklonalen Oberflächenzirkulation ab, die im Dezember auch in der Deutschen Bucht ihre stärkste Ausprägung erreichte (*Abb. 3-1*). In dieser zyklonalen Phase, die bis Ende Januar andauerte, war der Baltische Ausstrom stark gedrosselt. Mit Umstellung der atmosphärischen Zirkulation im Februar 2007 stellte sich bei vorherrschenden S-Winden ein Strömungszustand wie im März 2006 ein. Einerseits kam die nordseeweite Zirkulation weitgehend zum Erliegen, andererseits bahnte sich der über lange Zeit reduzierte Baltische Ausstrom jetzt mit sehr hoher Intensität seinen Weg in die nördliche Nordsee.

Im weiteren Verlauf des Jahres 2007 war die Oberflächenzirkulation meist nur schwach ausgeprägt und von geringer Persistenz (*Abb. 3-2*). Erwähnenswert erscheint die überregionale antizyklonale Oberflächenzirkulation im April, die auf die starke Hochdruckanomalie mit Kern über Großbritannien zurückzuführen ist (*Abb. 2-18, S. 82*). Ferner kam es im Oktober zu einer Zweiteilung des Musters mit starken ostwärts setzenden Strömungen im Norden und sehr schwachen, wenig stabilen Strömungen in der südlichen Nordsee. Dieses dichotome Muster wurde durch ein ausgedehntes Hochdruckplateau mit Kern über Belgien hervorgerufen, dessen Druck im Nordwesten steil in Richtung Island abfiel (*Abb. 2-20, S. 84*).

3.2.3 Wassertransporte

Die hier diskutierten Wassertransporte durch die Straße von Dover, den Westrand der Deutschen Bucht und das Kattegat basieren auf simulierten Strömungen des operationellen Zirkulationsmodells des BSH. Die Modellergebnisse wurden zunächst über zwei Tideperioden von etwa 24,8 Stunden gemittelt, um Gezeiteneffekte zu eliminieren. Die Volumentransporte durch die Querschnitte sind als Tagesmittel und übergreifende Monats- und Quartalsmittel für die Jahre 2006 und 2007 dargestellt (*Abb. 3-3 bis Abb. 3-5*), wobei in die Nordsee bzw. Deutsche Bucht gerichtete Transporte positives Vorzeichen haben. In den Zeitreihen der täglichen Transporte wurden Sturmereignisse markiert, deren Stärke und Typus den Wetterlagenkalendern entnommen werden können (vgl. *Tab. 2-1 & Tab. 2-3, S. 45*).

Der Transport durch die Straße von Dover (*Abb. 3-3*) war im saisonal gemittelten Verlauf des Jahres 2006 praktisch durchweg in die Nordsee gerichtet. Insbesondere in der Periode November 2006 bis Februar 2007 erreichte der Transport auf monatlichen Zeitskalen Spitzenwerte von über 0,4 Sv. Dieser starke Einstrom in die Nordsee wurde durch die verstärkte atmosphärische Zonalzirkulation verursacht (*Abb. 2-16, S. 80*), die sich in *Abb. 3-3* im hohen Sturm aufkommen ausdrückt. In der zweiten Jahreshälfte 2007 ging der Transport stark zurück und wechselte sogar auf saisonalen Zeitskalen zeitweilig das Vorzeichen (Ausstrom von Nordseewasser in den Kanal).

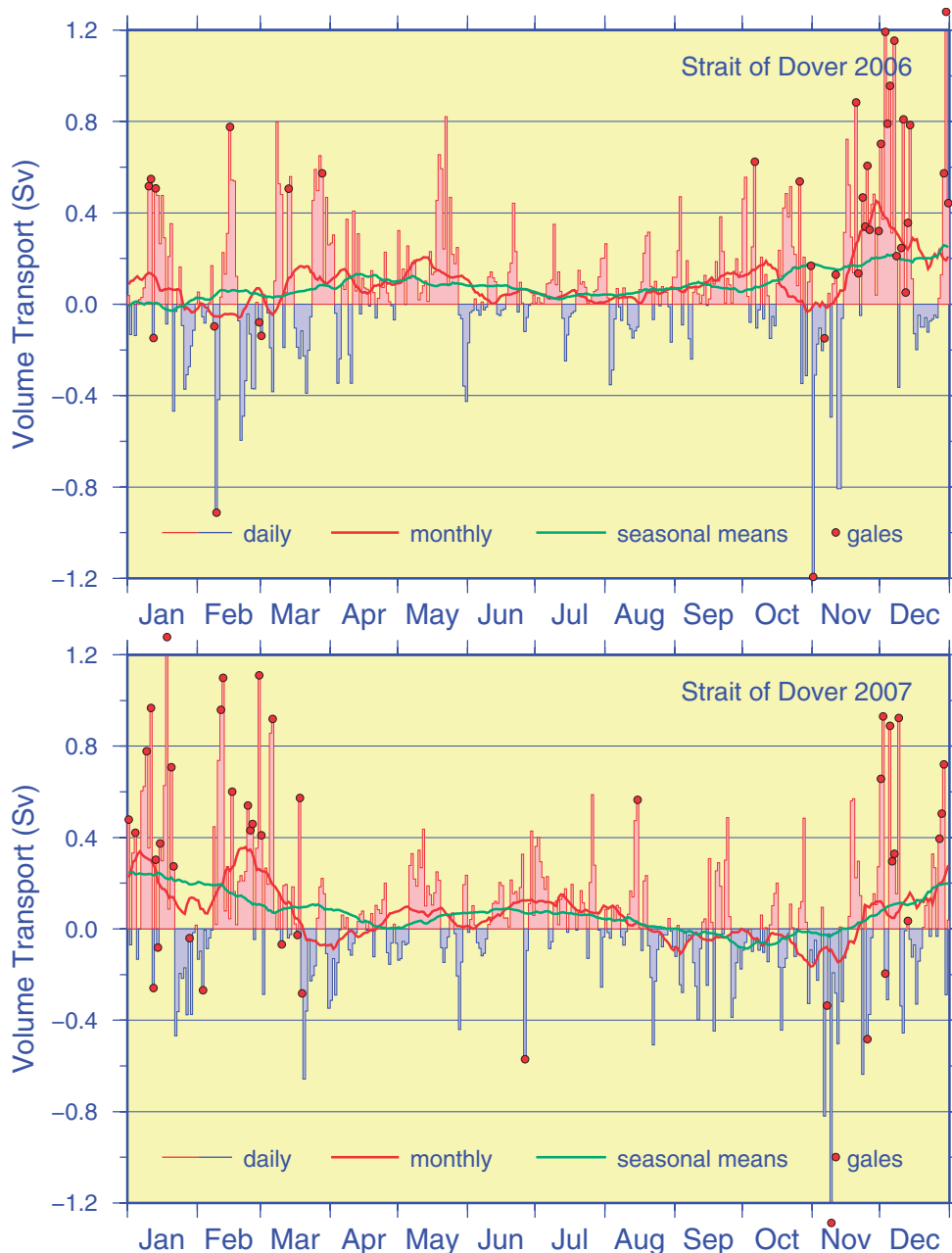


Abb. 3-3: Wassertransport durch die Straße von Dover in den Jahren 2006 (oben) und 2007 (unten). Modelldaten ›BSHcmod‹; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 3-3: Volume transport through the Strait of Dover in 2006 (top) and 2007 (bottom). Model data ›BSHcmod‹; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Transporte durch den Westrand der Deutschen Bucht (Abb. 3-4) entsprachen im zeitlich gemittelten Verlauf weitgehend denen durch die Straße von Dover. Dies erklärt sich aus dem Umstand, dass sich die transportrelevante und meist dominante Zonal-komponente des Windantriebs für beide Regionen aufgrund der großräumigen Dimensionen der Wettersysteme gewöhnlich wenig unterscheidet. Auch für die Deutsche Bucht ist demzufolge der starke und andauernde (ostwärtige) Einstrom im Herbst/Winter 2006/07 die markanteste Besonderheit in der zeitlichen Transportentwicklung über beide Jahre, die sich in vollem Einklang mit bereits geschilderten Eigenheiten in der Entwicklung der Oberflächenzirkulation befindet (vgl. Kap. 3.2.2, S. 117).

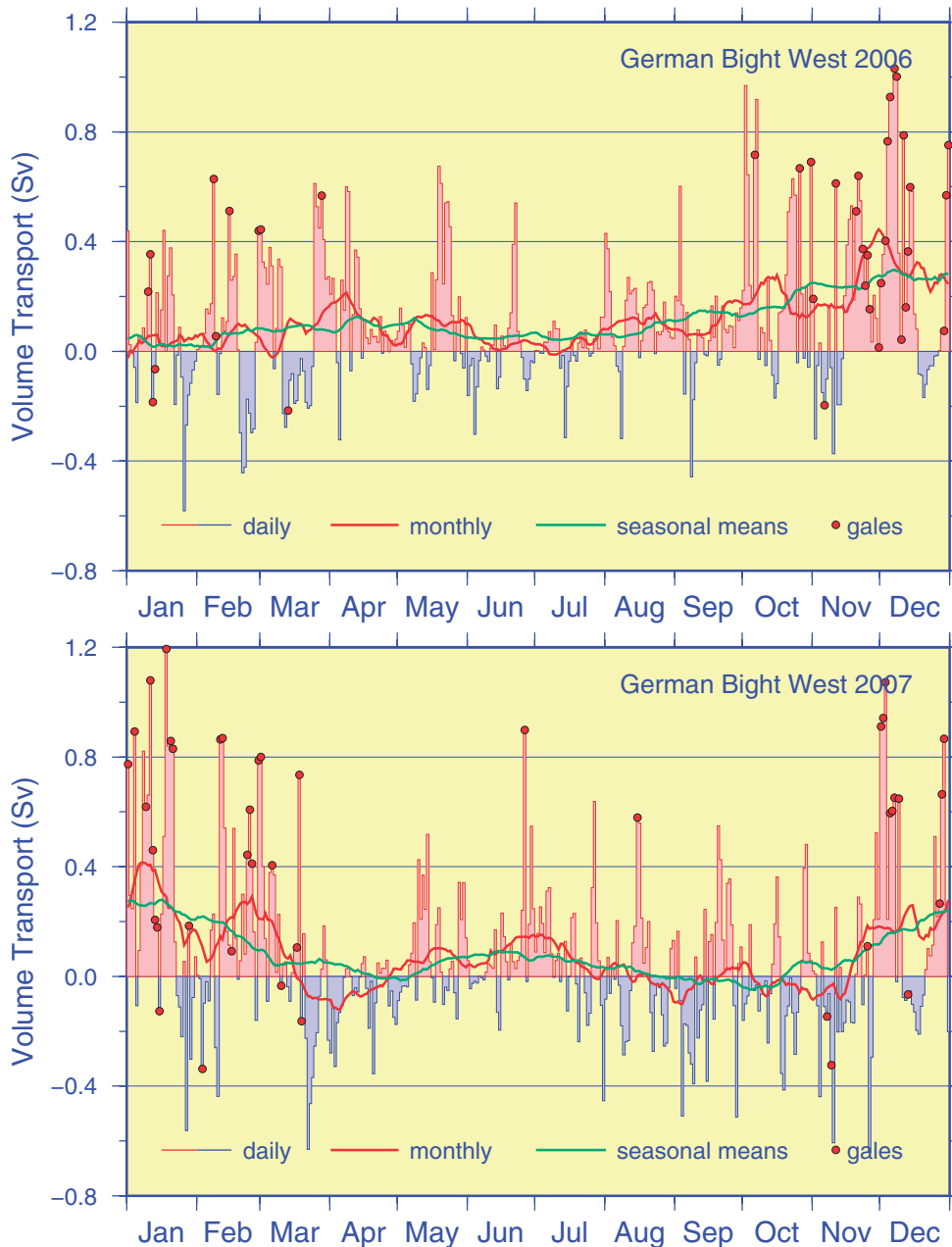


Abb. 3-4: Wassertransport in den Jahren 2006 (oben) und 2007 (unten) durch den Westrand der Deutschen Bucht von $53^{\circ}15'$ bis $55^{\circ}N$ entlang $6^{\circ}20'E$. Modelldaten ›BSHcmod‹; $1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3/\text{s}$

Fig. 3-4: Volume transport in 2006 (top) and 2007 (bottom) through western boundary transect of the German Bight; extending from $53^{\circ}15'$ to $55^{\circ}N$ along $6^{\circ}20'E$. Model data ›BSHcmod‹; $1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3/\text{s}$.

Der zeitliche Verlauf des Transports durch das Kattegat (Abb. 3-5) zeichnete sich, wie gewöhnlich, durch hohe kurzfristige Fluktuationen aus, die auf längeren Zeitskalen einen schwachen Nettoeinstrom in die Nordsee ergaben (Baltischer Ausstrom). Besonders bemerkenswert ist von daher der beständig hohe Transport im Februar 2007, der in Spitzen oberhalb $0,2\text{ Sv}$ lag. Mit der Umstellung der atmosphärischen Zirkulation von verstärkt zonal auf meridional, die sich beispielsweise im Sprung des ›Nordseewindes‹ von W auf S zeigt (Abb. 2-22, S. 89), kam es nach monatelanger Blockade Anfang Februar zur Forcierung des Baltischen Ausstroms (s. a. Kap. 3.2.2, S. 117).

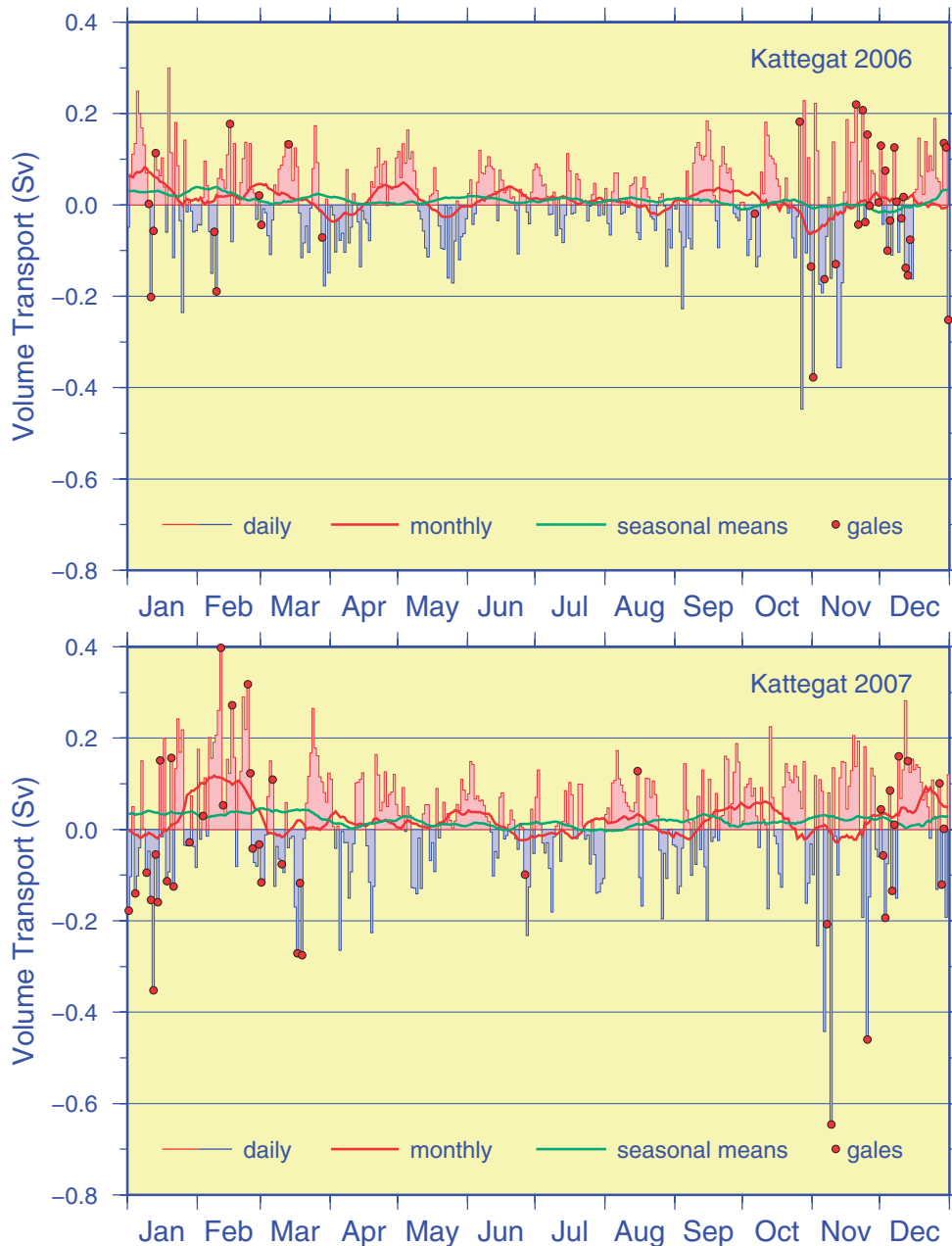


Abb. 3-5: Wassertransport durch das Kattegat in den Jahren 2006 (oben) und 2007 (unten). Modelldaten ›BSHcmod‹; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 3-5: Volume transport through the Kattegat in 2006/2007. Model data ›BSHcmod‹; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2.4 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Klassifizierung der Oberflächenzirkulation in der Deutschen Bucht für die Jahre 2006 und 2007 präsentiert. Die Klassifizierung der Strömungsverhältnisse ist ähnlich motiviert wie diejenige der Wetterlagen über der Nordsee (vgl. Kap. 2.3, S. 40): sie soll in kompakter Form die täglichen Strömungszustände und deren zeitliche Entwicklung in den Berichtsjahren dokumentieren. Der Zusammenhang zwischen Wetterlagen und Strömungsmustern wurde in LOEWE (2009) erörtert. Gemeinsam können Wetterlagen- und Strömungskalender bei der Interpretation besonderer Ereignisse in der Meeresumwelt von Nutzen sein.

3.2.4.1 Daten, Methodik und Überblick

Die Zirkulationsstatistik basiert auf mit ›BSHcmod‹ generierten geographischen Verteilungen täglicher Restströme in der obersten Modellschicht (0 – 8 m). Diese liegen in Kartenform vor und wurden im Gebiet zwischen 53° 15' – 55° 30' N und 6° 30' – 9° E analysiert, indem das räumliche 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 direktionale Muster (N, S, W, E, NW, SE) für vorherrschende Strömungsrichtungen definiert. SW- und NE-Strömungen sind in dieser Klassifizierung

2006	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	C				N	C	V				V	
2	NW	V		C	C	V		C	C	C		
3	V						C				A	
4	NW		C	S		A	V	W	V	V		
5	W	C		A	N			V	A		S	
6									C			
7	NW	V	V	C	NW		C	A	S		SE	
8		E	N			V			A	V	C	
9		V	C					V		C	S	
10	C	A	NW	A	V				V	V	A	
11		V				N	V			NW	C	
12	V			C		C		C	C	C	V	
13			V				A			N	SE	E
14		C			W	A			V		V	
15	C		W		V	A			NW	V		C
16			A	V	C	C		V				V
17					V	V						
18	V	V				V	V					
19	C		V	C				C				
20		A		N						C		
21	V		A	V	C	C			C			A
22				N							C	
23	C	V	V				C	V				
24			NW			V						
25		A		V	V	W		N		N		
26					V	V	V	V		C		V
27		V				A		E	V			
28	A	C	C		E					V		
29				W	S	V		V	C			C
30		./.		V	A					C		
31	V			./.	V	./.	C	C	./.	C	./.	

C(yclonic) ↻ | A(nticyclonic) ↻ | V(ariable) | N ↑ | S ↓ | E → | W ← | NW ↙ | SE ↘

Tab. 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für das Jahr 2006. Im Gegensatz zur Windrichtung gibt die Strömungsrichtung an, wohin der Strom setzt.

Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2006. Unlike wind direction current direction is the direction toward which the current flows.

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. Die verschiedenen Richtungsmuster sind in nachfolgenden Statistiken als Richtungstyp DIR zusammengefasst. Strömungsmuster, die keinem der genannten Muster zugeordnet werden können und z. T. auch Wirbelstrukturen enthalten, werden als V (variabel) klassifiziert.

2007	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	C	V	C	V	V	NW	C	V	A	A	V	C
2	V	S	C	V			C	W	C	V	S	C
3	C	A	V	A	W	V	V	C		C	A	V
4			NW	S			V	N		A	C	C
5	V	S		A	E		C	C	A	V		C
6		C	C	V	V						V	
7		N		SE	V	NW	V	A		A	V	V
8	C	A			A		V	A				C
9		W	V	V	C				SE	V	A	NW
10			C	V	V	V	SE				V	W
11					C	C	V	V	A	A	A	
12	V	C	V	NW	C		C			V	V	
13			V	V		W		E		C	A	V
14			C	C	V		W	A		A		
15		N	SE	V	A	C		C				
16		C	V	A		C	C	C		V		
17			C	A		V		A		A	V	A
18		V	C	SE	C	NW	V			A		V
19			A	A		C	W	C				W
20			V	A		C	A		C			
21					A		C	W		V	C	V
22	V	C	A	V		V		A	V	C	C	C
23					V		V	V		A	A	V
24	A			C		C		SE	C		V	
25								S	V	V	SE	
26	SE	V	V	W	W		C				A	C
27	A	A	V	W		V		A	A	C		
28	SE	C			C	C	S		V	A	C	
29	C		C	V		C		SE				
30	S	./.	V	A			A		V	A		V
31	SE		NW	./.		./.	A	SE	./.	V	./.	C

C(yclonic) ↻ | A(nticyclonic) ↻ | V(ariabel) | N↑ | S↓ | E → | W ← | NW ↖ | SE ↘

Tab. 3-2: Kalender der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für das Jahr 2007. Im Gegensatz zur Windrichtung gibt die Strömungsrichtung an, wohin der Strom setzt.
 Table 3-2: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2007. Unlike wind direction current direction is the direction toward which the current flows.

Die zeitliche Abfolge der Zirkulationsmuster ist für die Jahre 2006 (Tab. 3-1) und 2007 (Tab. 3-2) in Kalenderform wiedergegeben. In Tab. 3-3, S. 128 sind die Häufigkeiten der wichtigsten Zirkulationsmuster für die Jahre 2000 – 2009 zusammengestellt.

YEAR	C	A	V	DIR
2000	199 2.3	39 -1.4	77 -1.4	51 -0.5
2001	138 -0.7	51 -0.4	108 0.4	68 1.2
2002	143 -0.4	42 -1.2	131 1.8	49 -0.7
2003	149 -0.1	50 -0.4	108 0.4	58 0.2
2004	160 0.4	71 1.4	77 -1.4	58 0.2
2005	135 -0.8	65 0.9	88 -0.8	77 2.1
2006	166 0.7	49 -0.5	110 0.5	40 -1.6
2007	128 -1.2	71 1.4	113 0.7	53 -0.3
2008	154 0.1	57 0.2	100 -0.1	54 -0.2
2009	148 0.2	57 0.2	100 -0.1	60 0.4
M ± S	152.2 ± 20.1	55.0 ± 11.2	101.3 ± 16.8	56.4 ± 10.2

Tab. 3-3: Häufigkeiten der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für 2000 – 2009 mit standardisierten Abweichungen vom 10-Jahresmittel (m). Anomalien größer $|1|$ Standardabweichung (s) fett.

Table 3-3: Frequencies of daily circulation patterns in the German Bight for 2000 – 2009 together with standardized departures from 10-year means (m). Bold: anomalies exceeding $|1|$ standard deviation (s).

Saisonale und jährliche Häufigkeiten der Zirkulationsmuster für die Jahre 2006 und 2007 sind zusammen mit empirischen Verteilungen für den Zeitraum 2000 – 2009 in Abb. 3-6 wiedergegeben. Die Darstellung gibt nicht nur Aufschluss über die zwischenjährige Variabilität eines Musters innerhalb einer Jahreszeit, sondern auch über die Umverteilung der Zirkulationsmuster von Saison zu Saison innerhalb eines bestimmten Jahres. Darüber hinaus wird erstmals quantitativ belegt, dass das Auftreten insbesondere des zyklonalen und des variablen Musters einem ausgeprägten Jahrgang unterliegt.

3.2.4.2 2006

Der Strömungskalender 2006 (Tab. 3-1) zeichnet sich gegenüber denen für das Vor- (LOEWE 2009) und das Folgejahr (Tab. 3-2) durch eine bemerkenswert geringere Tag-zu-Tag Variabilität aus. Beispielhaft hierfür sei die ununterbrochene Phase zyklonaler Zirkulation angeführt, die von Mitte November bis Mitte Dezember andauerte und damit den bisherigen Persistenzrekord von 16 Tagen vom November 2005 deutlich übertraf. Der Herbst 2006 war insgesamt vom C-Muster dominiert (s. a. Abb. 3-6). Auf Jahressicht wies das Richtungsmuster DIR mit nur 40 Tagen die geringste Häufigkeit im Referenzzeitraum auf (Tab. 3-3). Im Wesentlichen folgte die oberflächennahe Zirkulation dem atmosphärischen Antrieb (Tab. 2-1, S. 44). Im Gegensatz zum Wind ist die Strömung jedoch räumlich durch die Küstenlinien beschränkt, so dass beispielsweise südwestliche Winde in der Regel eine zyklonale Zirkulation bewirken (vgl. LOEWE 2009, S. 90).

3.2.4.3 2007

Das zyklonale Muster trat im Jahr 2007 an nur 128 Tagen auf und somit mit der geringsten Häufigkeit im Referenzzeitraum 2000 – 2009 (Tab. 3-3). Dieses Minimum ergibt sich aus dem geringen Vorkommen des C-Typs im Frühjahr und Herbst (Abb. 3-6), welches wiederum auf entsprechend geringe Häufigkeiten von SW- und/oder C-Wet-

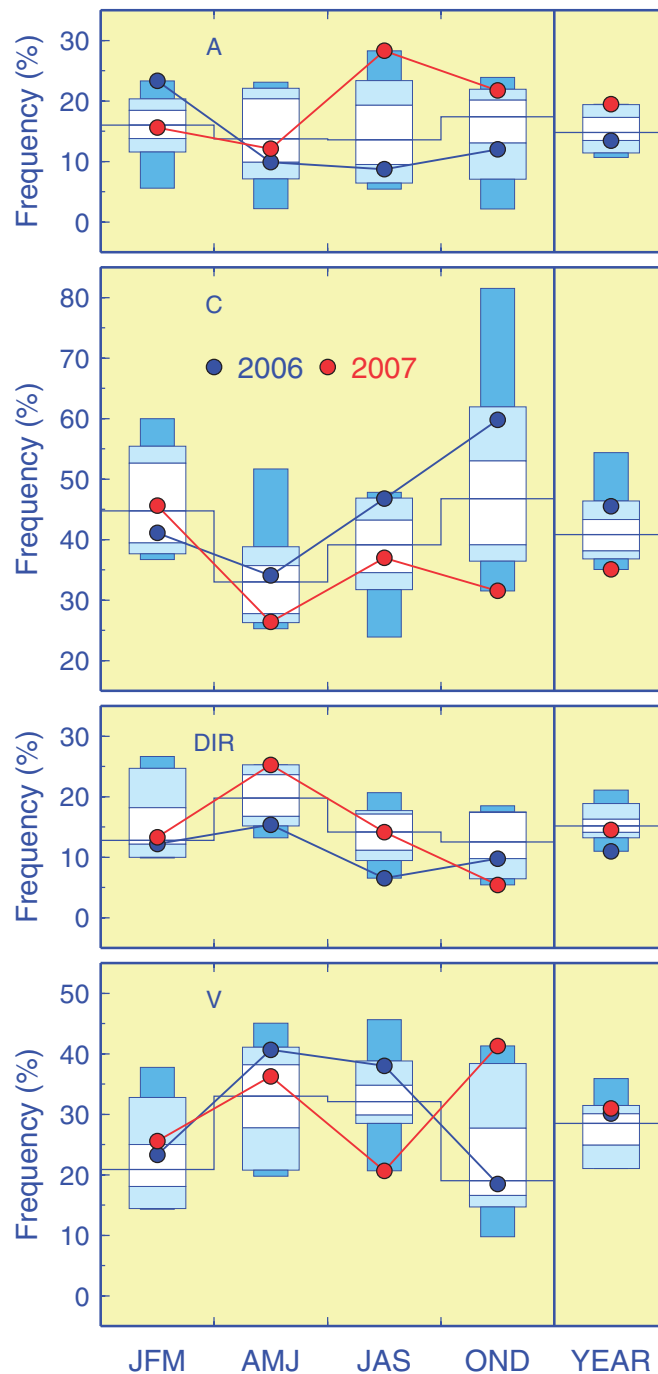


Abb. 3-6: Saisonale und jährliche Häufigkeiten der Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für die Jahre 2006 und 2007 mit Perzentilen der empirischen Verteilungen für 2000 – 2009 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, Trep-penlinie), 75 und 90 %.

Fig. 3-6: Seasonal and annual frequencies of circulation patterns in the German Bight for 2006 and 2007 along with percentiles of empirical distributions for 2000 – 2009 (stacked co-lumns). Percentile range Min to Max, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, stepline), 75 and 90 %.

terlagen zurückzuführen ist (Abb. 2-4, S. 52), denn diese Wetterlagen produzieren etwa 80% der zyklonalen Strömungsmuster in der Deutschen Bucht (LOEWE 2009). Obwohl in der zweiten Januardekade fast durchgängig Weststurm herrschte (Tab. 2-3,

S. 45), war die zyklonale Zirkulation in der Deutschen Bucht durch eine Phase variabler Zirkulation unterbrochen (Tab. 3-2); in ein generell zyklonales Muster hatten sich Wirbelstrukturen eingebettet. Das antizyklonale Strömungsmuster erreichte wie bereits im Jahr 2004 eine Rekordhäufigkeit von 71 Tagen (Tab. 3-3), die vor allem auf sein extrem hohes Vorkommen in den Sommermonaten zurückgeht (Abb. 3-6), welches an entsprechend erhöhte Häufigkeiten von N-Wetterlagen gekoppelt war (Abb. 2-4, S. 52). Die Jahreshäufigkeiten des V- und DIR-Musters entsprachen etwa den Mittelwerten des Referenzzeitraums (Tab. 3-3). Aus Abb. 3-6 ist jedoch ersichtlich, dass sich in diesem unauffälligen Ergebnis extrem geringe und extrem hohe saisonale Häufungen kompensieren. Dabei war die extreme Häufung des Richtungsmusters im Frühjahr, welches vornehmlich als W-Strömung in Erscheinung trat (Tab. 3-2), an E-Wetterlagen gebunden (vgl. Tab. 2-3, S. 45). Das besonders seltene (häufige) Vorkommen des V-Musters im Sommer (Herbst) befindet sich im Einklang mit hohen (geringen) Geschwindigkeiten des Nordseewindes in den entsprechenden Jahreszeiten (Abb. 3-6; Abb. 2-22, S. 89).

3.2.5 Zusammenfassung

Die Oberflächenzirkulation der Nordsee, basierend auf monatlichen Strömungsfeldern (Modell), zeichnete sich im Winter 2006 durch eine abgeschwächte Meridionalzirkulation aus, die im wesentlichen aus dem im Januar und März über der Nordsee vorherrschenden Südwind resultierte. Ein für diese Jahreszeit typisches nordseeweites zyklonales Strömungsmuster konnte sich daher nicht ausprägen. Auch im Frühjahr und Sommer 2006 waren die Strömungsfelder wenig stabil und wiesen kaum überregionale Strukturen auf. Im Herbst/Winter 2006/07 bildete sich eine starke atmosphärische Zonalzirkulation aus, die mit einem der höchsten Sturmaufkommen im Zeitraum 1948 – 2010 verbunden war. Dies bewirkte die Ausbildung einer nordseeweiten, starken und persistenten zyklonalen Oberflächenzirkulation. Mit Umstellung der atmosphärischen Zirkulation im Februar 2007 stellte sich bei vorherrschenden S-Winden ein Strömungszustand wie im März 2006 ein. Einerseits kam die nordseeweite Zirkulation weitgehend zum Erliegen, andererseits bahnte sich der über lange Zeit reduzierte Baltische Ausstrom jetzt mit sehr hoher Intensität seinen Weg in die nördliche Nordsee. Im weiteren Verlauf des Jahres 2007 war die Oberflächenzirkulation meist nur schwach ausgeprägt und von geringer Persistenz.

Die Zirkulationsstatistik für die Deutsche Bucht basiert auf der zeitlichen Abfolge der täglichen Zirkulationsmuster der Restströme mit neun typischen Mustern. Das Jahr 2006 zeichnete sich gegenüber dem Vor- und dem Folgejahr durch eine bemerkenswert geringere Tag-zu-Tag Variabilität und eine deutlich geringere Häufigkeit der in der Regel an Starkwindereignisse gebundenen direktionalen Strömungsmuster aus.

Im Jahr 2007 trat das zyklonale Muster mit der geringsten Häufigkeit im Referenzzeitraum 2000 – 2009 auf. Obwohl in der zweiten Januardekade fast durchgängig Weststurm herrschte, war die zyklonale Zirkulation in der Deutschen Bucht durch eine Phase variabler Zirkulation unterbrochen. Das antizyklonale Strömungsmuster erreichte (wie schon im Jahr 2004) eine Rekordhäufigkeit von 71 Tagen. Das besonders seltene (häufige) Vorkommen des variablen Musters im Sommer (Herbst) befindet sich im Einklang mit hohen (geringen) Geschwindigkeiten des Nordseewindes in den entsprechenden Jahreszeiten.

3.3 Seegang

<•> D. Schrader

3.3.1	Einführung	... 131
3.3.2	Geographische Verteilungen	... 131
3.3.3	›Britta‹ – Extremseegang & Allerheiligenflut	... 134
3.3.4	Zusammenfassung	... 136

3.3.1 Einführung

Seegang ist der durch Windenergie erzeugte Schwingungszustand der Meeresoberfläche. Er setzt sich aus der lokalen Windsee und der aus anderen Seegebieten einlaufenden Dünung zusammen. Die Wellenhöhen der Windsee sind abhängig von der Windstärke, der Wirkdauer des Windes und Windstreichlänge, dem sog. ›Fetch‹. Dünung ist »alter« Seegang aus entfernten Sturmgebieten, der sich über große Distanzen unabhängig vom lokalen Wind ausbreitet. Dünungswellen sind im Gegensatz zur lokalen Windsee weniger steil und können im Atlantik Wellenlängen von mehr als 200 m erreichen. Als Maß für die Stärke des Seegangs wird die signifikante Wellenhöhe (SWH) verwendet, die als mittlere Wellenhöhe des oberen Drittels der Wellenhöhenverteilung definiert ist. Im Unterschied zu Strömungsrichtungen bezeichnen Richtungsangaben für Wind und Seegang deren Herkunft.

Die Verteilungen beruhen auf den Seegangsdaten des operationellen Wellenvorhersagemodells ›WAM‹ (WAMDI GROUP 1988) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Verwendbarkeit der zeitlich lückenlosen und flächendeckenden Modelldaten für klimatologische Aussagen wurde anderswo belegt (LOEWE ET AL. 2006).

3.3.2 Geographische Verteilungen

Das saisonale Seegangsklima wird durch die mittlere signifikante Wellenhöhe und die Hauptrichtung von Windsee und Dünung charakterisiert (Abb. 3-7, Abb. 3-8). Die maximalen Wellenhöhen im Winterhalbjahr und geringeren Wellenhöhen im Frühjahr und Sommer erklären sich aus entsprechenden Intensitätsverteilungen im Windantrieb (vgl. Kap. 2.4, S. 68). Generell nehmen die Wellenhöhen von Norden nach Süden und zu den Küsten hin ab. Diese Struktur des Wellenhöhenfeldes ist durch die geographisch-bathymetrische Prägung der Nordsee mit nach Norden hin zunehmenden Wassertiefen und der weiten Öffnung zum Nordatlantik bestimmt. Die aus dem Nordostatlantik kommende Dünung kommt in allen Jahreszeiten aus NW-licher Richtung und wird mit abnehmender Wassertiefe zu den Küsten hin gebrochen. Die Richtung der Windsee stimmt generell mit der Windrichtung überein. Sie kommt zwischen April und September überwiegend aus W- bis NW-lichen Richtungen, im Winterhalbjahr dagegen aus SW bis W. Abweichend von dieser generellen Richtungsverteilung kam

3 Meeresphysik

die Windsee im Winter 2006 in den E-lichen und N-lichen Seegebieten der Nordsee im Mittel aus SE (Abb. 3-7).

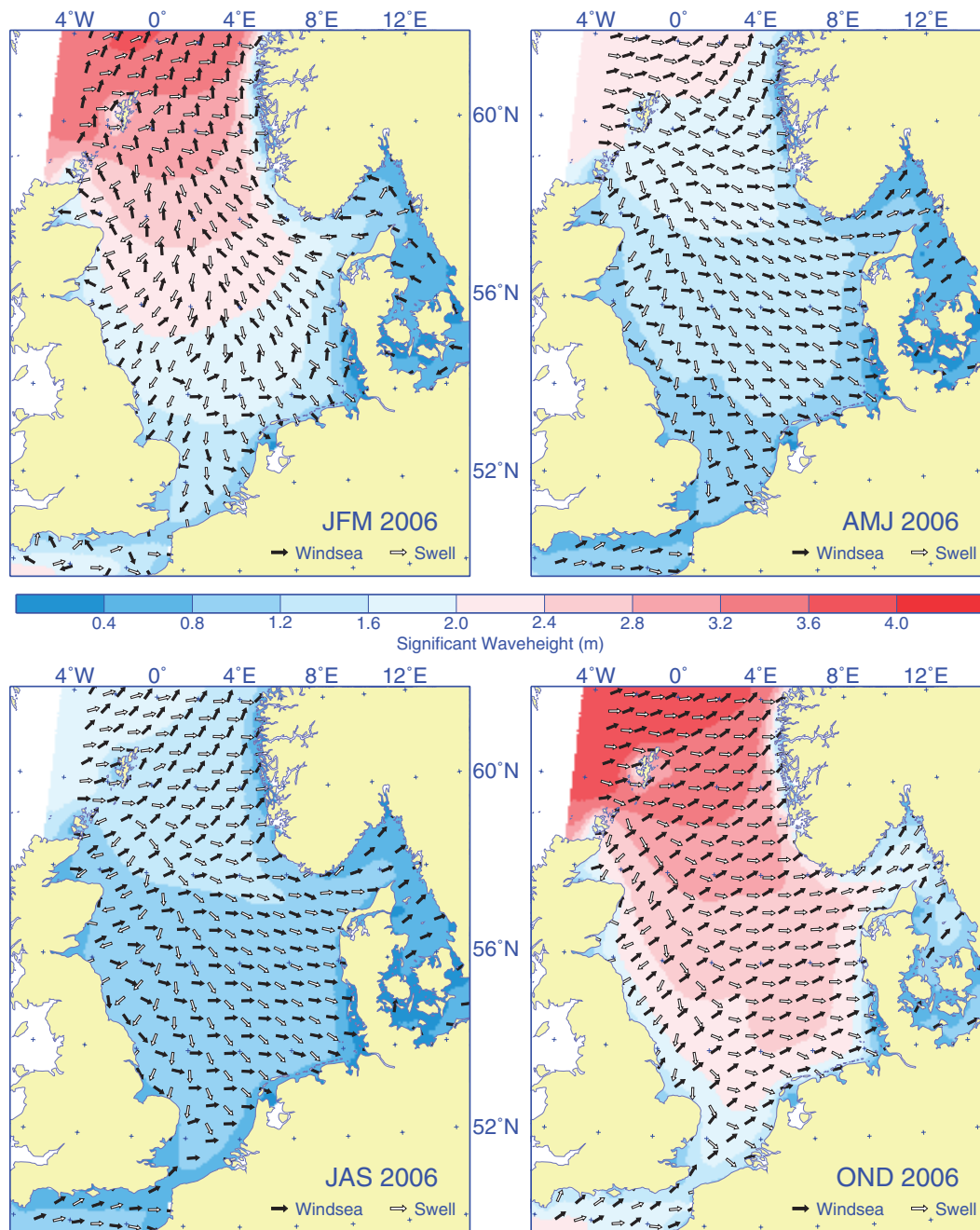


Abb. 3-7: Saisonale geographische Verteilungen von Wellenhöhe, Windsee und Dünung im Jahr 2006 (WAM Modell); JFM = Januar, Februar, März etc.

Fig. 3-7: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2006 (WAM Modell); JFM = January, February, March etc.

Die mittleren signifikanten Wellenhöhen waren in beiden Jahren, auch saisonal betrachtet, zumeist höher als in den Vorjahren. Eine Ausnahme bildet wieder der Winter 2006, in dem die NW-wärts laufende Windsee das Niveau der Vorjahre nicht überschritt und deutlich unter den Seegangshöhen der beiden Folgejahre blieb. Ein Grund dafür ist die meist geringere Windstärke bei südlichen bis östlichen Windlagen. Außer-

dem wächst die Seegangsenergie aufgrund der fehlenden Windstreichlänge von den SE-lichen Küsten von Null in Richtung NW an.

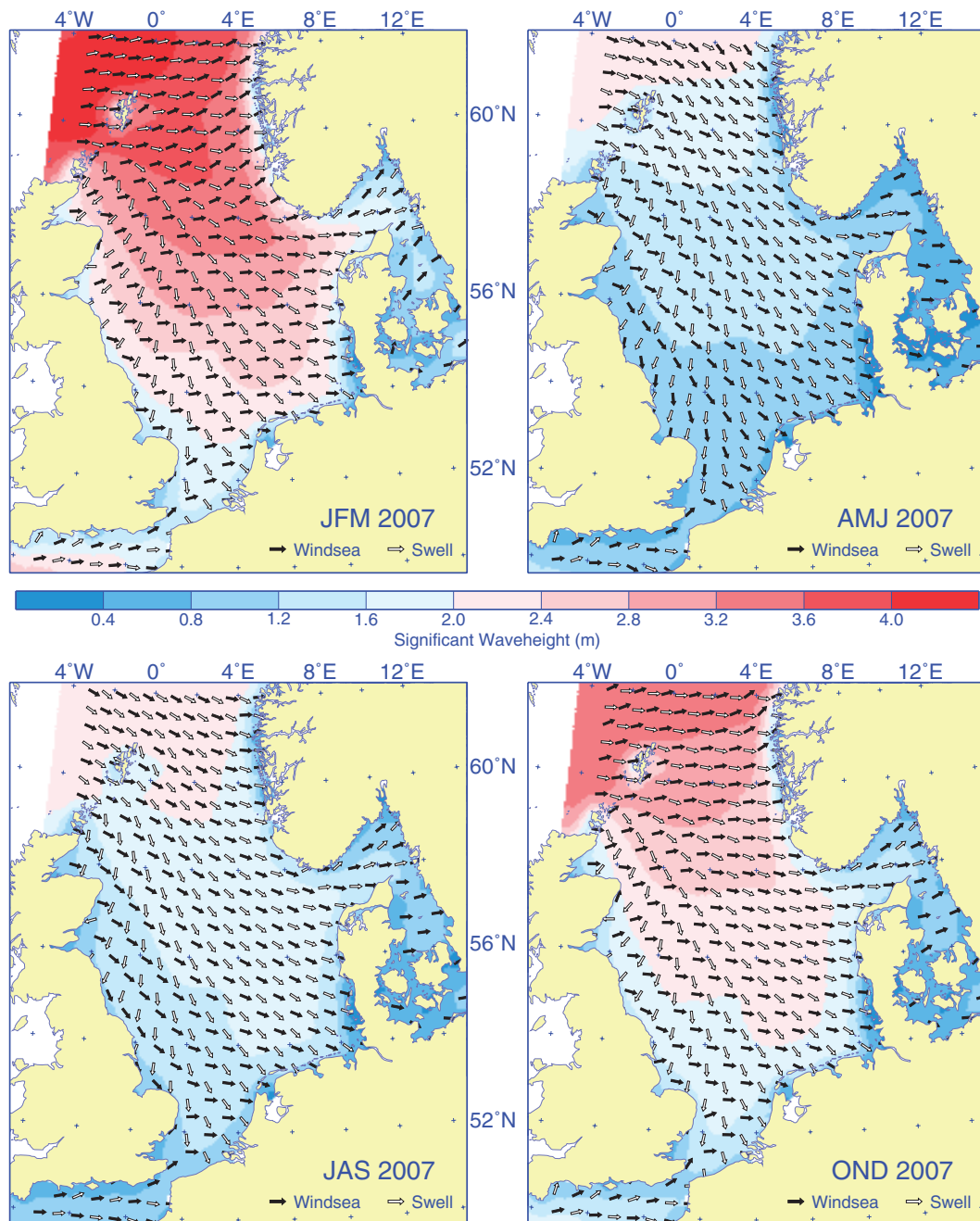


Abb. 3-8: Saisonale geographische Verteilungen von Wellenhöhe, Windsee und Dünung im Jahr 2007 (WAM Modell); JFM = Januar, Februar, März etc.

Fig. 3-8: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2007 (WAM Modell); JFM = January, February, March etc.

3.3.3 ›Britta‹ – Extremseegang & Allerheiligenflut

Extrem hohe Wellen können bei Sturm auftreten. Beispielhaft werden die Seegangsverhältnisse für das Orkantief ›Britta‹ diskutiert, das nicht nur außergewöhnlich große Wellenhöhen auch in der Deutschen Bucht verursachte (Abb. 3-9), sondern auch zur neunten Allerheiligenflut¹ führte.

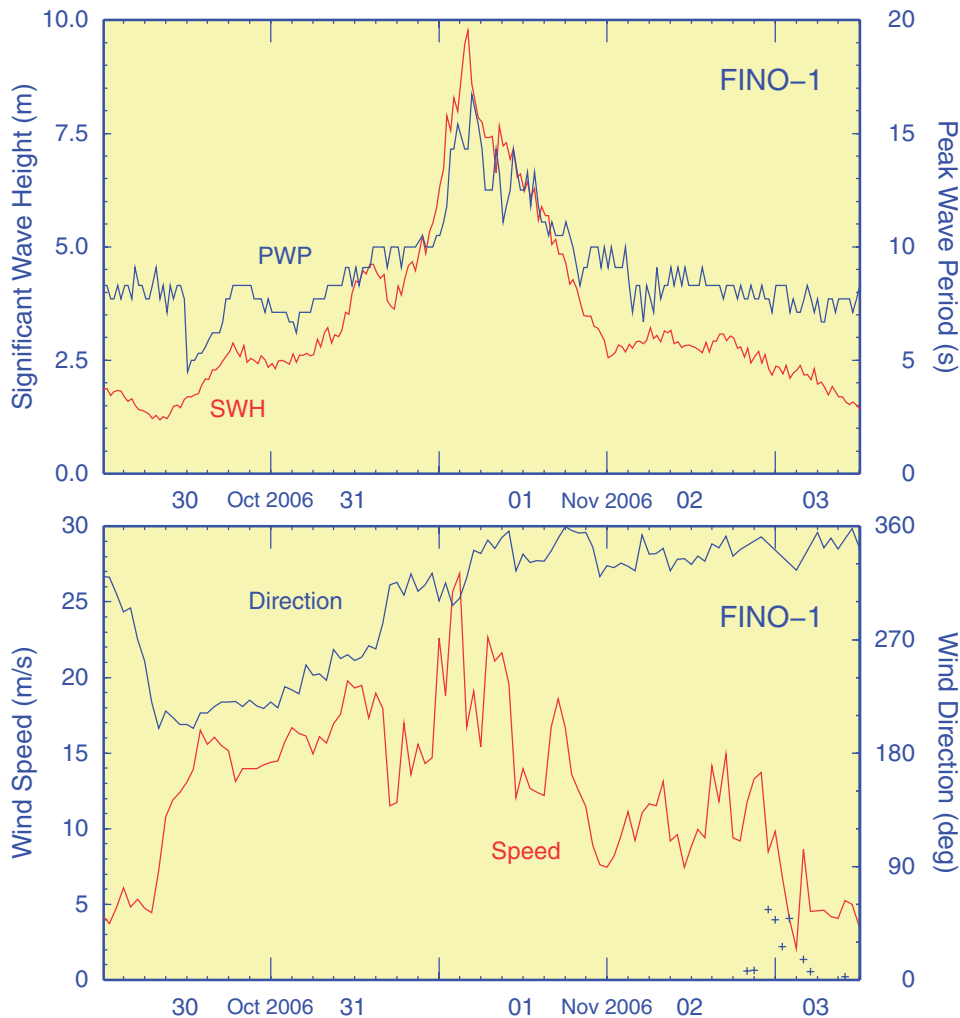


Abb. 3-9: Seegangparameter an der Messstation FINO-1 während des starken Sturms am 31. Oktober und 1. November 2006. Oben: Signifikante Wellenhöhe (rot) und Peakperiode (blau). Unten: Windgeschwindigkeit (rot) und Windrichtung (blau).

Fig. 3-9: Observed wave parameters at FINO-1 during the severe gale of October 31 and November 1, 2006. Top: Significant wave height (red) and peak period (blue). Bottom: Wind speed (red) and wind direction (blue).

›Britta‹ zog im Verlauf des 31. Oktober und 1. November 2006 mit einem Kerndruck von 980 hPa über die nördliche Nordsee nach Südnorwegen und weiter in die Ostsee. An seiner Westflanke wurden mittlere Windgeschwindigkeiten von 50 kn (10 Bft, Orkanböen) erreicht (LEFEBVRE 2006). Die mittlere Windrichtung lag in der Nacht zum 1. November mit NNW parallel zur Längsachse der Nordsee und ermöglichte so die größtmögliche Windstreichlänge. An den Stationen Brent, Ekofisk, Euro und FINO-1

1. <http://de.wikipedia.org/wiki/Allerheiligenflut>

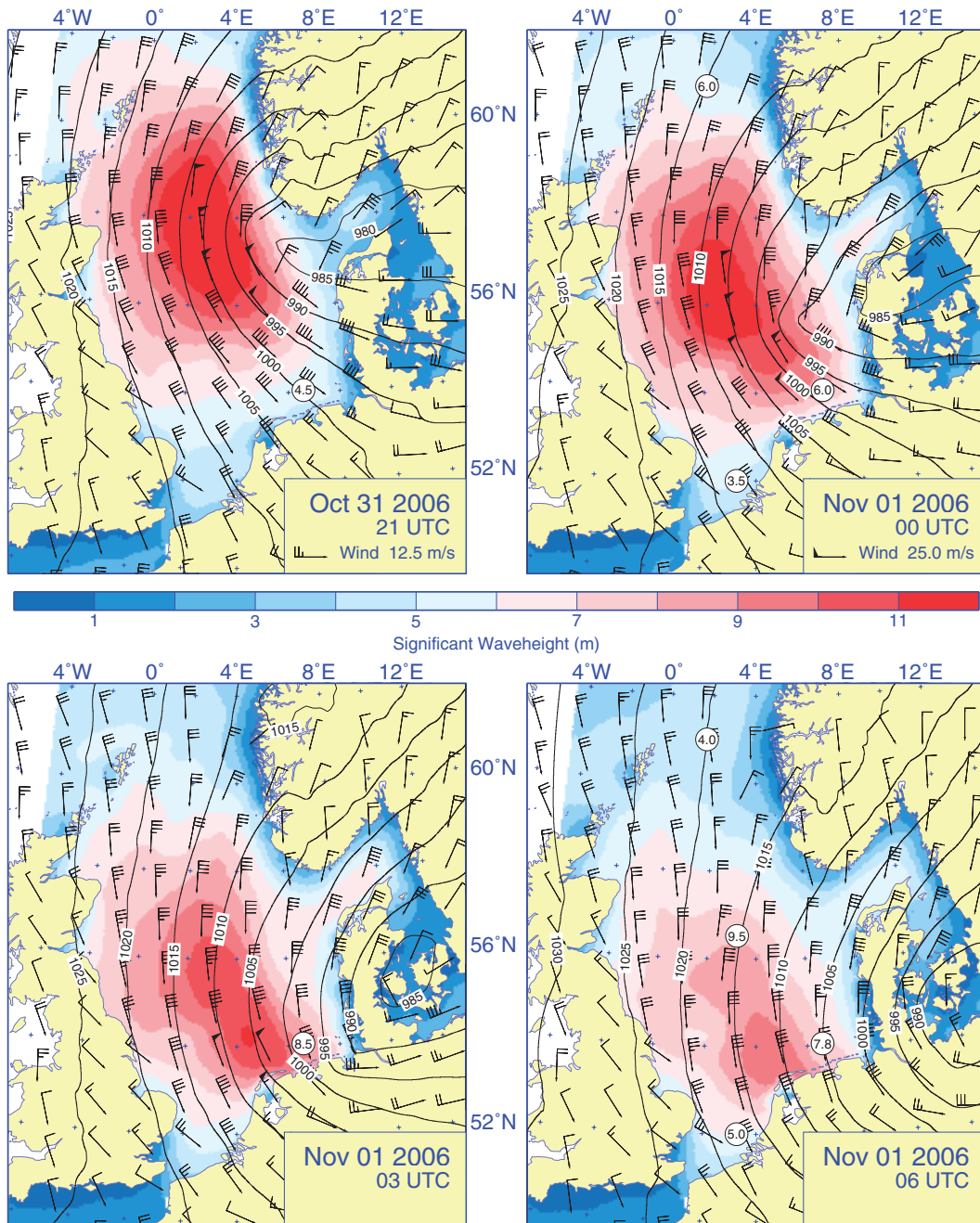


Abb. 3-10: Luftdruck, Wind und Wellenhöhe im Verlauf des Sturmes am 1. November 2006 (\triangleright WAM \triangleleft Modell). Eingekreist: Gemessene Wellenhöhen an den Stationen Brent, Ekofisk, FINO-1 und Euro (von N nach S, r. u.).

Fig. 3-10: Air pressure, wind and wave height during the gale of November 1, 2006 (\triangleright WAM \triangleleft Modell). Encircled: Wave heights measured at Brent, Ekofisk, FINO-1 and Euro (from N to S, b. r. frame).

wurden signifikante Wellenhöhen von über 11 m gemessen (Abb. 3-10). Das Wellensystem erreichte in den frühen Morgenstunden das Seegebiet vor der niederländischen und ostfriesischen Küste, wobei sich der Seegang in der flacheren Küstenregion kaum abschwächte.

An der Forschungsplattform FINO-1 vor Borkum wurde um 4 Uhr UTC eine maximale SWH von 9,8 m gemessen. In Abb. 3-9 sind die während des Sturmes gemessenen

Seegangparameter dargestellt. Die Wellenhöhe wuchs mit der Winddrehung auf NW sehr schnell an. Bemerkenswert sind die sehr langen Wellenperioden von bis zu 16 s, was einer Wellenlänge von etwa 250 m entspricht. Eine extrem hohe Welle verursachte Schäden an der Forschungsplattform in 15 m Höhe über dem mittleren Meeresspiegel (Abb. 3-11).

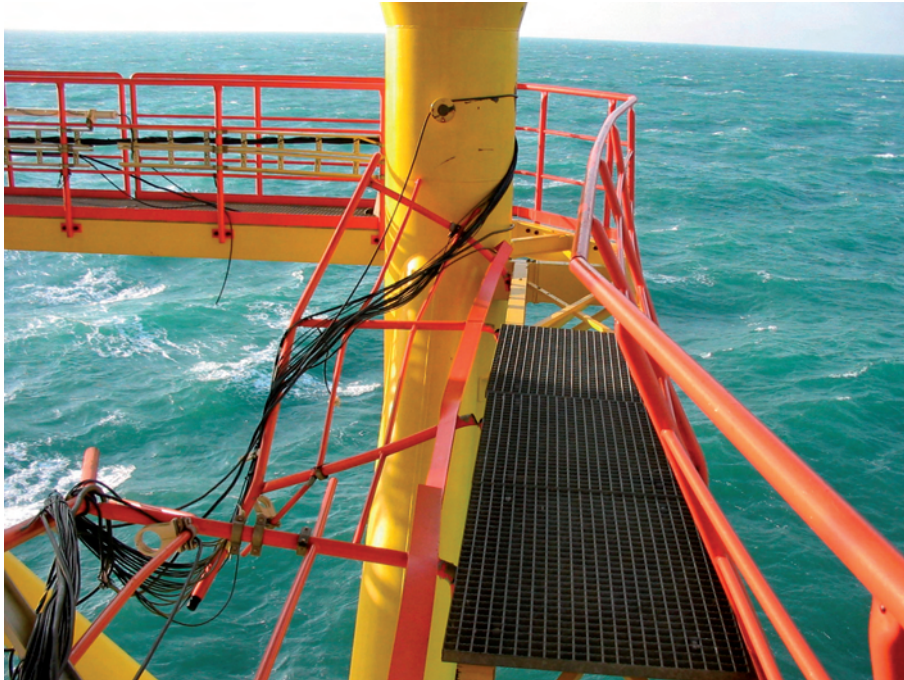


Abb. 3-11: Schäden durch Extremseegang an der Messplattform FINO-1.

Fig. 3-11: Damage due to extreme waves at the observation tower FINO-1.

Der langdauernde NNW-Sturm verursachte eine sehr schwere Spring-Sturmflut am Morgen des 1. November (Allerheiligen) in der Deutschen Bucht. An der ostfriesischen Küste, im Bereich des stärksten Windes, traten örtlich extrem hohe Wasserstände ein (Emden: 3,6 m über MHW (5 m NN), Wilhelmshaven: 3,1 m über MHW (4,9 m NN)), die zu den höchsten bisher gemessenen zählen. Weiter östlich im Weser- und Elbegebiet fielen die Höchstwasserstände niedriger aus aufgrund des dort schwächeren und bis zum Zeitpunkt des Tidehochwassers bereits nachlassenden Windes.

3.3.4 Zusammenfassung

Die typischen Verteilungsmuster des Seegangs sind durch die vorherrschenden Windverhältnisse und die geographisch-bathymetrische Gestalt der Nordsee geprägt. Die mittleren Wellenhöhen waren in den meisten Quartalen der Jahre 2006 und 2007 höher als in den Vorjahren. Wind und Windsee kamen in allen Jahreszeiten im Mittel aus Richtungen zwischen SW und NW, außer im Winter 2006, als südöstliche Richtungen dominierten. Die Dünung hatte in allen Jahreszeiten NW-liche Richtung. In einem NNW-Sturm am 1. November kam es in der nördlichen und zentralen Nordsee zu signifikanten Wellenhöhen über 10 m; vor der ostfriesischen Küste wurden noch 9,8 m gemessen.

3.4 Wasserstand

<•> *S. Müller-Navarra*

3.4.1	Einführung	... 137
3.4.2	Schwankungen des Meeresspiegels	... 137
3.4.3	Gezeiten	... 138
3.4.4	Mittlerer Meeresspiegel	... 138
3.4.5	Windstaustatistik und Sturmfluthäufigkeit	... 139
3.4.6	Zusammenfassung	... 141

3.4.1 Einführung

Als Wasserstand des Meeres wird die vertikale Lage der Grenzfläche zwischen Meer und Atmosphäre relativ zu einem geodätischen Festpunkt an Land bezeichnet. Relative Wasserstandsschwankungen ergeben sich u.a. durch die Gezeiten, atmosphärische Einflüsse, Änderungen im Wasserhaushalt, Klimaänderungen sowie Änderungen der ozeanischen Zirkulation. Hinzu treten noch isostatische Höhenänderungen der Erdkruste und Setzungen des Pegeluntergrundes. Vorgetäuschte Wasserstandsschwankungen können aus nicht erkannten systematischen Fehlern der Messeinrichtung oder fehlerhaften nachträglichen »Korrekturen« herrühren. Der Wasserstand wird an der deutschen Nordseeküste schon seit mehr als einhundert Jahren sehr sorgfältig aufgezeichnet und ausgewertet. Besonders lang ist die Zeitreihe stündlicher Messwerte am Pegel Cuxhaven (WAHL ET AL. 2010). Wasserstände an diesem Pegel wurden u.a. schon Mitte des 19. Jahrhunderts für Sturmflutwarnungen in Hamburg herangezogen (MÜLLER-NAVARRA 2009A).

3.4.2 Schwankungen des Meeresspiegels

Die Schwankungen des Meeresspiegels können aus oben genannten Gründen von Ort zu Ort recht verschieden ausfallen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf Schwankungen des relativen Meeresspiegel (RSL) an der deutschen Nordseeküste. Aus langen Zeitreihen deutscher Pegel lässt sich u.a. folgendes ableiten:

- Änderung der Gezeiten (Amplituden, Phasen, Steig- und Falldauern, mittlere Hoch- und Niedrigwasser, etc.),
- der lokale relative Meeresspiegelanstieg und
- Statistiken zum Windstau.

3.4.3 Gezeiten

Der Wasserspiegel der Nordsee ist an jedem Ort immer bestrebt, sich senkrecht zum örtlichen Vektor des Schwerfeldes einzustellen. Dieser Vektor unterliegt sehr kleinen Störungen, die durch Mond und Sonne verursacht werden und Gezeitenbeschleunigungen genannt werden. Nur in großen Ozeanen mit Wassertiefen von wenigen Kilometern verursachen die Gezeitenbeschleunigungen Wasserstandsschwankungen von wenigen Dezimetern. Diese im offenen Ozean erzeugten langen Gezeitenwellen dringen in die Nordsee ein und erfahren hier wegen der abnehmenden Tiefe und Form des Nordseebeckens eine Amplitudenzunahme. Der Gezeitenhub an der deutschen Nordseeküste erreicht bis zu 4 m. Der direkte Einfluss der örtlichen Gezeitenbeschleunigungen auf die Wassermassen der Nordsee ist sehr klein und beträgt lediglich wenige Millimeter bis Zentimeter (MÜLLER-NAVARRA 2002). Es handelt sich hier also hauptsächlich um Mitschwingungsgezeiten. Der Einfluss vom Mond ist deutlich größer als der von der Sonne, weswegen die Gezeiten der Nordsee im Mittel eine Periode von etwas mehr als einen halben Tag (12,42 h) haben und als halbtägige Gezeiten bezeichnet werden.

Langfristige Änderungen der Gezeiten, sei es aus astronomischen Gründen oder weil sich die Küstengestalt und die Tiefenverteilung der Gezeitengewässer geändert hat, fließen verfahrensbedingt Jahr für Jahr in die vorausberechneten Werte in den deutschen Gezeitentafeln ein (ANONYMUS 2009). So hat sich der mittlere Tidenhub (MTh) von ungefähr 3 m in Cuxhaven seit den 1950er Jahren nur unwesentlich verändert, während das mittlere astronomische Hochwasser (MHW) und das mittlere astronomische Niedrigwasser (MNW) mit dem relativen mittleren Meeresspiegel (s.u.) anstiegen. Die langjährigen Veränderungen dieser Art haben z. B. JENSEN UND MUDERSBACH (2007) analysiert. So haben sich an den Küstenpegeln die Gezeitenverhältnisse etwas stärker geändert als an den Inselpegeln, was teilweise mit Küstenschutzmaßnahmen und Ausbaumaßnahmen der Schifffahrtswege zusammenhängt.

3.4.4 Mittlerer Meeresspiegel

Der mittlere relative Meeresspiegel (RSL) in Cuxhaven, der monatlich oder jährlich aus stündlichen Wasserstandsregistrierungen abgeleitet wird, schwankt wegen der Wetterabhängigkeit so stark, dass aus 2 aufeinanderfolgenden Jahren (2006 – 2007) keine zeitliche Änderung des Anstiegs, z.B. ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg, abgeleitet werden kann. Zur Beurteilung der lokalen Entwicklung der Wasserstände über viele Jahre sind die Monatsmittelwerte gleichwohl hervorragend geeignet.

Vergleicht man die zeitlichen Änderungen der Wasserspiegellage der Jahre 2006 bis 2007 mit einem beliebigen Referenzzeitraum des 20. Jahrhunderts, so stellt man lediglich unbedeutende Veränderungen fest, die wenig bis gar keinen Bezug zu rezenten Klimaänderungen zeigen. Aus klimastatistischen Gründen sollten Referenzzeiträume mindestens die Länge von 30 Jahren haben (z.B. 1961 – 1990). Deswegen sind auch fernerkundete globale Mittelwerte der Wasserspiegellage und daraus abgeleitete Veränderungen noch unsicher. Zudem muss immer beachtet werden, dass punktuelle Mittelwerte, Mittelwerte über mehrere Orte entlang einer Küste oder gar Flächenmittel unterschiedliche geophysikalische Prozesse widerspiegeln.

Aussagekräftige Analysen liefern aus stündlichen Pegelständen $z(t)$ abgeleitete Monatsmittelwerte. Sie enthalten nur noch sehr kleine Gezeitenanteile und die Variabilität des Wetters tritt deutlich hervor (Abb. 3-12). Monate mit ausgeprägten Westwindlagen

sind ebenso auszumachen wie lang andauernde Hochdruckwetterlagen. Um aus diesen Schwankungen langjährige Trends abzuleiten, wurde zur Sichtbarmachung des Einflusses einer dekadischen Variabilität des Klimas auf die Wasserstände ein Filterverfahren verwendet, wie es für Pegeldata im Rahmen der Wasserstandsvorhersage angewendet wird (MÜLLER-NAVARRA 2009B). Danach ist der relative mittlere Meeresspiegel in Cuxhaven von Anfang 1918 bis Ende 2009 um 18,6 cm angestiegen (0,017 cm/Monat). Neun Jahre weitergerechnet, um ein ganzes Jahrhundert zu bekommen, wären es dann 20,4 cm. Davon entfallen etwa 40 % auf lokale isostatische Effekte (BUNGENSTOCK UND SCHÄFER 2009). Betrachtet man willkürlich kürzere Zeiträume – z.B. von 1940 bis 1968 – so ergeben sich zeitweise erheblich größere Anstiegsraten. Es ist also augenscheinlich auch nicht zulässig, den Zeitraum 1961 – 2003 mit einem kürzeren (z.B. 1993 – 2003) zu vergleichen und daraus auf einen beschleunigten Meeresspiegel zu schließen.

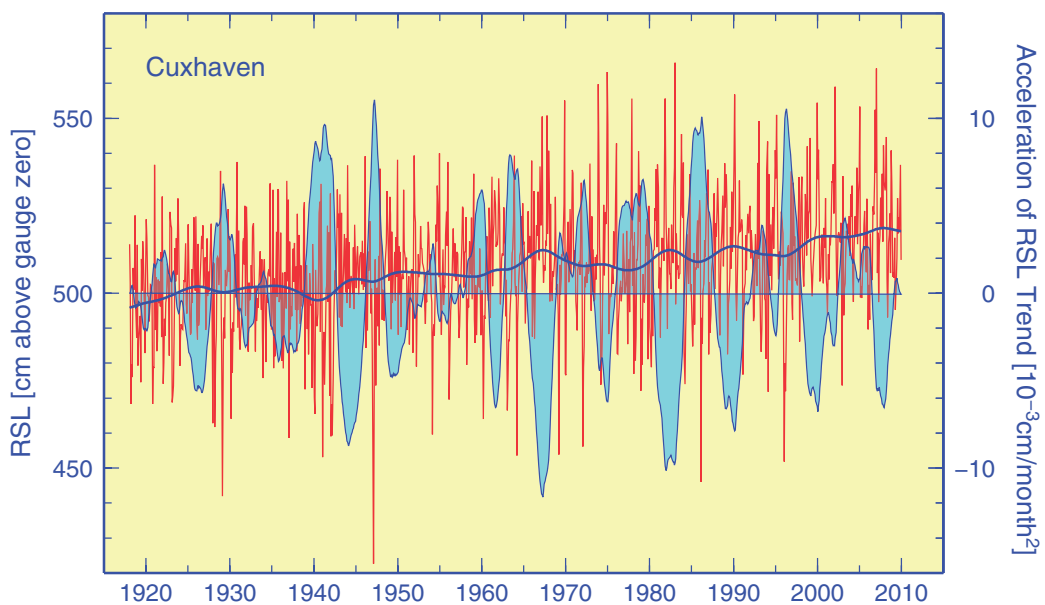


Abb. 3-12: Monatliche Wasserstandsmittelwerte (rot) am Pegel Cuxhaven 1918 – 2009 mit Langzeittrend (blau) und Trendbeschleunigung (türkis, rechte Skala).

Fig. 3-12: Monthly water levels at tide gauge Cuxhaven (red) 1918 – 2009 together with long-term trend (blue) and trend acceleration (cyan, right scale).

Wie der Verlauf der finiten zweiten Differenzen der Monatsmittelwerte $\Delta^2\bar{z}/(\Delta t)^2$ in Abb. 3-12 deutlich zeigt, wechseln kurze Zeiten eines beschleunigten Anstiegs mit Zeiten eines gebremsten Anstiegs ab. Insgesamt ergeben sich keine Anzeichen eines länger andauernden beschleunigten Meeresspiegelanstiegs am Pegel Cuxhaven, auch nicht in den letzten Dekaden.

3.4.5 Windstaustatistik und Sturmfluthäufigkeit

Durch Windeinfluss können Wasserstandsänderungen von der gleichen Größenordnung wie die des Gezeitenhubes erzeugt werden (MÜLLER-NAVARRA UND GIESE 1999). Als Windstau Δh wird die Differenz zwischen der astronomisch vorausgerechneten Hoch- bzw. Niedrigwasserhöhe und den zugehörigen Scheitelwerten der gemessenen Wasserstandskurve definiert. Bei Sturm von Orkanstärke entsteht in den flachen

Gebieten der Deutschen Bucht ein Windstau von über 4 m, jedoch mit größerer Wahrscheinlichkeit zu den astronomischen Niedrigwasserzeiten.

CUXHAVEN WIND SET-UP [CM]	2006		2007	
	HW	NW	HW	NW
$\Delta H \leq -200$	0	0	0	0
$-200 < \Delta H \leq -150$	0	0	0	0
$-150 < \Delta H \leq -100$	1	0	1	1
$-100 < \Delta H \leq -50$	37	19	12	17
$-50 < \Delta H \leq 50$	624	603	628	595
$50 < \Delta H \leq 100$	31	63	43	66
$100 < \Delta H \leq 150$	11	16	16	18
$150 < \Delta H \leq 200$	1	3	3	6
$200 < \Delta H$	1	1	2	3
TOTAL	706	705	705	706

Tab. 3-4: Häufigkeitsverteilung des Windstaus für die Jahre 2006 und 2007 am Pegel Cuxhaven.

Table 3-4: Frequency distribution of wind set-up for 2006 and 2007 at tide gauge Cuxhaven.

Windstaustatistiken bieten die Möglichkeit, einen Zusammenhang zu den vorherrschenden Wetterverhältnissen der einzelnen Jahre herzustellen. Ruhige oder windreiche Jahre bilden sich ohne weiteres auch in den Wasserstandsmittelwerten ab. Überwiegend weichen die Wasserstände im Betrage um weniger als 50 cm von den astronomisch vorausgerechneten HW- und NW-Höhen ab (Tab. 3-4). Nur sehr selten tritt ein Windstaubetrag von mehr als 1,5 m auf.

STORM SURGE (StS) FREQUENCIES: 1951 – 2007						2006 – 07
LOCATION	MHW EVOL.	StS	SEVERE StS	VERY S StS	TOTAL	TOTAL
HELGOLAND	574 – 618	63	3	0	66	4
BORKUM	589 – 617	93	2	0	95	4
BREMEN	706 – 751	244	9	0	253	15
CUXHAVEN	631 – 654	207	19	2	228	8
HAMBURG	659 – 709	299	48	13	360	21
HUSUM	645 – 669	312	38	4	354	12
DEF.: $150 \leq \text{STORM SURGE} < 250 \leq \text{SEVERE StS} < 350 \leq \text{VERY SEVERE StS}$ [CM ABOVE MHW]						

Tab. 3-5: Sturmfluthäufigkeiten in den Zeiträumen 1951 – 2007 und 2006 – 2007 mit MHW-Entwicklung (cm über PN). Borkum: Bis 1962 Pegel Südstrand, danach Fischerbalje.

Table 3-5: Storm surges for periods 1951 – 2007 and 2006 – 2007 together with MHW evolution (cm above gauge zero). Borkum: Until 1962 tide gauge Südstrand, thereafter Fischerbalje.

In Tab. 3-5 finden sich Zahlen zur Häufigkeit von Sturmfluten im Zeitraum 1951 – 2007 bzw. im Berichtszeitraum 2006 – 2007. Von einer Sturmflut in der Deutschen Bucht spricht man, wenn die Sturmfluthöhe das mittlere Hochwasser des jeweiligen Kalenderjahres (MHW) um mehr als 150 cm überschreitet. Im Vergleich ist festzustellen, dass die Häufigkeit von Sturmfluten im Berichtszeitraum durchschnittlich war. Die

etwas größere Häufigkeit von Sturmfluten in Hamburg und Bremen in den beiden Jahren hängt hauptsächlich mit den Küstenschutzmaßnahmen in Weser und Elbe zusammen, die nach der Sturmflut im Jahre 1962 notwendig wurden.

Es hat immer auch längere Zeiträume gegeben, während derer in der Deutschen Bucht Sturmfluten selten oder auch besonders häufig waren. Diese Tatsache lässt sich zum Teil der natürlichen dekadischen Variabilität des Sturmklimas in unseren Breiten zuordnen (FRANKE 2009). Zu einem anderen Teil spielt auch der Zufall eine Rolle, denn bei im Schnitt weniger als 7 Sturmfluten pro Jahr kann es durchaus sein, dass in einzelnen Jahren die relevanten Stürme in der Deutschen Bucht mehrheitlich mit den astronomischen Niedrigwasserzeiten zusammenfallen und damit nicht zur Hochwasserzeit wirksam werden können.

3.4.6 Zusammenfassung

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts werden an der deutschen Nordseeküste mit Pegeln Wasserstände gemessen. Die Pegelmessungen beziehen sich in ihrer Höhe auf geodätische Festpunkte der Landesvermessung und liefern im strengen Sinne also Erkenntnisse über relative Wasserstandsschwankungen.

Aus diesen Messungen lässt sich für den Referenzzeitraum 2006 – 2007 ableiten, dass sich weder die Gezeiten, noch die Anzahl von Sturmfluten oder gar der mittlere relative Meeresspiegel signifikant verändert haben. Veränderungen der Gezeitenhöhe, -höhen und -phasen fließen in die jährliche Produktion der Gezeitentafeln des BSH ein. Die Veränderung des relativen mittleren Meeresspiegels lag weiter im Rahmen des langjährigen Anstiegs von etwa 20 cm pro Jahrhundert, und die Anzahl der Sturmfluten lag etwas über dem Mittel der Jahre 1951 – 2007, es gab aber auch schon Jahre mit mehr als zweifacher Häufigkeit. Bei der Anzahl von Sturmfluten in den einzelnen Jahren spielt in hohem Maße der Zufall eine Rolle, denn bei Sturmfluten müssen Zeitpunkt des Sturmhöhepunktes und Gezeitenphase zueinander passen.

3.5 Temperatur

<•> P. Loewe, H. Klein, A. Frohse, A. Schulz & N. Schmelzer • • • • •

3.5.1	Einführung	... 142
3.5.2	Oberflächentemperatur	... 142
3.5.3	Temperaturschichtung	... 147
3.5.4	Meereis	... 154
3.5.5	Zusammenfassung	... 155

3.5.1 Einführung

Die Oberflächentemperaturen der Nordsee, die im BSH seit September 1968 wöchentlich veröffentlicht werden, bilden die wichtigste Datenbasis zur Analyse des thermischen Zustands der Nordsee und dessen dynamischer Entwicklung. Inzwischen umfasst das Archiv über 2000 digitale Temperaturfelder, die auf einem flächentreuen 20 sm Gitter vorliegen. Der Datensatz dokumentiert nicht nur die raumzeitliche Entwicklung einer Schlüsselvariablen des physikalischen Meereszustands über mittlerweile 45 Jahre; als Integrator des meteorologischen Antriebs lässt sich die Meeresoberflächentemperatur auch zur Untersuchung von Klimaänderungen in der Nordseeregion nutzen.

Zunächst werden die Oberflächentemperaturen der Nordsee in den Jahren 2006 und 2007 dokumentiert, im Zusammenhang mit atmosphärischen Zirkulationsanomalien diskutiert und statistisch eingeordnet. Im Anschluss wird die Temperaturschichtung anhand von Beobachtungen analysiert, die während der Gesamtaufnahme der Nordsee mit FS GAUSS bzw. FS PELAGIA jeweils im August angestellt wurden. Die ökologische Relevanz der Temperaturschichtung zeigt sich in markant verschiedenen Verteilungen von parallel gemessenen Nährsalzen, Sauerstoff und Chlorophyll-a und inversen biologischen Prozessen oberhalb (Produktion) und unterhalb (Abbau) der Temperatursprungschicht.

3.5.2 Oberflächentemperatur

Sowohl im Jahr 2006, als auch im Jahr 2007 lag die Jahresmitteltemperatur¹ der Nordsee auf der Rekordhöhe von 11,0 °C, die erstmals im Jahr 2002 erreicht worden war. Dabei wies der jahreszeitliche Verlauf der Nordseetemperatur in beiden Jahren erhebliche Unterschiede auf (Abb. 3-13).

In den ersten 6 Monaten des Jahres 2006 wichen die Temperaturen mit durchschnittlich $0,2 \pm 0,4$ K nur wenig vom klimatologischen Verlauf ab. Auch in der zweiten Jahreshälfte 2007 lag lediglich eine moderate Warmanomalie von 0,5 – 1,0 K vor. Als äü-

1. Mittelwert von Dez. bis Nov. entsprechend Abb. 3-13.

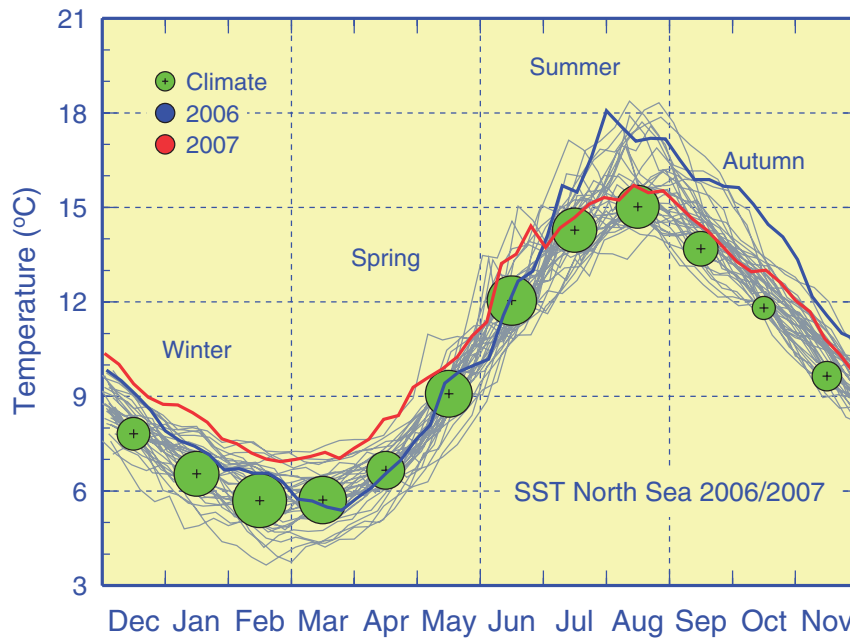


Abb. 3-13: Jahresgänge 2006/07 der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen mit Ensemble der Jahresgänge seit 1971 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971 – 1993) und zwischenjährlichen Standardabweichungen (Kreisradius).

Fig. 3-13: Seasonal cycles 2006/07 of areal mean weekly SST of the North Sea and ensemble of corresponding cycles since 1971. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971 – 1993.

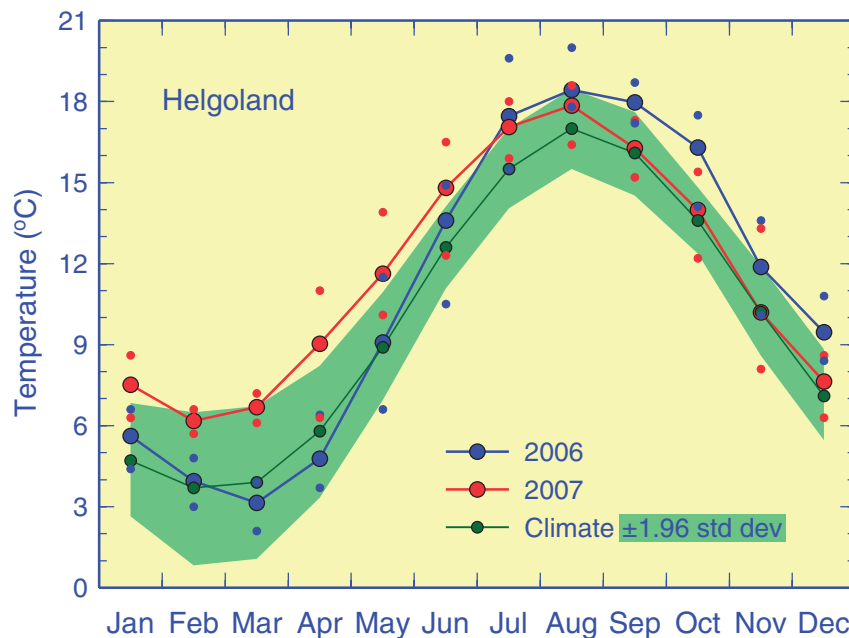


Abb. 3-14: Jahresgänge 2006/07 der monatlichen Oberflächentemperatur (und intramontatliche Extrema) bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ Standardabweichungen). (Rohdaten: K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)

Fig. 3-14: Seasonal cycles 2006/07 of monthly mean SST (& intramonthly extremes) at Helgoland Roads together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs.). (Raw data courtesy of K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)

Berst ungewöhnlich erwies sich hingegen der Zeitabschnitt von Juli 2006 bis Juni 2007, in dem eine extreme Warmanomalie von sehr beständiger Stärke ($1,7 \pm 0,4$ K) herrschte. Die saisonalen Temperaturen (JAS, ...) belegen die Ränge 2-1-2-1; für die zugehörigen Monatstemperaturen (Juli bis Juni) ergibt sich die Abfolge 3-4-2-1-2-1-1-3-2-1-5-4 im Zeitraum 1969 – 2010. Die Mitteltemperatur für diese Zeitspanne übertraf mit $11,6$ °C die o.g. Rekordtemperatur um weitere $0,6$ K und lag damit um $3,7$ Standardabweichungen über dem klimatologischen Jahresmittel ($9,9$ °C). Seit Beginn der Temperaturanalysen im Oktober 1968 war keine 12-monatige Periode wärmer als der in Rede stehende Zeitabschnitt. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass diese extreme Warmphase nicht auf das Nordseegebiet beschränkt war, sondern für die Nordhemisphäre sogar die wärmste Periode seit mindestens 130 Jahren darstellt (s. S. 103 und Abb. 2-28, S. 105).

Im Zeitraum 1971 bis 2010 lag die Korrelation zwischen den Monatsmitteltemperaturen für Nordsee und Deutsche Bucht (Seegebiet S-lich $55,5^\circ$ N und E-lich $6,5^\circ$ E) bei $0,94 \pm 0,02$. Ein entsprechender linearer Zusammenhang zwischen den Nordseetemperaturen und denen bei Helgoland Reede² berechnet sich zu $0,88 \pm 0,06$, wobei sich die mit Abstand schwächste Kopplung für den Monat Juni ergibt ($0,72$). Die Temperaturentwicklung in der Deutschen Bucht oder bei Helgoland Reede (Abb. 3-14) entspricht daher weitgehend derjenigen in der Nordsee, was hier anhand der Monatsränge der Temperaturen zwischen Juli 06 und Juni 07 weiter belegt wird (DB: 1-5-3-1-2-1-1-3-2-1-4-3; Helgoland 2-5-2-1-3-1-1-1-1-1-1-1). Ein beachtlicher Unterschied besteht allerdings in der höheren Amplitude des Jahresgangs, die aus der geringen Wassertiefe und geographisch kontinentalen Lage resultiert.

Einen regional differenzierten Einblick in die monatlichen Abweichungen der Oberflächentemperaturen der Nordsee von den klimatologischen Verteilungen des Zeitraums 1971 – 1993 bieten Abb. 3-15 und Abb. 3-16, in denen als Interpretationshilfe auch die anomalen Komponenten der atmosphärischen Zirkulation angegeben sind (vgl. Abb. 2-13, S. 77 ff.). Die angesprochenen parallelen Entwicklungen auf subregionalen und lokalen Skalen sind Konsequenz überregional kohärenter Muster, die sich vor allem infolge großräumiger atmosphärischer Zirkulationsanomalien und damit einhergehender Wetter- und Witterungsbedingungen einstellen³. Insofern sind die ausführlichen meteorologischen Erläuterungen zum Lufttemperaturgang auf Norderney (Kap. 2.7, S. 102) hier gleichermaßen anwendbar und eine entsprechende Wiederholung verzichtbar. Wesentlich für Entwicklung und Fortbestand der extremen Warmanomalie waren die durch eine Ω -Lage verursachte europaweite Hitzewelle im Juli 2006 (Abb. 2-28, S. 105), die starke meridionale viz. S-liche Anströmungskomponente ab September (Abb. 2-22, S. 89), das extreme Sturmaufkommen von Oktober bis März (Abb. 2-25, S. 100), die außergewöhnlich hohe Einstrahlung im April bei beständigem Hochdruck (Abb. 2-26, S. 104; Abb. 2-18, S. 82) und schließlich schwache Windverhältnisse im Frühjahr 2007 (Abb. 2-21, S. 86).

2. Die Messreihe der Oberflächentemperaturen von Helgoland Reede wurde freundlicherweise von der Biologischen Anstalt Helgoland (AWI) zur Verfügung gestellt (WILTSHIRE UND MANLEY 2004).

3. Gegenüber dem Energieaustausch mit der Atmosphäre sind advektive Wärmetransporte durch den Einstrom von Nordatlantikwasser auf den betrachteten Zeitskalen von untergeordneter Bedeutung (z. B. SHARPLES ET AL. 2006). Die Temperaturverhältnisse im Nordatlantik sind deshalb keineswegs irrelevant, denn sie werden über die atmosphärische Zirkulation kommuniziert. Da diese Verhältnisse seit Mitte der 1990er Jahre durch die Warmphase der Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO) charakterisiert sind (s. a. Abb. 2-28, S. 105), werden die seither nahezu dauerhaft erhöhten Temperaturen in der Nordseeregion sicher durch über den Atlantik herangeführte Luftmassen mitverursacht (vgl. a. SUTTON UND DONG 2012, ROBSON ET AL. 2012).

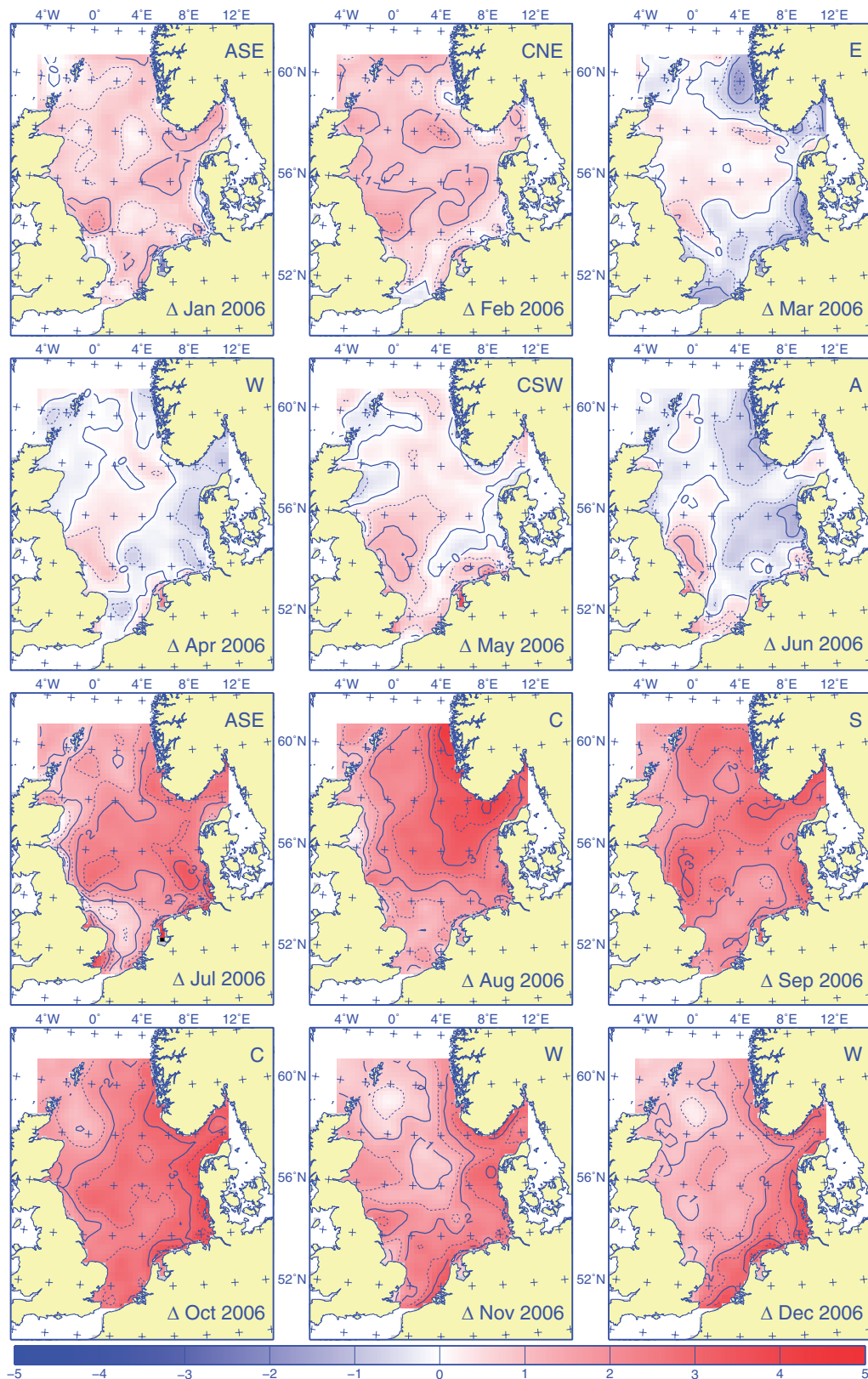


Abb. 3-15: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2006 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0,5 K. Kürzel, oben rechts, bezeichnen atmosphärische Zirkulationsanomalien (Abb. 2-13, S. 77 ff.).

Fig. 3-15: Fig. 3-15: Monthly SST anomalies in 2006 as departures from the 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. Letter codes (upper right) refer to atmospheric circulation anomalies (Fig. 2-13, p. 77 sqs.).

3 Meeresphysik

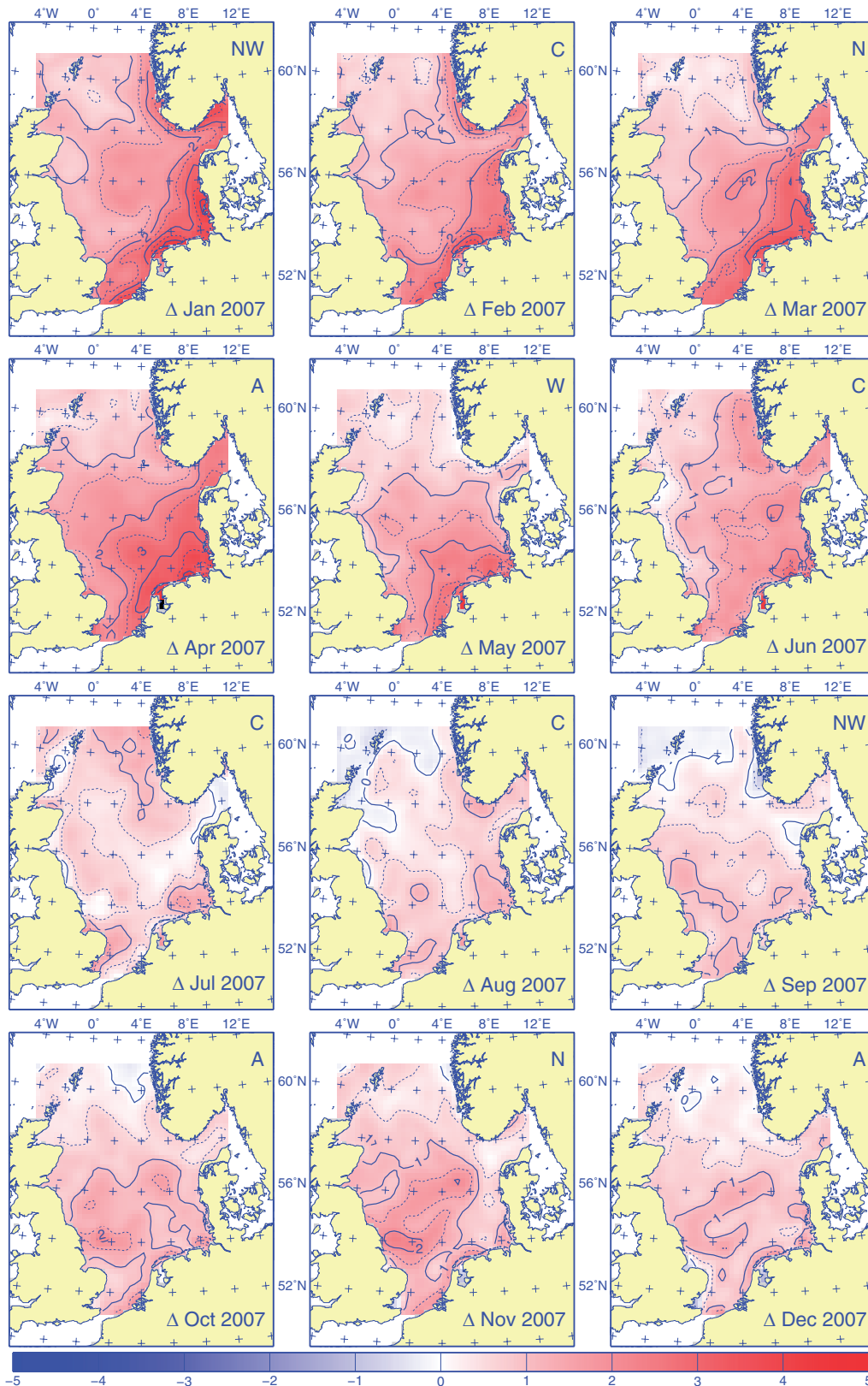


Abb. 3-16: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2007 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0,5 K. Kürzel, oben rechts, bezeichnen atmosphärische Zirkulationsanomalien (Abb. 2-17, S. 81 ff.).

Fig. 3-16: Fig. 3-15: Monthly SST anomalies in 2007 as departures from the 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. Letter codes (upper right) refer to atmospheric circulation anomalies (Fig. 2-17, p. 81 sqs.).

3.5.3 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 zwischen warmer Deckschicht und kälterer Bodenschicht 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 zusätzlich durch starke vertikale Salzgehaltsgradienten, wie sie in Flussmündungen oder im Bereich des baltischen Ausstroms auftreten, forciert werden.

Abhängig vom Wechselspiel zwischen thermischem Energieeintrag und kinetischer Energiezufuhr bilden sich eine oder auch mehrere thermische Sprungschichten aus, deren Tiefen von Jahr zu Jahr variieren. Die im Rahmen der Nordseeaufnahmen in den Sommern 2006 (*Abb. 3-17*) und 2007 (*Abb. 3-18*) auf Breitenparallelen erfassten Vertikalschnitte dokumentieren die zwischenjährliche Variabilität der Temperaturschichtung.

Nach einem vor allem im Osten tendenziell zu kalten Frühjahr (*Abb. 3-15, S. 145*) war die Oberflächentemperatur der Nordsee im Juli 2006 rasant angestiegen und lag im August mit 2,2 K um 3,2 Standardabweichungen über dem klimatologischen Mittel von 16,0 °C. Dabei bildete sich insbesondere in der östlichen Nordsee eine sehr warme Deckschicht mit scharfer Thermokline aus, die aber nicht sehr tief lag, so dass selbst über der Doggerbank auf 55° N eine schwache Schichtung beobachtet werden konnte (*Abb. 3-17*). Die Deckschicht war zwar ungewöhnlich warm, aber von so geringer Mächtigkeit, dass der Wärmehalt der Nordsee geringer ausfiel als in den vorangegangenen und folgenden 3 Sommern (*Tab. 3-6, S. 150*). Auch die verschiedentlich beobachtete starke Vertiefung der Deckschicht über der Norwegischen Rinne auf 58° N (z. B. *Abb. 3-18*) fehlte im Sommer 2006. Ursache hierfür ist vermutlich das kühle Frühjahr (*Abb. 3-15, S. 145*) und die späte drastische Erwärmung im Juli bei ruhigem und beständigem Strahlungswetter (vgl. *Abb. 2-15, S. 79 & Abb. 2-27, S. 104*).

Die extreme, nordseeweite Warmanomalie der Oberflächentemperatur dauerte von Juli 2006 bis Juni 2007 an (*Abb. 3-15, Abb. 3-16*). Der saisonale Temperaturgang in diesem wärmsten 12-monatigen Zeitraum seit Beginn der Beobachtungen verlief auf einem gegenüber dem klimatologischen Zyklus um 1,7 K erhöhten Niveau. Die intensive solare Einstrahlung im März und insbesondere im April 2007 (*Abb. 2-26, S. 104*) führte früh zur Ausbildung der Temperaturschichtung und damit zur Konservierung der warmen homothermen Wintertemperaturen im Wasser unterhalb ≈ 40 m. Im von Tiefdruckstörungen geprägten Hochsommer herrschten recht kräftige, persistente Winde aus W (*Tab. 2-14, S. 90*) – die Ende Juni sogar noch Sturmstärke erreichten (*Tab. 2-3, S. 45*) – so dass die Oberflächentemperaturanomalie zur Zeit der Nordseeaufnahme im August weitgehend abgebaut war (0,5 K). Als Folge dieser Windverhältnisse sowie der frühen Erwärmung wurde eine sehr mächtige Deckschicht (*Abb. 3-18, S. 149*) bei gleichzeitig näherungsweise normalen Oberflächentemperaturen vorgefunden (*Abb. 3-16, S. 146*). Gegenüber den mittleren Sommerprofilen des Zeitraums 2000 – 2009 waren die Tem-

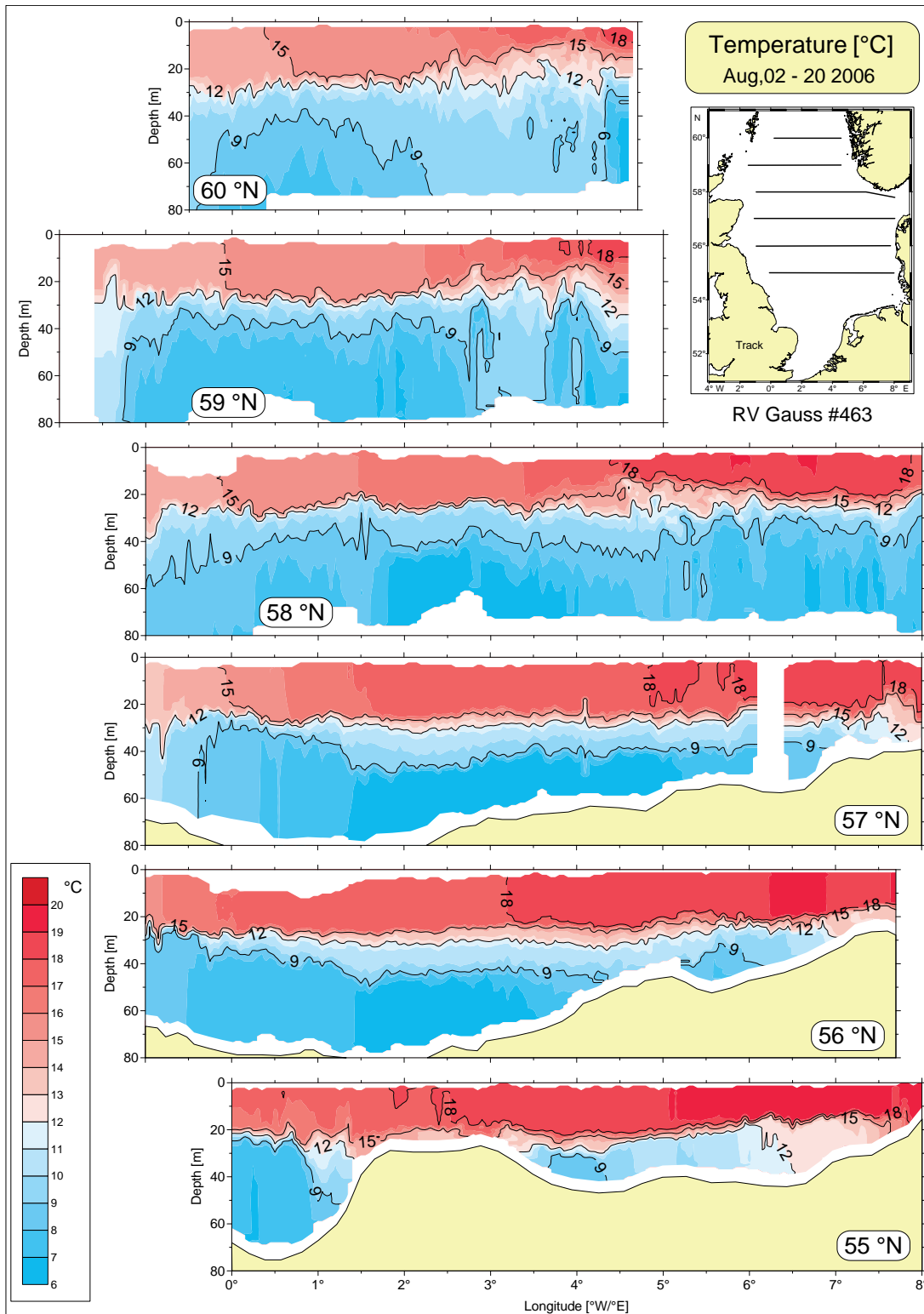


Abb. 3-17: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2006 (FS Gauß, Reise #463).

Fig. 3-17: Temperature stratification (°C) in summer 2006 (RV Gauß, Cruise #463)

peraturen oberhalb 20 m um 1 – 2 K zu kühl und in der Schicht von 20 – 40 m Tiefe entsprechend wärmer; dieser strukturelle Kontrast war gegenüber den Temperaturverhältnissen im August 2006 noch stärker ausgeprägt. Das Volumen der kalten Bodenschicht war deutlich geringer als im Vorjahr und die Bodentemperaturen in der zen-

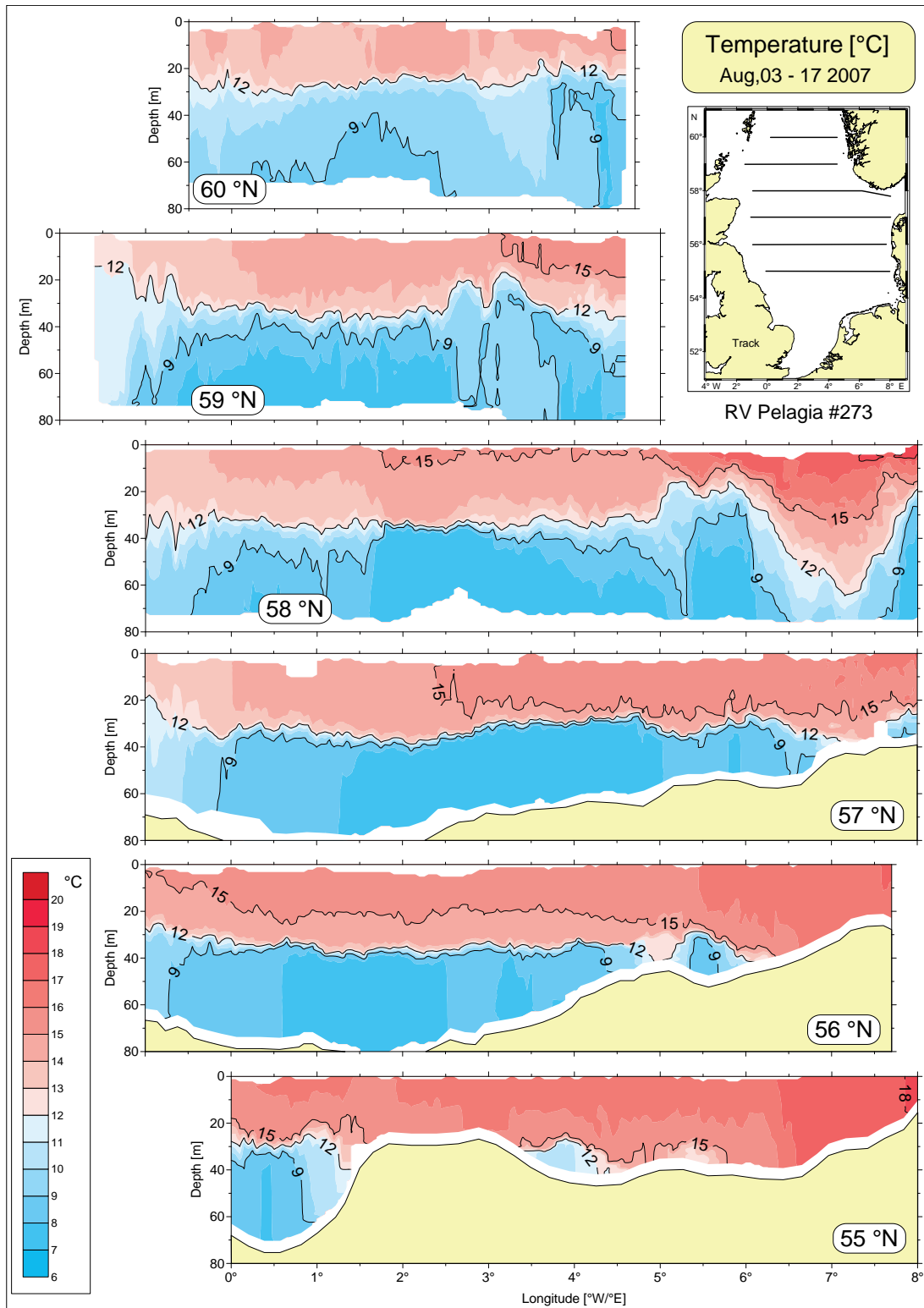


Abb. 3-18: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2007 (FS Pelagia, Reise #273).

Fig. 3-18: Temperature stratification (°C) in summer 2007 (RV Pelagia, Cruise #273).

tralen Nordsee lagen etwa 1 K über den Vorjahreswerten. Die flachen Gebiete in der südlichen Nordsee und über der Doggerbank waren vertikal homogen durchmischt. Der tiefe Trog der Deckschicht über der Norwegischen Rinne auf 58° N erreichte eine Tiefe von 65 m.

CRUISE	TERM	MIDTERM	HC [$\times 10^{21}$ J]	SVT [$^{\circ}$ C]	SST [$^{\circ}$ C]
G353	8/09 – 8/23/2000	8/16	1.497	10.3	15.3
G370	7/11 – 8/02/2001	7/27	1.346	9.2	15.2
G385	7/16 – 7/31/2002	7/25	1.517	10.4	15.4
G405	7/28 – 8/13/2003	8/04	1.625	11.2	17.8
G425	8/05 – 8/20/2004	8/12	1.594	11.0	17.1
G446	8/10 – 8/29/2005	8/20	1.550	10.6	14.9
G463	8/02 – 8/20/2006	8/11	1.520	10.4	17.0
P273	8/03 – 8/17/2007	8/10	1.567	10.8	15.3
P293	7/21 – 8/05/2008	7/29	1.550	10.6	16.1
P311	8/20 – 9/09/2009	8/30	1.645	11.3	15.7

Tab. 3-6: Wärmehalt (HC) der Nordsee mit Volumen- (SVT) und Oberflächentemperatur (SST) basierend auf 10 Sommeraufnahmen mit FS Gauß und FS Pelagia. Das Analysegebiet hat ein Volumen von $35,6 \times 10^3 \text{ km}^3$, eine Fläche von $404,1 \times 10^3 \text{ km}^2$ und eine mittlere Tiefe von 88 m. Während $HC \sim SVT$, besteht ein einfacher Zusammenhang zur SST nicht.

Table 3-6: North Sea heat content (HC) with SVT and SST based on 10 summer surveys with RV Gauß and RV Pelagia. Volume, area, and mean depth of analysis domain are $35.6 \times 10^3 \text{ km}^3$, $404.1 \times 10^3 \text{ km}^2$, and 88 m, respectively. While $HC \sim SVT$, there is no simple relation to SST.

Einen Eindruck von der jahreszeitlichen Entwicklung der vertikalen Temperaturverteilung in der westlichen Deutschen Bucht vermittelt Abb. 3-19, in der an den MARNET-Stationen ›NSB III‹ und ›Ems‹ gewonnene Messdaten aus verschiedenen Tiefenhorizonten in Isolethenform dargestellt sind⁴.

Die Station ›EMS‹ liegt im Übergangsbereich zwischen ganzjährig homothermem ostfriesischen Küstenwasser und in den Sommermonaten permanent stratifizierten Seegebieten (2 Schichten) bei und jenseits von ›NSB III‹ und somit im Bereich der ›Tidal Mixing Front‹. Der Frontverlauf ist wesentlich von der über den Spring-Nipp-Zyklus variierenden Gezeitenstromgeschwindigkeit und der Wassertiefe abhängig (SIMPSON UND HUNTER 1974), folgt in der Deutschen Bucht mehr oder minder der 30 m Tiefenlinie (z. B. PINGREE UND GRIFFITHS 1978) und bildet sich in starken lateralen Temperaturgradienten ab (im Juli 2006 unterhalb 20 m ca. 5/60 K/km zwischen ›NSB III‹ und ›EMS‹, Abb. 3-19). Während sich im flachen Küstenwasser die Reichweiten der von der Oberfläche her durch Wind und Seegang und vom Meeresboden her durch Gezeitenstromturbulenz durchmischten Schichten überschneiden, so dass die Ausbildung einer Thermokline nicht zustande kommt, sind bei ›Ems‹ alternierende Phasen von Stratifizierung und Erosion zu beobachten.

Zwischen April und August 2006 sind insgesamt fünf derartige Episoden eingetreten, wie der in Abb. 3-20 dargestellten zeitlichen Entwicklung täglicher Differenzen zwischen oberflächen- und bodennahen Temperaturen unmittelbar zu entnehmen ist. Nach Durchschreiten des saisonalen Minimums von $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Mitte März und Abschwelgen der Windgeschwindigkeit unter 5 m/s in der 3. Aprilwoche baute sich eine erste Schichtung zunächst allmählich, später – bei Strahlungsflüssen oberhalb 250 W/m^2 – beschleunigt auf. Mit auffrischenden Winden setzte am 18. Mai eine rapide Homogenisierung der Wassersäule ein, die innerhalb von 2 – 3 Tagen abgeschlossen war.

4. Unter der Adresse www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MARNET-Messnetz/MARNET.jsp werden auch Zeitseriendarstellungen für die verschiedenen Tiefenhorizonte vorgehalten.

Dieses Windregime (≈ 5 Bft) dauerte bei gleichzeitig geringer solarer Einstrahlung bis in die 1. Juniwoche hinein an, so dass die isothermen Verhältnisse in der Wassersäule bis zu diesem Zeitpunkt erhalten blieben. Der grundsätzliche Mechanismus, der auch in den nachfolgenden Schichtungsaufbau- und Erosionsepisoden am Werk ist, beruht auf alternierenden Phasen, in denen jeweils windschwache, strahlungsinensitive bzw. windreiche, strahlungsarme Bedingungen vorherrschen. Während starke Einstrahlung schichtungsaufbauend und -stabilisierend wirkt, führt die windinduzierte Vertiefung des Turbulenzregimes von oben her zur Überschneidung mit dem durch Gezeitenstromreibung generierten Turbulenzregime der Bodenschicht und damit zur Homogenisierung der Wassersäule.

Obgleich die in *Abb. 3-20* illustrierten meteorologischen Bedingungen sicher auch für ›NSB III‹ annähernd zugetroffen haben, wurde ein vollständiger Zusammenbruch der Schichtung lediglich in der 3. Maidekade realisiert und durch Springgezeiten um den 27. Mai herum unterstützt (*Abb. 3-19*). Die übrigen Durchmischungsereignisse (s. *Abb. 3-20*) führten lediglich zu einer Homogenisierung der Temperaturen in den obersten 15 m und gleichzeitig zur Ausbildung einer scharfen Thermokline im 15 – 20 m Tiefenbereich (*Abb. 3-19*), was auf die größere Wassertiefe und geringere Gezeitenstromgeschwindigkeiten gegenüber den Verhältnissen bei Ems zurückzuführen sein dürfte (MITTELSTAEDT ET AL. 1983). Ende Juli wurde in Oberflächennähe mit 22 °C kurzfristig ein saisonales Maximum in gleicher Höhe wie bei ›Ems‹ erreicht (vgl. *Abb. 3-14*, S. 143), während in der Bodenschicht unterhalb 20 m 11 °C herrschten (›Ems‹ 16 °C). Wenige Tage später war die Oberflächentemperatur unter 20 °C gefallen, diejenige in der Bodenschicht auf knapp 14 °C angestiegen. Die wenig sommerlichen meteorologischen Bedingungen im August gingen mit einer graduellen Erosion der Schichtung einher, die Ende August mit homogenen Temperaturen von 18 °C abgeschlossen war.

Im Februar 2007 wurde bei ›Ems‹ ein abnorm hohes saisonales Minimum von knapp 7 °C durchschritten (*Abb. 3-19*), das um gut 3 K über dem klimatologischen Mittel gelegen haben muss (vgl. *Abb. 3-14*, S. 143). Erste Schichtungsansätze wurden bei günstigen Einstrahlungsbedingungen (*Abb. 2-26*, S. 104) bereits zur Monatswende März/April und in der 2. Aprildekade registriert, jedoch durch Starkwindereignisse aus NW und grobe See wie am 19. 4. (*Tab. 2-3*, S. 45) schnell zunichtegemacht. Die markanteste und langlebigste Schichtungsepisode mit einem Temperaturkontrast von bis zu 4,5 K zwischen Oberfläche und Boden ereignete sich im Juni unter den schwachwindigsten Bedingungen des Jahres (*Tab. 2-14*, S. 90). Mit Durchzug des Sturmtiefs ›Uriah‹ (CN, *Tab. 2-3*, S. 45), das am 26. Juni eine Rekord-Sommersturmflut (1,32 m über MHW) am Emspegel Pogum verursachte (HEYKEN 2008), kam es zur vollständigen Durchmischung der Wassersäule bei ›Ems‹ auf homotherme 15 °C. Die Temperatur stieg danach graduell weiter an und erreichte Ende August in der Spitze 18 °C, ohne dass sich in dem – auch im Vergleich zum Frühjahr – frischen WNW Windregime (*Tab. 2-13*, S. 85) erneut nennenswerte Abweichungen von homothermen Verhältnissen einstellen konnten.

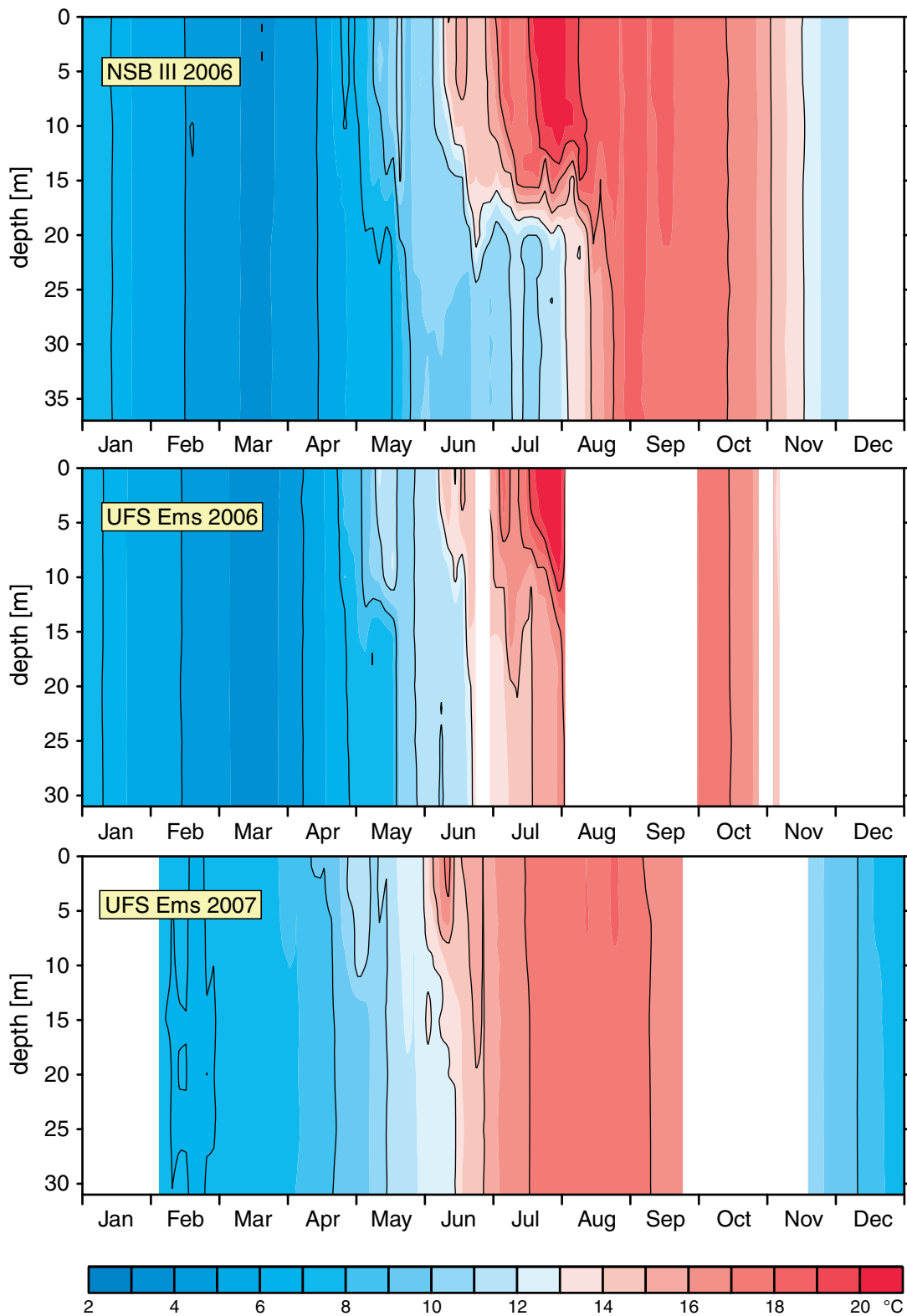


Abb. 3-19: Temperaturschichtung ($^{\circ}\text{C}$) an den MARNET-Stationen »NSB III« ($54^{\circ} 41' \text{N}$, $6^{\circ} 47' \text{E}$) und »Ems« ($54^{\circ} 10' \text{N}$, $6^{\circ} 21' \text{E}$). Wasser- und Sensortiefen: 40 m & 4, 6, 11, 15, 20, 25, 30, 35 m und 33 m & 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30 m.

Fig. 3-19: Temperature stratification ($^{\circ}\text{C}$) at MARNET stations »NSB III« ($54^{\circ} 41' \text{N}$, $6^{\circ} 47' \text{E}$) and »Ems« ($54^{\circ} 10' \text{N}$, $6^{\circ} 21' \text{E}$). Water and sensor depths: 40 m & 4, 6, 11, 15, 20, 25, 30, 35 m and 33 m & 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30 m.

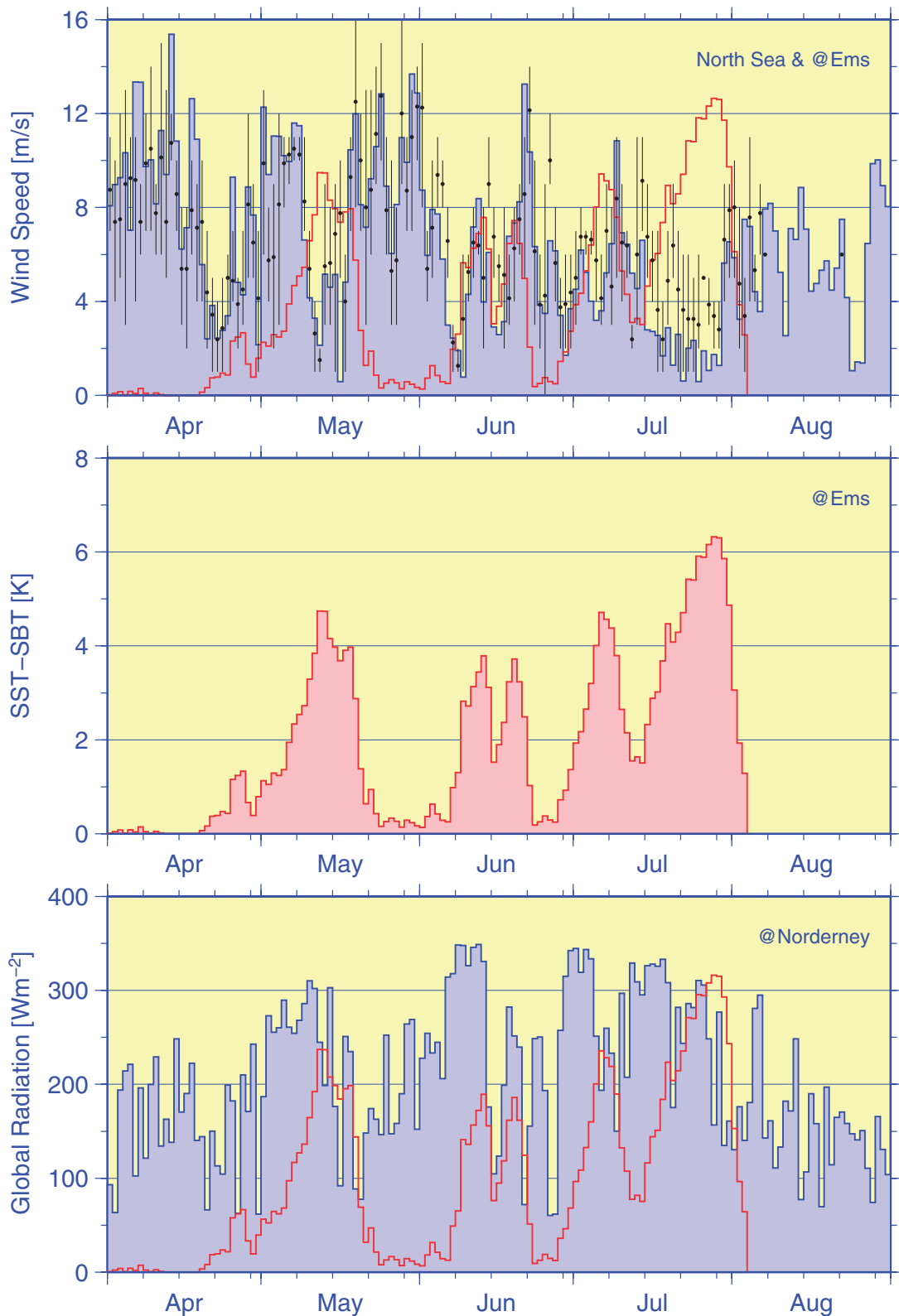


Abb. 3-20: Temperaturschichtung an der MARNET-Station ›Ems‹ im Jahr 2006. Mitte: Temperaturdifferenz Oberfläche minus Boden. Oben: ›Nordseewind‹ (blau, vgl. Kap. 2.5, S. 85) und lokaler 10 m Wind (schwarz, Tagesmittel mit Spannweite). Unten: Globalstrahlung auf Norderney (Kap. 2.7, S. 102).

Fig. 3-20: Temperature stratification at MARNET station ›Ems‹ in 2006. Middle: temperature difference surface minus bottom. Top: ›North Sea Wind‹ (blue, cf. ch. 2.5, p. 85) & local 10 m wind (black, mean and range). Bottom: global radiation at Norderney (cf. ch. 2.7, p. 102).

3.5.4 Meereis

Hinsichtlich der Eisverhältnisse an der deutschen Nordseeküste war der Winter 2005/06 nur schwach. Die flächenbezogene Eisvolumensumme – eine Maßzahl für die Stärke des Eiswinters (KOSLOWSKI 1989) – betrug 0,33 m; die als reduzierte Eissumme bezeichnete mittlere Anzahl von Tagen mit Eis (BÜDEL 1947, NUSSER 1948) erreichte 5,9 Tage. Die Berechnung beider Maße stützt sich auf Beobachtungen an den 13 eisklimatologischen Stationen der deutschen Nordseeküste. Im 110-jährigen Zeitraum 1897 bis 2006 waren 64 Eiswinter stärker und 45 schwächer als dieser.

Im November 2005 lag die Temperatur der vertikal homothermen Deutschen Bucht mit 11,9 °C auf Rekordhöhe und 2,8 K über dem Klimamittel (1971 – 1993). Trotz verstärkter winterlicher Abkühlung (ΔT Feb. minus Nov.: –8,3 K) bei ab Dezember schwacher Zonalzirkulation (Abb. 2-13, S. 77) blieb das für starke Vereisung typische Mindestniveau von ca. 1,5 °C (Feb.) unerreicht (LOEWE 2009). Das erste Eis an der Nordseeküste bildete sich Anfang Januar 2006 in geschützt liegenden Bereichen und kleineren Häfen der nordfriesischen Küste, in der dritten Januardekade auf der Unterelbe und Ende Januar an einigen Stellen der ostfriesischen Küste und im Nord-Ostsee-Kanal (Abb. 3-21). An der nordfriesischen Küste wurde das Eis etwa drei Wochen lang beobachtet. Am längsten trat das Eis im Hafen Tönning (25 Tage) und im Seebereich Eiderdamm (30 Tage) auf. Die Eisdicke erreichte im Mittel Werte zwischen 5 und 20 cm.

Im Winter 2006/07 (ΔT_{DB} F – N: 5,8 – 11,5 °C) blieb die Nordseeküste eisfrei.

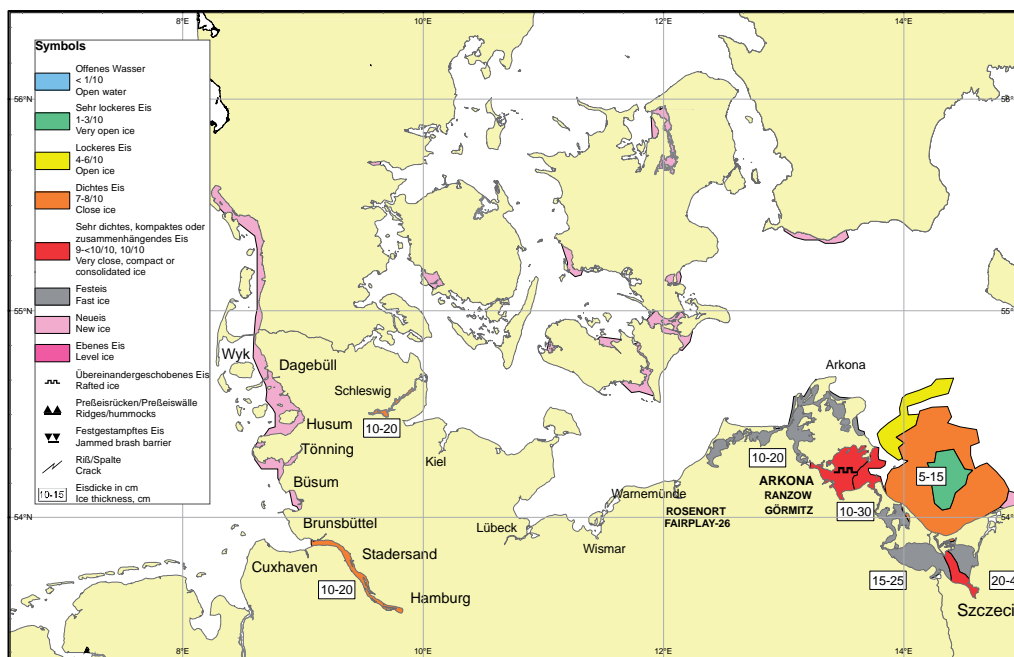


Abb. 3-21: Eisverhältnisse an der deutschen Nord- und Ostseeküste am 27. Januar 2006, dem Zeitpunkt maximaler Vereisung im Winter 2005/06.

Fig. 3-21: Sea ice conditions at the German coasts on January 27, 2006 when ice coverage was at its peak seasonal extent.

Eine umfassende Dokumentation beider Eiswinter bieten SCHMELZER UND HOLFORT (2009). Weiterführende Informationen zur langzeitlichen Entwicklung der Eisverhältnisse wurden in einer früheren Ausgabe dieses Berichts veröffentlicht (LOEWE 2009).

3.5.5 Zusammenfassung

Das Jahresmittel der Nordseeoberflächentemperatur lag in beiden Jahren auf der erstmals 2002 erreichten Rekordhöhe von 11,0 °C. Die mittlere Temperatur für die Zeitspanne von Juli 2006 bis Juni 2007 übertraf diesen Höchstwert nochmals um 0,6 K und lag damit um 3,7 Standardabweichungen über dem klimatologischen Jahresmittel der Basisperiode 1971 – 1993 von 9,9 °C. Innerhalb dieser extremen Warmphase, die für die Nordhemisphäre die wärmste 12-monatige Periode seit mindestens 130 Jahren darstellt, vollzog sich der jahreszeitliche Temperaturgang auf einem nahezu beständig um 1,7 K – in der Deutschen Bucht sogar um 2,7 K – über der Klimatologie liegenden Niveau. Auslöser der Warmanomalie war eine europaweite Hitzewelle im Juli 2006. Ihr langlebiges Fortbestehen war Ergebnis verfestigender, teils intensivierender Faktoren, von denen die starke S-liche Anströmungskomponente ab September, das extreme Sturmaufkommen von Oktober bis März, die außergewöhnlich hohe Einstrahlung im April bei beständigem Hochdruck und ein sommerartig schwachwindiges Frühjahr 2007 besonders nennenswerten Einfluss ausübten.

Nach einem insbesondere in den östlichen Seegebieten tendenziell zu kalten Frühjahr wurde während der Gesamtaufnahme der Nordsee im August 2006 eine außergewöhnlich warme Deckschicht vorgefunden, die jedoch von so geringer Mächtigkeit war, dass Wärmeinhalt ($1,520 \times 10^{21}$ J) und Volumentemperatur (10,4 °C) ähnlich gering ausfielen wie zuletzt im August 2002. Im Unterschied hierzu wurden im August 2007 eine sehr mächtige Deckschicht und gleichzeitig annähernd normale Oberflächentemperaturen angetroffen. Bezogen auf mittlere Schichtungsverhältnisse des vergangenen Jahrzehnts waren die Temperaturen oberhalb 20 m um 1 – 2 K zu kalt, diejenigen im Tiefenbereich 20 – 40 m entsprechend zu warm. Im Vergleich mit den Verhältnissen im August 2006 verschärft sich dieser Kontrast auf 2 – 3 K.

Die Tiefenverteilung der Temperatur in der Deutschen Bucht wurde anhand von Daten der Dauermessstationen ›NSB III‹ und ›EMS‹ des MARNET-Netzwerks dokumentiert. Bei der wenig außerhalb des ganzjährig durchmischten flachen Küstenwassers liegenden Station ›EMS‹ waren insbesondere im Frühjahr alternierende Phasen von Stratifizierung und Erosion zu beobachten. Diese waren an strahlungsintensive und gleichzeitig windschwache bzw. strahlungsarme und windstarke Episoden oder Ereignisse gebunden, die mit einer Entkopplung bzw. Überschneidung des windinduzierten Turbulenzregimes mit der Gezeitenstromturbulenz der Bodenschicht einhergingen. Unter praktisch gleichen meteorologischen Konditionen konnte sich bei der tieferen und geringeren Gezeitenströmen ausgesetzten Station ›NSB III‹ eine ab Anfang Juni 2006 beständige Schichtung mit scharfer Thermokline im 15 – 20 m Tiefenbereich ausbilden, die im Verlauf des von Tiefdruckstörungen geprägten August nur allmählich erodierte.

Im Winter 2005/06 bildete sich Meereis trotz der im Prinzip günstigen schwachen Zonalzirkulation erst Ende Januar und fast ausschließlich an der nordfriesischen Küste. Der als ›schwach‹ klassifizierte Eiswinter dauerte bei Eisdicken von 5 – 20 cm knapp eine Woche an. Im Winter 2006/07 blieb die Deutsche Nordseeküste vollständig eisfrei. Die unter verstärkter Zonalzirkulation geringen Abkühlungsraten reichten erst recht nicht hin, um den zu Winterbeginn erneut sehr hohen Wärmeinhalt des Meerwassers der Deutschen Bucht deutlich vor Durchschreiten des saisonalen Minimums im Februar abzubauen.

3.6 Salzgehalt

<•> H. Klein, P. Loewe, A. Frohse & A. Schulz

3.6.1	Einführung	... 156
3.6.2	Salzgehaltsverteilungen	... 156
3.6.3	Abfluss Elbe und Salzgehalt bei Helgoland	... 162
3.6.4	Zusammenfassung	... 163

3.6.1 Einführung

Der Salzgehalt der Nordsee wird geprägt durch salzreiches atlantisches Wasser, das mit Salzgehalten über 35 (Practical Salinity Units) am Nordwestrand und durch den Englischen Kanal einströmt, sowie durch salzarme Wassermassen im Osten. Salzgehalte unter 34 markieren den Einflussbereich des Baltischen Ausstroms im Skagerrak und über der Norwegischen Rinne, sind aber auch kennzeichnend für den Einfluss von Festlandsabflüssen. Der Süßwassereintrag durch Niederschlag über der Nordsee wird weitgehend durch Verdunstung kompensiert.

Ausgeprägte Salzgehaltsschichtungen treten in der Nordsee in den Mündungsgebieten der großen Flüsse und in den vom Brackwassereintrag des baltischen Ausstroms beeinflussten Seegebieten auf. Im Sommer ist die Bodenwasserschicht durch die saisonale Thermokline von der Deckschicht entkoppelt, so dass nicht nur die winterlichen Bodenwassertemperaturen, sondern auch die bodennahen Salzgehaltsbedingungen bis in den Sommer nur geringen Änderungen unterworfen sind. Nahezu identische Verteilungen in der boden- und oberflächennahen Schicht dokumentieren die vertikale Durchmischung der Nordsee im Winter, wenn weite Teile der Nordsee mit Wasser atlantischen Ursprungs (Salzgehalt > 35) gefüllt sind. Die flachen Seegebiete vor der kontinentalen Küste mit Tiefen kleiner 30 m sind infolge der Gezeitenreibung ganzjährig vertikal homohalin durchmischt.

Für die Jahre 2006 und 2007 werden beobachtete saisonale geographische Salzgehaltsverteilungen und sommerliche Salzgehaltsschichtungen diskutiert. Ferner werden Jahresgänge des Süßwasserabflusses der Elbe und des Salzgehalts bei Helgoland Reede erörtert.

3.6.2 Salzgehaltsverteilungen

3.6.2.1 Daten und Methoden

Für die Analyse der nordseeweiten horizontalen Salzgehaltsverteilungen im Winter wurden Daten des ICES aus dem Zeitraum Januar bis März herangezogen¹. Entspre-

1. www.ices.dk/datacentre/index.asp

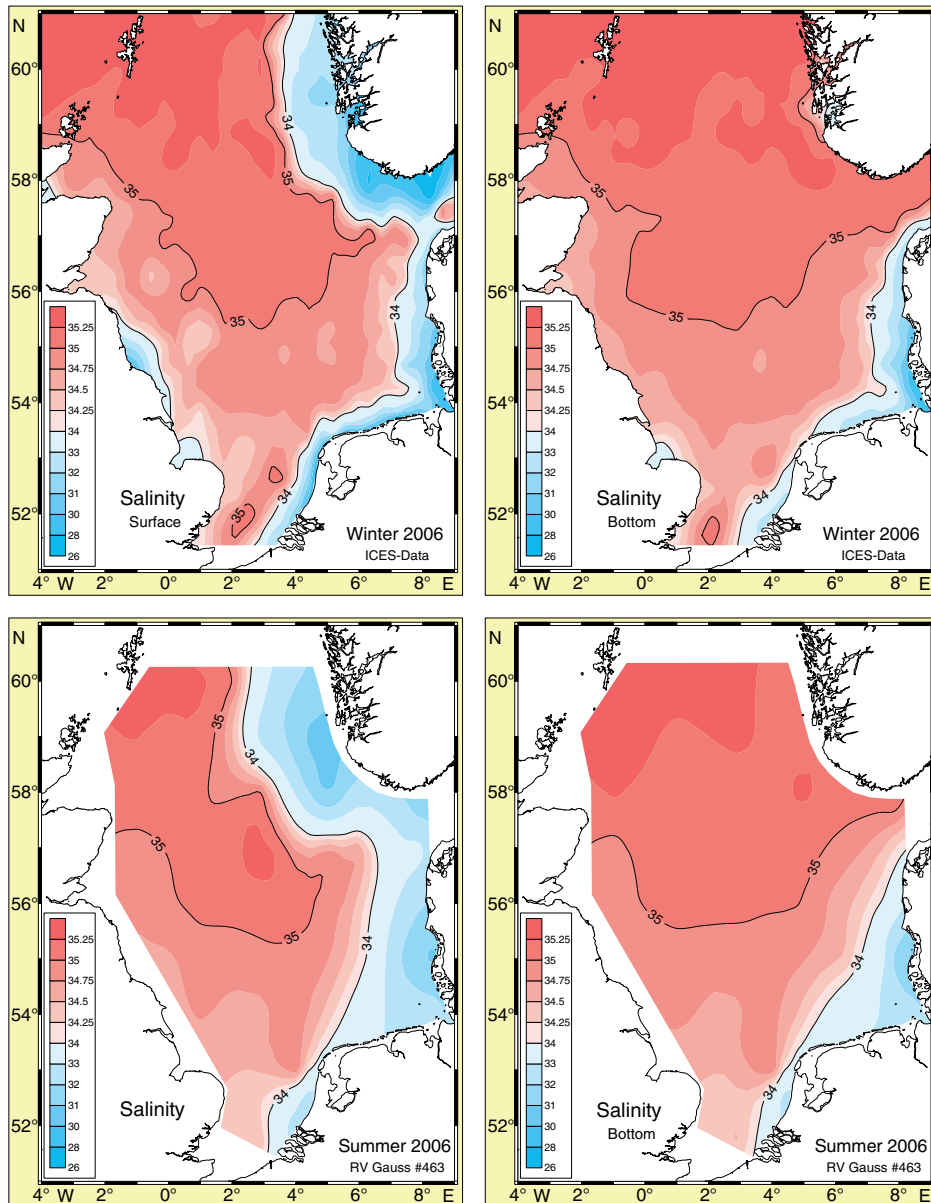


Abb. 3-22: Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- (links) und Bodennähe (rechts) im Winter (oben) und Sommer (unten) des Jahres 2006.

Fig. 3-22: Near-surface (left) and -bottom (right) salinity distributions in winter (top) and summer (bottom) 2006.

chende oberflächen- und bodennahe Verteilungen für den Sommer beruhen auf Daten der vom BSH gewöhnlich im August durchgeführten Nordsee gesamt Aufnahme. Die genannten Verteilungen sind für beide Niveaus und Jahreszeiten in Abb. 3-22 für das Jahr 2006 und Abb. 3-23 für das Jahr 2007 dargestellt.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Sommeraufnahmen mit dem undulierenden Schleppsystem ›Delphin‹ vertikale Salzgehaltsverteilungen entlang der Schiffsroute gemessen. Diese along-track Verteilungen sind für die verschiedenen Zonalschnitte zwischen 54° N und 60° N in Abb. 3-24 (2006) und Abb. 3-25 (2007) wiedergegeben. Auf diesen Daten beruht auch die Abschätzung des gesamten Salzinhalt der Nordsee, deren Ergebnisse für die Sommer 2000 bis 2009 in Tab. 3-7, S. 161 zusammengestellt sind.

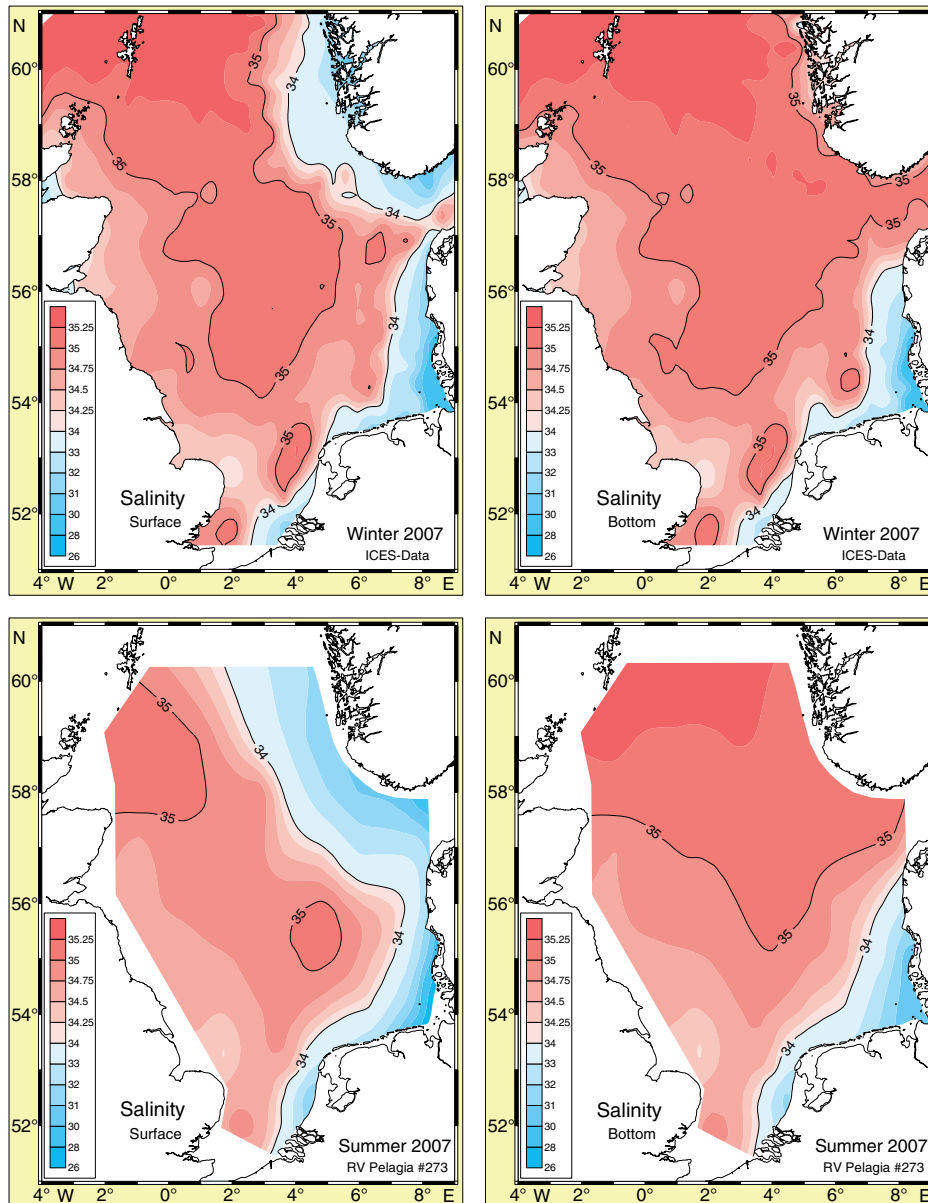


Abb. 3-23: Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- (links) und Bodennähe (rechts) im Winter (oben) und Sommer (unten) des Jahres 2007.

Fig. 3-23: Near-surface (left) and -bottom (right) salinity distributions in winter (top) and summer (bottom) 2007.

3.6.2.2 2006

Im Winter 2006 drang die 35er-Isoholine an Boden und Oberfläche bis $55^{\circ} 30' N$ nach Süden vor; das war auch im Sommer ihre südlichste Ausdehnung (Abb. 3-22). In der Bodenschicht reichte das atlantische Wasser bis an die Norwegische Küste heran und bis ins Skagerrak hinein. Ferner lagen kleine Linsen mit $S > 35$ in der tieferen Rinne ($> 40 m$) zwischen der belgischen und englischen Küste, die auf den Einstrom von Atlantikwasser durch den Englischen Kanal zurückgehen.

Vor der südlichen und östlichen Küste erstreckte sich ein Band mit Salzgehalten < 34 , das durch die kontinentalen Festlandsabflüsse gebildet wird. Über der Norwegischen Rinne kommt an der Oberfläche der Baltische Ausstrom hinzu, der sich im Sommer

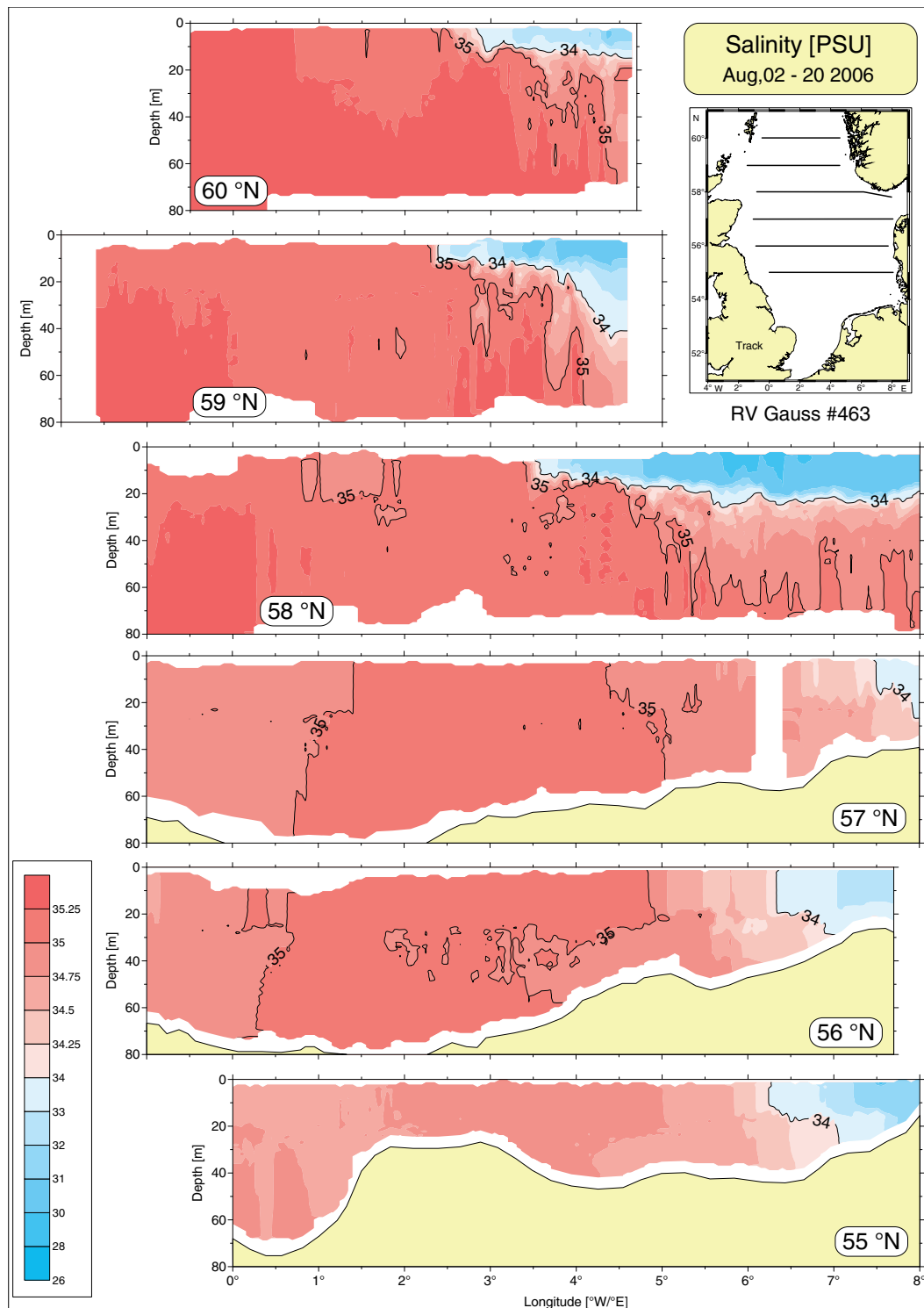


Abb. 3-24: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2006 (FS Gauß, Reise #463a).

Fig. 3-24: Salinity stratification in summer 2006 (RV Gauss, Cruise #463a).

deutlich weiter nach Westen ausbreitete. Auch entlang der friesischen und dänischen Küste war das Band salzärmeren Wassers wesentlich breiter. Aufgrund ungewöhnlich starker Schneefälle im Winter lagen die Festlandsabflüsse im April und Mai erheblich über den klimatologischen Monatsmitteln. Der Abfluss der Elbe entsprach im April mit ca. $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ dem $2\frac{1}{2}$ -fachen des langjährigen Mittelwertes (vgl. Abb. 3-27, S. 163). Die geringen Salzgehalte in der südlichen Nordsee bedingten eine Abnahme des ge-

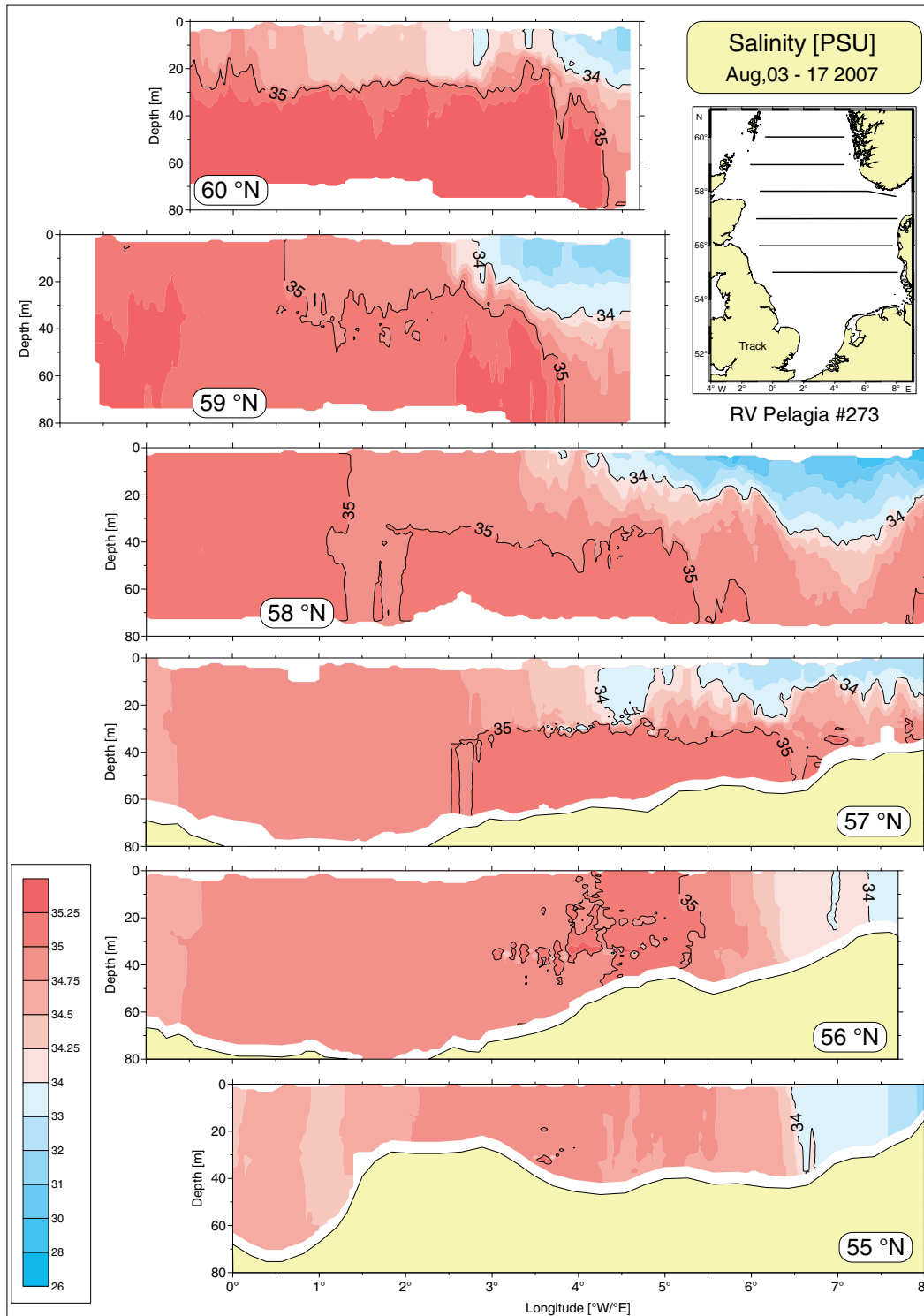


Abb. 3-25: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2007 (FS Pelagia, Reise #273a).

Fig. 3-25: Salinity stratification in summer 2007 (RV Pelagia, Cruise #273a).

samtigen Salzinhalts der Nordsee von 1,153 im Sommer 2005 auf $1,138 \times 10^{12}$ t (Tab. 3-7, S. 161). Die zonalen Vertikalprofile des Salzgehalts zeigen eine starke Sprungschicht (Halokline) über der Norwegischen Rinne (Abb. 3-24). Deren Tiefe variierte auf 58° N zwischen 20 und 30 m, nahm nach Norden hin vor der norwegischen Küste zunächst auf 40 m zu und lag auf 60° N recht einheitlich bei etwa 15 m.

3.6.2.3 2007

Im Winter 2007 drang das atlantische Wasser von Norden her bis auf etwa 54° 12' N vor. Gleichzeitig drang eine Zunge atlantischen Wassers aus dem Kanal in die südliche Nordsee ein, wobei einzelne Linsen bis vor die niederländische Küste wanderten (Abb. 3-23) Auch war das Band salzärmeren Oberflächenwassers vor der kontinentalen Küste auf der Höhe von Skagen unterbrochen. Die starke Ausbreitung salzreichen Atlantikwassers steht in Verbindung mit dem ungewöhnlich hohen Sturmaufkommen im Herbst/Winter 2006/07 (Abb. 2-25, S. 100), welches sich auch in einer stabilen zyklonalen Nordseezirkulation (Abb. 3-1, S. 118) oder hohen Wassertransporten durch die Doverstraße (Abb. 3-3, S. 123) ausdrückte.

CRUISE	TERM	MIDTERM	S [$\times 10^{12}$ t] | SA
G353	8/09 – 8/23/2000	8/16	1.140 | -0.3
G370	7/11 – 8/02/2001	7/27	1.095 | ./.
G385	7/16 – 7/31/2002	7/25	1.135 | -1.2
G405	7/28 – 8/13/2003	8/04	1.138 | -0.7
G425	8/05 – 8/20/2004	8/12	1.148 | 1.0
G446	8/10 – 8/29/2005	8/20	1.153 | 1.8
G463	8/02 – 8/20/2006	8/11	1.138 | -0.7
P273	8/03 – 8/17/2007	8/10	1.143 | 0.2
P293	7/21 – 8/05/2008	7/29	1.143 | 0.2
P311	8/20 – 9/09/2009	8/30	1.140 | -0.3

Tab. 3-7: Gesamter Salzinhalt der Nordsee (S) mit standardisierter Abweichung (SA) vom Mittelwert 2000 - 2009 ($1,142 \pm 0,006 \times 10^{12}$ t, ohne 2001). Die Analyse basiert auf den Daten der Sommeraufnahmen mit FS Gauß und FS Pelagia.

Table 3-7: Total North Sea salt content (S) and standardized departure (SA) from 2000 - 2009 mean ($1.142 \pm 0.006 \times 10^{12}$ t, w/o 2001). Analysis based on data from summer surveys with RV Gauß and RV Pelagia.

Im Sommer war die Nordsee deutlich salzärmer. An der Oberfläche wurden Salzgehalte > 35 nur noch NW-lich der Linie Peterhead – Fladengrund – Südspitze Shetlands, also im unmittelbaren Einflussbereich des Fair-Isle-Strom, angetroffen. Auch am Boden verringerte sich die Fläche atlantischen Wassers, dessen Südrand sich um über 60 sm NE-wärts verlagerte. Der gesamte Salzinhalt der Nordsee entsprach im Sommer mit $1,143 \times 10^{12}$ t praktisch dem 10-Jahresmittel der vergangenen Dekade (vgl. Tab. 3-7, S. 161). Der vertikale Salzgehaltsgradient über der norwegischen Rinne war deutlich weicher als im Vorjahr, so dass sich keine eigentliche Halokline ausbildete (Abb. 3-25). Auf 58 und 59° N lag die 34er-Isohaline in Tiefen von etwa 40 m. Auf 60° N existierte nur noch nahe der Oberfläche eine dünne, in zonaler Richtung durchgängig salzarme Schicht; darunter traten salzarme »Tröge« und salzhaltigere »Rücken« im Wechsel auf.

3.6.3 Abfluss Elbe und Salzgehalt bei Helgoland

Der Abfluss der Elbe wird vom WSA Lauenburg etwa 200 Stromkilometer oberhalb der Flussmündung am Wehr Neu-Darchau gemessen. Im langjährigen Jahresmittel fließen dort $21,6 \text{ km}^3/\text{a}$ 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 Flüsse angesehen. Die Gesamtabflussmengen der Jahre 2006 und 2007 lagen mit $22 \text{ km}^3/\text{a}$ dicht am langjährigen Mittel (Abb. 3-26).

Der Abfluss der Elbe hat Einfluss auf die Salzgehaltsverteilung der Deutschen Bucht und damit auch auf das Seegebiet um Helgoland, welches im Mittel in der Hauptachse des Elbeausstroms liegt. Hohe/geringe Abflussmengen bewirken hier tendenziell niedrige/hohe Salzgehalte, wie beispielsweise am inversen Verlauf von Abflussmenge und Salzgehalt in der zweiten Jahreshälfte 2007 erkennbar ist (Abb. 3-27 und Abb. 3-28). Die räumliche Ausdehnung der Elbfahne ist jedoch auch von dynamischen Veränderungen durch Gezeitenströme und wechselnden großräumigen Reststrommustern abhängig. Ostwestverlagerungen der Frontalzone zwischen Elbfahne und Nordseewasser sind dabei mit sprunghaften Salzgehaltsänderungen verbunden, wie sie bei Helgoland seit 1873 beobachtet werden (WILTSHIRE 2004, FRANKE ET AL. 2004, PANGAEA 2012).

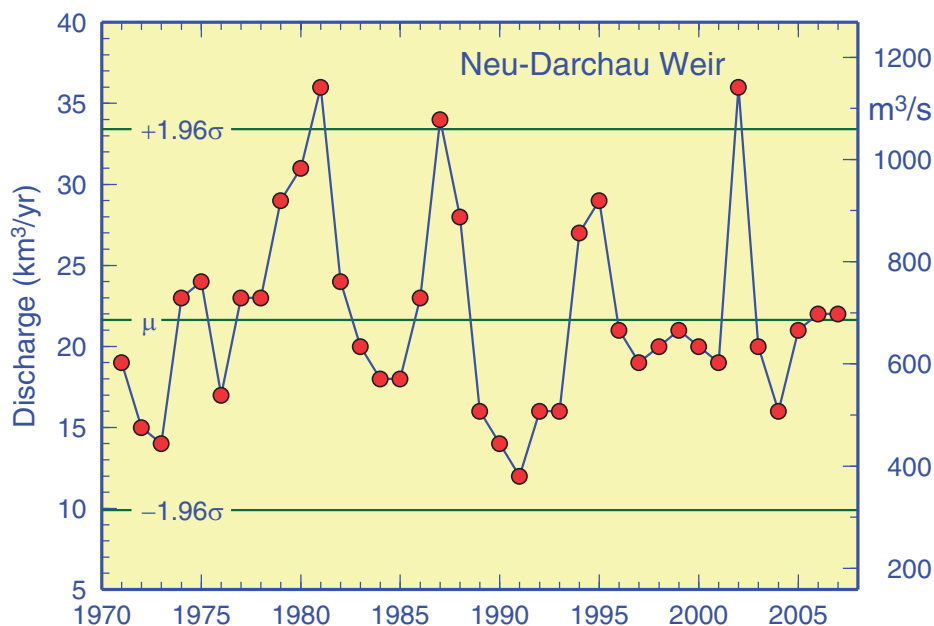


Abb. 3-26: Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Langzeitmittel (1971 – 2000) und 95%-Grenzen. $1 \text{ km}^3/\text{a}$ entspricht $31,7 \text{ m}^3/\text{s}$. (Rohdaten: WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-26: Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971 – 2000) and 95%-limits. $1 \text{ km}^3/\text{a}$ is equivalent to $31,7 \text{ m}^3/\text{s}$. (Raw data courtesy of WSA-Lauenburg.)

Trotz durchschnittlicher Gesamtabflussmengen der Elbe in den Jahren 2006 und 2007 traten im saisonalen Verlauf deutliche Unterschiede ein und zwar insbesondere im Frühjahr und Herbst (Abb. 3-27). Das herausragende Ereignis stellt der extrem hohe Abfluss im April 2006 dar, in dem sich das Frühjahrshochwasser der Elbe abbildet

(BELZ ET AL. 2006). Über den kalten Winter hinweg konnten sich im Einzugsgebiet Schneemassen akkumulieren, die Ende März aufgrund einer Umstellung der Wetterlage (CSW, vgl. Tab. 2-1, S. 44) binnen einer Woche vollständig abschmolzen und am 9. April in Neu-Darchau einen Hochwasserscheitel von 6,76 m produzierten. Dieses Signal spiegelt sich zeitverzögert im Juni im Salzgehaltsminimum bei Helgoland wider (Abb. 3-28). Die stetige Zunahme des Abflusses in der zweiten Jahreshälfte 2007 scheint hingegen mit einer kontinuierlichen Abnahme des Salzgehaltes bei Helgoland einhergegangen zu sein.

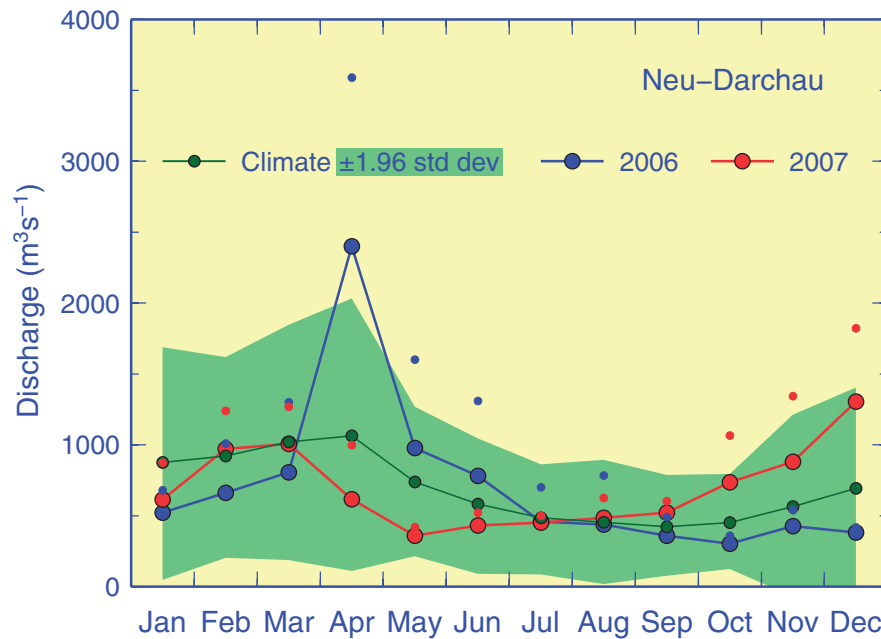


Abb. 3-27: Monatsmittel und max. Abflussraten der Elbe in den Jahren 2006 und 2007 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ Std. Abw.). 1000 m³/s entsprechen 2,592 km³/Monat. (Datenquelle: BfG/WSA-Lauenburg.)

Fig. 3-27: Monthly means and max. runoff of Elbe River in 2006/07 at Neu-Darchau weir together with 1971 – 2000 base period means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs.). 1000 m³/s are equivalent to 2.592 km³/month. (Source data: BfG/WSA-Lauenburg.)

3.6.4 Zusammenfassung

Das von Norden einströmende atlantische Wasser mit $S > 35$ drang im Jahr 2006 ganzjährig am Boden und an der Oberfläche bis $55^{\circ} 30' N$ nach Süden vor. In der Bodenschicht reichte das atlantische Wasser bis an die Norwegische Küste heran und bis ins Skagerrak hinein, an der Oberfläche wurde es durch den salzärmeren Baltischen Ausstrom über der Norwegischen Rinne in seiner Ausdehnung nach Westen begrenzt. Der gesamte Salzinhalt lag mit 0,7 Standardabweichungen unter dem langfristigen Mittel 2000 – 2009.

Die den Salzgehalt in der Deutschen Bucht beeinflussenden Festlandsabflüsse lagen im April und Mai 2006 aufgrund ungewöhnlich starker Schneefälle im Winter erheblich über den klimatologischen Monatsmitteln. Der Abfluss der Elbe entsprach im April dem 2½-fachen des langjährigen Mittelwertes.

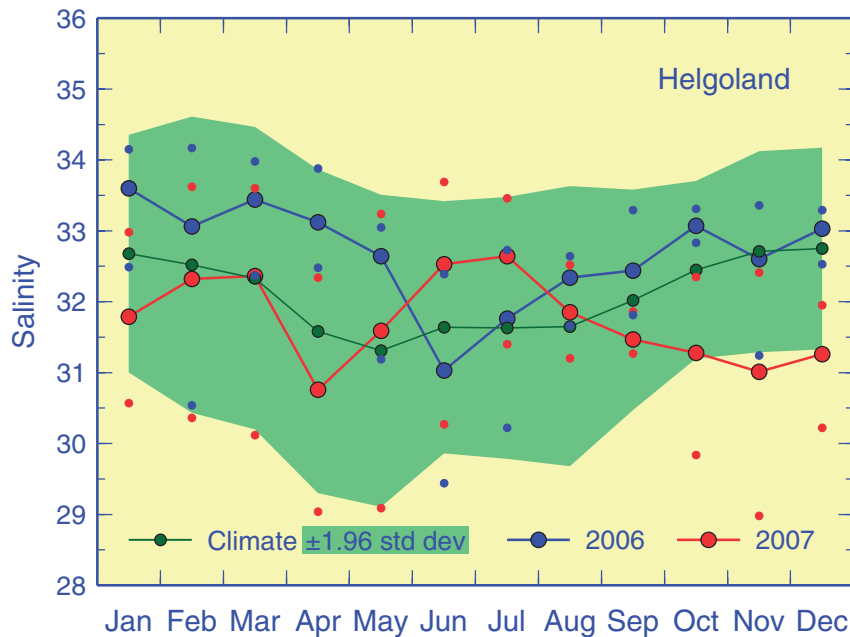


Abb. 3-28: Jahresgänge 2006/07 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und intra-monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ Std. Abw.). (Rohdaten: K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)

Fig. 3-28: Seasonal cycles 2006/07 of monthly mean SSS at Helgoland Roads together with intramonthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs). (Raw data courtesy of K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)

Infolge des ungewöhnlich hohen Sturmaufkommens im Herbst/Winter 2006/07 drang im Jahr 2007 das atlantische Wasser von Norden her bis auf etwa $54^{\circ} 12' N$ vor; gleichzeitig drang eine Zunge atlantischen Wassers aus dem Kanal in die südliche Nordsee ein. Im Sommer war die Nordsee deutlich salzärmer. An der Oberfläche wurden Salzgehalte > 35 nur noch NW-lich der Linie Peterhead – Fladengrund – Südspitze Shetlands, also im unmittelbaren Einflussbereich des Fair-Isle-Stroms, angetroffen. Auch am Boden verringerte sich die Fläche atlantischen Wassers, dessen Südrand sich um über 60 sm NE-wärts verlagerte. Der gesamte Salzinhalt der Nordsee entsprach im Sommer mit $1,143 \times 10^{12}$ t praktisch dem 10-Jahresmittel der vergangenen Dekade. Der vertikale Salzgehaltsgradient über der norwegischen Rinne war deutlich weicher als im Vorjahr, so dass sich keine eigentliche Halokline ausbildete. Die Gesamtabflussmengen der Elbe in den Jahren 2006 und 2007 lagen mit $22 \text{ km}^3/\text{a}$ dicht am langjährigen Mittel.

3.7 Literatur

Anonymus, Gezeitentafeln 2010, Europäische Gewässer, 246pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2009.

Belz, J. U., P. Burek, H. Matthäus, B. Rudolf, S. Vollmer, W. Wiechmann, Das Hochwasser der Elbe im Frühjahr 2006, *BfG-1514*, 43pp, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 2006.

http://undine.bafg.de/servlet/is/12448/BfG_Bericht_HW2006.pdf

Büdel, J., Der Eiswinter 1945/46 an den deutschen Küsten (Brit. Zone) im Vergleich zu den Eiswintern 1903/04 bis 1942/43, *Unveröff. Wiss. Arb.*, Nr. 34, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, 1947.

Bungenstock, F. und A. Schäfer, The Holocene relative sea-level curve for the tidal basin of the barrier island Langeoog, German Bight, Southern North Sea, *Global and Planetary Change*, 66, 34-51, 2009.

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, BSH, Hamburg und Rostock, 2001.

Franke, H.-D., F. Buchholz, K. H. Wiltshire, Ecological long-term research at Helgoland (German Bight, North Sea): retrospect and prospect – an introduction, *Helgol. Mar. Res.*, 58, 223-229, 2004.

Franke, R., Die Nordatlantischen Orkantiefs seit 1956. Ergebnisse einer langjährigen Untersuchung zur Veränderung der Sturmaktivität im Hinblick auf die Klimadiskussion, *Naturw. Rdsch.*, 62, 249-356, 2009.

Heyken, H., 15 Sturmfluten sind keine Boten des Klimawandels. 14-15 in: NLWKN (Hrsg.), *Jahresbericht 2007*, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2008.

www.nlwkn.niedersachsen.de/download/24153/Jahresbericht_2007_des_NLWKN.pdf

Jensen, J. und Ch. Mudersbach, Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den deutschen Küsten, *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 81, 99-112, 2007.

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.

Lefebvre, C., Orkan Britta am 31. 10. und 1. 11. 2006 und seine Auswirkungen, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2006.

www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU23/besondere_ereignisse_deutschland/stuerme/orkan_britta_30103006,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/orkan_britta_30103006.pdf

Loewe, P., G. Becker, U. Brockmann, S. Dick, A. Frohse, J. Herrmann, B. Klein, H. Klein, H. Nies, S. Schmolke, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald, S. Weigelt, Nordseezustand 2004, *Berichte des BSH*, Nr. 40, 221pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2006.
www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte/_Bericht40/index.jsp

Loewe, P. (Ed.), System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen, *Berichte des BSH*, Nr. 44, 261pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2009.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht44/index.jsp

Mittelstaedt, E., W. Lange, C. Brockmann, K. C. Soetje, Die Strömungen in der Deutschen Bucht, Nr. 2347, 141pp, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, 1983.

Müller-Navarra, S. H. und H. Giese, Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight, *Ocean Dynamics*, 51, 385-405, 1999.

Müller-Navarra, S. H., Implementation of the equilibrium tide in a shelf sea model, *Environmental and Chemical Physics*, 24, 127-132, 2002.

Müller-Navarra, S. H., Sturmfluten in der Elbe und deren Vorhersage im Wandel der Zeiten. 77-95 in: Ohlig, C., Hamburg – die Elbe und das Wasser sowie weitere wasserhistorische Beiträge, *Schriften der DWhG*, 13, 2009a.

Müller-Navarra, S. H., Zur automatischen Scheitelpunktbestimmung gemessener Tidedekurven in der Deutschen Bucht, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 53, 380-388, 2009b.

Nusser, F., Die Eisverhältnisse des Winters 1947/48 an den deutschen Küsten, *Dt. Hydrogr. Z.*, 1, 149-156, 1948.

PANGAEA, Data Publisher for Earth and Environmental Science, 2012.

www.pangaea.de

Pingree, R. D. und D. K. Griffiths, Tidal fronts on the shelf seas around the British Isles, *J. Geophys. Res.*, 83C, 4615-4622, 1978.

Robson, J., R. Sutton, K. Lohmann, D. Smith, M. D. Palmer, Causes of the rapid warming of the North Atlantic Ocean in the mid-1990s, *J. Clim.*, 25, 4116-4134, 2012.

Schmelzer, N. und J. Holfort, Eiswinter 2004/05 bis 2008/09 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten (Ice winters 2004/05 to 2008/09 on the German North and Baltic Sea coasts), *Berichte des BSH*, Nr. 46, 72pp, BSH, Hamburg & Rostock, 2009.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht46/index.jsp

Sharples, J., O. N. Ross, B. E. Scott, S. P. R. Greenstreet, H. Fraser, Inter-annual variability in the timing of stratification and the spring bloom in the north-western North Sea, *Cont. Shelf Res.*, 26, 733-751, 2006.

Simpson, J. H. und J. R. Hunter, Fronts in the Irish Sea, *Nature*, 250, 404-406, 1974.

Sutton, R. T. und B. Dong, Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s, *Nature Geoscience*, 5, 788-792, 2012.

Wahl, T., J. Jensen, T. Frank: On analysing sea level rise in the German Bight since 1844, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 171-179, 2010.

WAMDI Group, The WAM Model – A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810, 1988.

Wiltshire, K. H. und B. F. J. Manly, The warming trend at Helgoland Roads, North Sea: phytoplankton response, *Helgol. Mar. Res.*, 58, 269-273, 2004.

4 Meereschemie



<•> S. Weigelt-Krenz

- 4.1 Einführung ... 168
 <•> S. Schmolke
- 4.2 Nährstoffe ... 170
 <•> S. Weigelt-Krenz
- 4.3 Organische Stoffe ... 193
 <•> N. Theobald
- 4.4 Metalle ... 232
 <•> S. Schmolke
- 4.5 Radioaktive Stoffe ... 263
 <•> J. Herrmann & P. Loewe
- 4.6 Literatur ... 275

4.1 Einführung

<•> S. Schmolke

Der Stoffhaushalt im Meer 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 Oberflächengewässern 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 Akkumulationsprozesse in der Nahrungskette potenziert. Zu den möglichen Folgen zählen Beeinträchtigungen des Immunsystems, der Reproduktionsfähigkeit und des Stoffwechsels.

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 (Schifffahrt) 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. Grundlagen hierfür schafft die chemische Meeresumweltüberwachung des BSH. Die Beprobung des Meerwassers erfolgt dabei an festen geographischen Positionen eines Stationsnetzes, welches 2004 erweitert und vereinheitlicht wurde (Abb. 4-1).

Die in den Jahren 2006/07 durchgeführten Überwachungsfahrten und dabei erhobenen Datensätze zur Charakterisierung des chemischen Zustands sind Tab. 4-1 zu entnehmen.

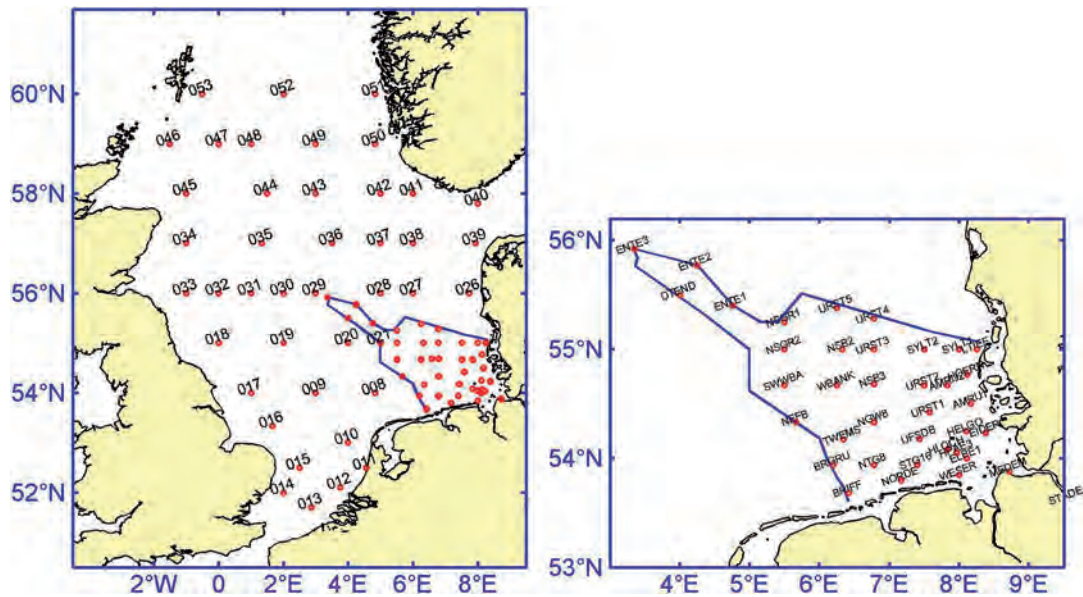


Abb. 4-1: Stationsnetz zur Schadstoff- und Nährstoffüberwachung in der Deutschen Bucht und der Nordsee.

Fig. 4-1: Observational network for contaminant and nutrient monitoring in the German Bight and North Sea.

CRUISE	TERM	DOMAIN	NUTRIENTS	ORGANICS	METALS	RADIOACT.
GAUSS 452	JAN 2006	GB	X		X	X
GAUSS 456	MAR	GB	X		X	X
ATAIR 143	MAY	GB		X		
GAUSS 463	AUG	NS & GB	X	X	X	X
GAUSS 465	OCT	GB	X		X	X
ALKOR 292	JAN 2007	GB	X		X	
ALKOR 296	MAR	GB	X		X	X
ATAIR 150	MAY	GB		X		
PELAGIA 273	AUG	NS & GB	X	X	X(GB)	
HEINKE 281	NOV	GB	X		X	X
ATAIR 155	NOV	GB		X		

Tab. 4-1: Durchgeführte Überwachungsfahrten in 2006/07 und in der Zustandsanalyse verwendete Daten (X).

Table 4-1: Monitoring cruises in 2006/07, and data used in this state assessment (X).

4.2 Nährstoffe

<•> S. Weigelt-Krenz • • • • •

4.2.1	Einführung	... 170
4.2.2	Nährstoff-Flusseinträge in die Deutsche Bucht	... 172
4.2.3	Nährstoffverteilungen – Dt. Bucht und Nordsee	... 173
4.2.4	Nährstoffveränderungen in der Dt. Bucht	... 181
4.2.5	Bewertung der Nährstoffsituation – Dt. Bucht	... 188
4.2.6	Chlorophyll-a-Gehalte in der Nordsee	... 189
4.2.7	Sauerstoffgehalte in der Nordsee	... 190
4.2.8	Zusammenfassung	... 191

4.2.1 Einführung

Für die Biosynthese des Phytoplanktons sind Nährstoffe wie Phosphor-, Stickstoffverbindungen und Silikat neben unbegrenzt verfügbarem Kohlenstoff von grundlegender Bedeutung. Die Nährstoffzufuhr war zunächst ein natürlicher Prozess. Seit den 1950er Jahren sind die Nährstoffkonzentrationen 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 Fisch- und Muschelbeständen verursachen können. Starke Phytoplanktonblüten der Schaumalge *Phaeocystis* führten u. a. in den 1980er Jahren zu ausgedehnten Schaumteppichen an den Stränden.

Diese übermäßige Produktion pflanzlicher Biomasse ist Folge der anthropogenen Überdüngung der Meere mit anorganischen Nährstoffen. Zur Bekämpfung dieser ›Eutrophierung‹¹ hatten sich nationale und internationale Organisationen (OSPAR, HELCOM, EU) darauf verständigt, den Nährstoffeintrag bis 1995 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 Phosphat in Flüsse und Seen. Die Nutzung Nitrat-basierter Dünger verringerte sich zwar in Europa seit 1980, der Eintrag aus landwirtschaftlichen Quellen, Industrie und Verkehr über Flüsse und Atmosphäre ist jedoch immer noch hoch.

1. von griechisch ›eu‹ (gut) und ›trophein‹ (ernähren, wachsen).

Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar

Die gesamte marine Nahrungskette basiert auf der Biomasseproduktion von im Meer treibenden einzelligen Algen – dem **Phytoplankton**. Anorganische Spurenstoffe wie **Phosphat**, die Stickstoffverbindungen **Nitrat**, **Nitrit** und **Ammonium** sowie **Silikat** (als Gerüstsubstanz von Kieselalgen) sind für das Phytoplankton lebensnotwendig und wachstumsfördernd, weshalb sie als **Nährsalze** bezeichnet werden. Der Oberbegriff **Nährstoffe** umfasst neben den genannten anorganischen Nährsalzen auch solche organischen Verbindungen (z. B. Aminosäuren, Nukleinsäuren, Harnstoff, Lipide), die vom Phytoplankton als Stickstoff- und Phosphorquellen genutzt werden können.

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

Stickstoff wird für die Synthese von Aminosäuren und Nukleinsäuren in der Form von Nitrat (NO_3^-), Nitrit (NO_2^-), Ammonium (NH_4^+) oder in Form organischer Verbindungen aufgenommen. So sind Harnstoff und Aminosäuren bevorzugte Stickstoffquellen. Viele Bakterien können molekularen Stickstoff fixieren. Ammonium wird wegen seiner reduzierten Form meist bevorzugt aufgenommen, während Nitrat energetisch aufwendig durch das Enzym Nitratreduktase reduziert werden muss, bevor der Stickstoff für Biosynthese verfügbar ist.

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

Silikat ist eine Verbindung von Silizium und Sauerstoff (Si_xO_y), einem oder mehreren Metallen und eventuell auch Hydroxid-Ionen. Mit Silikat bezeichnet man auch die Salze des Siliziums und der Kieselsäuren. Ein Mangel an Silikat im Meerwasser verhindert das Wachstum bestimmter Phytoplanktonarten, nämlich Kieselalgen bzw. Diatomeen, die Silikate zur Ausbildung ihrer Schalen benötigen. Wenn Stickstoff oder Phosphor knapp werden, stellt Phytoplankton generell das Wachstum ein. Wird Silikat knapp, so setzt sich zwar das Wachstum des Phytoplanktons fort, aber andere Arten treten hervor, wie nackte (unbeschaltete) 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 können auf Produktionsbegrenzung durch das jeweils in geringster Konzentration vorliegende Element hindeuten (Nährstofflimitierung). Außerdem können veränderte N:P-Verhältnisse zu Verschiebungen in der Phytoplanktonpopulation und eventuell auch zu erhöhter Toxizität bei einigen Algen führen.

Phytoplankton wird i. d. R. vom Zooplankton gefressen. Abgestorbenes Phytoplankton kann als Schwebstoff ebenfalls vom Zooplankton aufgenommen werden oder dient Bakterien und benthischen Organismen als Nahrung. Das organische Material wird dabei unter Sauerstoffverbrauch in Kohlendioxid umgewandelt und die Nährsalze 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 (Abgestimmte Definition der OSPAR Commission, vgl. www.ospar.org.)

Um die Entwicklung von Ausmaß und Wirkung des anthropogenen Nährstoffeintrags zu erfassen und die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verringerung der Einträge zu kontrollieren, werden Nährstoff- und Chlorophyllkonzentrationen im Jahresverlauf überwacht. Die Sauerstoffsättigungskonzentrationen in der Nordsee werden im August/September jeden Jahres aufgenommen.

4.2.2 Nährstoff-Flusseinträge in die Deutsche Bucht

Einen wesentlichen Beitrag zum Nährstoffeintrag in die innere Deutsche Bucht und das schleswig-holsteinische Wattenmeer leisten die Flüsse Elbe und Weser. Die Trends der Gesamtfrachten von Stickstoff und Phosphor im Zeitraum 1980 bis 2006 sind in *Abb. 4-2* dargestellt (PÄTSCH UND LEHNHART 2004).

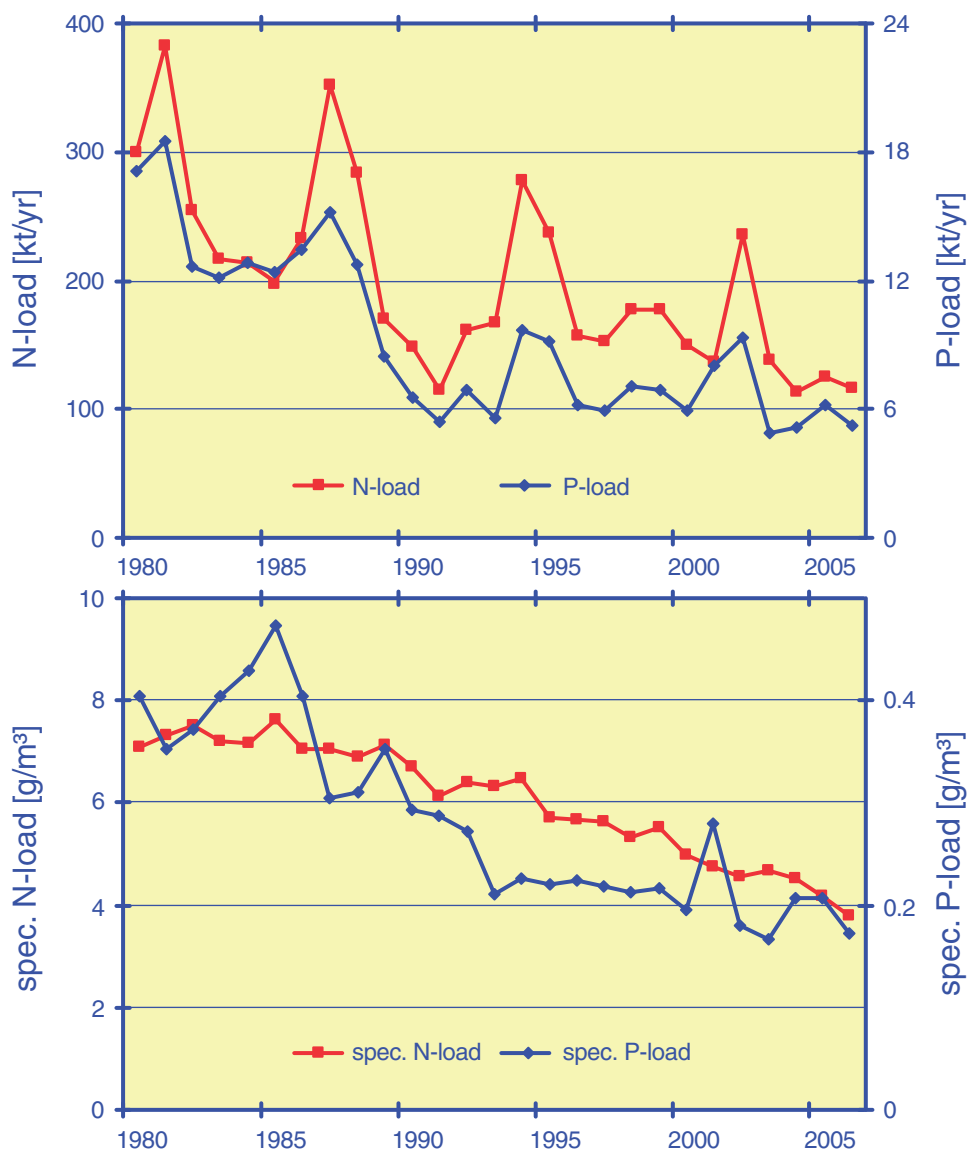


Abb. 4-2: Stickstoff- und Phosphorfracht der Weser und Elbe in absoluten (oben) und spezifischen Einheiten. Die Daten basieren auf Messungen von FFG Weser und FFG Elbe.

Fig. 4-2: Nitrogen and phosphorus loads of Weser and Elbe in absolute (top) and specific units. The data are based on measurements of FFG Weser and FFG Elbe.

Hierbei zeigen die Nährstofffrachten eine große interannuelle Variabilität, die zum Teil mit dem Frischwasserabfluss korreliert. Stellt man die spezifischen Flussfrachten (Jahresfracht geteilt durch Jahresabfluss) dar (*Abb. 4-2*), so ist sowohl für Phosphor als auch für Stickstoff seit den 1980er Jahren eine deutliche Abnahme erkennbar.

Für Phosphor beträgt der lineare abnehmende Trend etwa 3% pro Jahr während für Stickstoff etwa 2% seit Mitte der 1980er Jahre erreicht wird. Als Folge des Verbots von phosphathaltigen Waschmitteln und der Einführung der Phosphatfällung in Klärwerken nahm Phosphor vor allem während der 1980er und 1990er Jahre stark ab, während seit 2001 kein Trend mehr erkennbar ist. Stickstoff nimmt langsamer ab; bedingt durch die Landwirtschaft und hohe atmosphärische Einträge (Industrie, Verkehr, Schifffahrt) haben sich die Maßnahmen, wie Reduktion stickstoffhaltiger Düngemittel nicht so deutlich ausgewirkt.

4.2.3 Nährstoffverteilungen – Dt. Bucht und Nordsee

Die Nährstoffüberwachung der Deutschen Bucht wird vom BSH seit den 1980er Jahren regelmäßig Anfang des Jahres durchgeführt, da um diese Zeit die Nährstoffkonzentrationen aufgrund der geringen biologischen Aktivität und weit fortgeschrittenen Remineralisierung saisonale Maxima erreichen, die im Rahmen von OSPAR für überregionale Vergleiche und Trendbetrachtungen verwendet werden. Seit 2004 finden ergänzend Überwachungsfahrten im März, August/September und Oktober/November statt um den jahreszeitlichen Verlauf der Nährstoffkonzentration aufzunehmen.

4.2.3.1 Verteilungsmuster im Winter 2006/2007 (Dt. Bucht)

Grundlage der hier gezeigten Ergebnisse sind die während der FS GAUSS-Fahrt 452 durchgeführten Beprobungen. Exemplarisch wird die räumliche Verteilung der in der Januar-Kampagne 2006 gemessenen Konzentrationen diskutiert und mit dem Folgejahr (Winter 2007) verglichen.

Die in *Abb. 4-3* dargestellten Verteilungsmuster für DIN (gelöster anorganischer Stickstoff), Phosphat und Silikat sind repräsentativ für die gesamte Wassersäule, da durch die Winterstürme das Seewasser gut durchmischt ist. Im Küstenbereich wurden deutlich höhere Nährstoffkonzentrationen als in der offenen See gemessen. Ursache hierfür sind erhebliche Nährstofffrachten vor allem der Elbe und Weser, die überwiegend mit dem nach Norden fließenden Reststrom entlang der nordfriesischen Küste verteilt und zur offenen See hin verdünnt werden.

Die gezeigten Strukturen ergeben sich aus dem Zusammenspiel von Eintragsstärke der Flüsse, Richtung des Nettotransports (Reststromes) und fortschreitender Verdünnung. Diese hochvariablen Einflussgrößen integrieren sich in der Salzgehaltsverteilung (*Abb. 4-4*), wie ähnliche räumliche Strukturen belegen (s. a. *Kap. 4.2.4.2, S. 184*).

Im ostfriesischen Küstenbereich wiesen Salzgehalte bis 32,9 darauf hin (*Abb. 4-4*), dass im Winter 2005/2006 Atlantikwasser weit in die Deutsche Bucht vorgedrungen war (s. a. *Abb. 3-28, S. 164*). Der Süßwassereintrag über die Flüsse spiegelte sich im nordfriesischen Küstenbereich durch einen verhältnismäßig niedrigen Salzgehalt von 28,7 an der Station EIDER wider. Eine ähnliche Situation herrschte auch im Winter 2006/2007 vor. Der Salzgehalt vor Norderney lag bei 32,6, während vor der nordfriesischen Küste Werte bis 28,8 gemessen wurden.

4 Meereschemie

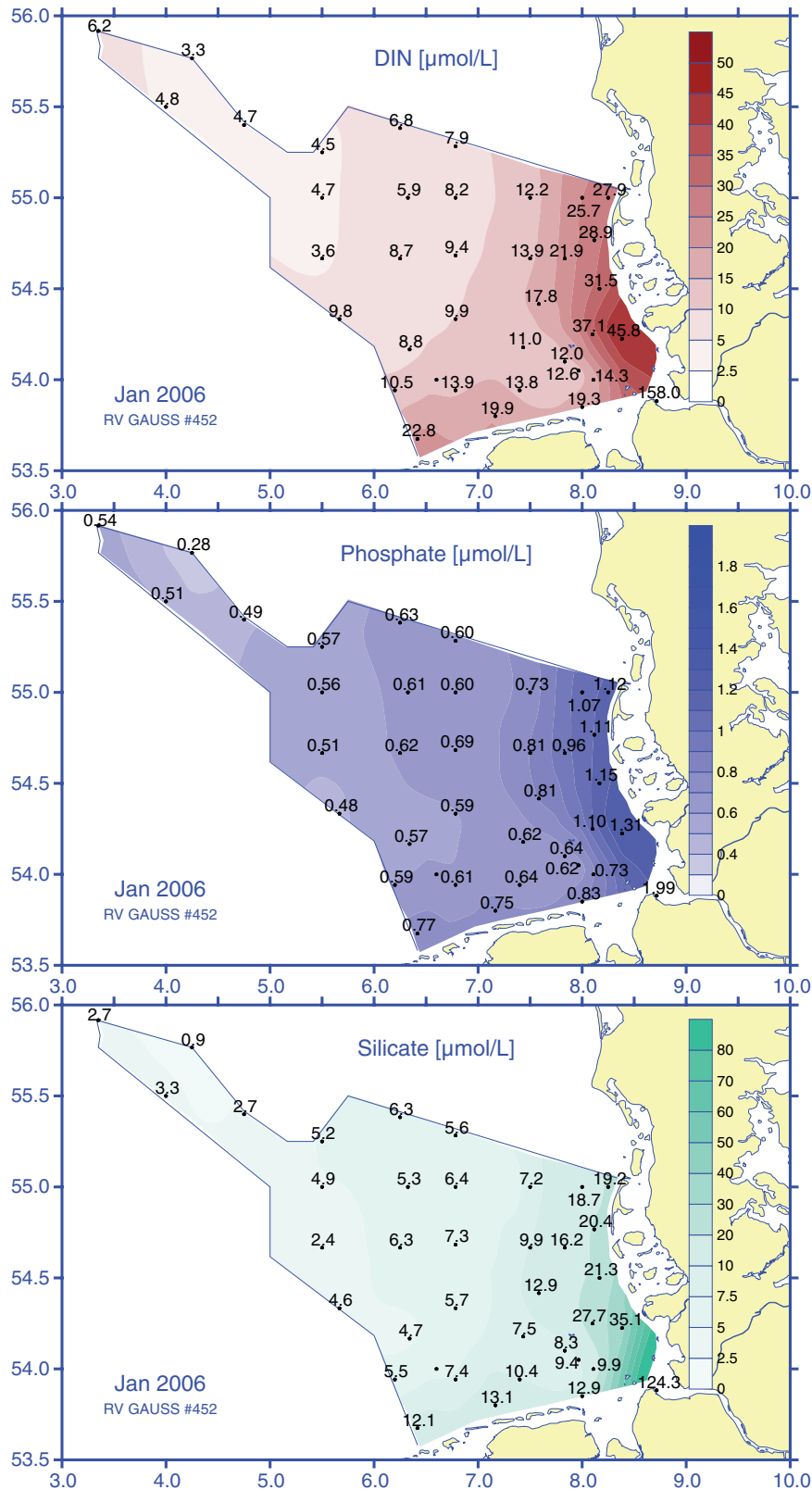


Abb. 4-3: Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) für Phosphat, DIN und Silikat im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Januar 2006.

Fig. 4-3: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of phosphate, DIN and silicate in surface sea water of the German Bight in January 2006.

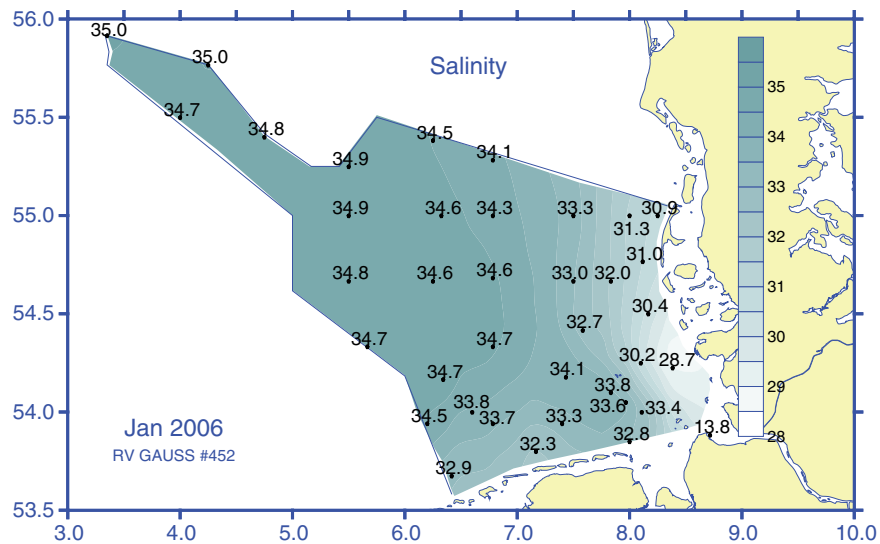


Abb. 4-4: Salzgehaltsverteilung im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Januar 2006.

Fig. 4-4: Salinity distribution in surface sea water of the German Bight in January 2006.

Entsprechend der starken Süßwassereinträge wurden an der schleswig-holsteinischen Küste hohe Nährstoffkonzentrationen bestimmt. Die Phosphatkonzentration an der Station EIDER erreichte $1,31 \mu\text{mol/L}$, die DIN-Konzentration stieg auf $45,8 \mu\text{mol/L}$ an und die Silikatkonzentration lag bei $35,1 \mu\text{mol/L}$.

Im Winter 2007 wurde an der gleichen Station für Phosphat $1,03 \mu\text{mol/L}$ ermittelt, für DIN $51,8 \mu\text{mol/L}$ und für Silikat $37,4 \mu\text{mol/L}$. Durch überdurchschnittlich hohe Wassertemperaturen (Temperaturanomalie $1,7 \text{ K}$; s. Kap. 3.5.2, S. 142) war die Remineralisierung weit fortgeschritten, dies hatte überdurchschnittlich hohe DIN und Silikatkonzentrationen im Winterwasser 2007 zur Folge.

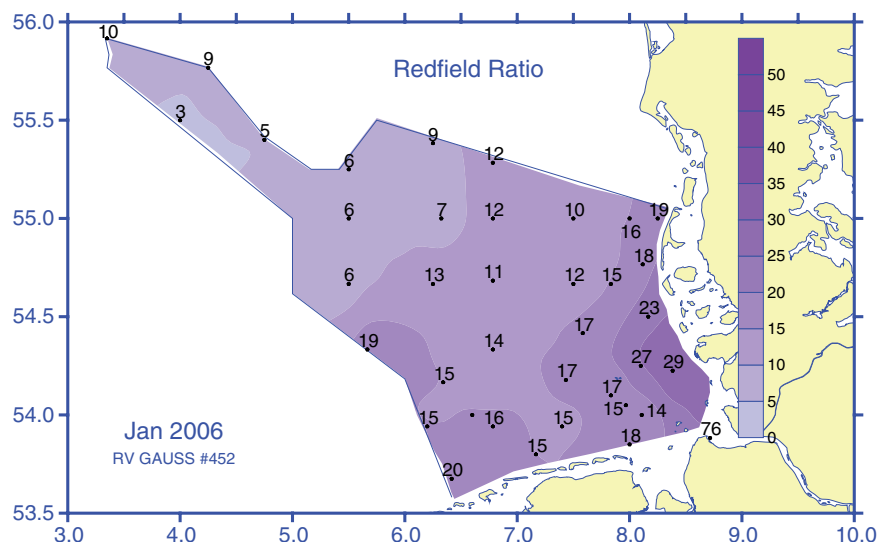


Abb. 4-5: Redfield-Verhältnis ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) im Bodenwasser der Dt. Bucht im Januar 2006.

Fig. 4-5: Redfield ratio ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) in the bottom water of the German Bight in January 2006.

Die Redfield-Verhältnisse (Abb. 4-5) lagen im Januar 2006 zwischen $N/P = 28$ im küstennahen Bereich und $N/P = 3$ in der äußeren Deutschen Bucht. Der theoretische Wert von $N/P = 16$ (REDFIELD 1934) wurde nur an wenigen Stationen erreicht. Nach wie vor kennzeichnet ein Ungleichgewicht der Nährstoffkonzentrationen die Eutrophierungsproblematik in der AWZ (Ausschließliche Deutsche Wirtschaftszone), wie hohe Stickstoffkonzentrationen im küstennahen Bereich, bedingt durch hohe Einträge über die Flüsse bzw. niedrige Phosphatkonzentrationen im Verhältnis zu den immer noch erhöhten Stickstoffkonzentrationen in der äußeren Deutschen Bucht zeigen.

4.2.3.2 Verteilungsmuster im Sommer 2006/2007 (Nordsee)

Wie schon in den Vorjahren wurden auch im Sommer 2006 und 2007 flächendeckende Gesamtaufnahmen in der Nordsee durchgeführt und umfangreiche Datensätze gewonnen. Diese enthalten u. a. Messwerte zu den anorganischen Nährsalzen, Chlorophyll und zu gelöstem Sauerstoff. Nachfolgend werden geographische Verteilungen der Nährstoffe im Sommer 2007 dargestellt und im Vergleich zu den Vorjahren diskutiert.

Während im Sommer 2006 das Atlantikwasser ($S = 35$) weit in die mittlere Nordsee drückte, fallen im Sommer 2007 vor der norwegischen Küste niedrige Salzgehalte ($S = 29,4$) in der Oberflächenschicht auf, die einen starken Ostseeestrom in die Norwegische Rinne kennzeichnen. Auch der Run-off der Flüsse war im Sommer 2007 stärker als 2006. Dies wirkte sich deutlich auf die Verteilung der Nährstoffkonzentrationen aus.

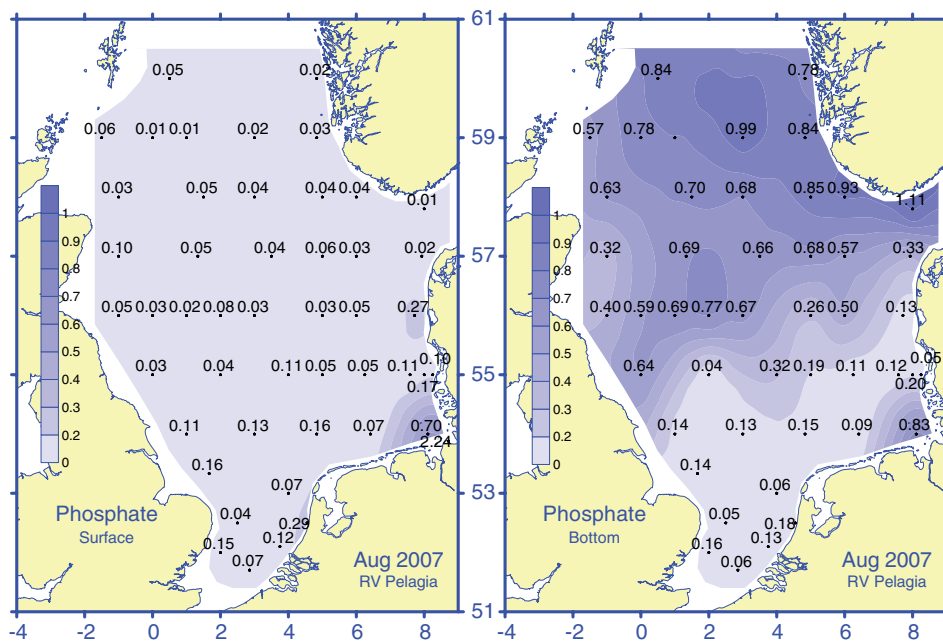


Abb. 4-6: Phosphatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007.

Fig. 4-6: Phosphate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.

a) Phosphat (Abb. 4-6)

Im Oberflächenwasser entsprachen die geringen Phosphatkonzentrationen im Sommer 2006 und 2007 den Vorjahreswerten. Phosphat war im Oberflächenwasser der zentralen und nördlichen Nordsee bis unter $0,03 \mu\text{mol/L}$ aufgezehrt, erreichte aber in der flachen südlichen Nordsee bereits wieder Gehalte über $0,1 \mu\text{mol/L}$, da remineralisiertes Phosphat aus dem Bodenwasser hier durch vertikale Vermischung nachgeliefert wurde. Die starken Abflussraten im Sommer 2007 spiegelten sich im Elbmündungsbereich durch vergleichsweise hohe Phosphatkonzentrationen (bis $0,7 \mu\text{mol/L}$ in der Oberfläche; bis $0,83 \mu\text{mol/L}$ in Bodennähe) wider.

b) Nitrat (Abb. 4-7)

In der Oberflächenschicht waren die Nährstoffe weitestgehend verbraucht. Die Nitratgehalte lagen in der zentralen Nordsee zwischen $0,1$ und $0,5 \mu\text{mol/L}$, während sich im Sommer 2007 der Süßwassereinstrom im Küstenbereich mit Werten bis $7,0 \mu\text{mol/L}$ (Elbfahne) bzw. $6,8 \mu\text{mol/L}$ (Rheinfahne) bemerkbar machte. Der atlantische Einstrom zeigte sich deutlich im Bodenwasser. Die Nitratgehalte waren 2007 bis auf Werte von $9,3 \mu\text{mol/L}$ gestiegen (2004: $6,5 \mu\text{mol/L}$; 2005: $5,4 \mu\text{mol/L}$; 2006: $4,6 \mu\text{mol/L}$), sie erreichten im Sommer 2007 die höchsten Werte seit 2004. In der südlichen Nordsee wurden Konzentrationen zwischen $0,1$ und $0,5 \mu\text{mol/L}$ gemessen. Hier wird die Stickstoffverarmung ähnlich wie in den vorigen Sommern durch geringe Nitratkonzentrationen deutlich. Im Bereich der Doggerbank werden die durch Remineralisierung freigesetzten Nährsalze ständig vom Phytoplankton wieder aufgenommen, da aufgrund der geringen Wassertiefe die Lichtverhältnisse hier ausreichend sind.

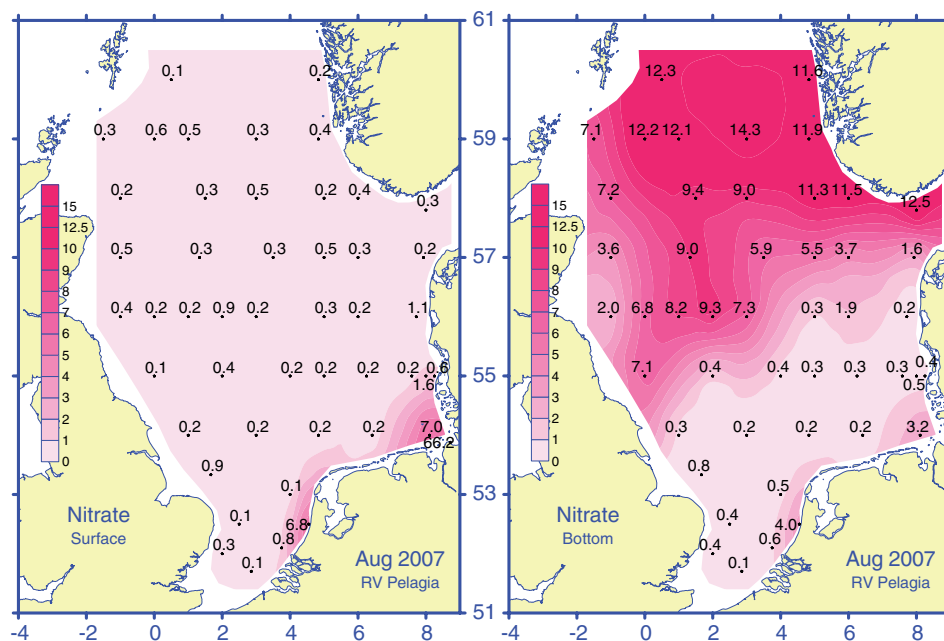


Abb. 4-7: Nitratkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007.

Fig. 4-7: Nitrate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.

Die Redfieldverhältnisse $N/P < 10$ (Abb. 4-8) spiegeln in weiten Teilen der zentralen Nordsee die Stickstofflimitierung in den Sommermonaten wider. Natürliche Redfield-Verhältnisse ($N/P = 16$) wurden nur im nördlichen Bereich in Bodennähe bestimmt, während in der Deutschen Bucht die Werte sogar unter 3 sanken. Nitrat ist zu dieser Jahreszeit aus der Wassersäule aufgezehrt. Die Remineralisierung ist jedoch noch nicht soweit fortgeschritten um Defizite auszugleichen.

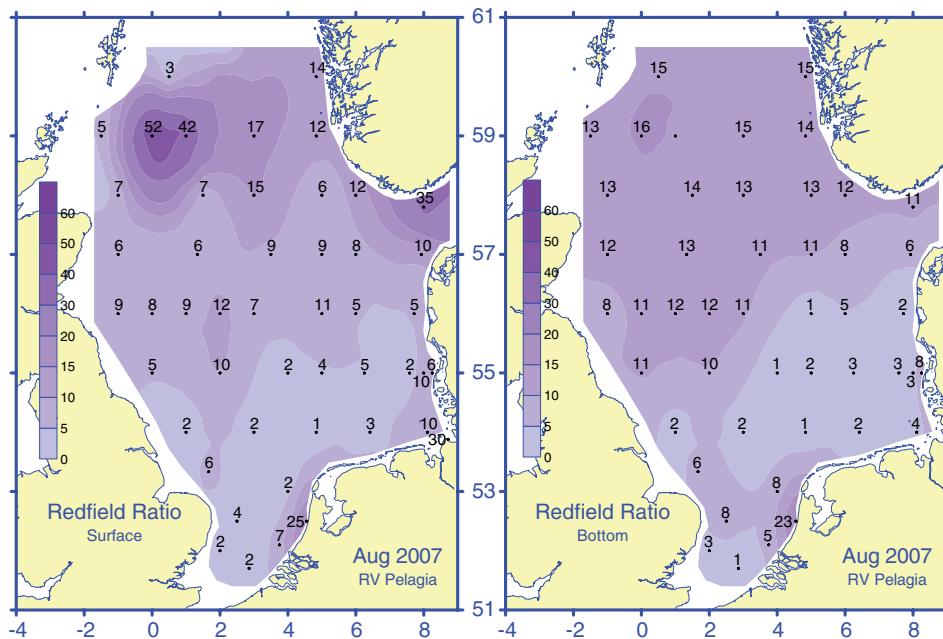


Abb. 4-8: Redfield-Verhältnis im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007.

Fig. 4-8: Redfield ratio in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.

c) Nitrit (Abb. 4-9)

Nitrit stellt wie in den Vorjahren unter den anorganischen Stickstoffverbindungen mit Konzentrationen von 0,02 bis 0,04 $\mu\text{mol/L}$ im Oberflächenwasser die anteilig kleinste Komponente dar. Hohe Nitritgehalte weisen auf Umsetzungsprozesse in der Wassersäule hin, da das während der Remineralisierung freigesetzte Ammonium zu Nitrit und anschließend weiter zu Nitrat oxidiert wird. Umgekehrt laufen aber auch Denitrifizierungsprozesse ab, die ebenfalls Nitrit als Zwischenprodukt haben. In Bodennähe wurden im Sommer 2007 in der westlichen Nordsee und im zentralen Bereich Konzentrationen bis 1,83 $\mu\text{mol/L}$ erreicht. Diese verhältnismäßig hohen Werte spiegeln aktive Umsetzungsprozesse wider und sind teilweise mit dem räumlichen Verteilungsmuster von Ammonium vergleichbar. Abweichungen machen deutlich, dass parallel dazu Denitrifizierungsprozesse (LAW UND OWENS 1990) stattfinden.

d) Ammonium (Abb. 4-10)

Da Ammonium vom Phytoplankton als Stickstoffquelle bevorzugt aufgenommen wird, wurden im Oberflächenwasser der zentralen Nordsee, vergleichbar zu 2005 nur Werte bis 0,5 $\mu\text{mol/L}$ gemessen, während im südlichen Bereich und in Küstennähe auch Werte $> 1 \mu\text{mol/L}$ auftraten. Auf Grund hoher Abflussraten im Sommer 2007 und loka-

ler Remineralisierung erreichte die Ammonium-Konzentration im Elbeausstromgebiet $2,1 \mu\text{mol/L}$ (Oberfläche) bzw. $6,2 \mu\text{mol/L}$ (Bodennähe).

Im Bodenwasser der westlichen Nordsee wurden im Sommer 2007 Ammoniumkonzentrationen bis $3,1 \mu\text{mol/L}$ gemessen. Diese hohen Werte zeigen schnell ablaufende Remineralisierungsprozesse bei hohen Wassertemperaturen an.

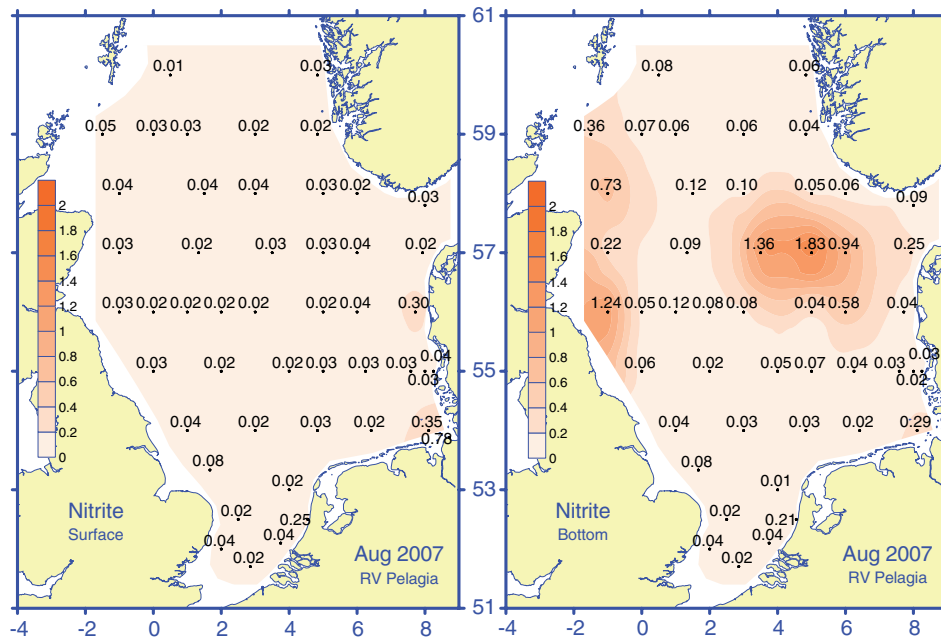


Abb. 4-9: Nitritkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007.

Fig. 4-9: Nitrite concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.

e) Silikat (Abb. 4-11)

In der Oberfläche lagen die Silikatkonzentrationen in weiten Teilen der zentralen Nordsee unter den Werten der Vorjahre. Die Nährstoffe waren von Diatomeen aus der Wassersäule aufgezehrt und die sedimentierten Kieselalgenschalen noch nicht wieder der Wassersäule zugeführt worden. 2007 wurde in der mittleren Nordsee ein leichter Silikat-Anstieg verzeichnet. Die bodennahen Konzentrationen lagen im Bereich der Vorjahre. Deutliche Unterschiede traten jedoch im Sommer 2007 vor der norwegischen Südküste auf, hier wurden vergleichsweise hohe Konzentrationen von $12,4$ bzw. $10,5 \mu\text{mol/L}$ analysiert, was auf den terrestrischen Silikateinfluss hinweist.

4 Meereschemie

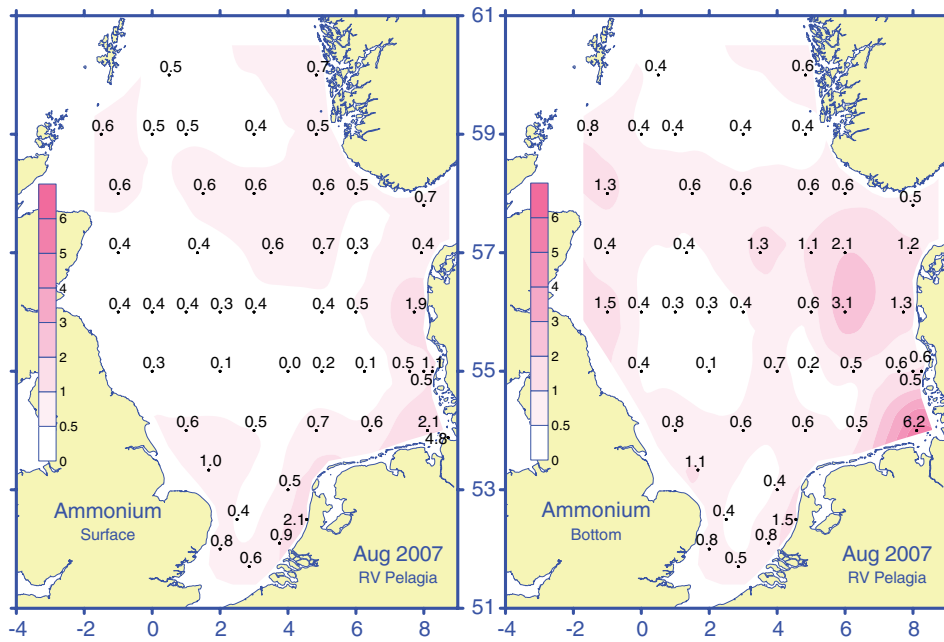


Abb. 4-10: Ammoniumkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007.

Fig. 4-10: Ammonium concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.

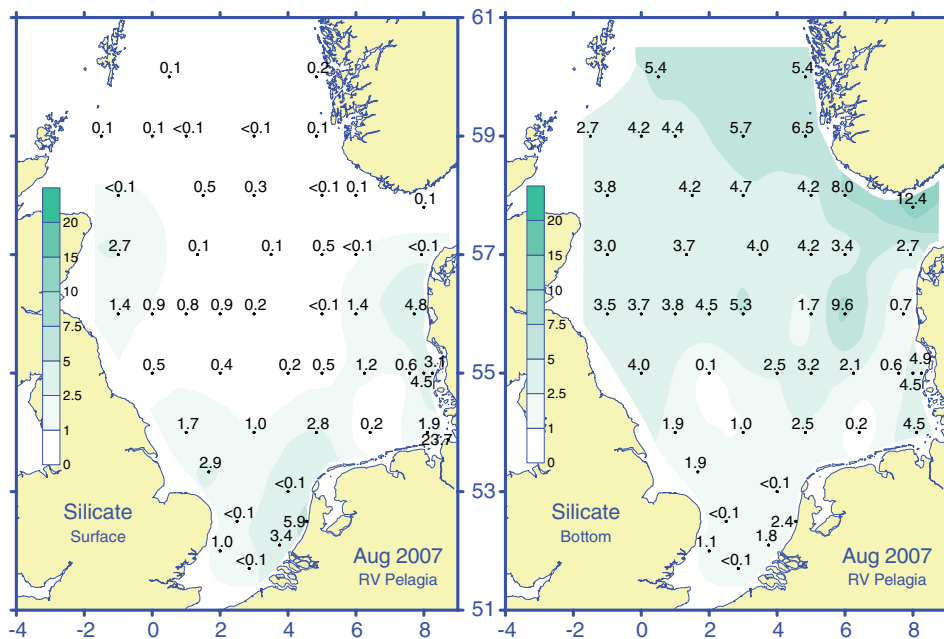


Abb. 4-11: Silikatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007.

Fig. 4-11: Silicate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.

4.2.4 Nährstoffveränderungen in der Dt. Bucht

4.2.4.1 Jahreszeitliche Variabilität an ausgewählten Stationen

Zur Aufnahme der jahreszeitlichen Variabilität und zur Erfassung der Nährstoffmaxima/-minima werden seit 2004 neben der Winteraufnahme weitere über das Jahr verteilte Monitoringfahrten in der Deutschen Bucht durchgeführt.

Abb. 4-12 veranschaulicht an drei ausgewählten Stationen aus dem küstennahen Bereich, der mittleren Deutschen Bucht und der äußeren Deutschen Bucht den jahreszeitlichen Verlauf von Nitrat, Nitrit und Ammonium. Ammonium ist ein wesentliches Remineralisierungsprodukt, welches durch nitrifizierende Bakterien (*Nitrobacter*, *Nitrosomonas*) unter Verbrauch von Sauerstoff zu Nitrit und weiter zu Nitrat oxidiert wird. Nitrit entsteht als Zwischenprodukt, welches meistens die kleinste Stickstoffkomponente im Meerwasser darstellt. Umgekehrt wird Nitrat durch Denitrifizierungsprozesse teilweise wieder abgebaut (VAN BEUSEKOM ET AL. 2008).

Allen Stationen gemeinsam ist ein deutlicher Anstieg der Nitratkonzentrationen im Frühjahr. Die höchsten Konzentrationen werden Ende März/Anfang April erreicht und nehmen während die Frühjahrsplanktonblüte langsam ab. Im Gegensatz dazu sind die Ammoniumkonzentrationen im Herbst bzw. im Winter am höchsten, je nach Fortschritt der Umsetzungsprozesse.

An der küstennahen Station EIDER ist Nitrat die Hauptstickstoffkomponente. Durch Remineralisierungsprozesse wird zwar auch hier Ammonium freigesetzt, zusätzlich werden jedoch hohe Nitratmengen über die Elbe in die Deutsche Bucht und vor allem in den küstennahen Bereich getragen.

An der Station NSB2 (Nordseeboje 2) erreichte Nitrit im Oktober 2004 und 2005 Höchstwerte, da das freigesetzte Ammonium zum Zeitpunkt der Probenahme schon zu Nitrit oxidiert worden war. Bis zum Frühjahr hatte sich das Zwischenprodukt Nitrit weiter umgesetzt zu Nitrat, während Ammonium durch Remineralisierungsprozesse wieder nachgeliefert worden war.

An der Station ENTE 1 lag die Ammoniumkonzentration jeweils im Oktober weit über der Nitratkonzentration. Erst im Frühjahr wurden durch Umsetzungsprozesse entsprechend hohe Nitratkonzentrationen erreicht.

Die jahreszeitliche Konzentrationsverteilung von Phosphat verläuft ungleich zu der von Nitrat. Während Phosphat in Küstennähe nach Literaturangaben aus den 1990er Jahren sein Maximum im Spätherbst erreichte, da die im Sediment angereicherten unlöslichen Eisen(III)phosphatkomplexe bei Sauerstoffmangel zu Eisen(II)phosphat reduziert und aufgrund ihrer Löslichkeit wieder in die Wassersäule freigesetzt (VAN BEUSEKOM ET AL. 1999) werden, erreichten die Phosphatkonzentrationen in den letzten Jahren erst im Januar ihre Höchstwerte (*Abb. 4-13*).

Auch an der küstennahen Station EIDER wurden in den Wintern 2004/2005 und 2005/2006 die höchsten Konzentrationen im Januar gemessen. Eine bis in den Spätherbst dauernde Wachstumssaison war verbunden mit einem sehr späten Winteranstieg der Nährstoffe. VAN BEUSEKOM machte diese Beobachtungen auch im Nordsylter Wattenmeer (MURSYS, Biologische Verhältnisse 2006).

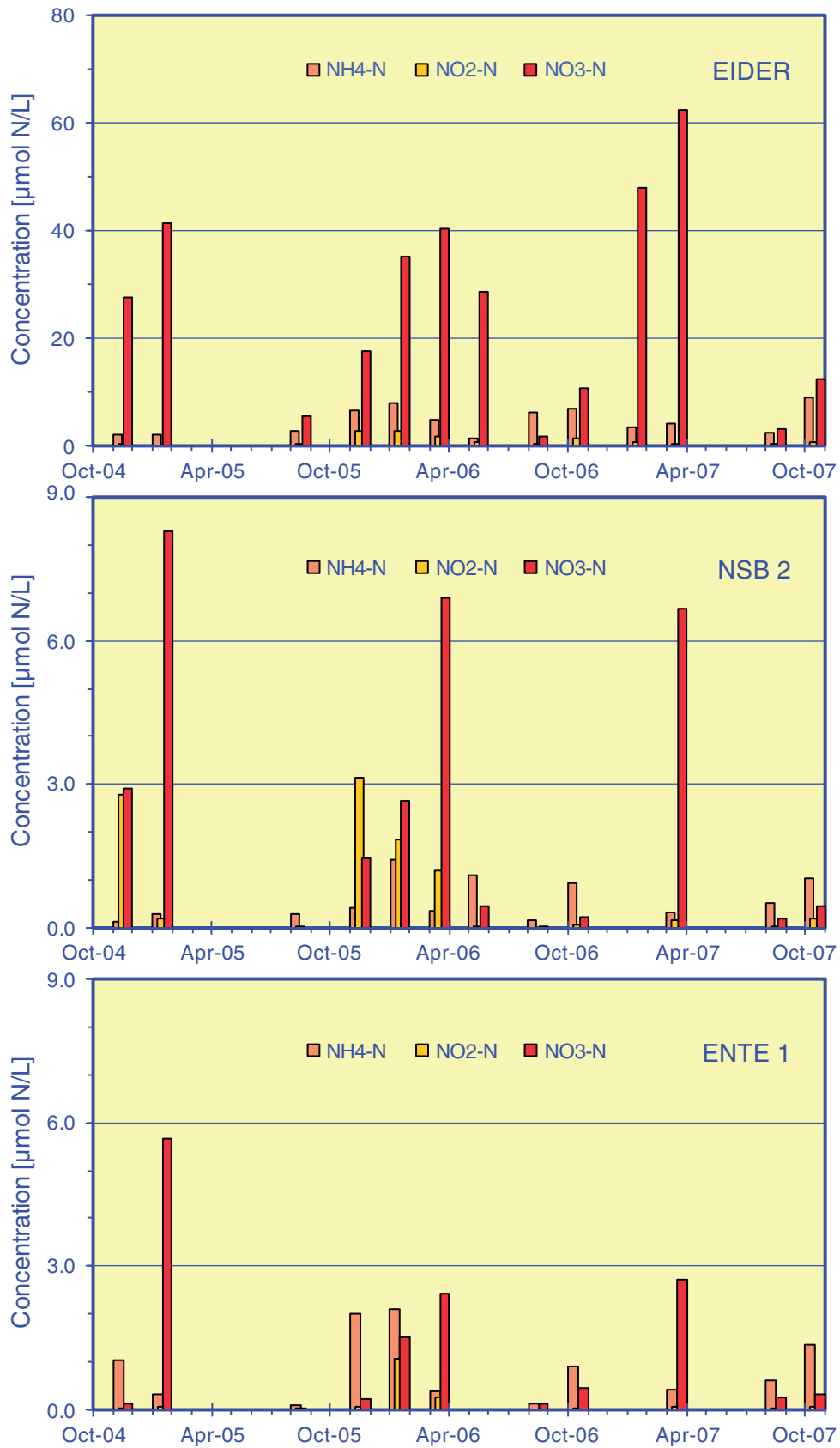


Abb. 4-12: Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumkonzentrationen im Seewasser an den Monitoringstationen EIDER, NSB2, ENTE1 (Okt. 2004 bis Okt. 2007).

Fig. 4-12: Nitrate, nitrite and ammonium concentrations in sea-water at the monitoring stations EIDER, NSB2, ENTE1 (October 2004 to October 2007).

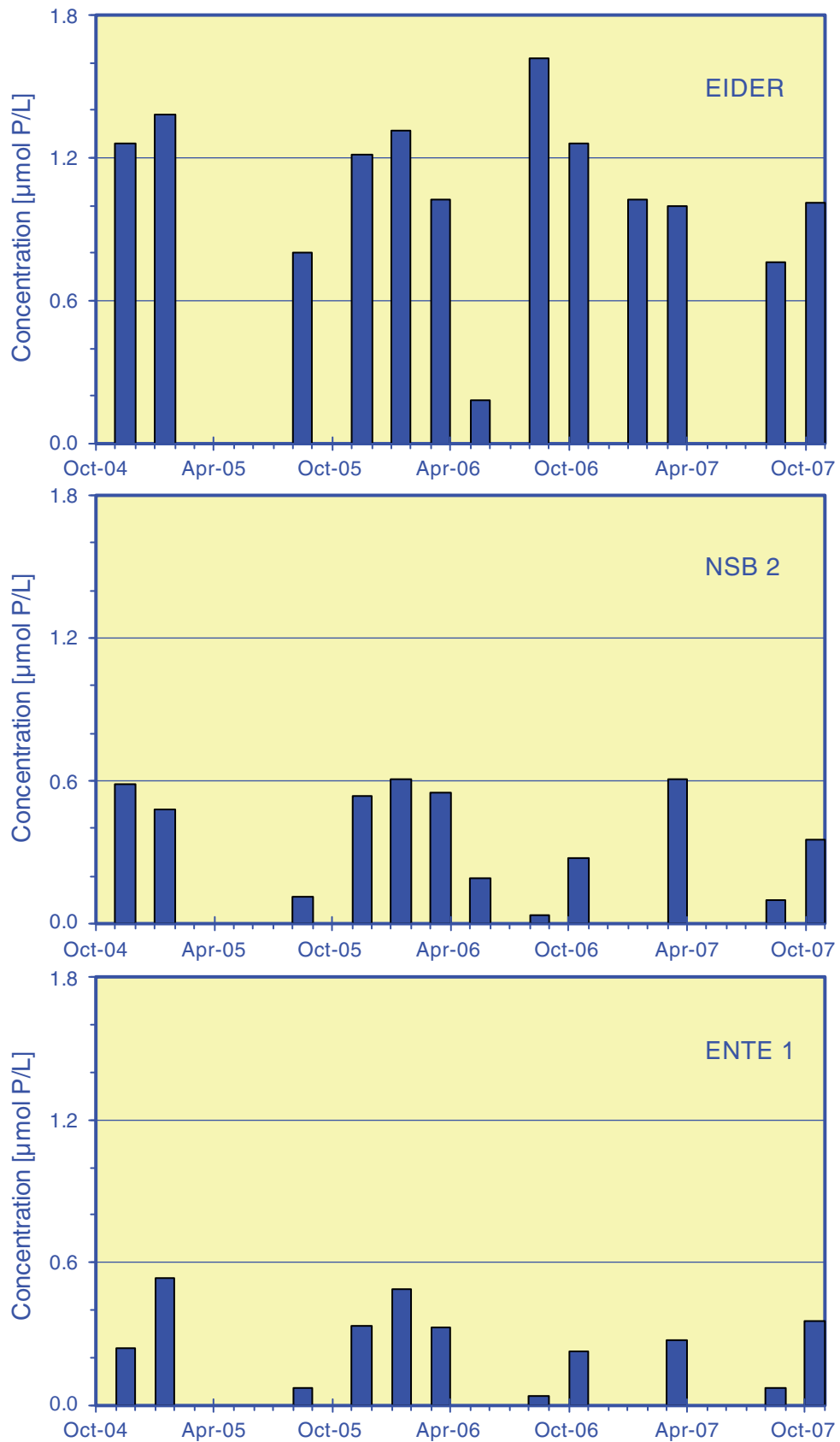


Abb. 4-13: Phosphatkonzentrationen im Seewasser an den Monitoringstationen EIDER, NSB2, ENTE1 (Okt. 2004 bis Okt. 2007).

Fig. 4-13: Phosphate concentrations in sea-water at the monitoring stations EIDER, NSB2, ENTE1 (October 2004 to October 2007).

Ungewöhnlich war die schon im August 2006 erreichte hohe Phosphatkonzentration. Wahrscheinlich beschleunigte die in diesem Sommer überdurchschnittlich hohe Wassertemperatur die temperaturabhängigen Remineralisierungsprozesse und führte das lösliche Phosphat wieder der Wassersäule zu.

An den Stationen NSB2 und ENTE 1 wurden im Januar 2005 und Januar 2006 die höchsten Werte ermittelt. Im Januar 2007 war aufgrund sehr schlechten Wetters an diesen Stationen keine Probenahme möglich. Deutlich lagen jedoch die Märzwerte über den Oktoberwerten.

4.2.4.2 Korrelationen zum Salzgehalt

Für Nährstoffe in der Deutschen Bucht liegt im Winter eine lineare Abhängigkeit der Konzentrationen vom Salzgehalt vor (Abb. 4-14). Zu dieser Zeit ist die biologische Aktivität gering und die Remineralisierung fast abgeschlossen. Die Konzentration der Nährstoffe (wie auch der Salzgehalt) wird hauptsächlich durch hydrodynamische Prozesse beeinflusst, die durch Vermischung von Fluss- und Meerwasser entstehen. Somit integriert sich das Zusammenspiel von Eintragsstärke der Flüsse, Richtung des Nettotransports (Reststromes) und fortschreitender Verdünnung in der Salzgehaltsverteilung, wie ähnliche räumliche Strukturen belegen (Abb. 4-3, S. 174; Abb. 4-4, S. 175). Dieser Prozess äußert sich in invers linearen Korrelationen zwischen Salz- und Nährstoffgehalten, welche sich für zwischenjährige Vergleiche und Trendschätzungen nutzen lassen (KÖRNER UND WEICHART 1991). Für Phosphat ergibt sich im Winter 2006 (2007) ein Korrelationskoeffizient von $-0,96$ ($-0,96$), für DIN $-0,98$ ($-0,98$) und für Silikat $-0,98$ ($-0,99$).

4.2.4.3 Langzeitliche Nährstoff-Entwicklung in der Dt. Bucht

Zur Diskussion der langzeitlichen Entwicklung werden aus den Regressionsgeraden (Abb. 4-14) für definierte Salzgehalte ($S = 30, 33, 34$) Nährstoffkonzentrationen abgeschätzt, welche charakteristisch für das Küstenwasser (S_{30}), die eigentliche Deutsche Bucht (S_{33}) und die äußere Deutsche Bucht (S_{34}) sind. Die so erhaltenen Ergebnisse aus der Winteraufnahme 2006 und 2007 sind in Tab. 4-2 zusammengefasst.

TIME/CRUISE	S	PHOSPHATE	SILICATE	NITRATE	NITRITE	AMMONIUM	DIN
JAN 2006 GAUSS 452	30	1.19 ± 0.13	25.2 ± 3.1	35.8 ± 3.6	3.01 ± 1.85	4.8 ± 1.7	35.0 ± 4.2
	33	0.77 ± 0.13	11.9 ± 3.0	16.2 ± 3.5	1.76 ± 1.80	2.1 ± 1.6	16.9 ± 4.1
	34	0.64 ± 0.13	7.4 ± 3.0	9.7 ± 3.5	1.34 ± 1.80	1.1 ± 1.6	10.9 ± 4.1
JAN 2007 ALKOR 292	30	0.95 ± 0.11	30.2 ± 3.6	39.6 ± 6.2	1.18 ± 1.81	2.4 ± 1.4	43.2 ± 6.3
	33	0.67 ± 0.11	14.7 ± 3.5	20.0 ± 6.2	1.25 ± 1.79	1.0 ± 1.4	22.3 ± 6.3
	34	0.58 ± 0.11	9.6 ± 3.6	13.5 ± 6.2	1.27 ± 1.81	0.5 ± 1.4	15.3 ± 6.3

Tab. 4-2: Berechnete Nährstoffkonzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich ($\mu\text{mol/L}$) für Küstenwasser (S_{30}), Meerwasser der mittleren Deutschen Bucht (S_{33}) und äußerer Deutschen Bucht (S_{34}).

Table 4-2: Calculated nutrient concentrations with 95 % prediction limits ($\mu\text{mol/L}$) for coastal water (S_{30}), sea water of the German Bight proper (S_{33}) and outer German Bight (S_{34}).

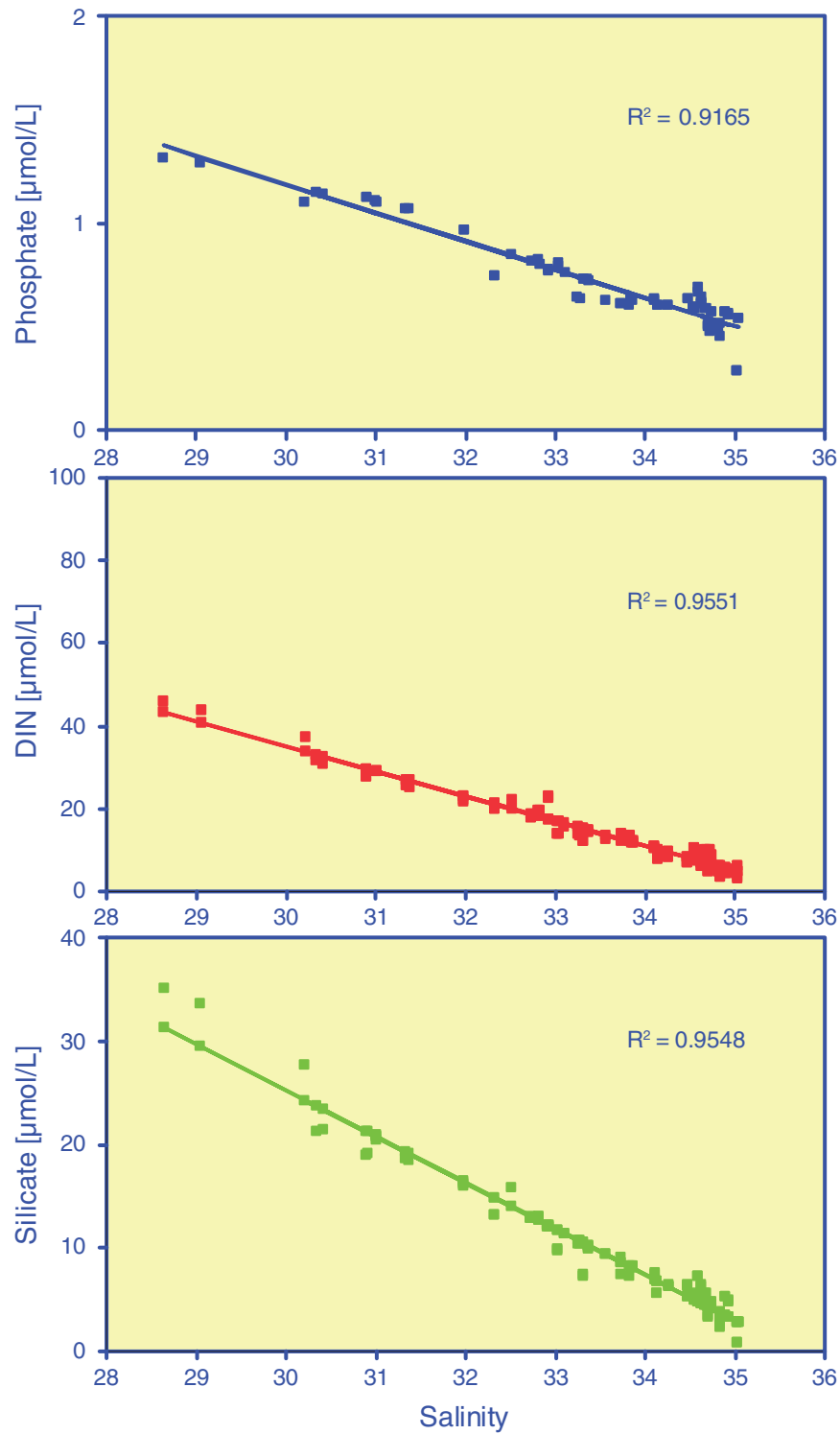


Abb. 4-14: Phosphat-, DIN-, Silikatkonzentration vs. Salzgehalt in der Deutschen Bucht im Februar 2006.

Fig. 4-14: Phosphate-, DIN, silicate concentration vs. salinity in the German Bight in February 2006.

Der Vergleich der Daten aus dem küstennahen Bereich (S_{30}) ergibt für Phosphat eine Abnahme der Konzentration von $1,19 \mu\text{mol/L}$ auf $0,95 \mu\text{mol/L}$. Die Silikatkonzentration erreichte im Winter 2007 einen Wert von $30,2 \mu\text{mol/L}$ im Vergleich zu $25,2 \mu\text{mol/L}$ im Vorjahr. Die Summe der löslichen Stickstoffkomponenten (DIN) betrug im Winter 2007 $43,2 \mu\text{mol/L}$ im Vergleich zu $35,0 \mu\text{mol/L}$ im Winter 2006. Während die Phosphatkonzentration um ca. 20% abgenommen hatte, nahm die Konzentration von Silikat und den löslichen Stickstoffverbindungen im Vergleich zum Vorjahr um 20 bzw. 25% zu.

Abb. 4-15 zeigt die langzeitliche Entwicklung der winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (S_{30}) von 1978 bis 2007. Für Phosphat und Silikat sind darüber hinaus Vergleichskonzentrationen aus dem Jahr 1936 angegeben. Zu dieser Zeit war die Bevölkerungsdichte noch geringer und die Landwirtschaft wurde extensiv betrieben (kaum Einsatz von künstlichem Dünger, keine intensive Viehhaltung), es gab jedoch keine Klärwerke in den Städten.

Die Phosphatkonzentration ging trotz zeitweilig starker zwischenjähriger Schwankungen zu Beginn der 1990er Jahre deutlich zurück. Diese Entwicklung setzte sich jedoch in den vergangenen 12 Jahren nicht fort. Der rückläufige Trend, der auch bei Helgoland festgestellt wurde (RAABE UND WILTSHIRE 2009), kann durch den in *Abb. 4-2*, S. 172 aufgezeichneten Rückgang der Nährstofffrachten über die Flüsse erklärt werden. Die auf den Salzgehalt 30 normierten Phosphatkonzentrationen korrelieren im Übrigen signifikant mit den in *Abb. 4-2* dargestellten spezifischen Phosphatfrachten.

Die Konzentration der löslichen Stickstoffverbindungen im Küstenwasser unterlag starken zwischenjährigen Schwankungen, wobei vergleichsweise niedrige Gehalte in den Wintern 1996, 2002, 2004 und 2006 angetroffen wurden. Für den Zeitraum 1989 – 2007 ergibt sich zwar ein Abwärtstrend von $-7,8 \mu\text{mol/L}$ pro Dekade, dennoch liegt die aktuelle Konzentration von $43,2 \mu\text{mol/L}$ noch weit oberhalb des Orientierungswertes (Salzgehalte 28 – 34,5) von $12 \mu\text{mol/L}$ (BROCKMANN ET AL. 2007). Auch der rückläufige Trend der löslichen anorganischen Stickstoffverbindungen (DIN) kann durch den Rückgang der Nährstofffrachten der Flüsse erklärt werden. Die auf den Salzgehalt 30 normierte Konzentration des gelösten anorganischen Stickstoffs korreliert signifikant mit den in *Abb. 4-2*, S. 172 dargestellten spez. Gesamtstickstoffkonzentrationen, die aus den mittleren Frachten und den Frischwasserabflüssen ermittelt wurden.

Die winterlichen Silikatkonzentrationen unterlagen von Jahr zu Jahr starken Änderungen. Während die geschätzten Konzentrationen von 1993 bis 1996 im Bereich des Vergleichswertes von 1936 ($18,5 \mu\text{mol/L}$) lagen, wurde dieser Wert in den Folgejahren deutlich überschritten.

Insgesamt hat sich die Nährstoffsituation gegenüber derjenigen des Vorjahres nur im Rahmen der natürlichen Variabilität verändert. Die im Winter durch Algenwachstum kaum beeinflussten Phosphatgehalte lagen in der zentralen Nordsee weiterhin auf dem Vergleichsniveau 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 kaum beeinflusst, so dass zwischenjährige Schwankungen biologische und auch geologische Veränderungen anzeigen.

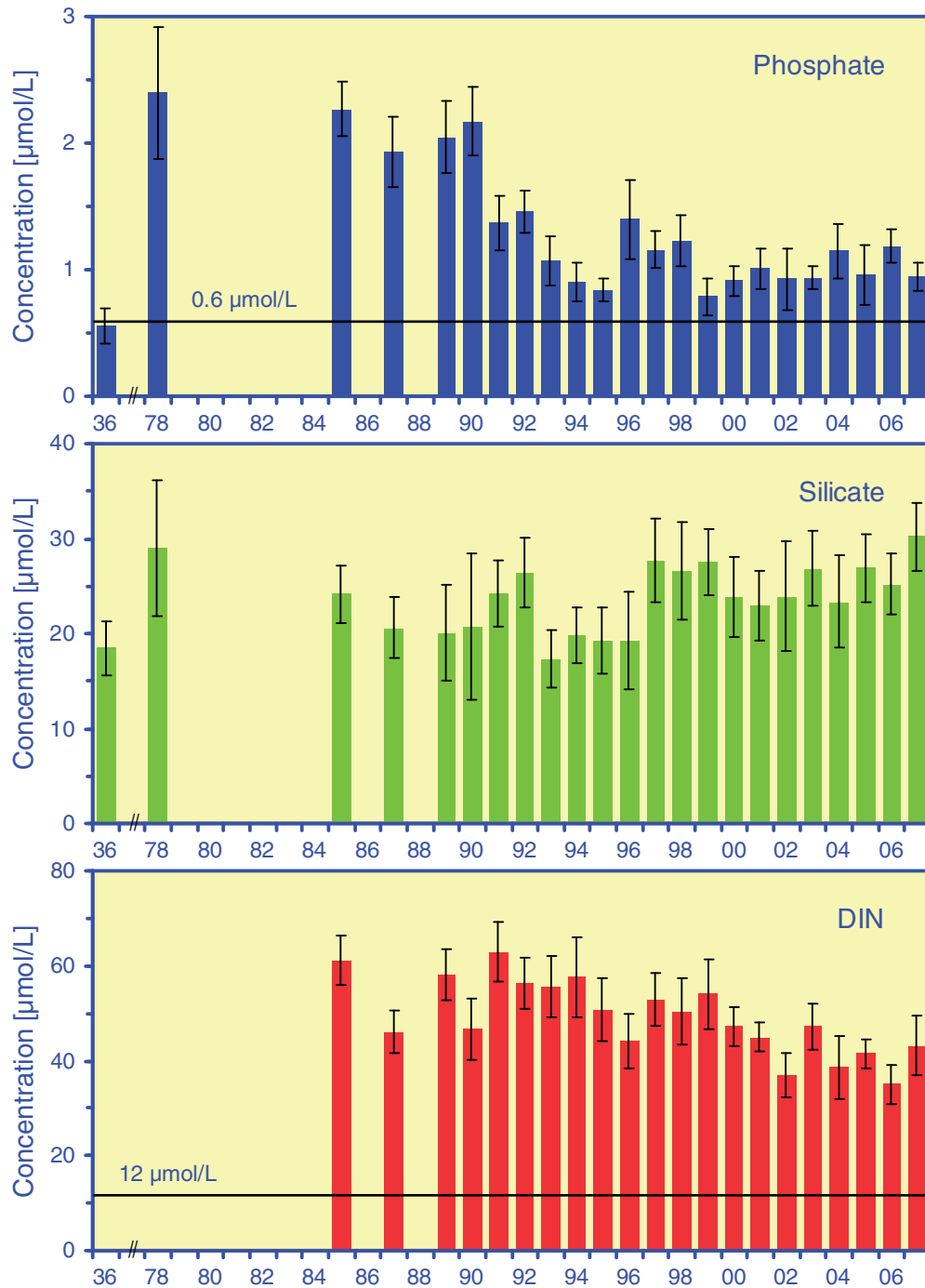


Abb. 4-15: Zeitserien der berechneten winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (Salzgehalt 30) mit 95%-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Vergleichswerten von 1936, soweit verfügbar.

Fig. 4-15: Time series of wintry nutrient concentrations calculated 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.

4.2.5 Bewertung der Nährstoffsituation – Dt. Bucht

4.2.5.1 Bewertungsgrundlage

Im Rahmen der Bund/Länder Messprogramm (BLMP) Arbeitsgruppe Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde im November 2006 ein Papier ›Eutrophierung in den deutschen Küstengewässern von Nord- und Ostsee‹ verabschiedet, in dem Hintergrund- und Orientierungswerte für Nährstoffkonzentrationen in Übergangs- und Küstenwassertypen und für die Deutsche Bucht angegeben sind (BROCKMANN ET AL. 2007). Die Orientierungswerte, die zur Diskussion und Bewertung der vorliegenden Nährstoffergebnisse heran gezogen werden, berechnen sich aus den Hintergrundwerten, die gemäß den Verfahren von OSPAR und HELCOM mit einem Aufschlag von 50 % versehen wurden. Daraus ergibt sich bei einem Salzgehalt von 28 – 34,5 für die löslichen anorganischen Stickstoffverbindungen (DIN) ein Orientierungswert von 12 $\mu\text{mol/L}$ und für Phosphat ein Orientierungswert von 0,6 $\mu\text{mol/L}$.

4.2.5.2 Bewertung 2007

Im Winter 2007 wurde in der offenen Deutschen Bucht bei einem Salzgehalt 30 eine mittlere Phosphatkonzentration von $0,95 \pm 0,11 \mu\text{mol/L}$ ermittelt (Tab. 4-2, S. 184). Dieser Wert weicht noch ca. 60 % von dem Orientierungswert ab. Die für die offene Deutsche Bucht (Salzgehalt = 34) abgeschätzte mittlere Phosphatkonzentration von $0,58 \pm 0,11 \mu\text{mol/L}$ liegt im Bereich des im Winter 1936 aufgenommenen Wertes von $0,53 \pm 0,13 \mu\text{mol/L}$. Der Orientierungswert von 0,6 $\mu\text{mol/L}$ ist erreicht.

Bei den löslichen Stickstoffverbindungen wurde im Winter 2007 für einen Salzgehalt 30 (küstennaher Bereich) eine mittlere Stickstoffkonzentration (DIN) von $43,2 \pm 6,3 \mu\text{mol/L}$ abgeschätzt. Dieser Wert ist deutlich (ca. 360 %) höher als der Orientierungswert von 12 $\mu\text{mol/L}$. Die für die offene Deutsche Bucht (Salzgehalt = 34) berechnete mittlere Konzentration von $15,3 \pm 6,3 \mu\text{mol/L}$ liegt ca. 30 % über dem Orientierungswert.

4.2.5.3 Gesamtbewertung

Eine Gesamtbewertung der Eutrophierungssituation, die im Rahmen von OSPAR durchgeführt wurde (2007), ergab eine Klassifizierung der Küstengewässer als ›problem area‹, da hier die Winter-Nährsalzkonzentrationen immer noch oberhalb der definierten Schwellenwerte (Orientierungswerte) lagen.

Die in diesem Bericht durchgeführte Bewertung der Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht beruht ebenfalls auf Winterkonzentrationen, die auf definierte Salzgehalte normiert wurden. Die Ergebnisse sind von Jahr zu Jahr vergleichbar, da sie im Winter zur Zeit geringster biologischer Aktivität und fast abgeschlossener Remineralisierung aufgenommen wurden. Die salzgehaltnormierten Werte werden mit o. g. Orientierungswerten diskutiert.

Für Phosphat ist sowohl bei den Flusseinträgen als auch bei den winterlichen Konzentrationen in der Deutschen Bucht seit Mitte der 1980er Jahre eine deutliche Abnahme erkennbar, die dazu geführt hat, dass sich die aktuellen Konzentrationen in Küstennähe nur noch etwa 60 % oberhalb des Orientierungswerts bewegen. Die Abnahme war während der frühen 1990er Jahre am stärksten und verlangsamte sich während der letzten Jahre.

Auch für den gelösten anorganischen Stickstoff (DIN) ist bei den Flusseinträgen und bei den winterlichen Konzentrationen im Küstenwasser eine Abnahme seit Mitte der

1980er Jahre erkennbar. Die aktuellen Konzentrationen im Küstenwasser liegen jedoch immer noch deutlich (ca. 360 %) oberhalb des Orientierungswertes.

Die vorliegenden Ergebnisse aus Langzeitbeobachtungen zeigen, dass die Maßnahmen zur Reduktion der Nährstofffrachten gegriffen haben. Signifikante Rückgänge der Nährstofffrachten über die Flüsse in die Deutsche Bucht und der Nährstoffkonzentrationen im Nordseewasser werden beobachtet.

Die von den Umweltministern auf der zweiten INK (Internationalen Nordseeschutzkonferenz) 1987 beschlossene Halbierung der Nährstoffeinträge wurde für Phosphor erreicht. Die spezifischen Stickstofffrachten der Flüsse haben sich zwischen 1985 und 2007 fast halbiert (ca. 48 %).

Im Winter 2006/2007 lagen die Konzentrationen für Phosphat im Küstenbereich noch ca. 60% über dem Orientierungswert.

Die Konzentrationen der anorganischen löslichen Stickstoffverbindungen wichen im Winter 2006/2007 in Küstennähe mit Faktor 3 deutlich von dem Orientierungswert ab.

4.2.6 Chlorophyll-a-Gehalte in der Nordsee

Die Chlorophyll-a-Gehalte im Oberflächenwasser der zentralen Nordsee bewegten sich in beiden Jahren im Sommer zwischen 0,1 und 0,4 $\mu\text{g/L}$ (Abb. 4-16). Die Nährsalze waren durch die Planktonblüten im Frühjahr und Frühsommer aus der Wassersäule aufgezehrt; die Nährstofflimitierung im Oberflächenwasser spiegelt sich auch in den niedrigen Chlorophyllkonzentrationen wider. Höhere Konzentrationen traten wie im Vorjahr im Sommer 2007 im nordöstlichen Seegebiet auf. Aber auch in flachen Gebieten und Küstengewässern, wo Nährstoffe aus dem Sediment und über die Flüsse eingetragen werden, wurden höhere Chlorophyll-a-Konzentrationen gemessen.

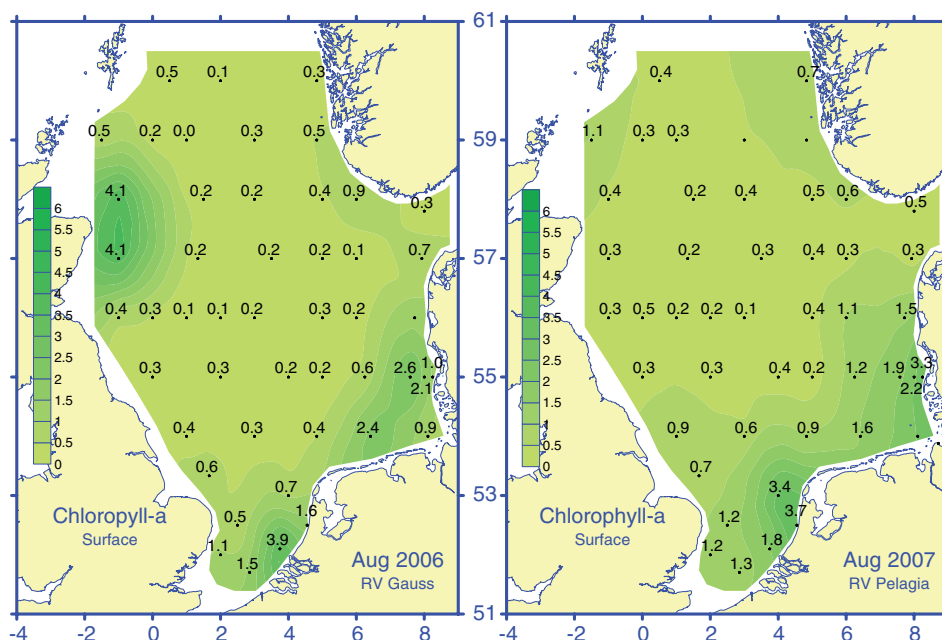


Abb. 4-16: Chlorophyll-a-Konzentration ($\mu\text{g/L}$) im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2006 und 2007.

Fig. 4-16: Chlorophyll-a-concentration ($\mu\text{g/L}$) in near-surface water of the North Sea in summer 2006 and 2007.

4.2.7 Sauerstoffgehalte in der Nordsee

Im Sommer 2006 erreichten die Sauerstoffkonzentrationen in der Wasseroberfläche der zentralen Nordsee 100 und 105% Sättigung (Abb. 4-17). Höhere Konzentrationen weisen auf Planktonwachstum hin. So wurden während dieser Monitoringaufnahme in der nordwestlichen Nordsee Werte bis 110% Sättigung gemessen. Die Chlorophyllkonzentrationen stiegen in diesem Bereich auf 4,1 µg/L an.

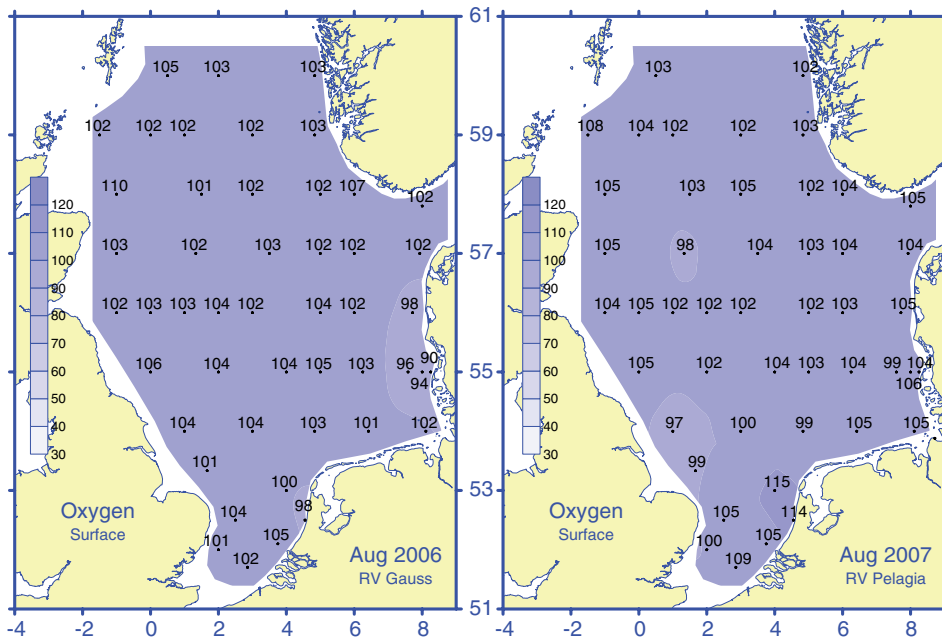


Abb. 4-17: Sauerstoffsättigung (%) im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2006 & 2007.
 Fig. 4-17: Oxygen saturation (%) in near-surface water of the North Sea in summer 2006 & 2007.

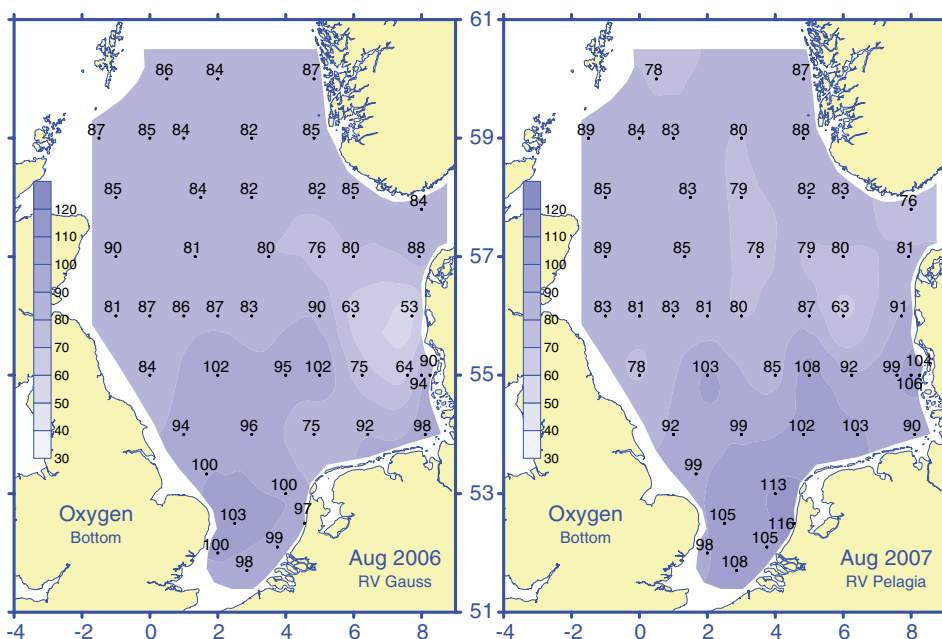


Abb. 4-18: Sauerstoffsättigung (%) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2006 & 2007.
 Fig. 4-18: Oxygen saturation (%) in near-bottom water of the North Sea in summer 2006 & 2007.

Im Sommer 2007 lagen die durchschnittlichen Sauerstoffkonzentrationen zwischen 99 und 105 % Sättigung. Werte über 110 % Sättigung wurden in der südlichen Nordsee bestimmt; die Chlorophyllgehalte waren hier auf 3,7 µg/L erhöht.

In Bodennähe lagen die Sauerstoffkonzentrationen sowohl 2006 als auch 2007 in großen Bereichen der zentralen Nordsee bei 80 % (Abb. 4-18). Wie im Vorjahr traten die niedrigsten Konzentrationen im östlichen Bereich auf. So wurden im Sommer 2006 vor der dänischen Küste nur 53,5 % Sättigung erreicht. Im Sommer 2007 lag der niedrigste Wert bei 63 % Sättigung.

Eine Sauerstoffsättigung von 84 % (ca. 7,5 mg/L) wird im Bodenwasser als unterer Grenzwert einer guten Sauerstoffversorgung angesehen. Gehalte unter 6 mg/L (ca. 70 %) können bei Fischen zu Beeinträchtigungen des Wachstums führen; bei Gehalten unter 4 mg/L (ca. 50 %) sind Stoffwechselstörungen bei am Boden lebenden Tieren feststellbar (DIAZ UND ROSENBERG 1995). Sauerstoffkonzentrationen unter 2 mg/L (ca. 25 %) haben Abwanderung bzw. Massensterben der Bodenfauna zur Folge.

Fast alle im Untersuchungsgebiet gemessenen Sauerstoffsättigungen bis auf den Bereich vor der dänischen Küste sind nach den derzeit gültigen OSPAR-Kriterien als mindestens befriedigend einzustufen. Die Werte um 53,5 % Sättigung vor der dänischen Küste grenzen an den mangelhaften Bereich.

4.2.8 Zusammenfassung

Die über Elbe und Weser eingetragenen Nährstofffrachten in die Deutsche Bucht zeigen trotz großer interannueller Unterschiede eine deutlich abnehmende Tendenz. Dies spiegelt sich auch im langzeitlichen Verlauf der Nährsalzkonzentrationen in der Deutschen Bucht wider.

Die regressiv aus Salzgehalts- und Nährstoffanalysen abgeleiteten, für Küstenwasser (Salzgehalt 30) und Meerwasser der eigentlichen Deutschen Bucht ($S = 34$) repräsentativen Nährstoffgehalte unterschieden sich im Winter 2006 und 2007 wenig von denen der Vorjahre. Die Phosphatgehalte lagen in der Deutschen Bucht nicht mehr, im Küstenwasser ca. 60 % über den Vergleichswerten von 1936 bzw. über den im Rahmen von OSPAR diskutierten Orientierungswerten. Hohe Konzentrationen der Stickstoffverbindungen zeigen eine nach wie vor erhebliche Nährstoffbelastung an. Die durch industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten wenig beeinflussten Silikatkonzentrationen liegen im Bereich natürlicher Schwankungen.

Das Nordseewasser zeichnete sich wie in den Vorjahren im Sommer 2006/07 durch eine nährstoffarme Deckschicht aus, in der die Nährsalze, besonders Nitrat, das Algenwachstum limitierten. Auffallend waren im Sommer 2007 höhere Konzentrationen im Elbeausstrombereich, da durch hohe Abflussmengen über die Elbe Nährstoffe in die Deutsche Bucht getragen wurden. Die Chlorophyllkonzentrationen in der zentralen Nordsee waren aufgrund der Stickstofflimitierung gering. Chlorophyllmaxima traten nur in Küstennähe auf, da hier durch starke Oberflächenabflüsse und Remineralisierungsprozesse ausreichend Nährstoffe zur Verfügung standen.

Das Redfieldverhältnis ($N/P = 16$), das im Rahmen von OSPAR auch zur Eutrophiebewertung herangezogen wird, lag in weiten Bereichen der Nordsee außerhalb des natürlichen Bereiches und spiegelte zum Teil die Stickstofflimitierung in den Sommermonaten wider.

4 Meereschemie

Im Berichtszeitraum war die Verteilung der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser vergleichbar mit den Vorjahren (80 – 100%). Die stärksten Untersättigungen traten sowohl 2006 als auch 2007 in der östlichen Nordsee auf; sie lagen hier unter 60% und sanken örtlich auf 53% ab.

4.3 Organische Stoffe

<*> N. Theobald

4.3.1	Einführung	... 193
4.3.2	Hexachlorcyclohexan-Isomere	... 195
4.3.3	Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe	... 202
4.3.4	Kohlenwasserstoffe	... 206
4.3.5	Polare Pestizide	... 217
4.3.6	Neue Schadstoffe	... 227
4.3.7	Zusammenfassung	... 231

4.3.1 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 2000 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

zung 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 Frühjahr, Sommer und Herbst im Rahmen von zwei bis drei Überwachungsfahrten durchgeführt. Im August 2007 wurde als Sonderprogramm die Schadstoffbelastung der gesamten Nordsee untersucht. Im Untersuchungszeitraum wurden insgesamt fünf Überwachungsfahrten durchgeführt (*Tab. 4-1, S. 169*).

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 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 ereignisbezogene Untersuchungen standen im Berichtszeitraum nicht an.

Die Schadstoffkonzentrationen im Sediment werden einmal pro Jahr an 13 Stationen in der Deutschen Bucht bestimmt. Die Bewertung der räumlichen Schadstoffverteilung ist allerdings schwierig, da die Konzentrationen nicht nur von speziellen, lokalen Belastungsfaktoren abhängig sind, sondern sehr stark von Sedimenteigenschaften wie dem TOC-Gehalt (>Total Organic Carbon<) beeinflusst werden. 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. 4-19* dargestellt. Die TOC-Gehaltsverteilung lässt sich nach drei Belastungsgruppen klassifizieren, welche über die Konzentrationsintervalle 6 – 42 mg/g (rot), 2,2 – 5,9 mg/g (orange) und < 0,4 – 2,1 mg/g (grün) definiert sind.

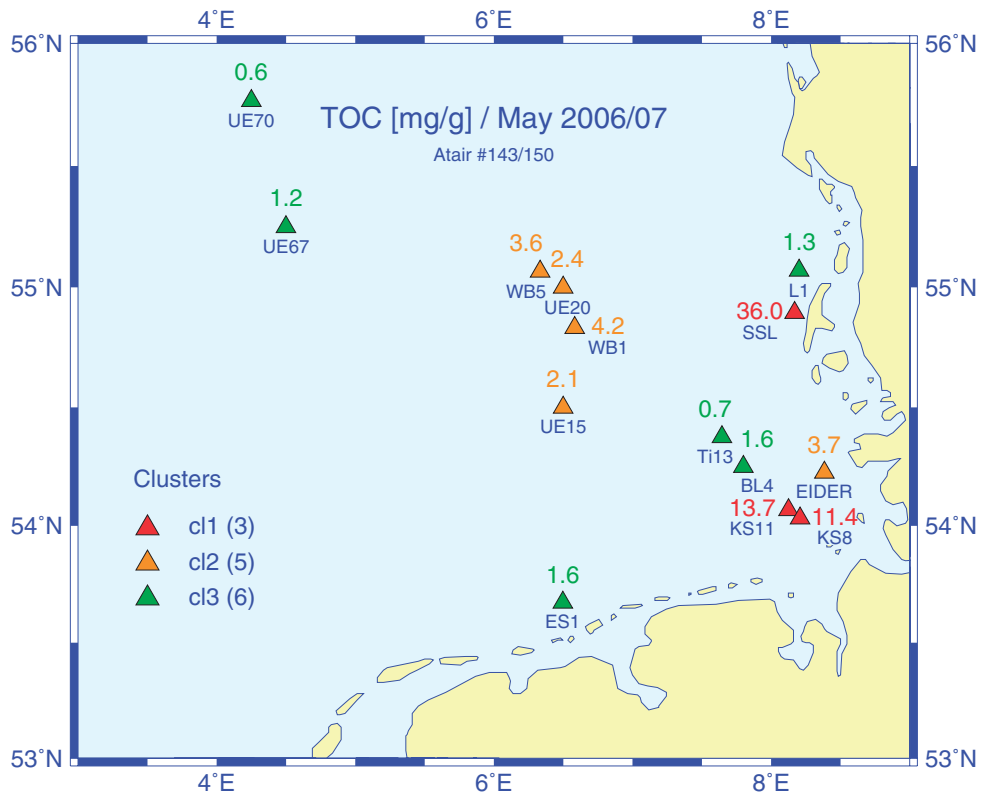


Abb. 4-19: Geographische Verteilung des TOC-Gehalts im Oberflächensediment der Deutschen Bucht (Mittelwerte von Mai 2006 und Mai 2007).

Fig. 4-19: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight (mean values of May 2006 and May 2007).

Nachfolgend werden die aus den Schadstoffbeprobungen gewonnenen Ergebnisse dokumentiert und mit denen früherer Jahre verglichen, um Entwicklungstendenzen aufzuzeigen. Ferner liefern Strukturen und Muster in räumlichen Schadstoffverteilungen Hinweise auf Eintragsquellen sowie zu Ausbreitung und Verbleib solcher Stoffe im Meer. Die Unterteilung des Kapitels orientiert sich an Schadstoffgruppen, die hinsichtlich Meerwasserbelastung und Sedimentkontamination weiter untergliedert bzw. behandelt werden.

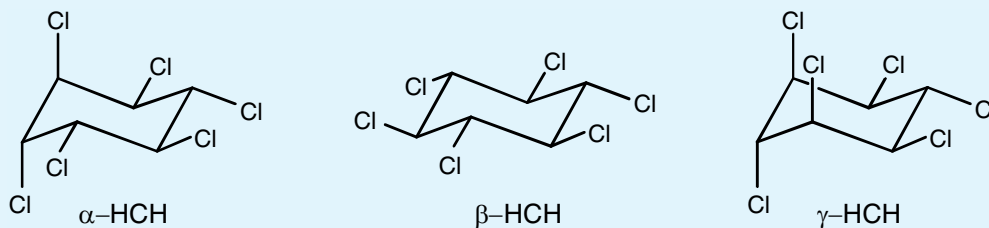
4.3.2 Hexachlorcyclohexan-Isomere

Hexachlorcyclohexan-Isomere (HCH) 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: 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 Schwebstoffen gebunden.

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 deutliche Belastungsquelle der Deutschen Bucht.

Tafel 4-2: HCH-Isomere

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



4.3.2.1 HCH-Gehalte des Meerwassers – räumliche Verteilung

Die Konzentrationsverteilungen von α -, β - und γ -HCH (Lindan) in der Deutschen Bucht sind für die Monate Mai und August des Jahres 2007 in *Abb. 4-20* wiedergegeben. Die Verteilungen der drei HCH-Isomere unterscheiden sich geringfügig sowohl in den Küstengewässern, als auch weiter seewärts hinsichtlich Muster und absoluter Gehalte.

Durch die Abnahme der α - und γ -HCH Konzentrationen in den letzten Jahren haben sich die Isomerenverhältnisse in der Elbe deutlich verschoben: Inzwischen liegen dort das γ - und das δ -HCH auf einem ähnlichen Niveau; bisher war das δ -HCH nur von untergeordneter Bedeutung gewesen. α - und β -HCH liegen auf deutlich höheren Level (ca. Faktor 3). Das heißt, das eigentliche Insektizid Lindan (γ -HCH) weist nur noch einen Anteil von 10 bis 15% der Gesamt-HCH Menge auf, obwohl es das einzige in Europa noch zugelassene Isomer ist.

Anders sehen die Verhältnisse in der Deutschen Bucht und Nordsee aus. Hier sind noch immer α - und γ -HCH die vorherrschenden Isomere. Die Grundbelastung für β -HCH im Meerwasser ist sehr gering und lag bisher meist unter der Bestimmungsgrenze (BG) von 30 pg/L. Mit der Verbesserung der BG auf 5 pg/L lässt sich jedoch nun seine Verteilung in der gesamten Nordsee beobachten. Da β -HCH im Elbewasser in relativ hoher Konzentration vorkommt, wird die Elbfahne vor der nordfriesischen Küste sehr gut durch die β -HCH-Konzentrationen abgebildet (*Abb. 4-20*). α -HCH liegt gegenüber β -HCH im Meerwasser – außerhalb der Elbfahne – in höheren Konzentrationen vor, die im August 2007 zwischen 0,019 und 0,049 ng/L variierten. In der Elbfahne selbst wurden zu dieser Zeit Konzentrationen bis 0,063 ng/L gemessen.

Unter den drei Isomeren wies γ -HCH in der Deutschen Bucht die höchsten Konzentrationen auf. Weitere Besonderheiten stellen die relativ hohen Gehalte vor der Küste Ostfrieslands und das damit verbundene starke Konzentrationsgefälle nach Norden hin dar (*Abb. 4-20*), welche dem Einfluss der Elbe weitgehend entzogen sind.

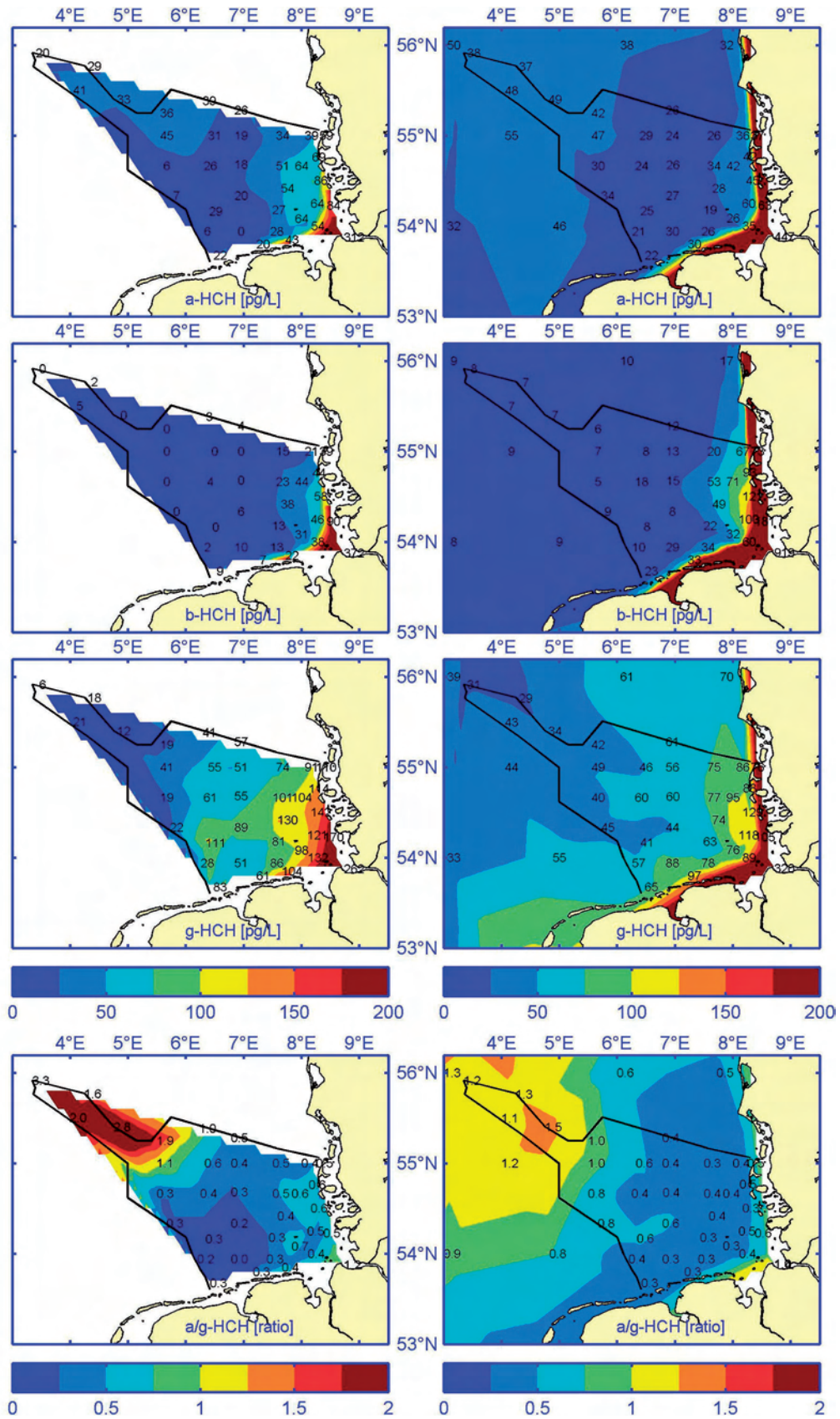


Abb. 4-20: HCH-Konzentrationen und α/γ -HCH Verhältnis für Oberflächenwasser (5 m) der DB im Mai (links) und August (rechts) 2007.

Fig. 4-20: HCH concentrations and α/γ -HCH ratio for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May (left) and August (right) 2007.

Aufgrund der beachtlichen Reduktion von α - und γ -HCH (s. u.) lagen die Konzentrationen in der Deutschen Bucht (und der zentralen Nordsee) im Jahr 2006 und 2007 z. T. nur noch geringfügig über denen des Atlantikwassers am Eingang des Englischen Kanals (α -HCH: 0,014 ng/L; γ -HCH: 0,031 ng/L (Werte aus dem Jahr 2005)). Vergleicht man die Median-Konzentrationen der offenen Nordsee (α -HCH: 0,038 ng/L und γ -HCH: 0,041 ng/L) mit denen aus dem Nordatlantikwasser, das durch den Fair-Isle Current in die Nordsee einströmt (Station 46: α -HCH: 0,045 ng/L bzw. 0,015 ng/L), so sind die α -HCH Werte in der südlichen und zentralen Nordsee sogar geringer.

Die charakteristischen Verteilungsmuster der HCH-Isomere in der Deutschen Bucht und der Nordsee stehen in engem Zusammenhang mit der individuellen Quellstruktur dieser Isomere und mit der großräumigen Nordseezirkulation (Abb. 3-2, S. 120). Kenntnisse zum prinzipiellen Wassertransport (Kap. 3.2.3, S. 122) in Verbindung mit solchen lassen sich deshalb zur Identifikation der Hauptwasserkörper nutzen, die in der Deutschen Bucht aufeinandertreffen. Nachfolgend wird diese Möglichkeit anhand von Ergebnissen der Nordseeesamtaufnahme vom August 2007 demonstriert (Abb. 4-21).

Die Konzentrationen des α -HCH nehmen von Süden nach Norden zu, während diejenigen des γ -HCH in dieser Richtung abnehmen. Das N-S-Gefälle der α -HCH-Konzentrationen erklärt sich aus der Tatsache, dass dieses Isomer (und auch β -HCH) hauptsächlich noch aus früheren Einträgen in der Umwelt vorhanden ist und heute nur durch Altlasten in die Umwelt eingetragen wird (u. a. über die Elbe). Die höheren α -HCH-Konzentrationen im Norden kommen dabei durch eher diffuse Altlasten, die globale Verteilung und atmosphärische Deposition zustande. Da auch heute noch in einigen Entwicklungsländern technische Gemische mit hohen α -HCH-Gehalten verwendet werden, gelangen diese durch einen derartigen Ferntransport in den Nordatlantik (Global Distillation) und die Nordsee. Hingegen wird γ -HCH auch in Europa weiterhin angewendet, was die vom europäischen Festland im Süden nach Norden hin abnehmenden Konzentrationen erklärt.

Die geschilderten Charakteristika der verschiedenen Quellen und großräumigen HCH-Verteilungen bedingen klar unterscheidbare Isomerenverhältnisse. Für den atlantischen Einstrom aus dem Kanal wurde ein α/γ -Verhältnis von 0,3 bestimmt, während das mit dem Fair-Isle Current in die nördliche Nordsee einströmende Nordatlantikwasser ein α/γ -Verhältnis von 2,6 bis 3,4 aufwies (Abb. 4-21). Die Verteilungsstrukturen des Isomerenverhältnisses im Südwesten bzw. Nordwesten der Deutschen Bucht (Abb. 4-20) sind offensichtlich mit diesen beiden Wassermassen assoziiert. Die höheren α/γ - und β/α -Verhältnisse vor der nordfriesischen Küste bilden das Elbewasser als dritten Wasserkörper ab.

Für die Konzentrationen der HCH-Isomere und den Salzgehalt in der Deutschen Bucht und der Nordsee lassen sich hohe lineare Korrelationskoeffizienten errechnen, wenn enge räumliche Grenzen betrachtet werden, in denen jeweils nur zwei bedeutende Wasserkörper/Quellen zur Vermischung beitragen (THEOBALD UND LOEWE 2009). Dies ist auch für die Jahre 2006 und 2007 der Fall, soll jedoch hier nicht erneut dargestellt werden.

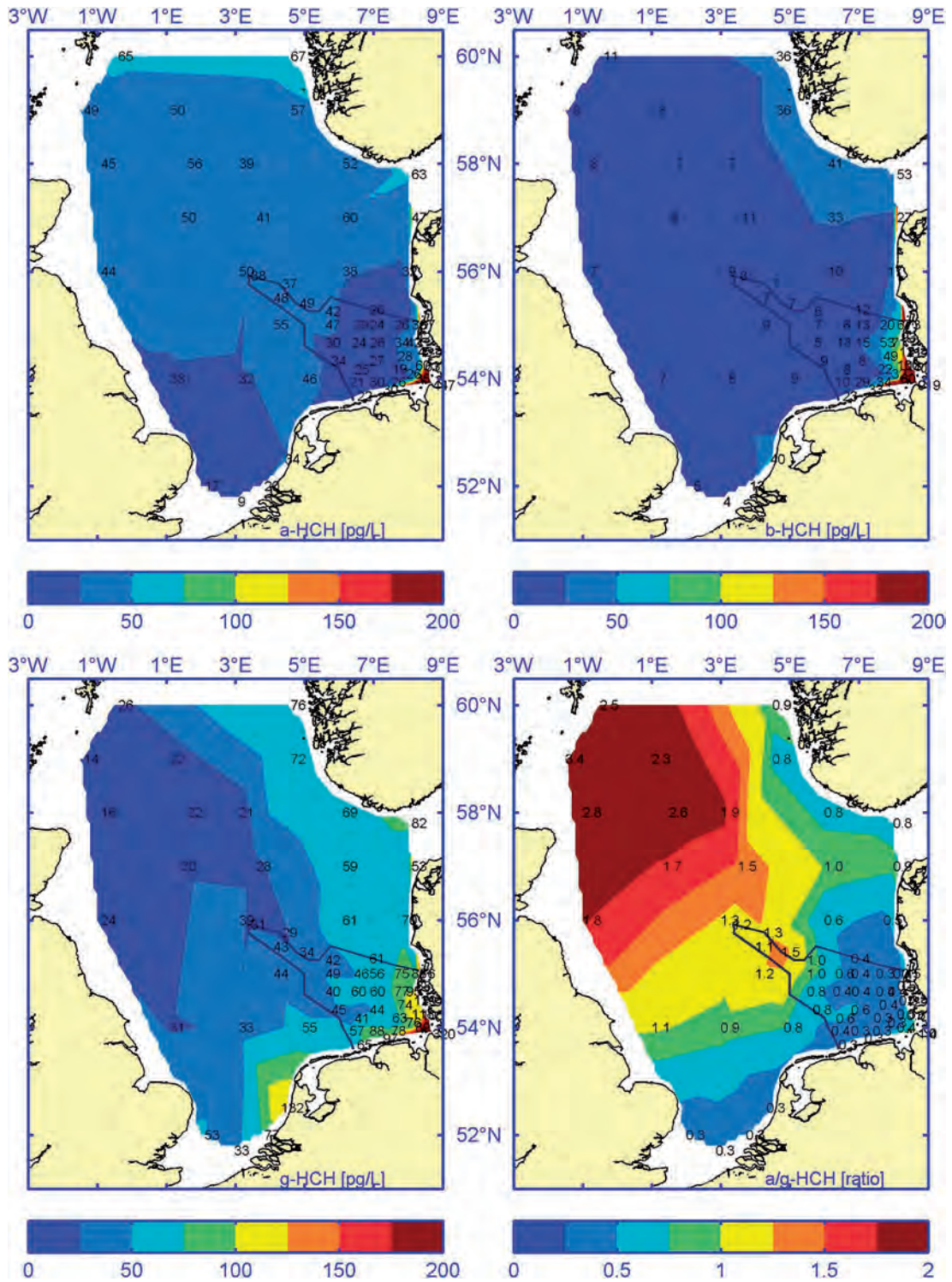


Abb. 4-21: HCH-Konzentrationen und a/ γ -HCH Verhältnis des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im August 2007.

Fig. 4-21: HCH concentrations and a/ γ -HCH ratio for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.

4.3.2.2 Zeitliche Entwicklung der HCH-Konzentrationen

a) Kurzzeit-Ereignisse

Da die Konzentrationen in der östlichen Deutschen Bucht vor allem von Einträgen durch die Elbe beeinflusst werden, ist der zeitliche Verlauf in der Elbe (z. B. an der Süßwassergrenze bei Stade) von besonderem Interesse. Für α - und β -HCH waren in den Jahren 2002, 2004 und 2006 episodenhafte Konzentrationssprünge aufgetreten, die die langfristigen Abwärtstrends ab 1995 gestört und unterbrochen haben (Abb. 4-22). Die Spitzen der Jahre 2002 und 2006 fallen mit Hochwasser-Ereignissen der Elbe zusammen. Bemerkenswerterweise wirkten sich diese Episoden auf die Lindan-Konzentrationen kaum aus, so dass von einer Altlasten-Quelle, die hauptsächlich α - und β -HCH enthält, ausgegangen werden kann. Nachdem 2006 während des April-Hochwassers β -HCH Werte von 4,5 bis 23 ng/L beobachtet wurden, hatten sich die Konzentrationen im Mai wieder auf das Niveau der Vorjahre normalisiert (α -HCH: 1,8 – 2,5 ng/L, β -HCH: 2,7 – 4,4 ng/L und γ -HCH: 0,8 – 1,1 ng/L). 2007 war eine weitere deutliche Abnahme zu beobachten (α -HCH: 1,0 – 1,9 ng/L, β -HCH: 1,1 – 2,0 ng/L und γ -HCH: 0,5 – 0,8 ng/L).

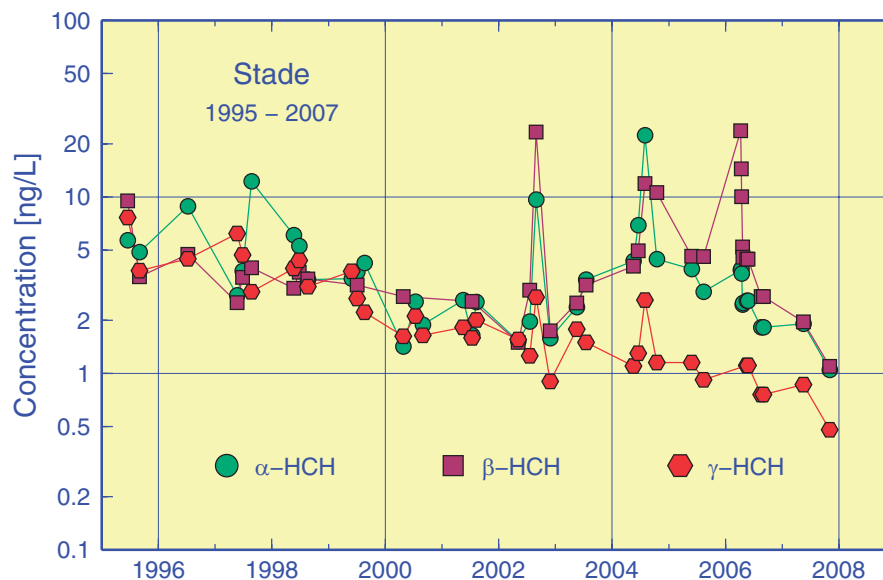


Abb. 4-22: Zeitliche Entwicklung der α -, β - und γ -HCH-Konzentrationen bei Stade (Elbe) seit 1995.

Fig. 4-22: Temporal evolution since 1995 of α -, β -, and γ -HCH concentrations near Stade (Elbe River).

Bei den fünf Beprobungen in der DB wurden relativ große Variabilitäten beobachtet (vgl. Abb. 4-20, S. 197), die erst bei Betrachtung im langfristigen Zusammenhang sinnvoll bewertet werden können. Meist waren die Konzentrationen im August niedriger als im Mai oder November.

b) Langfrist-Trends

Für eine ausführliche Analyse der Langzeit-Trends wird auf THEOBALD UND LOEWE (2009) verwiesen. Als Beispiele für die Fortführung der Untersuchungen werden die Konzentrationszeitserien für α - und γ -HCH an den Stationen ›EIDER‹ und ›NSB2‹

stellvertretend für die Verhältnisse in der inneren und zentralen Deutschen Bucht in Abb. 4-23 dargestellt. Seit 1986 ist für α -HCH trotz hoher Schwankungen zunächst ein deutlicher Rückgang der Konzentration zu beobachten. Dieser Abwärtstrend hat sich jedoch auf ›EIDER‹ seit 1999 verlangsamt bzw. ist in den letzten Jahren aufgrund erheblicher Konzentrationsschwankungen in der Elbe (s. o.) ganz abgebrochen. Auf weiter westlich liegenden Stationen (›BRIFF‹ oder ›NSB2‹) hat während dieser Zeit der Abwärtstrend ungebrochen fortbestanden (Abb. 4-24). Ab 2005 ist auch auf den durch die Elbe beeinflussten Stationen wieder ein leichter Rückgang zu verzeichnen.

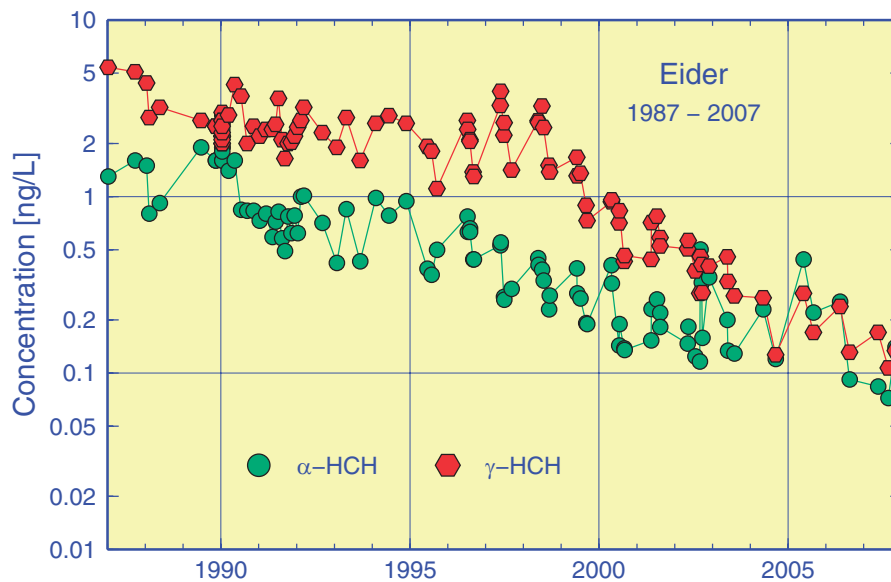


Abb. 4-23: Zeitliche Entwicklung der α - und γ -HCH-Konzentrationen an Station ›Eider‹ seit 1987.

Fig. 4-23: Temporal evolution since 1987 of α - and γ -HCH concentrations at station ›Eider‹.

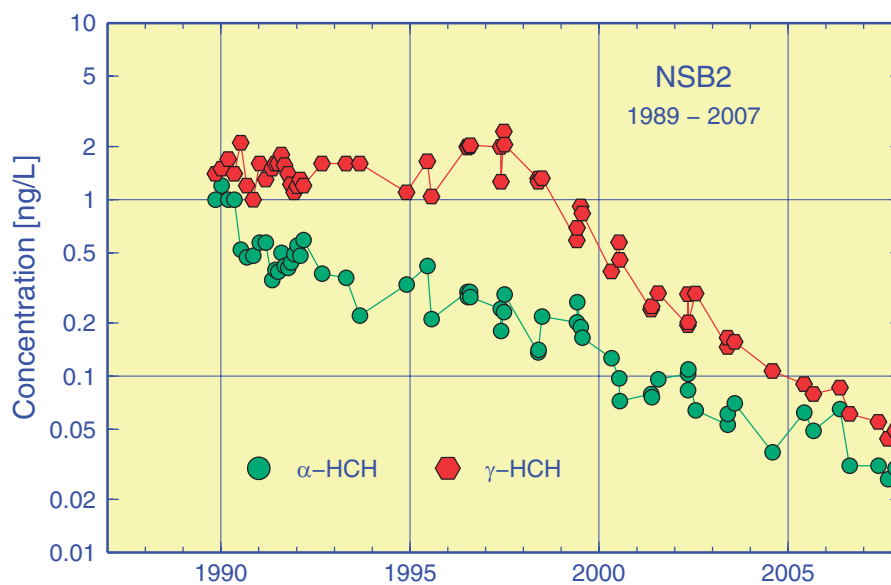


Abb. 4-24: Zeitliche Entwicklung der α - und γ -HCH-Konzentrationen in der äußeren Deutschen Bucht (Station ›NSB2‹) seit 1989.

Fig. 4-24: Temporal evolution since 1989 of α - and γ -HCH concentrations in the outer German Bight (station ›NSB2‹).

Die Lindankonzentration unterlag bis 1998 großen Schwankungen, die durch eine ausgeprägte saisonale Variabilität verstärkt wurden (Abb. 4-23); hohe Konzentrationen traten dabei häufig im Frühsommer auf. Ab 1998 nahmen auch hier die Werte nachhaltig und sehr deutlich von ca. 2 ng/L auf 0,13 ng/L ab.

Bei Betrachtung der Langzeitreihen wird deutlich, dass in dem Berichtszeitraum (2006 und 2007) an allen Stationen die Konzentrationen weiterhin leicht rückläufig sind, jedoch scheinen sich die Trends etwas zu verlangsamen.

4.3.2.3 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 2006 und 2007 die höchsten Konzentrationen in Proben der schlickreichen Station ›KS11‹ vor der Elbmündung gemessen. Im Mittel wurden hier Belastungen mit α -HCH von 0,081 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM und mit γ -HCH von 0,083 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM festgestellt. Im übrigen Gebiet variierten die Gehalte von $< 0,005$ bis 0,069 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM.

Aufgrund hoher Konzentrationsschwankungen sind Trends gegenwärtig kaum nachweisbar. Lediglich für γ -HCH ergaben sich auf den Stationen des ehemaligen Klärschlammverklappungsgebiets (›KS8‹, ›KS11‹) und der Weißen Bank (›WB1‹, ›WB5‹ und ›UE20‹) rückläufige Konzentrationen.

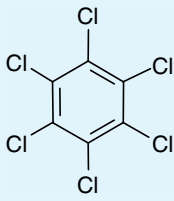
4.3.3 Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe

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} -Werte¹ von 5 bis 7) 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.

4.3.3.1 CKW-Gehalte des Meerwassers

Die Elbe ist mit HCB deutlich belastet (Stade: 0,2 bis 0,7 ng/L); allerdings nimmt die HCB-Konzentration bereits im Ästuar sehr stark ab. Im August 2007 sank beispielsweise die Konzentration von Cuxhaven (17,4 pg/L) bis zur Station ›Eider‹ (4 pg/L) in

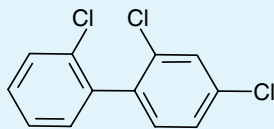
1. Der K_{ow} -Wert ist der Octanol-Wasser-Verteilungskoeffizient eines Stoffes, der sich aus der Verteilung der Substanz zwischen den Phasen Wasser (polar) und Octanol (unpolar, lipophil) ergibt. Diese Gleichgewichtskonstante ist ein Maß für die Polarität des Stoffes. Da die K_{ow} -Werte der verschiedenen 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 gelten als lipophil und zeigen eine hohe Affinität zu festen Phasen (Schwebstoffe, Sedimente) sowie eine hohe Tendenz der Bioakkumulation.

Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)

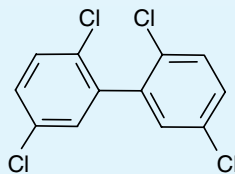
Hexachlorbenzol (HCB) wurde als Weichmacher und Flammschutzmittel für Kunststoffe und Schmiermittel, vor allem aber als Fungizid in Holzschutzmitteln angewandt; ferner gelangt es bei der Herstellung von Lösungsmitteln und beim Verbrennen chlorhaltiger Produkte in die Umwelt. Herstellung und Weiterverarbeitung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

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

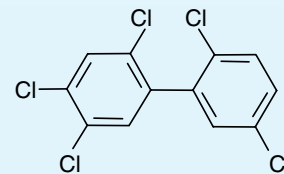
PCB sind giftig und zeigten im Tierversuch krebserregende Wirkung. Im tierischen Organismus werden sie kaum abgebaut, sondern reichern sich zu hohen Konzentrationen an. In der Übersicht sind einige der wichtigsten PCB-Kongeneren dargestellt.



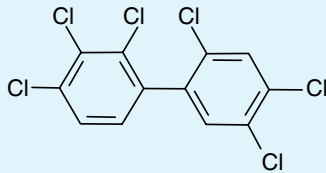
PCB 28



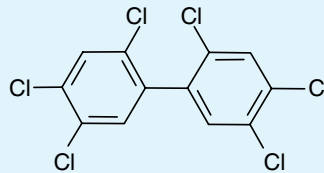
PCB 52



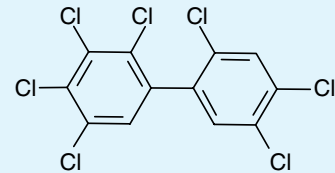
PCB 101



PCB 138

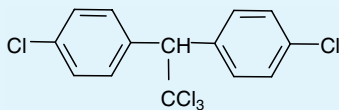
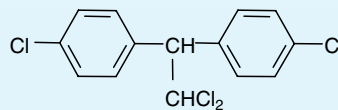
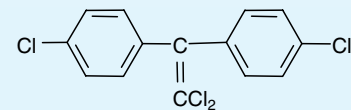


PCB 153



PCB 180

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

*p,p'*-DDT*p,p'*-DDD*p,p'*-DDE

der inneren Deutschen Bucht um fast eine Größenordnung. Die starke Affinität des HCB zum Schwebstoff führt über Sedimentation zur raschen Reduktion der HCB-Konzentrationen in der Wassersäule.

Im Sommer 2007 wurde in der Elbfahne der Deutschen Bucht eine Mediankonzentration von 2,4 pg/L bestimmt. In der übrigen Deutschen Bucht und Nordsee lag eine

sehr homogene und sehr niedrige HCB-Grundbelastung des Wassers in einem Bereich von 2 bis 3 pg/L vor, ohne dass Konzentrationsschwerpunkte oder Quellen außerhalb der Flüsse festgestellt wurden.

Während im Elbeästuar bei Cuxhaven im August 2007 für das Leit-PCB CB153 eine Konzentration von 67,5 pg/L beobachtet wurde, sanken die Gehalte in der inneren Deutschen Bucht auf 1 bis 8 pg/L ab. Minimale Konzentrationen von 0,4 pg/L wurden vereinzelt in der offenen Nordsee nachgewiesen. 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 %.) Bei der räumlichen Verteilung ist eine leichte Abnahme der PCB-Konzentrationen vom Süden nach Norden zu beobachten (Abb. 4-25).

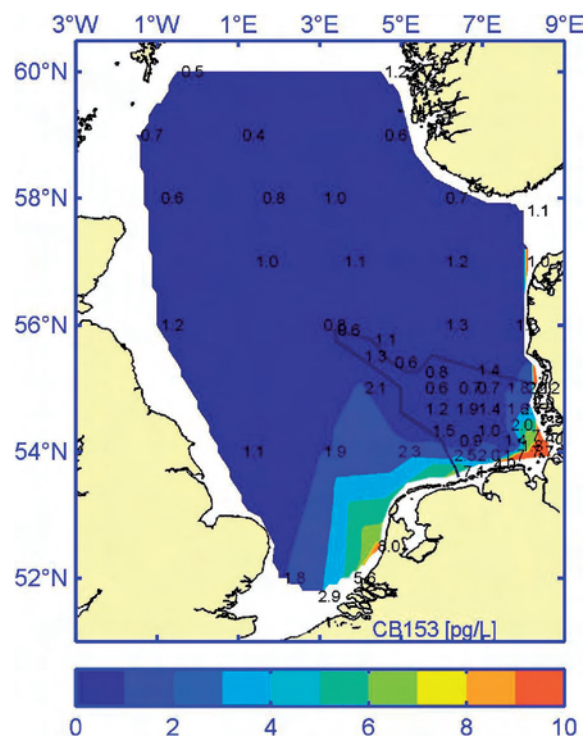


Abb. 4-25: CB153-Konzentrationen des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im August 2007.

Fig. 4-25: CB153 concentrations for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.

Das Abbauprodukt p,p'-DDD ist aus der DDT-Gruppe diejenige Verbindung, die im Wasser (und Sediment) die höchsten Konzentrationen aufweist. Bei Cuxhaven wurde im August 2007 ein Gehalt von 277 pg/L gemessen; für p,p'-DDE und p,p'-DDT lagen die Konzentration bei 39 pg/L und 13 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). In der inneren Deutschen Bucht wurden DDD-Konzentrationen von 1 pg/L bis 17 pg/L beobachtet.

Alle CKW-Konzentrationen lagen auf dem Niveau der Vorjahre. Die beobachteten Unterschiede sind wahrscheinlich auf natürliche Variabilitäten – z. B. des Schwebstoffgehalts oder der Abflussmenge der Elbe – zurückzuführen. Zuverlässige Messungen

im Konzentrationsbereich < 10 pg/L sind erst seit dem Jahr 2000 möglich. Trendausagen können aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraums bislang für keine Substanzgruppe getroffen werden.

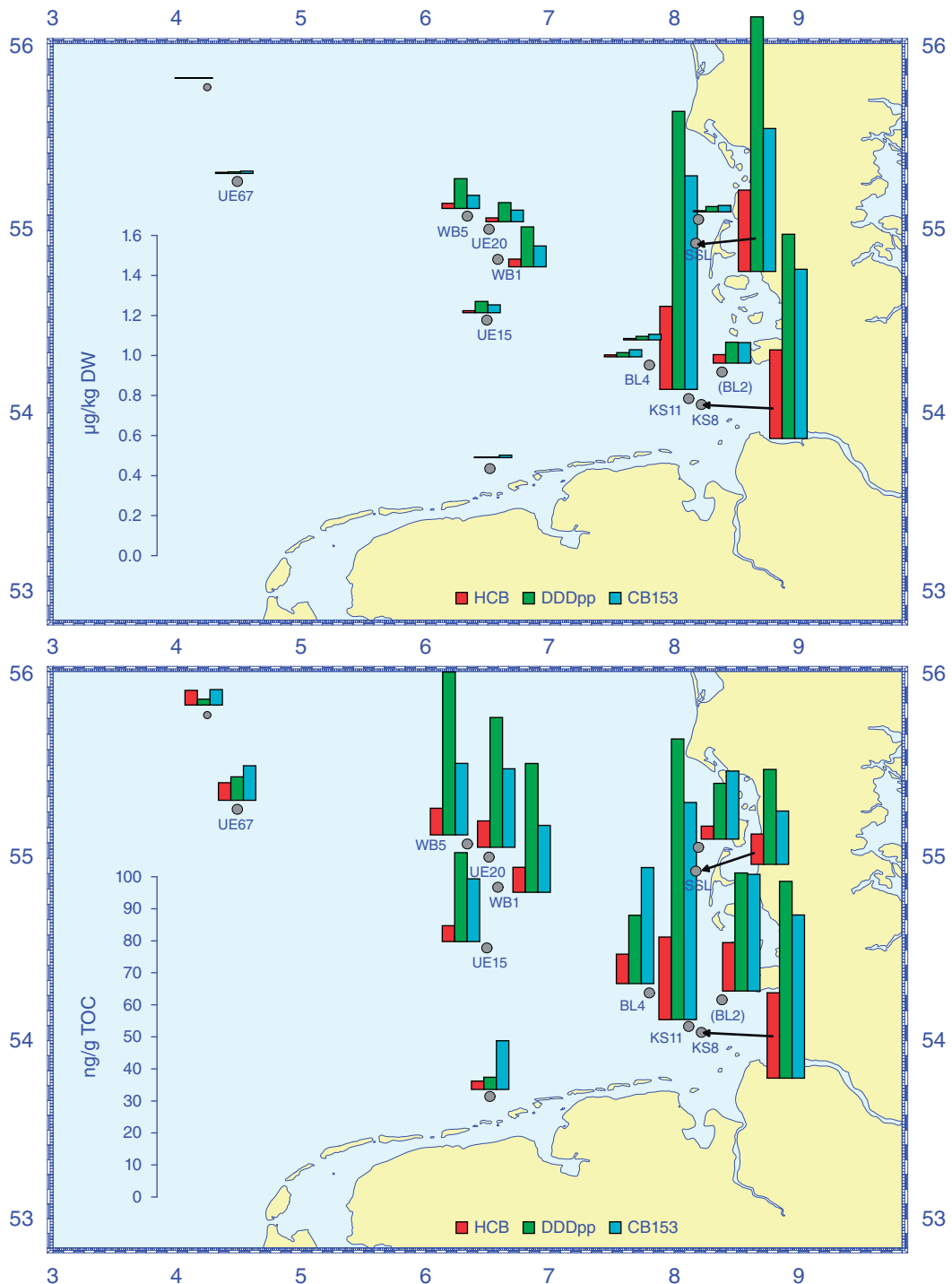


Abb. 4-26: HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2007.

Fig. 4-26: HCH-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2007.

4.3.3.2 CKW-Gehalte des Sediments

Die auf Trockenmasse bezogenen Konzentrationsverteilungen von HCB, CB153 und DDD in der Deutschen Bucht im Mai 2007 sind in *Abb. 4-26, 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. 4-19, S. 195*).

Die höchsten auf Trockenmasse bezogenen Schadstoffkonzentrationen wurden auf der schlickreichen Station ›SSL‹, ›KS11‹ sowie den unmittelbar benachbarten Stationen ›KS8‹ und ›BL2‹ in der inneren Deutschen Bucht festgestellt. Die Konzentrationen der Leitkomponenten DDD, HCB und CB153 erreichten auf ›KS11‹ im Mai 2007 (2006) Werte von 1,39 µg/kg TM (1,81 µg/kg), 0,42 µg/kg TM (0,29 µg/kg) und 1,07 µg/kg TM (1,57 µg/kg). Ein weiterer Schwerpunkt lag im Gebiet der Stationen ›UE20‹, ›WB5‹ und ›WB1‹, wo das Sediment ebenfalls einen relativ hohen Feinkornanteil aufweist; auf Station ›WB5‹ ergaben sich für DDD: 0,15, HCB: 0,03 und CB153: 0,07 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 µg/kg TM).

Bei Normierung der Schadstoffkonzentrationen auf den TOC-Gehalt ergibt sich eine deutliche Nivellierung der oben geschilderten Konzentrationsunterschiede (*Abb. 4-26, unten*). Maximum-zu-Minimum-Verhältnisse reduzieren sich dabei von > 200 auf < 20. Die niedrigsten Konzentrationen wurden auf allen Stationen für HCB gefunden. CB153 lag in gleichen oder geringfügig höheren Konzentrationen als DDD vor, außer auf der nordwestlichsten Station ›WB5‹.

Zeitliche Tendenzen sind bisher für keinen der Stoffe auf keiner Station erkennbar. Gründe hierfür sind die hohen Variabilitäten der Konzentrationen. Auch die Normierung der Konzentrationen auf den TOC-Gehalt führte zu keiner spürbaren Reduktion der hohen Schwankungen.

4.3.4 Kohlenwasserstoffe

Bei der Stoffgruppe der Kohlenwasserstoffe (KW) haben zwei Untergruppen eine besondere ökologische Bedeutung: Gesättigte KW (Alkane, Aliphaten) und aromatische KW. Die Alkane (*Kap. 4.3.4.2, S. 209*) stellen mengenmäßig den Hauptbestandteil von Erdöl (und daraus gewonnener Produktöle), sind jedoch relativ gering toxisch. Hingegen kommen aromatische KW nur in geringeren Konzentrationen im Erdöl vor, weisen aber eine höhere Toxizität auf. Dies gilt in noch stärkerem Maße für die Aromaten-Untergruppe der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (*Kap. 4.3.4.3, S. 211*). Das Auftreten von gesättigten und aromatischen KW in der Meeresumwelt steht keineswegs immer und ausschließlich mit Ölverschmutzungen in Verbindung; auch natürliche Prozesse sind potentielle Quellen für beide Stoffgruppen.

4.3.4.1 Akute Ölverschmutzungen

Obwohl bei den Untersuchungen der chronischen Verschmutzung durch Erdölkohlenwasserstoffe nur eine geringe Belastung im Meerwasser beobachtet wurde (vgl. *Kap. 4.3.4.2, S. 209*), sind auch im Jahr 2006 und 2007 zahlreiche akute Verschmutzungen durch Öl in der Deutschen Bucht beobachtet worden.

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-C₂₀ bis n-C₃₀) verwendet, der für petrogene Muster etwa 1 und für biogene Muster > 4 ist. Auch Algen sind Produzenten bestimmter n-Alkane; von diesen werden vor allem n-C₁₇, n-C₁₉ und n-C₁₅ gebildet.

Von der Küstenwache (Bundesgrenzschutz See, Zoll, Vollzugsorgane der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Fischereiaufsicht), der Marine, der Wasserschutzpolizei sowie durch private Dritte wurden im Jahr 2006 insgesamt 127 Gewässerverunreinigungen in der Deutschen Bucht (AWZ) gemeldet, im Jahr 2007 wurden 82 Vorfälle beobachtet (2005: 98). In der Regel handelte es sich um Ölverschmutzungen (74 bis 80%). Die räumliche Verteilung der beobachteten Verschmutzungen ist in *Abb. 4-27* dargestellt. Die zahlreichen Ölverschmutzungen nördlich der ostfriesischen Inseln sowie im Nordwesten der AWZ fallen mit den Hauptfahrwassern zusammen.

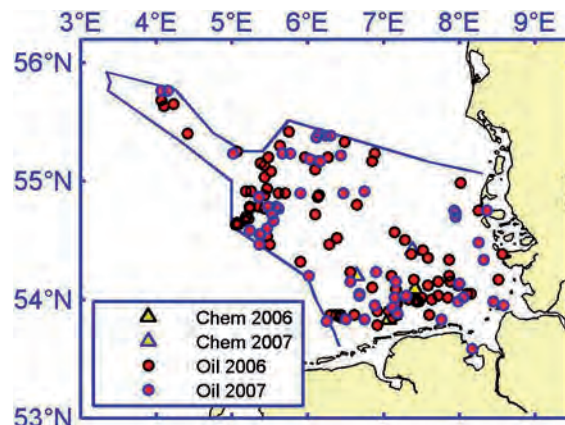


Abb. 4-27: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2006 und 2007.

Fig. 4-27: Pollution sightings in the German Bight in 2006 and 2007.

Im Rahmen laufender Strafverfahren wurden im BSH 2006 in 8 Fällen und 2007 in 16 Fällen vergleichende Analysen zwischen Proben aus Ölfilmen und von verdächtigten Schiffen durchgeführt. Insgesamt wurden dazu 71 Proben untersucht.

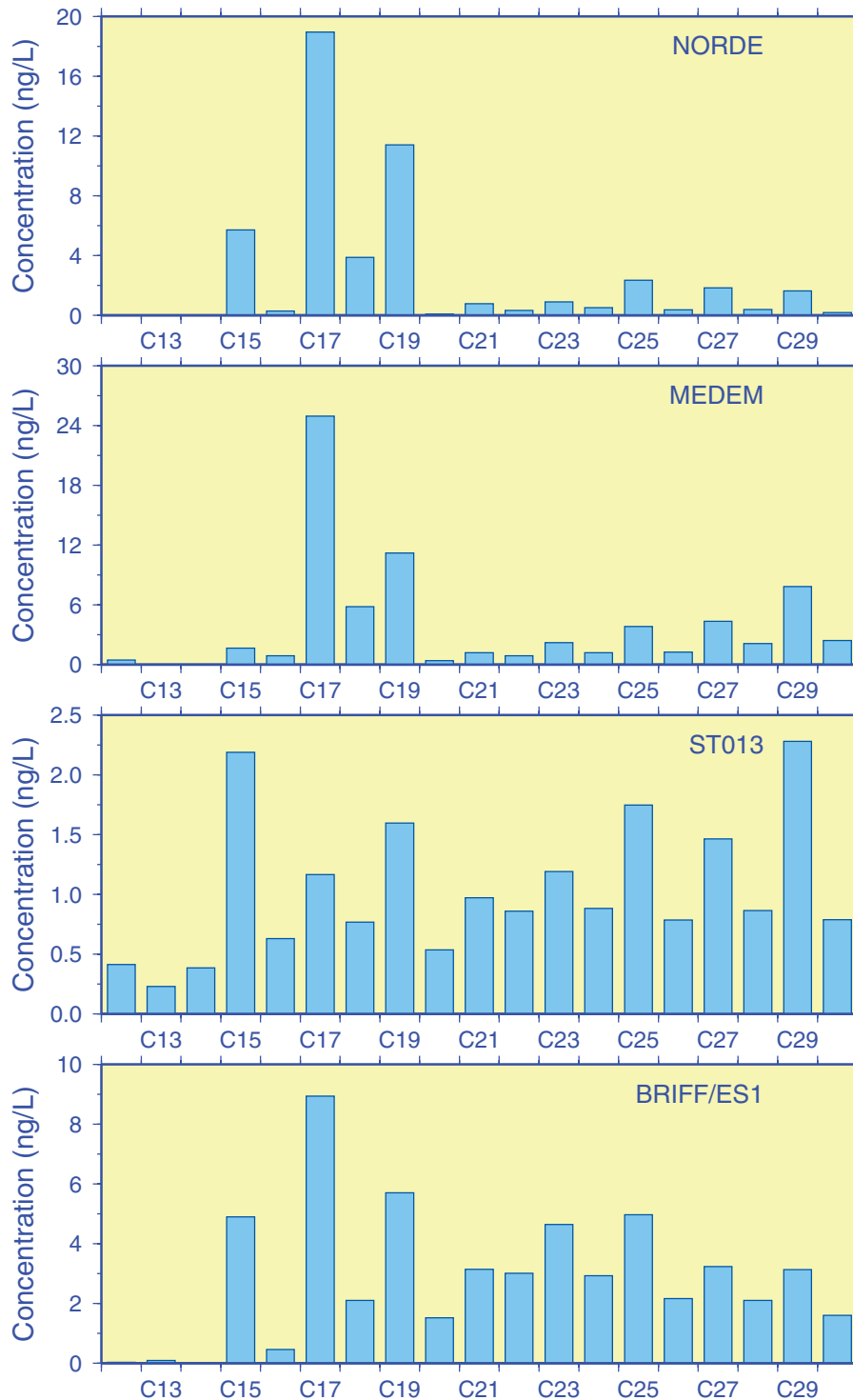


Abb. 4-28: Beispiele für Konzentrationsmuster von n-Alkanen im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im August 2007. Hintergrundbelastung mit Resten bio- und petrogenen Alkane (›ST013‹), hohe Alkananteile von terrestrischen Pflanzen (›MEDEM‹), von Algenstoffwechselprodukten (›NORDE‹, ›MEDEM‹) und infolge Ölverschmutzung (›BRIFF‹). Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-1, S. 169.

Fig. 4-28: Different n-Alkane patterns in near-surface sea water of the German Bight in August 2007. Background concentrations with remnants of bio- and petrogenic Alkanes (›ST013‹), high fractions from terrestrial plants (›MEDEM‹), from algae metabolites (›NORDE‹, ›MEDEM‹), and due to oil spill (›BRIFF‹). Cf. Fig. 4-1, S. 169 for a station map.

4.3.4.2 Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane

Der Konzentrationsbereich der Summe der Aliphaten lag im August der Jahre 2006 und 2007 zwischen 7 ng/L in der zentralen Nordsee und 73 ng/L in der Elbe (Stade). Für die Verteilung der Konzentrationen über die n-Alkane ergaben sich im Wesentlichen vier verschiedene Muster, für die typische Beispiele in *Abb. 4-28* angegeben sind.

Im August 2007 lagen die Mediankonzentrationen einzelner n-Alkane (C_{20} bis C_{30}) in der Nordsee zwischen 0,4 und 1,4 ng/L. Die relativ homogene Konzentrationsverteilung (*Abb. 4-29*) und ein mittlerer Carbon Preference Index von 2,2 deuten auf eine gewisse Grundbelastung der Nordsee durch Erdölkohlenwasserstoffe hin. Die Summe (C_{20} bis C_{30}) der Mediankonzentrationen von 7 ng/L weist diese chronische Belastung jedoch als relativ gering aus.

Für einzelne Stationen ergaben sich allerdings Summenkonzentrationen von über 25 ng/L; hier lagen akute Ölverschmutzungen vor, wie die Verteilungsmuster der Alkane eindeutig belegen (vgl. ›BRIFF‹ in *Abb. 4-28*). In der Elbe wurde ein alternierendes Verteilungsmuster der Konzentrationsbeiträge der n-Alkane mit einer Kettenlänge größer als C_{20} beobachtet (vgl. ›MEDEM‹ in *Abb. 4-28*). Die Bevorzugung ungeradzahlicher Kettenlängen (Maximum bei C_{29}) deutet auf Landpflanzen als Hauptquelle hin; ein zusätzlicher (petrogener) Öl-Anteil ist jedoch auch hier vorhanden.

In den Monaten mit starker Primärproduktion (Mai bis August) übertrafen auf einigen Stationen die Konzentrationen von C_{17} (bis 43 ng/L), C_{19} (bis 12 ng/L) und vereinzelt auch C_{15} (bis 10 ng/L) diejenigen aller anderen Alkane. Diese drei Alkane sind bekannte Stoffwechselprodukte von Algen.

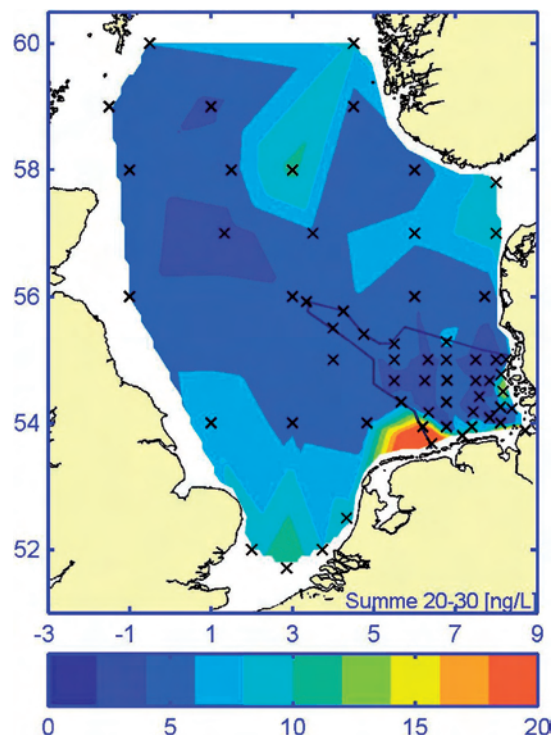


Abb. 4-29: Geographische Konzentrationsverteilung für die Summe der n-Alkane von C_{20} bis C_{30} im Oberflächenwasser der Nordsee (5 m) im August 2007.

Fig. 4-29: Geographical distribution of total concentration of n-Alkanes from C_{20} to C_{30} of near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.

4 Meereschemie

Wie Abb. 4-30 zeigt, waren hohe Konzentrationen von C₁₇ und C₁₉ im Hochsommer vor allem in den Küstengewässern der südlichen und östlichen Nordsee zu beobachten. Eine gute Korrelation zum Schwebstoffgehalt besteht nicht. Eine ähnliche Konzentrationsverteilung wurde auch im vorausgehenden Mai angetroffen.

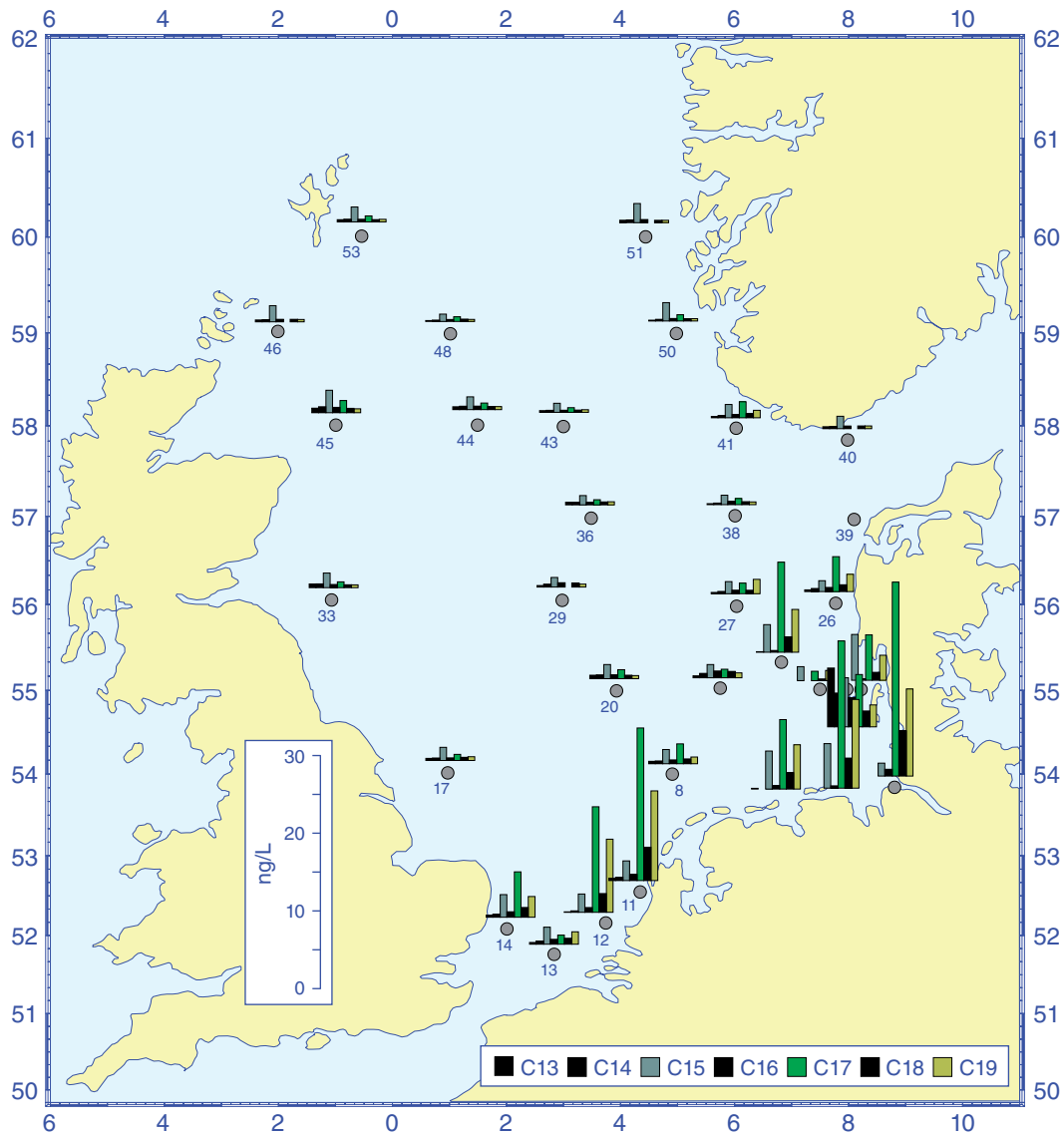


Abb. 4-30: Geographische Konzentrationsverteilungen für die n-Alkane C₁₃ bis C₁₉ im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im August 2007. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-30: Geographical distribution of concentrations of n-Alkanes C₁₃ to C₁₉ for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.

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.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Deutschen Bucht eine Grundbelastung durch Reste von Erdölkohlenwasserstoffen nachweisbar war. Nur auf wenigen Stationen wurden deutlich erhöhte Konzentrationen gemessen (Summe C₂₀ bis C₃₀ > 40 ng/L) und ein Muster gefunden (Abb. 4-28, S. 208), das eindeutig auf akute Verschmutzung durch Öl hinweist (CPI < 1,2). 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 Ölreste keine Aussagen möglich sind.

4.3.4.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Die PAK sind einander zwar strukturell ähnlich, unterscheiden sich jedoch in ihren physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften erheblich. 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. 202). Unterschiedliche Konzentrationsverteilungen sind sowohl in der Verschiedenheit physikalisch-chemischer Eigenschaften als auch durch unterschiedliche Eintragspfade begründet.

a) PAK-Gehalte des Meerwassers

Eine Dokumentation der Konzentrationsverteilungen und Verhaltensweisen aller vom BSH überwachten PAK würde den Rahmen dieses Berichts sprengen. An anderer Stelle wurden deshalb Cluster- und Regressionsanalysen durchgeführt (LOEWE ET AL. 2006, THEOBALD UND LOEWE 2009), die Aufschluss über ähnliches und eigenständiges Verhalten gaben, und so eine sinnvolle Auswahl von PAK-Verbindungen erleichterten. Die nachfolgende Untersuchung konzentriert sich daher auf wenige typische Verbindungen, nämlich Naph, Fl, Phen, Flu und BaP, die sich entweder sehr eigenständig oder repräsentativ verhalten.

Die Konzentrationen dieser PAK-Verbindungen variierten bei den vier Beprobungen der Jahre 2006 und 2007 in der Elbe bei Stade zwischen 0,62 ng/L (Fl) und 13,6 ng/L (Flu). In der Deutschen Bucht lagen alle Konzentrationen im Intervall < 0,005 – 2,75 ng/L, während Mediankonzentrationen zwischen 0,025 ng/L (BaP) und 0,48 ng/L (Naph) rangierten (Tab. 4-3). Sowohl in der Elbe als auch in der Deutschen Bucht entsprechen diese Konzentrationen dem beobachteten Bereich von 2005.

Mit Ausnahme der Naph-Verteilung zeigten alle PAK-Verteilungen einen mehr oder minder starken Konzentrationsabfall von den Küsten (Flüssen) zur offenen See hin (Abb. 4-31). Für die hochkondensierten 5- und 6-Ring-Aromaten war dieser Gradient am stärksten ausgeprägt; die Verhältnisse der Konzentrationen in der Elbe zu den Minimalkonzentrationen in der Deutschen Bucht und Nordsee waren > 1000. Für die 2- und 3-Ring-Aromaten fiel der Gradient weniger steil aus (Konzentrationsverhältnisse < 20). 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

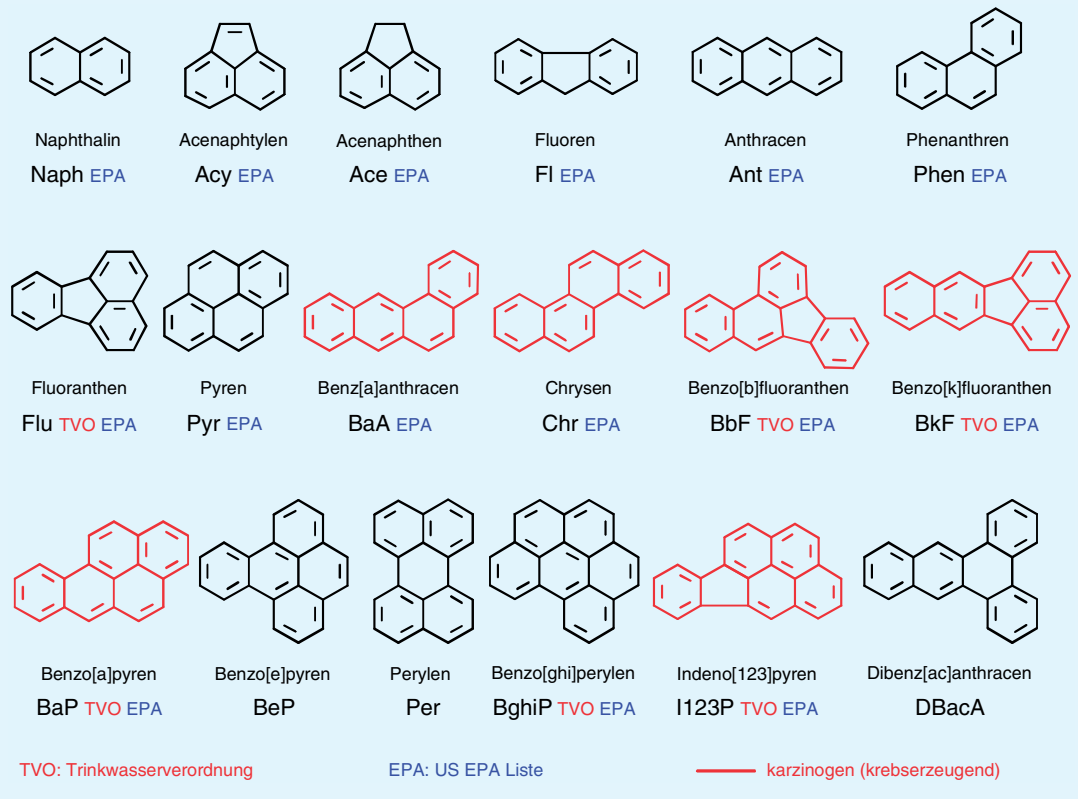
Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

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:



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. 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, ließen sich ebenfalls nicht aufstellen. Wie Abb. 4-31 zeigt, sind die Konzentrationen von Naphthalin und z. T. auch die von Phenanthren sehr variabel und folgen nicht immer den üblichen Verteil-

lungsstrukturen. Dies deutet auf zusätzliche Punktquellen hin. Wahrscheinlich werden die erhöhten Werte durch lokale Ölverschmutzungen verursacht.

Die Konzentrationen der verschiedenen PAK sind zeitlich hochvariabel und zeigen eine saisonale Abhängigkeit. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt (KOOPMANN ET AL. 1993, NIES ET AL. 2003), dass die PAK-Konzentrationen im Hochsommer (August / September) an allen Stationen ein Minimum durchlaufen, während im Zeitraum November bis April höhere Konzentrationen auftreten. Letztere werden auf im Winter höhere Schwebstoffgehalte, geringere Abbauraten sowie höhere Einträge durch Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückgeführt. Eine solche Tendenz ist auch bei den Werten des vorliegenden Untersuchungszeitraums zu beobachten (Abb. 4-32, S. 215).

Betrachtet man die Median-PAK-Konzentrationen aus der Deutschen Bucht der einzelnen Fahrten (Abb. 4-32), so werden frühere Ergebnisse dahingehend bestätigt, dass die Konzentrationen der 2- und 3-Ring-Aromaten im August ein Minimum durchliefen, wobei an den meisten Stationen die Werte etwa halb so groß waren wie im Mai und November. Bemerkenswert sind dabei die großen Unterschiede zwischen den Mai Werten von 2006 und 2007. Das »saisonale Minimum« in den Konzentrationen der 4- bis 6-Ring-Aromaten verteilte sich hingegen auf Mai und August und erschien damit breiter; im November wurden deutlich höhere Werte beobachtet.

PAHs	STADE			CUXHAVEN			GERMAN BIGHT		
	MIN	MEDIAN	MAX	MIN	MEDIAN	MAX	MIN	MEDIAN	MAX
ACE			0.85	<LoQ	0.068	0.342	<LoQ		0.083
ACY			0.95	<LoQ	0.046	0.219	<LoQ		0.105
ANT			1.26	<LoQ	0.069	0.587	<LoQ		0.058
BAA			5.47	<LoQ	0.212	2.063	<LoQ		0.123
BAP	4.55	6.29	8.65	0.726	2.543	3.328	<LoQ	0.026	0.624
BBF			9.55	<LoQ	0.563	4.184	<LoQ		0.417
BEP			5.68	<LoQ	0.311	2.335	<LoQ		0.224
BGHIP			5.25	<LoQ	0.267	2.087	<LoQ		0.184
CHRTR	4.07	5.39	7.37	0.817	2.411	3.068	<LoQ	0.065	0.653
DBAHA			2.45	<LoQ	0.072	1.073	<LoQ		0.063
DBT			0.40	<LoQ	0.054	0.249	<LoQ		0.074
FL	0.62	0.89	1.62	0.412	0.647	1.078	0.084	0.272	0.949
FLU	6.70	10.10	13.62	1.683	4.542	5.976	0.024	0.248	1.591
I123P	2.63	4.69	7.96	0.552	2.004	3.535	<LoQ	0.026	0.639
NAPH	0.49	0.87	1.76	0.651	0.852	3.092	0.165	0.483	2.775
PER			4.36	<LoQ	0.169	1.554	0.000	0.000	0.116
PHEN	2.90	4.26	6.87	0.994	2.096	2.429	0.086	0.330	1.314
PYR	6.65	9.85	13.03	1.396	4.046	5.341	0.004	0.095	0.990
Σ_2^3 RING	4.13	7.23	10.77	2.421	4.162	6.241	0.372	1.148	5.038
Σ_4^6 RING	25.47	36.19	82.77	8.357	17.32	34.38	0.052	0.585	4.292

Tab. 4-3: PAK-Konzentrationen (ng/L) in der Elbe und der Deutschen Bucht.

Table 4-3: PAH-concentrations (ng/L) in the river Elbe and the German Bight.

Aufgrund der hohen Schwankungen können weiterhin keine Aussagen zur langfristigen Entwicklung getroffen werden.

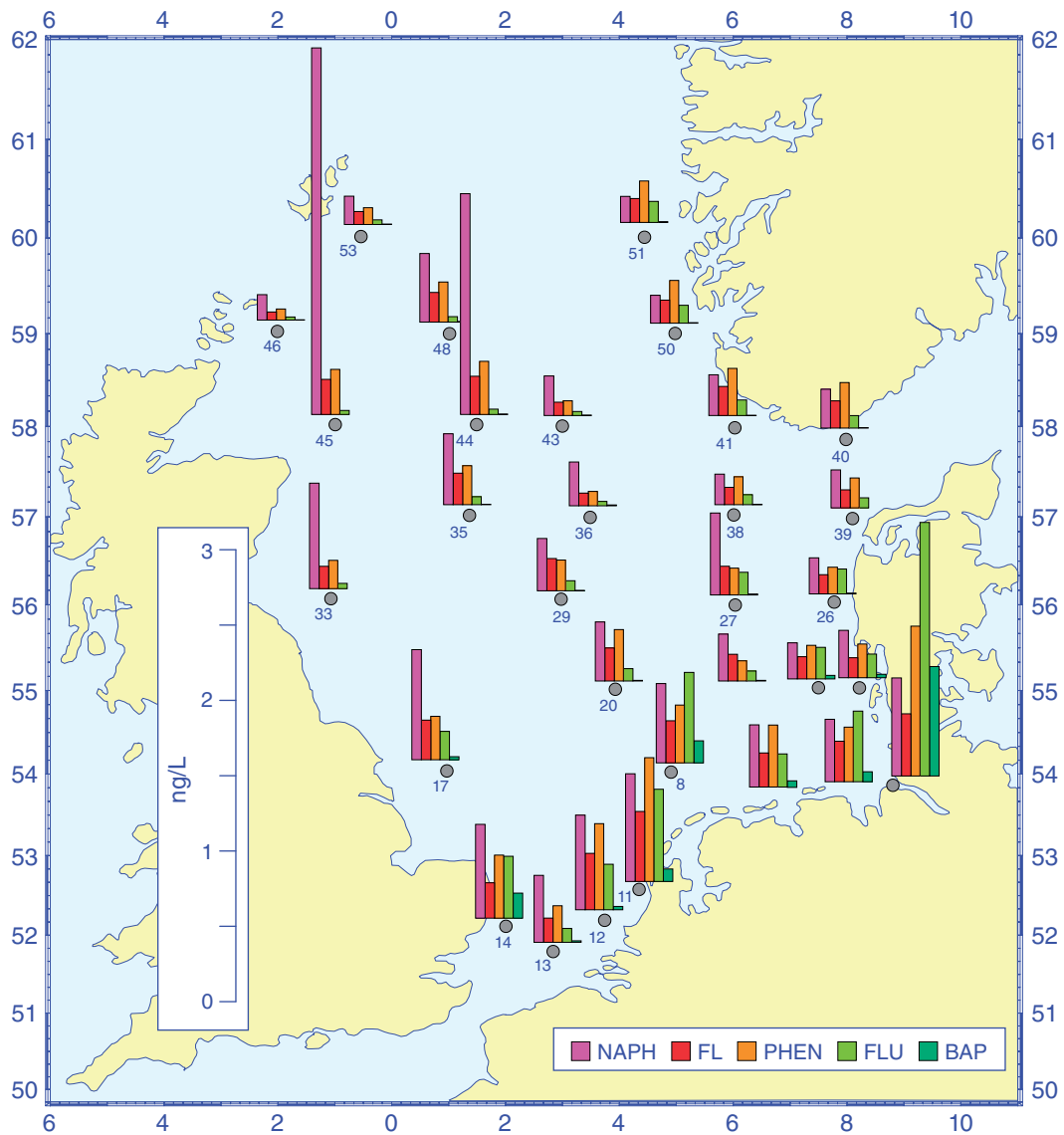


Abb. 4-31: Konzentrationen ausgesuchter PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Aug. 2007. Säulenhöhen in ng/L; unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-31: Concentrations of some PAHs in near-surface water (5 m) of the German Bight in Aug. 2007. Column heights in ng/L; underneath columns station IDs.

b) PAK-Gehalte des Sediments

Aufgrund ihrer unpolaren Eigenschaften werden die meisten PAK an festen Oberflächen stark angereichert und liegen in Sedimenten und Schwebstoffen in 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 PAK-Muster in Wasser- und Sedimentproben unterscheiden sich deutlich. In Sedimenten sind die 5- und 6-Ring-Aromaten (I123P, BghiP) in deutlich höheren Kon-

zentrationen 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. Während die PAK-Muster in Wasserproben stark von dem Schwebstoffanteil abhängen (vgl. *Abb. 4-31*), ähneln die Konzentrationsmuster der PAK im Sediment einander recht stark (*Abb. 4-33*).

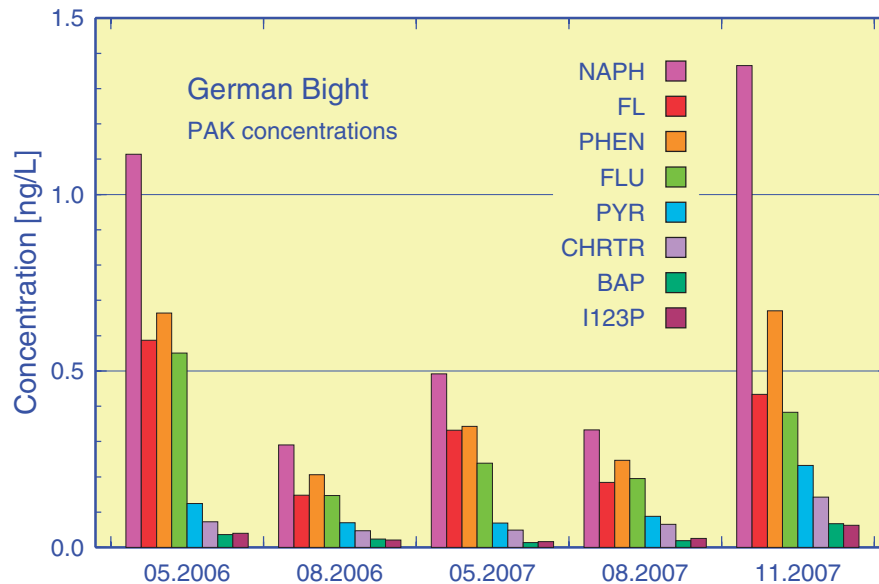


Abb. 4-32: Median-Werte der PAK-Konzentrationen in der Deutschen Bucht.

Fig. 4-32: Median-values of PAH-concentrations in the German Bight.

Die Konzentrationsverteilung ausgewählter PAK im Sediment der Deutschen Bucht ist in *Abb. 4-33* exemplarisch für Mai 2007 dargestellt. Die geographische Verteilung der Konzentrationen orientiert sich - ähnlich wie bei den CKW - an der TOC-Verteilung der Sedimente. Die Mediane der Konzentrationen aller Stationen lagen 2006 zwischen 0,9 µg/kg TM (ACY) und 37,7 µg/kg TM (BbF); im Jahr 2007 wurde ein Bereich von 0,4 µg/kg TM (ACY) bis 25,4 µg/kg TM (BbF) beobachtet.

Von allen organischen Schadstoffen weisen die PAK im Sediment die räumlich gleichmäßigsten Konzentrationsverteilungen auf; dies wird besonders deutlich bei Betrachtung der auf den TOC-Gehalt bezogenen Konzentrationen (*Abb. 4-33, unten*). Die Max/Min Verhältnisse der TOC-normierten Konzentrationen lagen für die meisten PAK im Bereich von 10 bis 20; für die auf Trockenmasse bezogenen Konzentrationen lagen die Max/Min Verhältnisse dagegen zwischen 100 und 500. Die geringe räumliche Struktur der Konzentrationsverteilungen ist höchstwahrscheinlich eine Konsequenz des sehr diffusen Eintrags und des ubiquitären Vorkommens der PAK in der Umwelt.

Vergleicht man die auf den TOC-Gehalt bezogenen Konzentrationsverteilungen der PAK (*Abb. 4-33, unten*) und die der CKW (*Abb. 4-26, S. 205*), fällt auf, dass die PAK in der zentralen Deutschen Bucht (>WB5< etc.) maximale Konzentrationen erreichen und nicht vor der Elb-Mündung. Dieser Umstand deutet auf eine besondere lokale Quelle hin. Ob diese erhöhten Konzentrationen mit der Häufung der Ölverschmutzungen entlang der westlich davon verlaufenden Schifffahrtsroute ursächlich zusammenhängen (vgl. *Abb. 4-27, S. 207*), konnte bisher noch nicht bestätigt werden.

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

4 Meereschemie

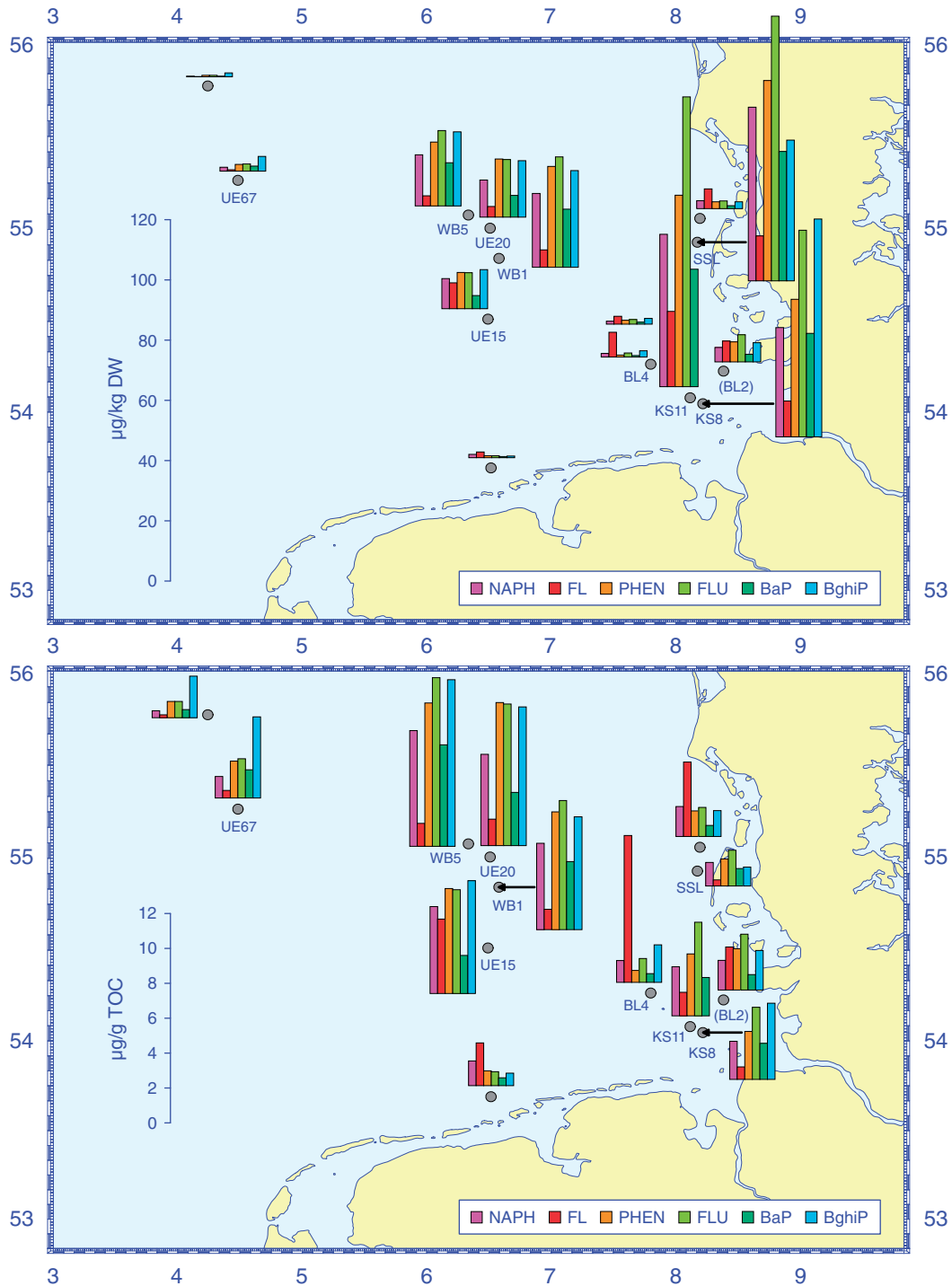


Abb. 4-33: PAK-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2007.

Fig. 4-33: PAH concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2007.

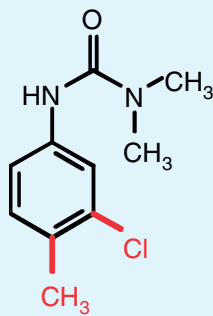
4.3.5 Polare Pestizide

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) aufgelisteten 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 ein Drittel zu den modernen Pestiziden zählt.

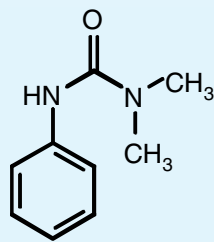
Tafel 4-6: Herbizide

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.

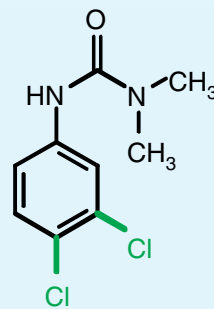
Phenylharnstoff-Herbizide



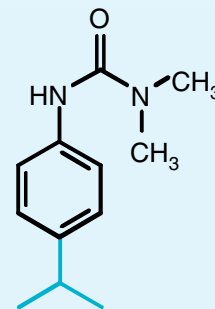
Chlortoluron



Fenuron



Diuron



Isoproturon

(Fortsetzung ...)

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. In den folgenden Abschnitten wird die Herbizidbelastung der Nordsee im August 2007 dokumentiert und interpretiert. Anschließend werden Ergebnisse zu jahreszeitlichen Veränderungen in der Herbizidbelastung der Deutschen Bucht vorgestellt.

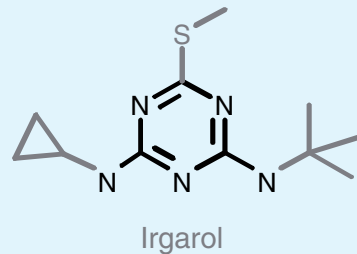
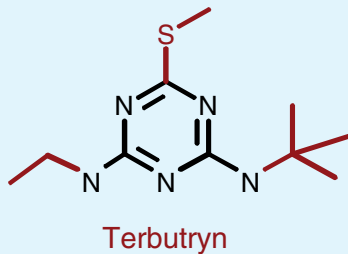
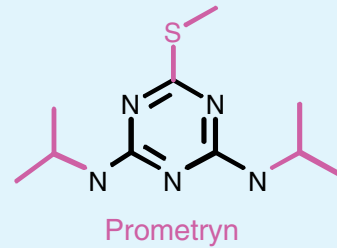
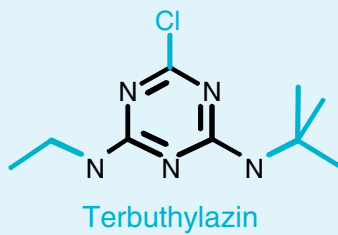
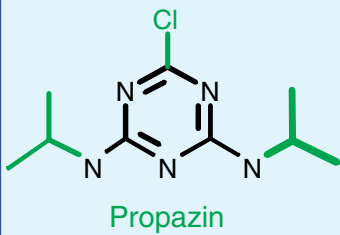
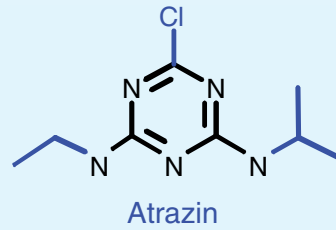
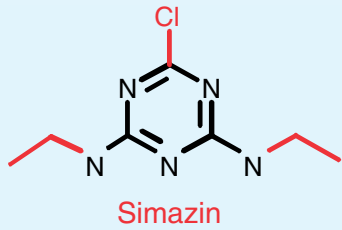
4.3.5.1 Herbizidgehalte des Meerwassers

Da die Elbe die stärkste Quelle für Schadstoffeinträge in die Deutsche Bucht und südöstliche Nordsee darstellt, wurden Proben aus dem Elbeästuar in die Untersuchung einbezogen. Der Pestizideintrag und demzufolge die Pestizidkonzentrationen des Wassers unterliegen erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen, die aus der saisonalen Anwendung der einzelnen Wirkstoffe resultieren (THEOBALD UND LOEWE 2009).

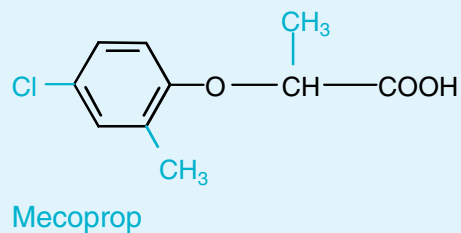
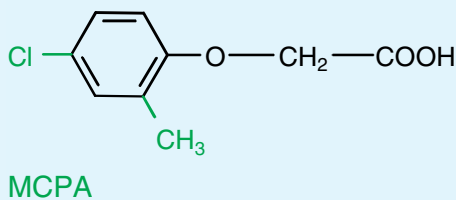
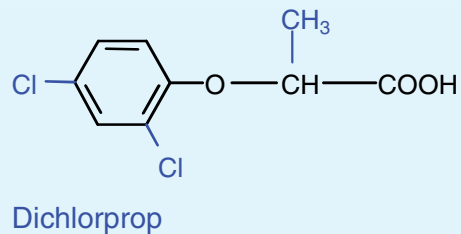
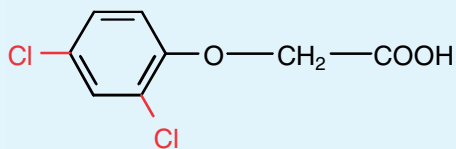
Tafel 4.6: Herbizide

(... Fortsetzung)

Triazin-Herbizide



Phenoxyessigsäure-Herbizide



Von 42 analysierten Pestiziden waren in der Elbe 26 nachweisbar; 23 davon wurden auch küstennah in der Deutschen Bucht angetroffen, während in der offenen See noch 17 Stoffe gefunden wurden. Aus allen drei Hauptstoffklassen der Herbizide – nämlich Phenylharnstoffe, Triazine und Phenoxyessigsäuren – wurden 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 Atrazin, Terbutylazin

und Simazin gefunden, während unter den Phenoxyessigsäuren MCPA und Mecoprop in höchsten Konzentrationen vorkamen.

Die räumlichen Konzentrationsverteilungen in der Nordsee im August 2007 sind für die fünf wichtigsten Triazine (sowie das Abbauprodukt Desethylatrazin) in Abb. 4-34 wiedergegeben. In der Elbe waren diese Stoffe in Konzentrationen von 3 bis 6 ng/L nachweisbar; Atrazin und Terbutylazin traten vereinzelt auch in Konzentrationen von bis 15 bzw. 73 ng/L auf. Diese hohen Einträge sind weitgehend verantwortlich für die hohe Belastung der Küstenregionen der südöstlichen Dt. Bucht. Eine weitere Belastungsquelle für die südliche Nordsee ist der Rhein, wie an erhöhten Konzentrationen im Mündungsgebiet erkennbar ist (Abb. 4-34, Station >11< und >12<). Zur offenen See hin wurde ein steiles Konzentrationsgefälle beobachtet, so dass in der zentralen und nördlichen Nordsee nur noch Simazin, Atrazin, dessen Abbauprodukt Desethylatrazin und – in deutlich geringeren Konzentrationen – Terbutylazin nachweisbar waren.

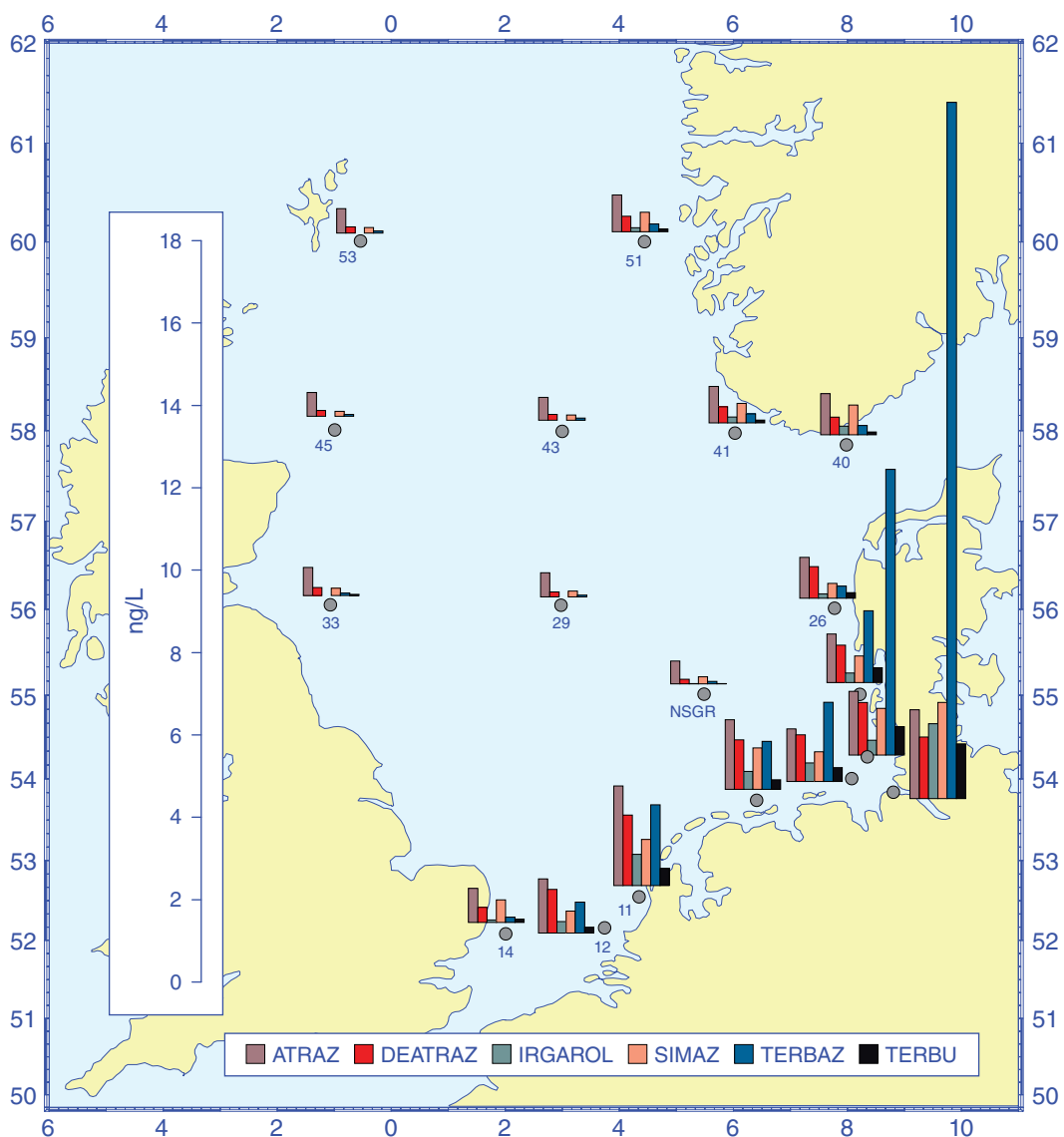


Abb. 4-34: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im August 2007.

Fig. 4-34: Concentrations (ng/L) of selected triazine herbicides in near-surface sea water of the North Sea in August 2007.

4 Meereschemie

Die Konzentrationsverteilungen für die fünf wichtigsten Phenylharnstoff-Herbizide sind in Abb. 4-35 dargestellt. Das grundsätzliche Verteilungsmuster ähnelt dem der Triazine stark; die absoluten Konzentrationen unterscheiden sich natürlich aufgrund verschiedener Eintragsmengen.

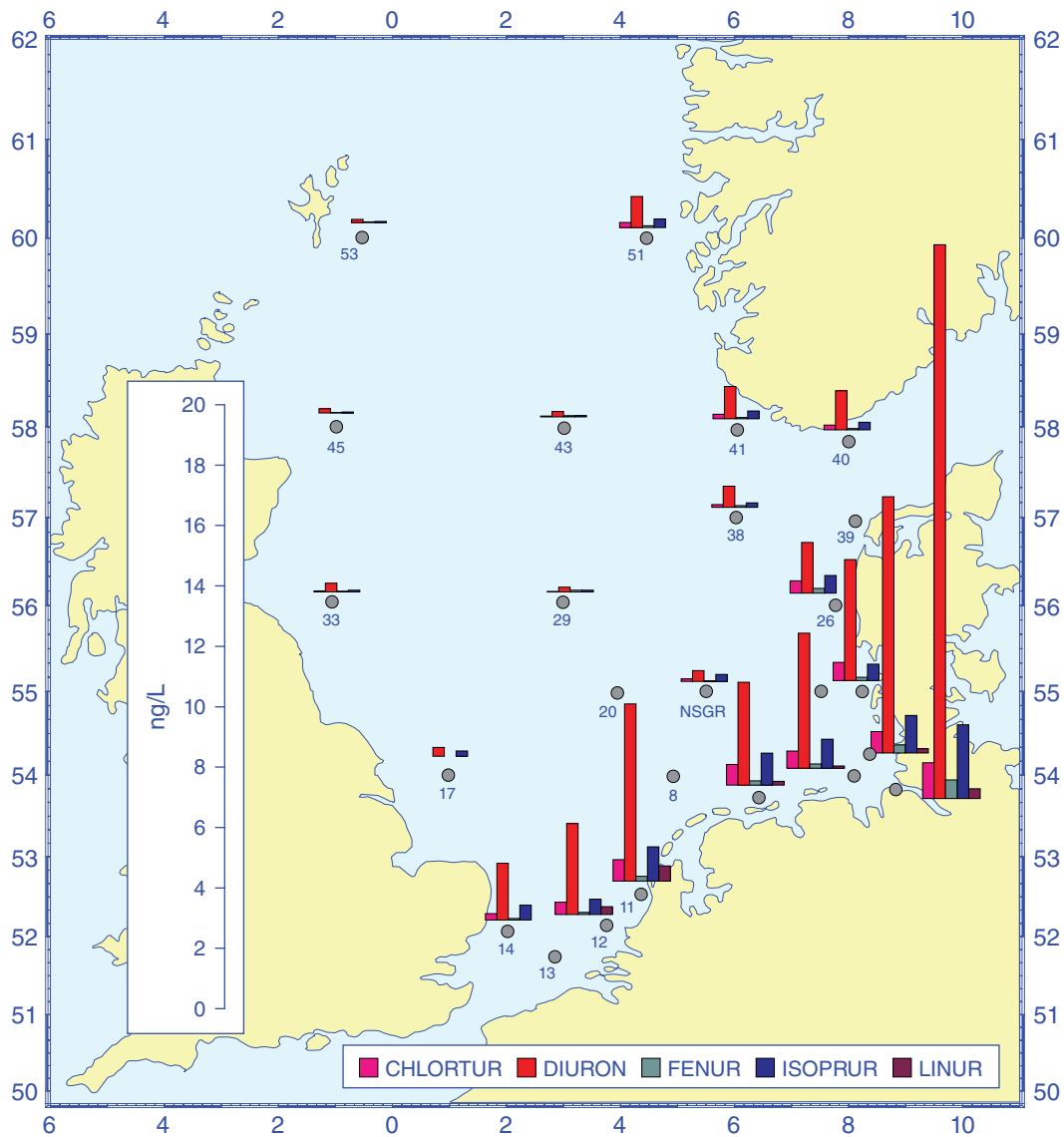


Abb. 4-35: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im August 2007.

Fig. 4-35: Concentrations (ng/L) of selected phenylurea herbicides in near-surface sea water of the North Sea in August 2007.

Die Phenylharnstoff-Herbizide wiesen bei den Beprobungen 2006 und 2007 in der Elbe meist deutlich höhere Konzentrationen auf als die Triazine; so wurden bei Stade für Diuron durchschnittlich 39 ng/L gefunden und Chlortoluron und Isoproturon zeigten Maximalwerte von 23 und 38 ng/L im Jahr 2006. Trotz dieser hohen Quellkonzentrationen wurden in der offenen See nur sehr geringe Konzentrationen von unter 0,1 ng/L gemessen und oft konnte nur Diuron nachgewiesen werden. Dagegen konnten in Küstennähe meist alle Stoffe nachgewiesen und bestimmt werden.

Ähnliches gilt für die drei Phenoxyessigsäure-Herbizide, die hauptsächlich küstennah gefunden wurden. In der Elbe wurden sie mit hoher zeitlicher Variabilität zwischen 1,8 und 12 ng/L nachgewiesen.

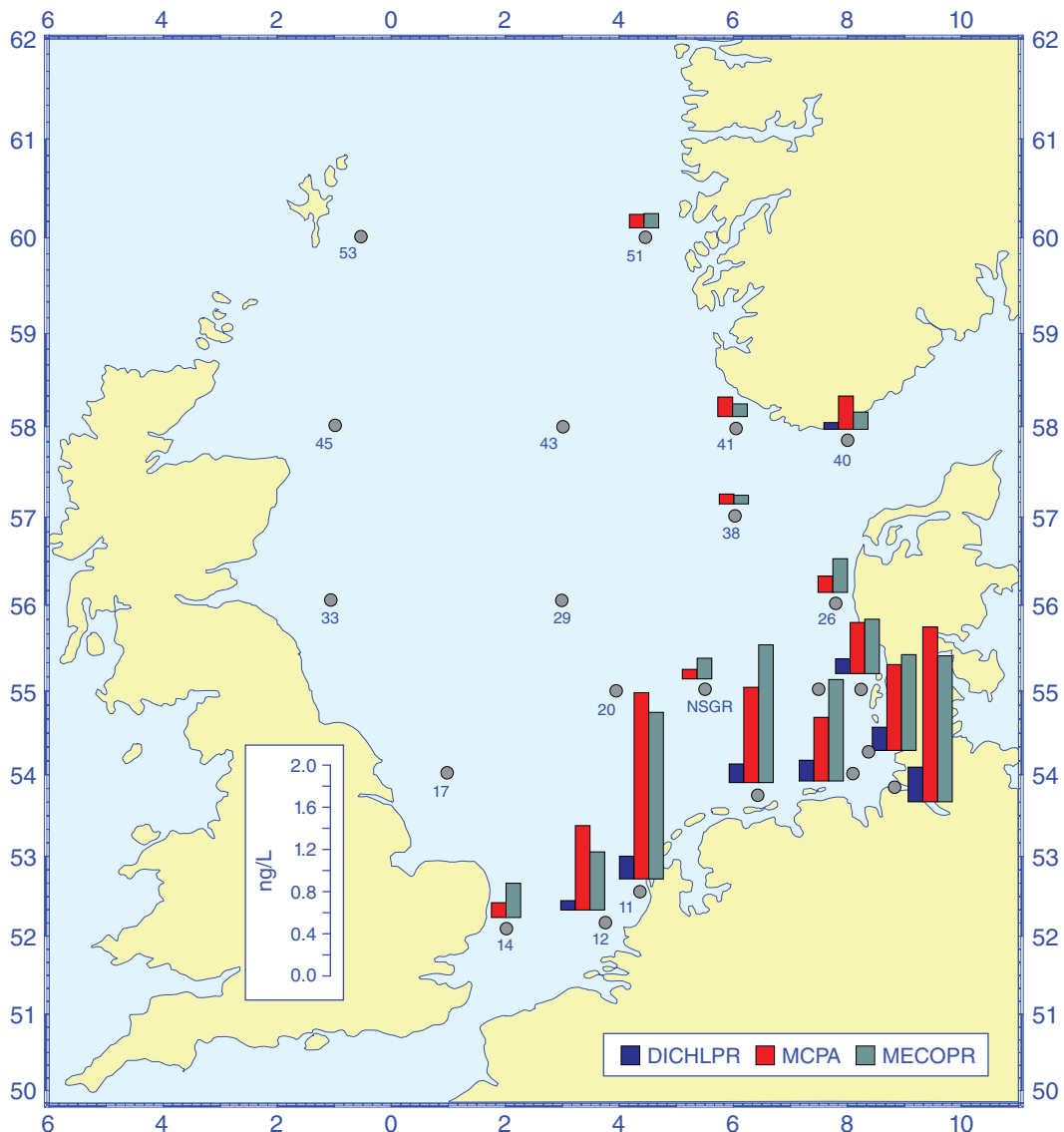


Abb. 4-36: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Phenoxyessigsäure-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im August 2007.

Fig. 4-36: Concentrations (ng/L) of selected phenoxy acetic acid herbicides in near-surface sea water of the North Sea in August 2007.

Die geographischen Verteilungen der polaren Herbizidgehalte sind einander sehr ähnlich und zeichnen sich durch starkes Gefälle von der kontinentalen Küste zur offenen See aus (Abb. 4-34 bis Abb. 4-36). Die regional unterschiedliche Ausprägung dieser Konzentrationsgradienten ist dabei wesentlich abhängig von der variablen Quellstärke bedeutender Punktquellen, wie Elbe, Rhein, Schelde oder Themse, deren Stoffeinträge sich mit unterschiedlich vorbelasteten Wasserkörpern (nördlicher Einstrom, Baltischer Ausstrom, Kanalwasser) vermischen und dabei verdünnen. Die großen, in die südliche Nordsee entwässernden Flüsse dominieren nicht nur die Belastung des Meerwassers mit polaren Pestiziden, sondern üben als wichtige Frisch-

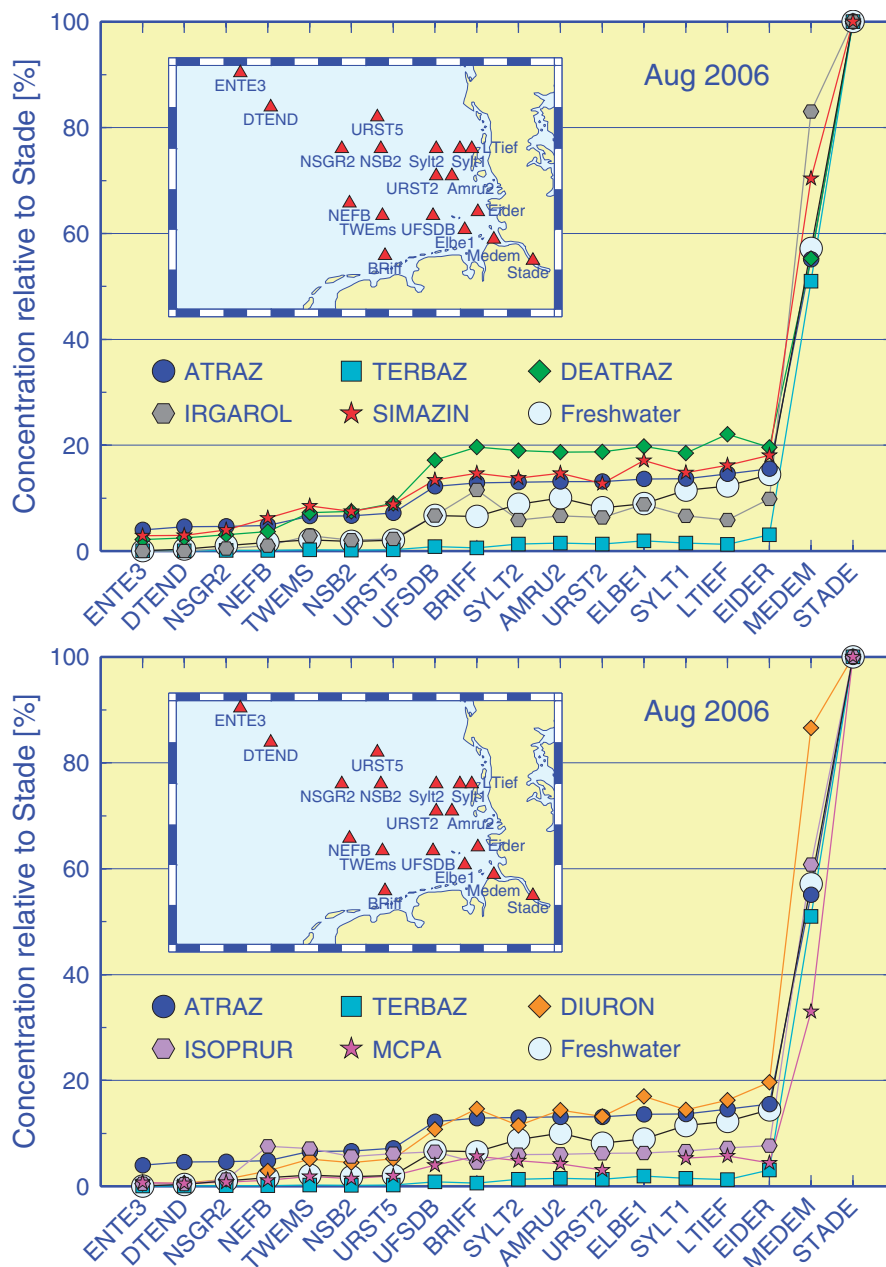


Abb. 4-37: Herbizid-Konzentrationen in der Deutschen Bucht als %-Anteil der Stade Konzentrationen im August 2006.

Fig. 4-37: Concentrations of herbicides as % of concentration of Stade in August 2006.

wasserquellen gleichzeitig erheblichen Einfluss auf die Salzgehaltsverteilung aus (Abb. 3-23, S. 158), die sich infolge hydrodynamischer Prozesse (Transport und Vermischung) einstellt. Gelöste Stoffverbindungen, die bei ihrer Ausbreitung mit den Meeresströmungen weder chemischen, noch biologischen Reaktionen ausgesetzt sind und auch nicht durch Adsorption an Schwebstoffe dem Wasser entzogen werden, verhalten sich wie Meersalz: »hydrodynamisch konservativ«. THEOBALD UND LOEWE (2009) haben den Zusammenhang zwischen polaren Herbiziden und dem Salzgehalt ausführlich untersucht und das relativ konservative Verhalten dieser Stoffgruppe aufgezeigt. Entsprechende Untersuchungen wurden auch mit den Daten aus den Jahren 2006 und 2007 durchgeführt. Es zeigte sich erneut, dass die regionale Unterteilung in Elbe- und Rheinregime für die südliche Nordsee für die meisten polaren persistenten

Stoffe sinnvoll und erfolgreich ist. Dabei fiel allerdings auf, dass die Zuordnung einzelner Stationen zu bestimmten Quellen aufgrund unterschiedlicher Strömungen zeitlich variieren kann und die Auswirkungen von den Quellstärken abhängig sind. Für praktisch alle Stoffe gilt, dass das von Südwesten in die Deutsche Bucht einströmende Nordseewasser deutlich vorbelastet ist.

In der nordöstlichen Nordsee ist weiterhin das Ostseewasser als eigenständige Eintragsquelle identifizierbar. So ergibt sich etwa für die Diuron-Konzentrationen zwischen Baltischem Ausstrom (Station ›40‹, 1,3 ng/L, S = 29,4) und nördlichem atlantischen Einstrom (Station ›45‹, S = 35,2) ein Gefälle von lediglich –0,2 ng/L pro Einheitssalzgehalt (Abb. 4-36) und damit eine signifikant flachere Mischungsgerade als im Elberegime (–1,55 ng/L pro Einheitssalzgehalt).

Um den Einfluss der stofflichen Eigenschaften auf die Verteilung in der Deutschen Bucht zu untersuchen, wurden in Abb. 4-37 die Konzentrationen als %-Anteil der Stadelkonzentrationen dargestellt, d. h. es wird die ›Verdünnung‹ der Quellkonzentrationen durch Meerwasser in der DB dargestellt – zum Vergleich ist ferner der »Süßwasseranteil« (SW) dargestellt. Bei streng konservativem Verhalten müssten Süßwasserkurve und Herbizidkurven aufeinander liegen. Bei Kurven, die unterhalb der SW-Kurve liegen, findet – neben der Verdünnung – eine zusätzliche Konzentrationsverringerng durch einen weiteren Prozess statt. Da die betroffenen Komponenten Irgarol und Terbutylazin lipophiler sind als die übrigen Stoffe, könnten Adsorptions- und Sedimentationsverluste durch Schwebstoffe die Ursachen sein. Ebenso würden natürlich auch Abbaureaktionen diesen Verlauf erklären. Bei den Kurven oberhalb der SW-Kurve müssen zusätzliche Quellen als Erklärung gefunden werden. Bei dem Abbauprodukt Desethylatrazin wäre ein Abbau von Atrazin plausibel. Bei Simazin und Atrazin ist eine Vorbelastung des Nordseewassers ein nachvollziehbarer Grund: die Kurven sind parallel zur Grundbelastung, die man im Wasser der zentralen Nordsee beobachtet (Simazin: 0,13 ng/L, Atrazin: 0,59 ng/L), gegenüber der SW-Kurve nach oben verschoben.

Mit Hilfe dieser Darstellung lassen sich stoffspezifische Besonderheiten relativ leicht erkennen. Abb. 4-37 macht aber auch deutlich, dass für eine genaue Interpretation prinzipiell eine individuelle Betrachtung jedes Einzelstoffes notwendig wäre – für eine solche Betrachtung fehlt hier jedoch der Raum.

4.3.5.2 Zeitliche Variabilität der Herbizidgehalte

Pestizide werden meist sehr gezielt eingesetzt, so dass die Eintragsmengen und demzufolge die Konzentrationen des Wassers starken saisonalen Schwankungen unterliegen. Die verschiedenen Pestizide weisen sehr heterogene Jahresgänge und kein gemeinsames Grundmuster auf (THEOBALD UND LOEWE 2009), sondern resultieren offenbar aus uneinheitlichen Anwendungszeiten und verschiedenen hohen Anwendungsmengen.

Die raumzeitliche Variabilität der Substanzkonzentrationen ist sehr komplex und Konzentrationsänderungen in der Elbe sind in ihrer Wirkung auf die Stoffverteilung in der Deutschen Bucht selten einfach nachvollziehbar.

In Abb. 4-38 sind die Konzentration der am häufigsten nachgewiesenen Herbizide für die fünf Fahrten an sechs ausgewählten Stationen zusammengefasst. In der Elbe (›STADE‹) variierten die Konzentrationen zwischen 1 ng/L (Metolachlor) und 73 ng/L (Terbutylazin). In der zentralen Nordsee (›ENTE3‹) zeigte Atrazin die höchsten Kon-

4 Meereschemie

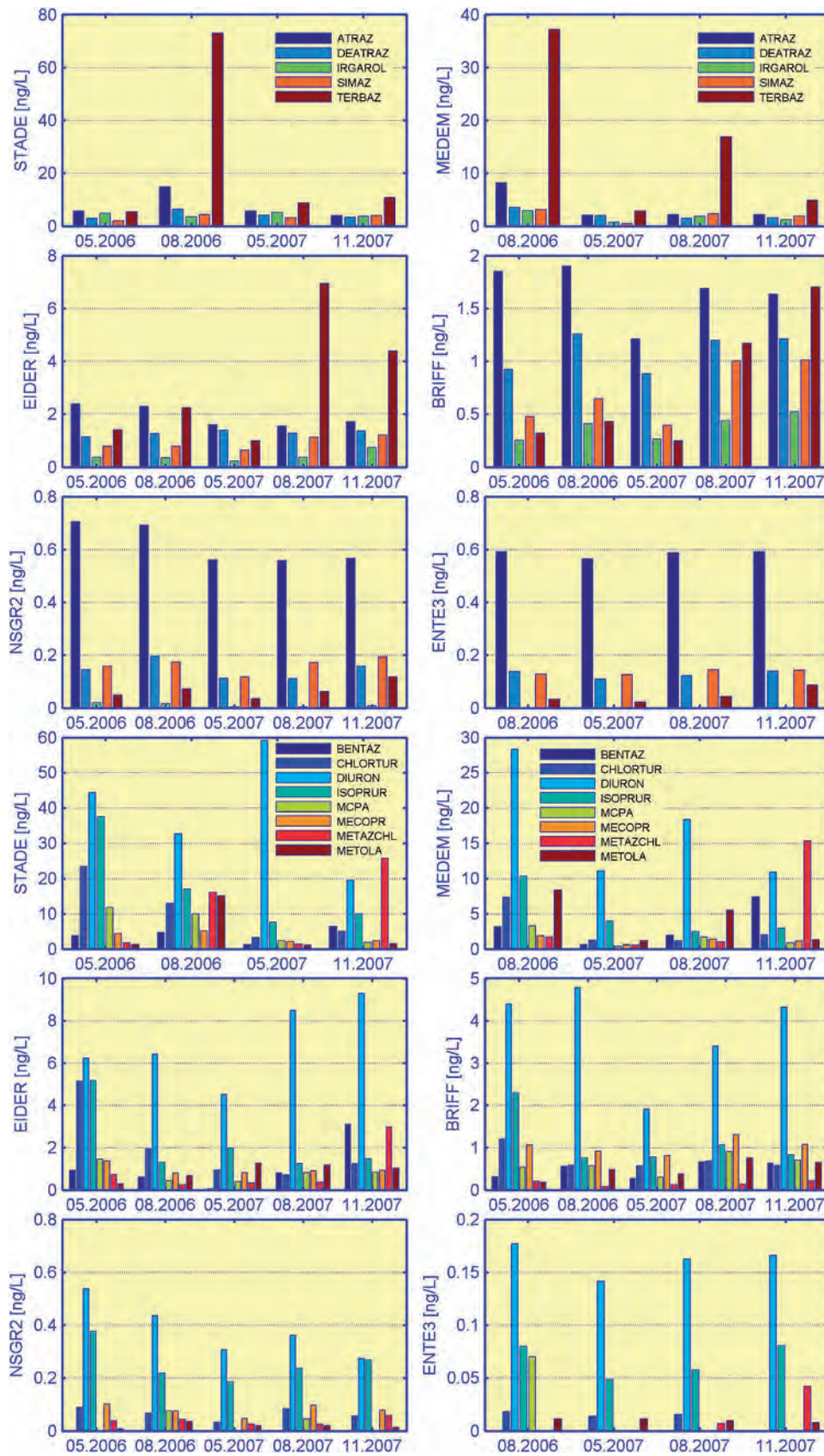


Abb. 4-38: Zeitlicher Verlauf der Herbizid-Konzentrationen auf ausgewählten Stationen der Deutschen Bucht.

Fig. 4-38: Temporal evolution of herbicide concentrations at selected stations of the German Bight.

zentrationen (0,56 bis 0,59 ng/L) gefolgt von Diuron (0,14 bis 0,18 ng/L), Simazin (0,13 bis 0,15 ng/L) und Desethyl-Atrazin (0,11 bis 0,14 ng/L). Terbutylazin, das in der Elbe z. T. in den höchsten Konzentrationen vorkam, wies nur noch Werte von 0,02 bis 0,09 ng/L auf. In der offenen See waren bei den gegenwärtigen Bestimmungsgrenzen nicht mehr alle Stoffe nachweisbar.

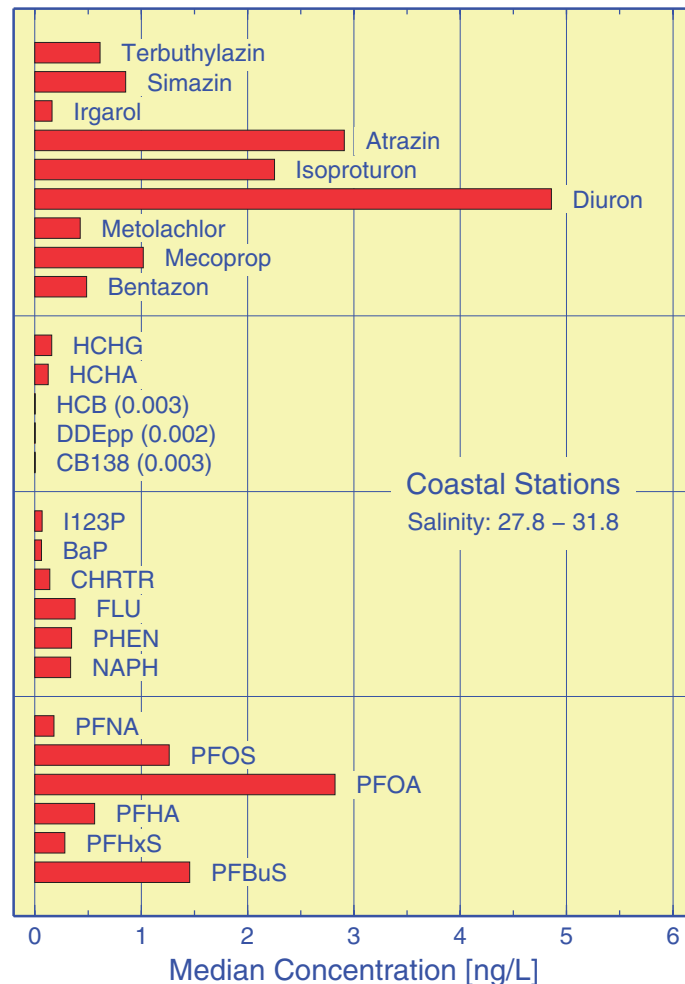


Abb. 4-39: Mediankonzentrationen von küstennahen Stationen ($S = 27,8 - 31,8$) im Zeitraum 2004 – 2005.

Fig. 4-39: Median concentrations of coastal stations ($S = 27.8 - 31.8$) for 2004 – 2005.

Bei den Stationen der offenen See (›ENTE3‹ und ›NSGR2‹) zeigten sowohl die Muster als auch die Konzentrationen der Herbizide relativ geringe Schwankungen (Abb. 4-38, jeweils die unteren Bilder). Auch die vor der ostfriesischen Küste gelegene Station ›BRIFF‹ wies noch recht homogene Muster auf; allerdings lagen hier die Konzentrationen natürlich deutlich höher. Sehr hohe zeitliche Schwankungen wurden in der Elbe und im Elbe-Ästuar beobachtet. Hier zeigten insbesondere Terbutylazin mit Maxima im August und Diuron sehr große Konzentrationsschwankungen.

Diese Abnahme in der Stärke der zeitlichen Variationen vom Flussbereich zur offenen See hin erklärt sich aus der in dieser Richtung zunehmenden Dämpfung der Signale durch Vermischung mit geringer belastetem Nordsee- und Atlantikwasser sowie den kurzen Zeitabständen zwischen den Messkampagnen.

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 (*Abb. 4-39*). Darüber hinaus stellen etliche der analysierten Herbizide strukturell ähnliche Verbindungen dar (vgl. *Tafel 4-6, S. 217*). 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.

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 in den Jahren 2006 und 2007 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 mehr als 10 Jahren in Deutschland und vielen EU-Staaten verboten.

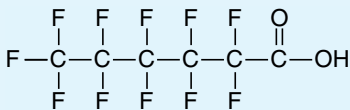
4.3.6 Neue Schadstoffe

Tafel 4-7: Perfluorierte Chemikalien

Perfluorierte organische Säuren (PFC, PFT) werden für zahlreiche Anwendungen in der Industrie und im Konsumentenbereich genutzt und in großen Mengen seit den 1950er Jahren hergestellt. Sie werden z. B. für die Oberflächenbehandlung von Textilien, Teppichen und Papier eingesetzt und finden ferner Verwendung in Schmiermitteln, Farben, Polituren, Nahrungsmittelverpackungen sowie in Feuerbekämpfungsschäumen. Aufgrund ihrer sehr stabilen Kohlenstoff-Fluor-Bindung sind diese Stoffe chemisch nahezu inert und zeigen eine große Beständigkeit in der Umwelt. Verwendung finden Carbon- und Sulfonsäuren mit Kohlenstoff-Kettenlängen von C₄ bis C₁₀. Da die Säuren sowohl eine ionische Gruppe als auch einen lipophilen Rest enthalten, besitzen sie Tensid-Eigenschaften (daher auch die Abkürzung: PFT). Die wichtigsten Vertreter der PFC sind die Perfluoroctansäure (PFOA) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS). PFOS zeigt eine gewisse Bioakkumulationsfähigkeit und weist toxische Eigenschaften auf und wird daher von der OSPAR und der OECD als PBT-Stoff (**p**ersistent, **b**ioakkumulierbar und **t**oxisch) eingruppiert.

Seit einer freiwilligen Beschränkung des Hauptproduzenten bzgl. der C₈-Säuren im Jahre 2002 gewinnen die C₄-Säuren Perfluorbutansäure (PFBA) und Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) zunehmend an Bedeutung.

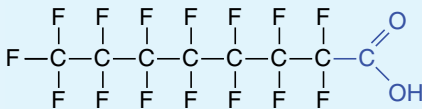
Strukturformeln der untersuchten PFC:



PFHxA Perfluorhexansäure

... ..

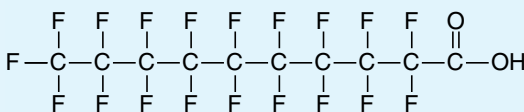
PFHpA Perfluorheptansäure



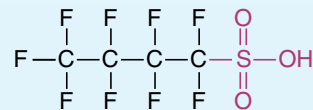
PFOA Perfluoroctansäure

... ..

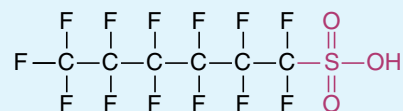
PFNoA Perfluornonansäure



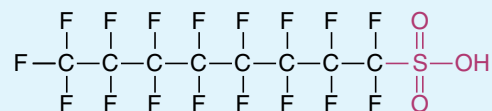
PFDeA Perfluordecansäure



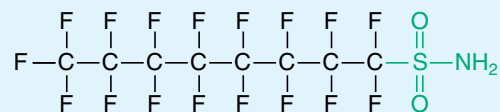
PFBS Perfluorbutansulfonsäure



PFHxS Perfluorhexansulfonsäure



PFOS Perfluoroctansulfonsäure



PFOSA Perfluoroctansulfonamid

4.3.6.1 PFC-Gehalte des Meerwassers

Nachdem im BSH in den Jahren 2003 bis 2005 im Rahmen eines Forschungsprojekts Bestimmungsmethoden entwickelt und validiert worden waren, wurden ab 2006 die PFC in das Routine-Monitoringprogramm des BSH aufgenommen. In der Deutschen Bucht konnten alle neun untersuchten PFC nachgewiesen werden. Die Konzentrationen der Hauptkomponenten PFOA und PFOS variierten in der Nordsee im Bereich von 30 pg/L bis 6 ng/L, wobei ein starker Gradient von den Küsten zur offenen See zu beobachten war. Elbe und Rhein/Schelde konnten in der südlichen Nordsee als deutliche Quellen identifiziert werden. In der Elbe wurden für PFOA und PFOS

4 Meereschemie

Werte zwischen 8 und 30 ng/L beobachtet. Als regionale Besonderheit fiel auf, dass die Konzentrationen von PFOS aus den Fluss-Ästuaren zur offenen See hin stärker abnahmen als die von PFOA. Vor der Rhein/Schelde-Mündung wurden ferner als Besonderheit relativ hohe PFBS-Konzentrationen (3,9 ng/L) beobachtet (Abb. 4-40).

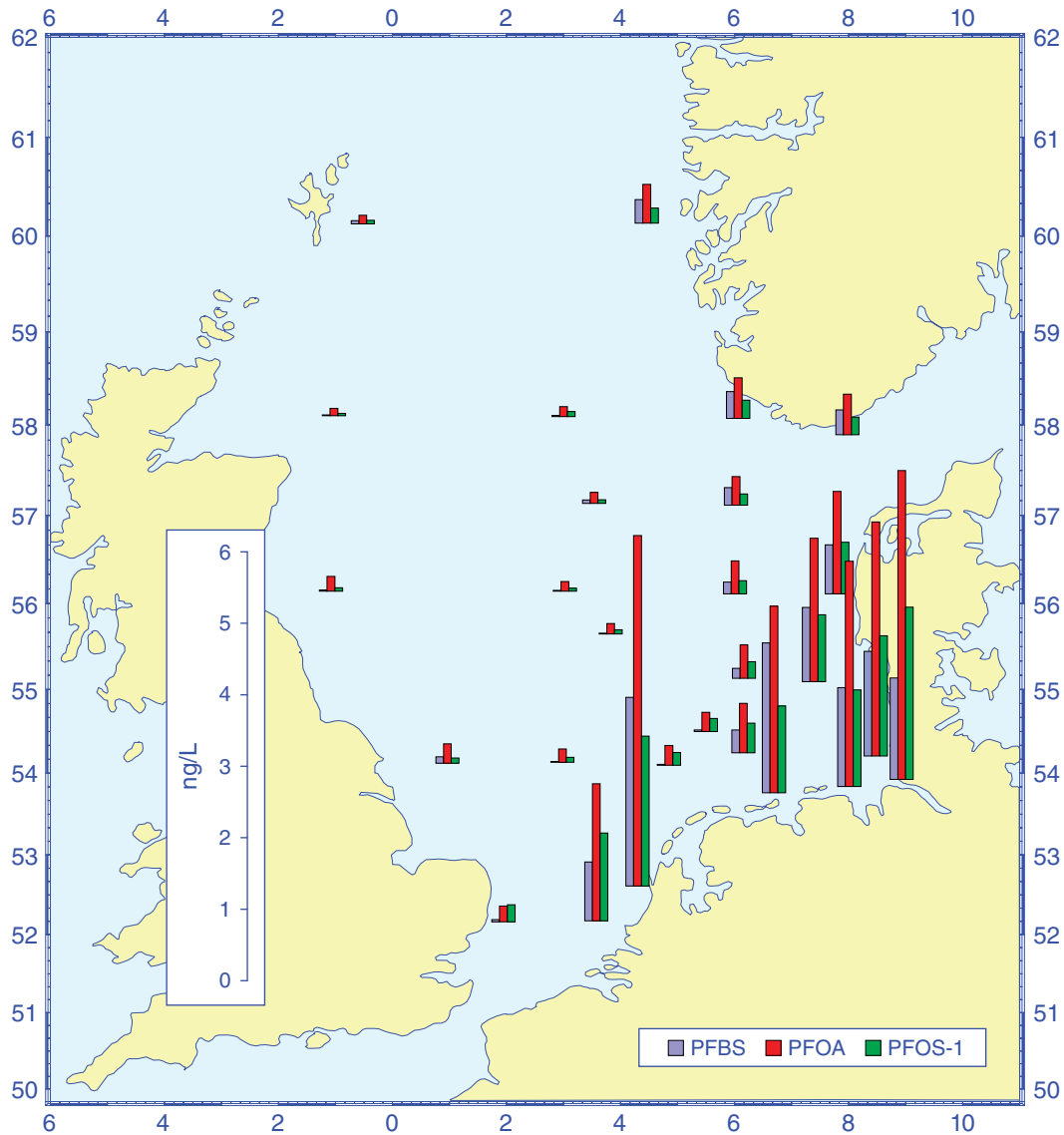


Abb. 4-40: PFC-Konzentrationen (ng/L) im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im August 2007.

Fig. 4-40: PFC concentrations (ng/L) in near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.

Bei allen Untersuchungen zeigte sich, dass PFOA meist die Substanz mit der höchsten Konzentration war, gefolgt von PFOS und PFBS; die übrigen PFC wurden stets in deutlich geringeren Konzentrationen beobachtet. Die PFOA-, PFBS- und PFOS-Konzentrationen lagen im Meerwasser in einem ähnlichen Bereich wie viele klassische Schadstoffe (HCH, PAH, Herbizide); im Vergleich zu lipophilen chlorierten Kohlenwasserstoffen (HCB, DDT, PCB) waren die Konzentrationen sogar erheblich höher.

4.3.6.2 PFC-Gehalte der Sedimente

Oberflächensedimente wurden im Jahr 2004 in der Deutschen Bucht auf insgesamt 9 Stationen beprobt. In allen Proben konnten PFC nachgewiesen werden. An den meisten Stationen wies PFOS die höchste Konzentration auf (Max.: 2,45 µg/kg TM).

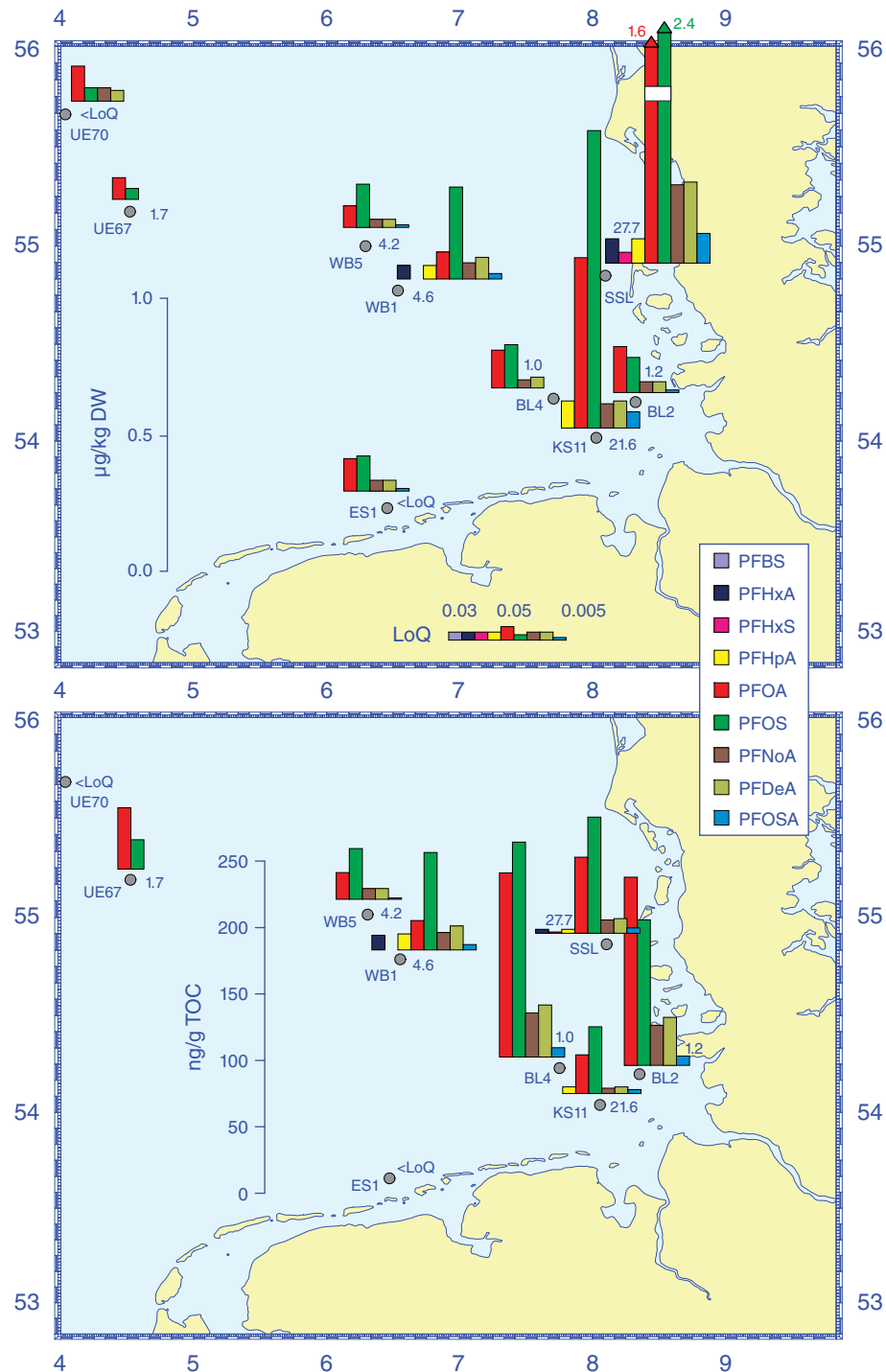


Abb. 4-41: PFC-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2004.

Fig. 4-41: PFC concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2004.

Die höchsten Werte bezogen auf Trockenmasse wurden auf schlickreichen Stationen im Einflussbereich der Elbe beobachtet, was einen starken Einfluss von Sedimentei-genschaften wie z. B. dem TOC-Gehalt oder Feinkornanteil nahe legt (Abb. 4-41).

Die Konzentrationen von PFOS in Sedimenten lagen im Bereich 0,02 – 2,4 µg/kg TM, die von PFOA im Bereich 0,06 – 1,57 µg/kg TM; sie befinden sich damit in der gleichen Größenordnung wie die der klassischen, lipophilen Schadstoffe DDD, PCB oder HCB. Die Konzentrationen der übrigen PFC lagen meist deutlich niedriger und damit in der Größenordnung mittelpolarer Stoffe wie z. B. der HCH-Isomeren. PFOS weist eine höhere Affinität zu Sedimenten auf.

4.3.6.3 Zeitliche Trends

Da die Messungen erst im Jahr 2003 begannen, ist die Untersuchung zeitlicher Trends sehr limitiert. Als Alternative wurde daher ein segmentierter Sedimentkern untersucht, um anhand der abgelagerten Schichten retrospektiv Aussagen zur zeitlichen Belastung zu erhalten. Für die Untersuchungen wurde ein Kern aus dem Skagerrak verwendet, da dieses Gebiet im Gegensatz zur Deutschen Bucht eine recht ungestörte Sedimentation aufweist. Die Konzentrationsverteilung der Schichten ist in Abb. 4-42 gezeigt. Um einen Vergleich mit klassischen Schadstoffen zu ermöglichen, wurden neben PFC auch CKW untersucht. Der glatte Verlauf der Konzentrationskurven gegenüber der Beprobungstiefe bestätigt die erwartete, ungestörte Sedimentation. Bemerkenswert sind die völlig unterschiedlichen Verläufe der Konzentrationskurven der PFC und der klassischen Beispiele DDD, CB153 und HCB. Während letztere verschiedene Maxima in verschiedenen Tiefen aufzeigen, zeigen die beiden PFC – PFOA und PFOS – kontinuierliche Anstiege bis zur obersten Schicht – also bis zur Gegenwart.

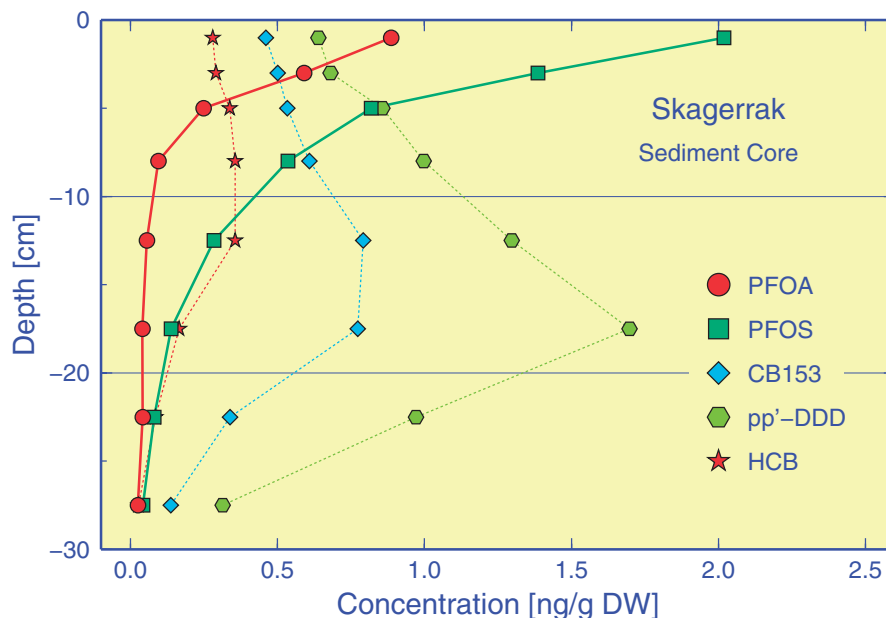


Abb. 4-42: PFOA und PFOS-Konzentrationen in einem Sedimentkern aus dem Skagerrak (57° 48' N, 8° 0' E) vom August 2005 im Vergleich zu CB153, pp'-DDD und HCB.

Fig. 4-42: PFOA and PFOS concentrations in a sediment core of the Skagerrak (57° 48' N, 8° 0' E) from August 2005 in comparison to CB153, pp'-DDD and HCB.

4.3.7 Zusammenfassung

Erwartungsgemäß ergaben sich auch in den Jahren 2006 und 2007 für die verschiedenen organischen Schadstoffe unterschiedliche räumliche Verteilungen und zeitliche Tendenzen. 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 hingen die Konzentrationen stark von den Schwebstoffgehalten der Proben ab.

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

Für die meisten Chlorkohlenwasserstoffe lassen sich aufgrund hoher Konzentrationschwankungen im Meerwasser und kurzer Beobachtungszeiten keine robusten Trends angeben. Die Konzentrationen der Hexachlorcyclohexan-Isomere α - und γ -HCH sind hingegen im Zeitraum 1989 – 2007 exponentiell zurückgegangen. Die Gehalte an α -HCH halbierten sich in der Deutschen Bucht alle 4 Jahre. Die γ -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 α -, als auch γ -HCH liegen die Konzentrationen inzwischen weit unter 0,5 ng/L. Im von der Elbfahne beeinflussten Seegebiet vor der nordfriesischen Küste war der langfristige Abwärtstrend von α -HCH bereits um die Jahrtausendwende in eine Seitwärtsbewegung übergegangen. In den beiden Jahren des Berichtszeitraums ist hingegen wieder eine Tendenz zur weiteren Reduktion zu beobachten.

Die höchsten Schadstoffkonzentrationen werden in der Deutschen Bucht nicht mehr für klassische, lipophile Schadstoffe beobachtet, sondern für ›moderne‹, eher polare und persistente Pestizide. Aufgrund dieser Eigenschaften verhalten sich diese Stoffe relativ ›konservativ‹, so dass meist recht gute inverse Korrelationen zwischen Stoffkonzentration und Salzgehalt gelten, welche die großen, in die südliche Nordsee entwässernden Flüsse als Haupteintragsquellen ausweisen. Die Konzentrationen der polaren Pestizide unterlagen auch in den Jahren 2006 und 2007 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. Die Konzentrationen aller untersuchten Verbindungen unterlagen im Sediment hohen Schwankungen, die sich auch bei Normalisierung der Konzentrationen auf organischen Kohlenstoff (TOC) nicht hinreichend reduzieren ließen, so dass – auch wegen des kurzen Überwachungszeitraums von nur 12 Jahren – robuste Trends nicht festgestellt werden konnten.

Am Beispiel einer neuen Schadstoffklasse – den perfluorierten Tensiden – konnte gezeigt werden, dass anhand ungestörter Sedimentkerne aus Sedimentationsgebieten retrospektiv Aussagen über Langzeittrends möglich sind.

4.4 Metalle

<•> S. Schmolke

4.4.1	Einführung	... 232
4.4.2	Bewertungskriterien	... 234
4.4.3	Oberflächenwasser	... 238
4.4.4	Sediment	... 252
4.4.5	Zusammenfassung	... 261

4.4.1 Einführung

Metalle kommen natürlich in der Umwelt vor. Durch Verwitterung, Vulkanismus und Ausgasungen werden sie im geochemischen Kreislauf mobilisiert. Die natürlichen Elementgehalte in den verschiedenen Umweltkompartimenten werden als Hintergrundwerte bezeichnet. Der Nachweis von Metallen in der Umwelt ist somit auf keinen Fall zwangsläufig als Verschmutzung zu werten. Es gibt zahlreiche essenzielle Elemente wie Eisen 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 Schlüsselprozesse 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 vari-

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

Quecksilber zählt zu den gefährlichsten Umweltgiften. Es bioakkumuliert durch die gesamte aquatische Nahrungskette. Seit der katastrophalen Methylquecksilbervergiftung der Bevölkerung in Minamata (Japan), ausgelöst durch den Konsum von quecksilberkontaminiertem 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 flüchtig vor und ist durch einen relativ hohen Dampfdruck gekennzeichnet. Gleichzeitig ist Quecksilber in der Atmosphäre mit einer durchschnittlichen Verweilzeit von einem Jahr sehr reaktionsträge. Folglich werden regionale Quecksilberemissionen über die Atmosphäre global verteilt. Aus der Atmosphäre wird es in elementarer und in reaktiver Form überwiegend durch Niederschläge in das Meer eingetragen.

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

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

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

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

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

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

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

(Fortsetzung ...)

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

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

ieren 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.

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, Nickel, Quecksilber und Zink gerichtet.

Es folgen separate Darstellungen und Bewertungen der Metallbelastungssituation im Wasserkörper und im Sediment, die die räumlichen Verteilungsmuster, Belastungsschwerpunkte und -ursachen sowie die zeitliche Entwicklung der Metallgehalte abdecken.

4.4.2 Bewertungskriterien

Bezugspunkt zur Bewertung der im Untersuchungsgebiet beobachteten Elementkonzentrationen sind für die Nordsee bzw. Deutsche Bucht angenommene Hintergrundkonzentrationen. Synthetische Substanzen kommen in der naturbelassenen Umwelt nicht vor; deren Hintergrundkonzentration ist demzufolge gleich Null. Metalle sind dagegen natürliche Bestandteile der Umwelt mit einer von Null verschiedenen Hintergrundkonzentration. Um sie zu ermitteln, werden im Wasser und Sediment unterschiedliche Strategien verfolgt. Hintergrundkonzentrationen des Wasserkörpers werden in der Regel aus Proben entlegener, durch menschliche Aktivität unbeeinflusster, Gebiete ermittelt. Dagegen werden Hintergrundwerte des Sediments häufig aus Sedimentkernproben bestimmt. Hier werden tiefer liegende, ältere, idealerweise nicht belastete Sedimenthorizonte zu deren Ermittlung verwendet.

Neben den Hintergrundkonzentrationen werden auch ökotoxikologisch begründete Bewertungskriterien verwendet. Diese bewerten nicht das Verhältnis von belasteter zu unbelasteter Umwelt, sondern das Auftreten von negativen Effekten auf die belebte Umwelt, die durch Schadstoffexpositionen verursacht werden können. Hierzu werden unterschiedliche Testorganismen den Schadstoffen ausgesetzt und entstehende Effekte (z. B. sinkende Reproduktionsfähigkeit oder steigende Mutationsraten) untersucht. Bewertungskriterien zur chronischen Exposition geben maximale Schadstoffexpositionen an, bei denen trotz Langzeitbelastung keine negativen Effekte zu erwarten sind. Diese Werte sind grundsätzlich niedriger als die Bewertungskriterien für eine maximale Kurzzeitbelastung. Wichtig ist allerdings darauf hinzuweisen, dass für die Ableitung der vielen auf dem Markt befindlichen ökotoxikologischen (Effekt-) Bewertungskriterien sehr unterschiedliche Testsysteme und Ableitungsstrategien eingesetzt wurden. Bewertungskriterien unterschiedlichen Ursprungs sind daher nicht zwangsläufig direkt miteinander vergleichbar. Insbesondere für die Bewertung der marinen Umwelt besteht hier weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf.

Während der Test der Umweltbelastung durch Schadstoffe gegen die Hintergrundwerte dazu dienen kann zu prüfen, ob die Ziele der regionalen Meeresschutzkonvention (OSPAR) erreicht wurden (›Concentrations are close to background or Zero‹), dient der Test gegen ökologisch begründete Effektgrenzwerte eher der Entscheidung, ob ein guter Umweltzustand erreicht wurde oder nicht, was eine grundlegende Anforderung der europäischen Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL) ist.

4.4.2.1 Wasser

Zur Bewertung der Metallgehalte im Wasserkörper stehen Bewertungskriterien der OSPAR-Meeresschutzkonvention, der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der US Environmental Protection Agency (US EPA) zur Verfügung. Alle Richtwerte für Hintergrundkonzentration (1) sowie ökotoxikologische Bewertungskriterien (2 bis 4) sind in *Tab. 4-4* zusammengefasst.

- 1) **OSPAR BRC** (Background Reference Concentration, OSPAR 1997A/B, OSPAR 2005): Die angegebenen BRC-Werte basieren auf Messungen in unbelasteten Gebieten der OSPAR-Region ›Northern North Sea‹.
- 2) **WRRL AA-EQS** (Annual Average Concentration Environmental Quality Standard; EU 2008) Umweltqualitätsstandard zur chronischen Belastung von Küstengewässern.
- 3) **WRRL MAC-EQS** (Maximum Acceptable Concentration Environmental Quality Standard; EU 2008). Nicht zu überschreitende (kurzfristige) Maximalbelastung. (Die WRRL gibt keine EQS für die Metalle Kupfer und Zink an. Aus diesem Grund sind von der Ableitung her ähnliche Standards der US EPA angegeben.)
- 4) **US EPA WQS** (Water Quality Standards; US EPA 2010). Hierbei handelt es sich um Kriterien zur Bewertung der chronischen Belastung von Salzwasser-ökosystemen.

Der Vergleich der ökotoxikologisch basierten Bewertungskriterien von WRRL und US EPA zeigt eine recht gute Übereinstimmung beim Blei, jedoch große Unterschiede bei der Bewertung der Elemente Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Zink und Nickel. Diese Unterschiede von über einer Größenordnung in beide Richtungen – Cadmium wird von der WRRL kritischer bewertet, Nickel von der US EPA – ist auf die Verwendung unter-

#	CRITERIA	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1	BRC | OSPAR	8 – 25	50 – 90	10 – 20	0.2 – 0.5	250 – 450	200 – 250
2	AA-EQS | WFD	200	—	7200	50	—	20000
3	MAC-EQS | WFD	450	—	—	70	—	—
4	WQS | US EPA	8800	3100	8100	940	8100	8200

1 Background Reference Concentration, based on contaminant levels in remote region samples of the OSPAR convention area.

2 Annual Average Concentration Environmental Quality Standard | Water Framework Directive. Assessment criteria to provide protection against long-term exposure.

3 Maximum Acceptable Concentration Environmental Quality Standard | Water Framework Directive. Assessment criteria to protect against short-term exposure.

4 Water Quality Standard | US Environmental Protection Agency. Effect-based assessment criteria to assess salt water ecosystems.

Tab. 4-4: Kriterien (ng/L) zur Bewertung der Metallgehalte in der Wassersäule. EU Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), OSPAR Konvention zum Schutz des Nord-Ost-Atlantik, US Environmental Protection Agency (US EPA).

Table 4-4: Assessment criteria (ng/L) metals in water. EU Water Framework Directive (EU WFD), OSPAR Convention, US Environmental Protection Agency (US EPA).

schiedlicher Testsysteme und Ableitungsstrategien zurückzuführen. An dieser Stelle besteht nach wie vor großer Forschungsbedarf, insbesondere bei der Entwicklung von passenden Bewertungssystemen für marine Ökosysteme. Wichtig ist, die Unsicherheit dieser Bewertungskriterien bei deren Anwendung zu berücksichtigen.

4.4.2.2 Sediment

Die Bewertung der Metallbelastung des Sedimentes ist weitgehend an das von OSPAR verwendete Bewertungsschema angelehnt (vgl. hierzu OSPAR 2009B). Alle verwendeten Werte sind in Tab. 4-5 zusammengefasst.

Hintergrundkonzentrationen:

- 1) **BSH BC** (Background Concentration) Hintergrundkonzentrationen, abgeleitet aus der Feinkornfraktion (Korngröße < 20 µm) tiefer gelegener, wenig belasteter Schichten von fünf Sedimentkernproben aus der Deutschen AWZ. Die BC-Spannweite ergibt sich aus der Spannweite der niedrigsten Gehalte aller bewerteten Einzelkerne.
- 2) **OSPAR BC** (Background Concentration, OSPAR 2005) Hintergrundkonzentrationen, die aus entlegenen und wenig beeinflussten Gebieten der OSPAR-Region abgeleitet wurden. Angegeben sind auf 5% Aluminiumgehalt normierte Werte. (Mit der Normierung wird eine weitgehende Vergleichbarkeit zwischen Messwerten aus der nicht fraktionierten Sedimentprobe und Messungen in der Feinkornfraktion erreicht, vgl. hierzu OSPAR 2002.)
- 3) **OSPAR BAC** (Background Assessment Concentration, OSPAR 2005) Die BAC-Werte wurden als Hilfsgrößen eingeführt. Mit ihrer Hilfe wird im OSPAR-Assessmentprozess bewertet, ob Messwerte nahe oder gleich der Hintergrundkonzentration sind. Der BAC-Wert berücksichtigt hierbei die Präzision der Bestimmungsmethoden, die im OSPAR-Monitoring eingesetzt werden, er stellt also keine Hintergrundkonzentration im eigentlichen Sinne dar.

Ökotoxikologisch basiertes Effekt-Bewertungskriterium:

- 4) **NOAA ERL** (Effect Range Low, der US National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA 1999) Aus biologischen Effektdaten abgeleitetes numerisches Qualitätskriterium aus den ›NOAA Sediment Quality Guidelines‹. Er stellt eine Schadstoffkonzentration dar, unterhalb derer das Eintreten von negativen Effekten auf die belebte Natur nicht zu erwarten ist. Er wurde aus einer Reihe von Expositionsuntersuchungen mit unterschiedlichen Testsystemen abgeleitet und als der Wert festgelegt, unterhalb dem lediglich 10% der Systeme einen Effekt anzeigen. Hier ist nur der Wert für Salzwassersysteme angegeben. Begleitend zu den veröffentlichten Werten wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um Informationswerte und nicht um Grenzwerte handelt.

#	CRITERIA	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1	BSH BC	0.08 – 0.26	16 – 29	0.02 – 0.04		12 – 38	81 – 116
2	OSPAR BC	0.2	20	0.05	30	25.0	90
3	OSPAR BAC	0.31	27	0.07	36	38.0	122
4	NOAA ERL	1.2	34	0.15	20.9	46.7	150

1 **BSH** regional **B**ackground **C**oncentration. Calculated from lower and undisturbed sediment horizons of 5 German Bight sediment cores (< 20µm fraction).

2 **OSPAR** **B**ackground **C**oncentration. Based on contaminant concentration measured in remote region samples of the OSPAR convention area (normalized to 5 % Al).

3 **OSPAR** **B**ackground **A**ssessment **C**oncentration. Assessment criteria, which integrate the measurement uncertainty of the OSPAR monitoring program and the **BC**.

4 US **NOAA** **E**ffect **R**ange **L**ow. Bioeffect-based environmental assess. criteria. Contaminant levels below ERL supposedly cause biological effects in the marine environment at minor probability.

Tab. 4-5: Kriterien (mg/kg) zur Bewertung der Metallgehalte im marinen Sediment. Angegeben sind Hintergrundwerte (< 20 µm) in der deutschen AWZ (BSH BC-low, BSH BC-high), Hintergrundwerte aus der OSPAR Region (OSPAR BC, BAC, normiert auf 5 % Al) und ökologische (Effekt) Bewertungskriterien der US NOAA (NOAA ERL).

Table 4-5: Assessment criteria (mg/kg) metals in sediment. German Bight Background Values in sediment fines (BSH (< 20 µm) BC-low and BC-high), Background Concentration Values and Assessment Values (OSPAR, BC and BAC normalised to 5 % Al) and effect assessment criteria (NOAA ERL).

Die Ableitung der OSPAR- und der BSH-Hintergrundwerte für marine Sedimente unterscheidet sich deutlich. Während OSPAR-Proben aus der gesamten OSPAR-Region verwendet und nicht gesiebte Proben einbezieht, wurden die BSH-Hintergrundwerte aus der Feinkornfraktion von Kernen abgeleitet, die in der deutschen AWZ gezogen wurden. Vergleichbar werden die unterschiedlichen Werte nur durch die Normierung der OSPAR-Werte auf 5% Aluminium. So zeigt der Vergleich beider Bewertungssysteme trotz aller Unterschiede keine gravierenden Differenzen. Um einen direkten Vergleich der nicht auf den Aluminiumgehalt normierten aber in der Feinkornfraktion < 20 µm bestimmten BSH-Monitoringergebnisse mit den Hintergrundwerten zu ermöglichen und gleichzeitig den regionalen Bezug der Bewertungskriterien zu wahren, wurden in diesem Bericht die BSH-Hintergrundwerte anstelle der OSPAR-Werte verwendet.

Neben dem Test auf das Erreichen von Hintergrundwerten wird im OSPAR-Bewertungssystem geprüft, ob die Schadstoffgehalte im Sediment Ursache für negative chronische Effekte auf marine Spezies sein können. Zu diesem Zweck wurden von OSPAR eigene Umweltbewertungskriterien, so genannte ›Environmental Assessment Criteria‹ (EAC) entwickelt. Leider ist dieses Bewertungssystem nicht auf die Metallbelastung des Sedimentes anwendbar, da die EAC von Cadmium und Blei deutlich unter den Hintergrundwerten dieser Elemente liegen, was aus grundsätzlichen Überlegungen keine sinnvolle Bewertung zulässt. OSPAR hat sich also entschieden für die Bewertung der Metallbelastung im Sediment (auch die der PAH) ein anderes, von der US NOAA entwickeltes Bewertungssystem anzuwenden, die sog. ›Effect Range Low‹ (ERL) Werte (s. o.).

4.4.3 Oberflächenwasser

Über die vier Jahreszeiten verteilt wurden im Zeitraum von Januar 2006 bis November 2007 an 327 Stationen Meerwasserproben entnommen, um darin die Metallbelastung des Oberflächenwassers zu bestimmen. Im Jahr 2006 wurden die Überwachungsfahrten noch mit dem BSH-Forschungsschiff ›Gauss‹ durchgeführt, seit 2007 werden zu diesem Zweck Charterschiffe eingesetzt. Acht Reisen führten ausschließlich in die Deutsche Bucht, die gesamte Nordsee wurde nur einmal im Sommer 2006 beprobt (Gauss 463a; vgl. *Abb. 4-1* und *Tab. 4-1*, S. 169).

4.4.3.1 Gelöste und schwebstoffgebundene Metallgehalte

Metalle liegen im Wasserkörper gelöst und schwebstoffgebunden vor. Beide Kompartimente werden im BSH getrennt voneinander untersucht. Wasserproben werden direkt nach der Entnahme an Bord des Forschungsschiffes in einem Reinraumlaborcontainer durch Filtration über 0,4 µm Porenfilter in Schwebstoff und Filtrat getrennt. Im Filtrat nachgewiesene Metallgehalte werden als gelöst betrachtet, der Rest, der sich auf dem Filter anreichert, als schwebstoffgebunden. Die Differenzierung bei Partikelgrößen von 0,4 µm entspricht aktuellen wissenschaftlichen Gepflogenheiten, ist aber nicht mehr als eine Konvention. Zum Beispiel sind kolloidale Suspensionen (sehr kleine Partikel) ohne weiteres filtergängig und von ihren Eigenschaften nicht eindeutig dem Schwebstoff oder der gelösten Phase zuzuordnen.

Abb. 4-43 zeigt die Verteilung einiger Elemente zwischen schwebstoffgebundener und gelöster Fraktion. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der Metallgehalte in der gelösten Fraktion, bezogen auf den Gesamtmetallgehalt der Wasserproben, in einem Boxdiagramm. In die Statistik einbezogen sind alle Messungen, die im Zeitraum von 1999 bis 2005 jeweils im Winter (Januar – März) durchgeführt wurden. Jede Teilgrafik zeigt die Verhältnisse bei unterschiedlichen Salzgehalten – von Brackwasser (links oben) bis Meerwasser (rechts unten). Deutlich ist die in der Reihe $Fe > Pb > Mn > Zn > Ni > Cu > Cd$ abnehmende Affinität der Elemente zum Schwebstoff zu erkennen. Während im Meerwasser das Element Eisen nahezu vollständig am Schwebstoff gebunden vorliegt, wird Cadmium deutlich überwiegend gelöst nachgewiesen. Die Reihung der Elemente ist unabhängig vom Salzgehalt, die Ausprägung der gelösten Elementgehalte verschiebt sich jedoch mit zunehmenden Salzgehalten zu höheren Anteilen in der gelösten Fraktion. Mit zunehmender Entfernung von der Küste, also mit steigenden Salzgehalten, sinken die Schwebstoffgehalte in der Wassersäule. Damit nimmt der Anteil der für Adsorptionsprozesse verfügbaren Oberflächen ab und ein proportional wachsender Teil der Metallgehalte bleibt in Lösung. Besonders ausgeprägt ist diese

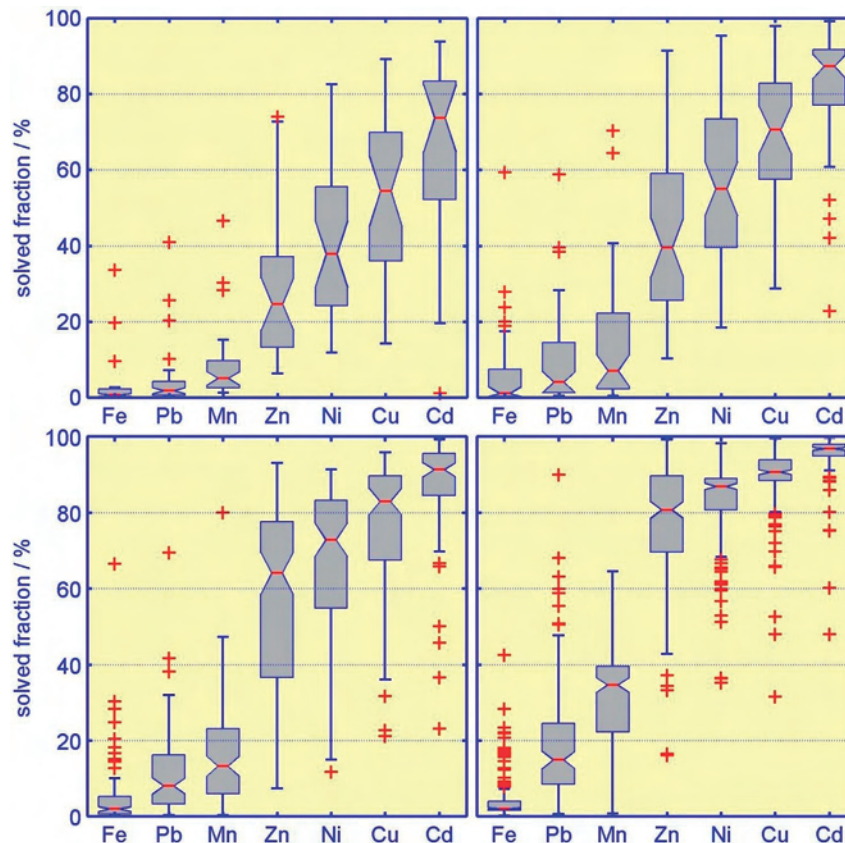


Abb. 4-43: Verteilungsstatistik der prozentualen Anteile der gelösten Fraktion an den Gesamtmetallgehalten in der Wassersäule, in einer Boxdarstellung¹. Jede Box stellt die Streuung aller Wintermesswerte (JFM) eines Elements zwischen 1999 und 2005 dar. Die vier Grafiken sind nach zunehmenden Salzgehalten differenziert; links oben: $S = 0 - 28$, r. o.: $28 - 30$, l. u.: $30 - 32$, r. u.: $32 - 34$.

Fig. 4-43: Distribution statistics of the percent fraction of dissolved to total metal concentrations in sea water as box and whisker plots. All boxstatistics are based on winter samples (JFM) from 1999 – 2005 and are separated in four figures by increasing salinity ranges (top left: $S = 0 - 28$, t. r.: $28 - 30$, b. l.: $30 - 32$, b. r.: $32 - 34$).

Abhängigkeit beim Zink, das bei Salzgehalten kleiner 28 zu knapp 30% gelöst vorliegt, bei hohen Salzgehalten zwischen 32 und 34 aber zu 80%.

Die Schwebstoffkonzentration hat einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtmetallgehalten in der Wassersäule. Naturgemäß gilt dies besonders für die vorzugsweise an den Schwebstoff gebundenen Elemente wie Eisen oder Blei. Da der Schwebstoffgehalt vor allem in flachen Meeren wie der Nordsee stark von Faktoren abhängt, die nicht direkt mit der Stärke und Struktur von Quellen gekoppelt sind (Resuspension von Sedimenten, biologische Aktivität), ist ein direkter Vergleich der Gesamtmetallgehalten aus Wasserkörpern unterschiedlicher Regionen mit dem Ziel, genau darüber Informationen zu erhalten, problematisch. Dies ist das wesentliche Argument für die getrennte Bestimmung der Metallgehalten in Schwebstoff und Wasser.

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.

4.4.3.2 Korrelation zwischen Salzgehalt und gelösten Metallgehalten

Im gesamten Nordseeraum mischen sich atlantische Wassermassen mit kontinentalen Süßwassereinströmen, die sich signifikant im Salzgehalt unterscheiden. Bedingt durch komplexe Einflussgrößen (Strömungsverhältnisse im Wasser und der Atmosphäre, Zu- und Abfluss von Atlantikwasser sowie Abflussmengen aus den großen kontinentalen Flusseinzugsgebieten) entwickeln sich in der Nordsee typische räumliche Salzgehaltsverteilungen. Nicht nur der Salzgehalt, sondern auch viele Spurenbestandteile sind im unverdünnten Meerwasser und den Süßwasserzuflüssen signifikant unterschiedlich angereichert. Typischerweise zeigen die Elemente, die vorwiegend aus kontinentalen Quellen in das Meer gespült werden, eine dem Salzgehalt gegenläufige räumliche Verteilung. Hierbei ist es zunächst unwichtig, ob es sich um primär anthropogen verursachte Emissionen handelt, oder ob natürliche Prozesse verantwortlich sind. Entlang dem Mischungsverhältnis von ozeanischem Wasser und Küstenwasser zeigt sich idealerweise ein linearer Konzentrationsgradient konservativer Spurenbestandteile. Dieser reinen Mischung überlagert sind andere Quell- und Senkenprozesse, wie atmosphärische Deposition, Mobilisierung durch Resuspension oder Gleichgewichtsverschiebungen zwischen gelöster und partikelgebundener Fraktion, bedingt durch biogeochemische Prozesse.

Die gelösten Gehalte einiger sich konservativ verhaltender Elemente zeigen eine ähnlich starke Korrelation mit dem Salzgehalt wie die Nährstoffe (s. Kap. 4.2.4.2, S. 184). Dies gilt vor allem für die gelösten Kupfer- und Nickelgehalte, aber mit Einschränkungen auch für die Cadmium- und Zinkgehalte. Abb. 4-44 fasst die Regressionsmodelle zusammen, die für Elementgehalte im filtrierten Wasser, in Abhängigkeit vom Salzgehalt für die Überwachungsfahrt im Januar 2006 gerechnet wurden. Die Elemente Nickel und Kupfer zeigen während dieser Aufnahme die beste Korrelation mit dem Salzgehalt. Interessant sind hier die bei hohen Salzgehalten von der Regressionsgeraden zu niedrigeren Konzentrationen abweichenden Messwerte. Hierbei handelt es sich um eine über die Jahre und Jahreszeiten systematische Abweichung. Hieraus ergibt sich ein deutlicher Hinweis auf küstenferne Wasserkörper, die nicht durch das Mischungsverhältnis zwischen dem Küstenwasser der Deutschen Bucht und dem Wasser atlantischen Ursprungs dominiert werden. Auch Cadmium zeigt ein ähnliches Verhalten, durch das insgesamt sehr niedrige Konzentrationsniveau allerdings weniger deutlich. Im Gegensatz hierzu ist die Korrelation der Elemente Quecksilber, Blei und Zink mit dem Salzgehalt schwächer ausgeprägt oder gar nicht vorhanden. Im Unterschied zu Cu, Ni und Cd sind diese Elemente durch eine höhere Affinität zum Schwebstoff ausgezeichnet (vgl. a. Abb. 4-43). Ihre z. T. vom Salzgehalt unabhängigen hohen Gehalte können auf filtergängiges kolloidales Material zurückzuführen sein, das sich methodenbedingt in der gelösten Fraktion wiederfindet. Insbesondere beim Zink können aber auch Kontaminationsprobleme bei der Probenahme zu deutlichen Abweichungen führen.

Eine gute, über die Jahreszeiten stabile, Korrelation der Elementgehalte mit dem Salzgehalt wäre die Voraussetzung, um ihn als Normierungsparameter (siehe auch Nährstoffkapitel) zu verwenden. Damit könnten die Metallgehalte aus unterschiedlichen Wasserkörpern, die unterschiedliche Mischungsverhältnisse zwischen Süßwasserzufluss und Wasser ozeanischen Ursprungs aufweisen, miteinander vergleichbar gemacht und damit die jahresübergreifenden Trend- und Statusanalysen auf eine breitere Datenbasis gestellt werden.

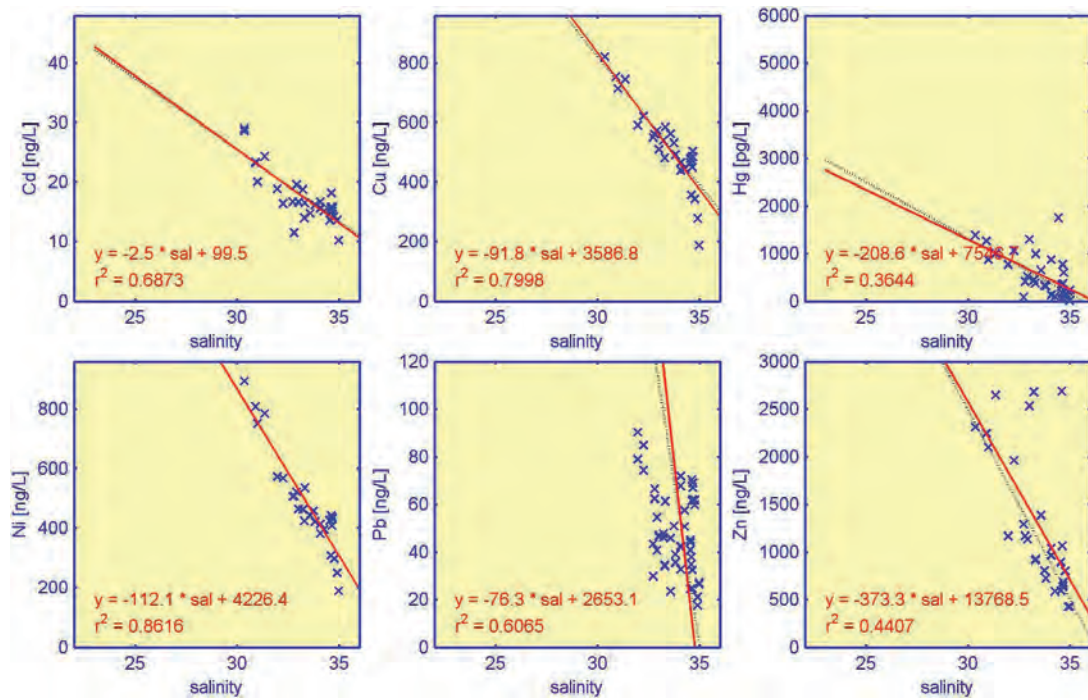


Abb. 4-44: Korrelation der gelöst vorliegenden Elementgehalte mit dem Salzgehalt im Januar 2006. Es wurden nur Proben mit Salzgehalten größer 20 berücksichtigt; Rote Linie: Regressionsgerade (kleinste Fehlerquadrate) und Regressionsgleichung; Schwarz gestrichelte Linie: robuste Regression (gewichtete Residuen).

Fig. 4-44: Scatter plots of solved metal concentrations during January 2006 versus salinity. Only samples of salinity greater than 20 are included. Red line and equation: Linear regression (least squares); Black dashed line: Robust regression (weighted residuals).

Um die Belastbarkeit des Salzgehaltes als Normierungsgröße zu untersuchen, wurden die Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn Messungen aller Seereisen im Zeitraum von 2000 bis 2009 einzeln mit Regressionsmodellen untersucht. In Abb. 4-45 sind die Verteilungsstatistiken der ermittelten Regressionsparameter (Steigung und Achsabschnitt) sowie das Bestimmtheitsmaß (R^2) als Qualitätsindikator in Boxdarstellungen zusammengefasst. In jeder Einzelgrafik wird weiterhin die jahreszeitliche Variation pro Quartal differenziert. Die gelösten Quecksilbergehalte und Bleigehalte zeigten keine bewertbare Korrelation mit dem Salzgehalt, nur in Ausnahmen wurden Regressionsmodelle mit $R^2 > 0,3$ ermittelt, diese Elemente wurden daher nicht in die Darstellung aufgenommen.

Gelöste Kupfer- und Nickelgehalte korrelieren über das ganze Jahr hinweg recht gut mit dem Salzgehalt (Mediane $R^2 \sim 0,9$). In allen vier Jahreszeiten liefern zwischen 70% und 100% der untersuchten Reisen Korrelationen mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,8$. Cadmium und Zink sind dagegen nur im 1. Quartal befriedigend korreliert ($R^2 > 0,6$ (Median)). Über alle vier Quartale des Jahres betrachtet, zeigt das Verhältnis von Salz- und Kupfergehalt einen deutlichen Jahresgang. Im dritten Quartal ist der Kupfer/Salz-Gradient am steilsten (Maximum Achsabschnitt, Minimum Steigung). Nickel zeigt keinen vergleichbaren Zusammenhang.

Die Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Salzgehalt und gelöst vorliegenden Metallgehalten ergibt ein differenziertes Bild. Vor allem die Elemente mit einer relativ hohen Affinität zum Schwebstoff, in der vorliegenden Studie Blei und Quecksilber, zei-

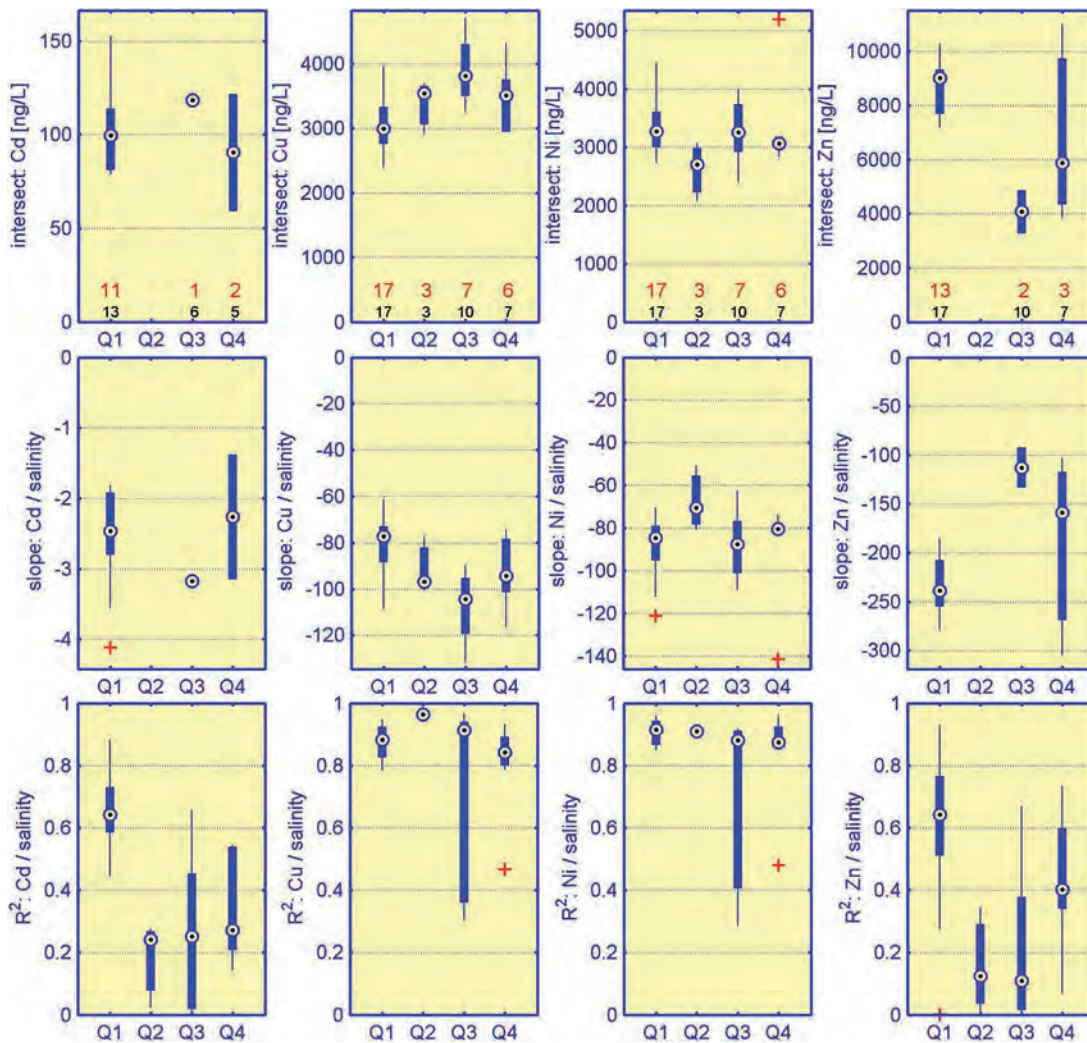


Abb. 4-45: Regressionsanalyse der Elementgehalte versus Salzgehalt im Zeitraum 2000 – 2009. Verteilungsstatistik der Regressionsmodellparameter und Bestimmtheitsmaße aller untersuchten Reisen als Boxdarstellung ($y = ax + b$; Schnittpunkt (b), Steigung (a), Bestimmtheitsmaß (R^2)). (Median, 25 %, 75 % Quantil, Minimum, Maximum, Extremwerte). Oben: zusätzlich die Gesamtzahl der pro Quartal untersuchten Reisen (schwarz) und die Anzahl der Reisen mit einer Element/Salzgehalt-Korrelation ($R^2 \geq 0,5$) (rot). Die Diagramme zu Schnittpunkt und Steigung zeigen lediglich Werte aus Regressionsmodellen mit einem Bestimmtheitsmaß $\geq 0,5$.

Fig. 4-45: Linear regression of solved metal concentration versus salinity for the period 2000 to 2009. Distribution statistics of cruise-wise computed linear regression model parameters (intercept, slope, coefficient of determination R^2) in a box and whisker representation (median, 25 %, 75 % quantile, min, max, outliers). Each quarter of a year is represented by an individual box. Top row: red figures give the total number of included cruises, black figures the number of cruises with sufficient correlation of solved element concentration and salinity ($R^2 \geq 0.5$). Intercept and slope figures aggregate only regression with $R^2 \geq 0.5$.

gen in der Deutschen Bucht nur einen sehr geringen oder keinen Zusammenhang mit dem Salzgehalt. Alle anderen untersuchten Elemente (Cd, Cu, Ni, Zn) sind wenigstens im ersten Quartal des Jahres deutlich mit ihm korreliert. In der Reihe Ni > Cu > Cd > Zn > Pb > Hg nimmt die Qualität der Korrelation ab. Allerdings zeigen die recht gut mit dem Salzgehalt korrelierten Elemente Ni, Cu und Cd vor allem zu

hohen Salzgehalten hin (> 34) Abweichungen von der Regressionsgeraden, erst zu leicht höheren Elementgehalten und dann, bei sehr hohen Salzgehalten, zu deutlich niedrigeren. Die Nutzung des Salzgehalts als Normierungsgröße macht nur in Salzgebhaltsbereichen Sinn, in denen in der Deutschen Bucht der Elementgehalt durch das Mischungsverhältnis von lokalem Küstenwasser und Wasser der zentralen Nordsee dominiert ist (28 – 34). Sinnvolle Normierungsergebnisse sind für die Elemente Ni, Cu, Cd und Zn im ersten Quartal des Jahres zu erwarten, im restlichen Jahr liefern nur Cu und Nickel überwiegend gute Ergebnisse.

4.4.3.3 Saisonalität der gelösten Metallgehalte

Ähnlich wie die Nährstoffe zeigen einige Metalle in der gelösten Fraktion jahreszeitlich periodische Konzentrationsschwankungen. Die Ursachen hierfür können unterschiedlicher Natur sein. Das Spektrum der Einflussgrößen geht von rein physikalischen Prozessen, wie der Resuspension vom Meeresboden durch Sturmereignisse, bis hin zu Abhängigkeiten von biologischen Wachstums- und Remineralisierungszyklen. *Abb. 4-46* fasst die Messungen der Metallgehalte in küstennahem Wasser mit Salzgehalten zwischen 30 und 32 im Zeitraum von 2000 bis 2009 zusammen. Alle Messwerte sind monatsweise gruppiert und in einzelnen Boxstatistiken zusammengefasst. Die anschließende Diskussion der Jahresgänge bezieht sich auf diesen relativ küstennahen Wasserkörper.

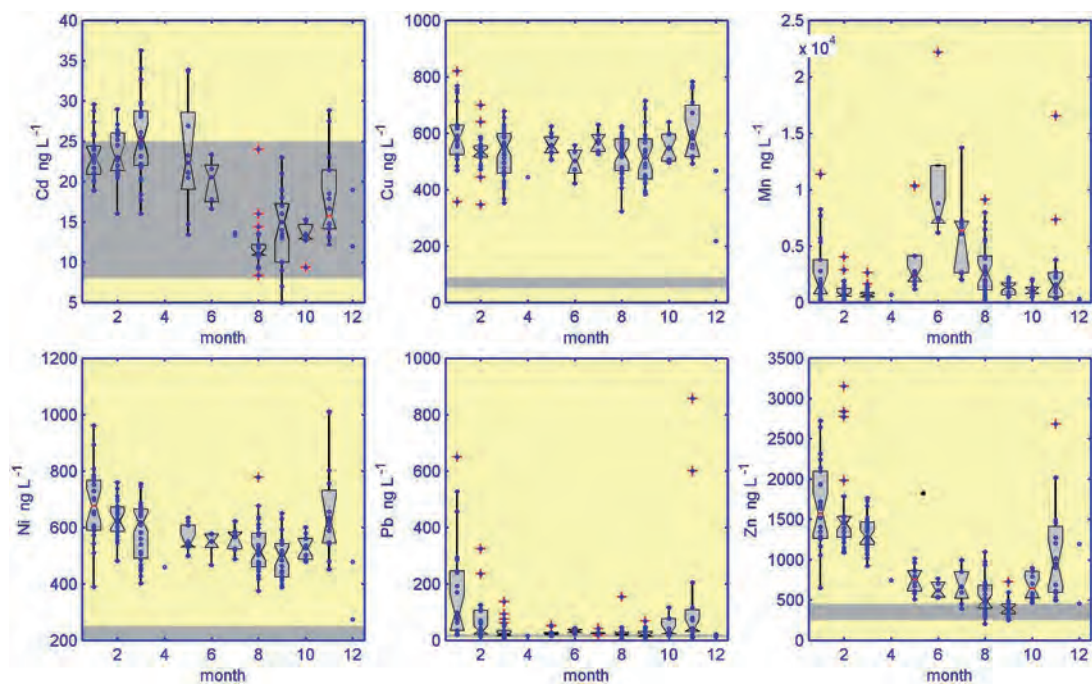


Abb. 4-46: Jahresgänge (Boxdarstellung) der gelösten Cd, Cu, Mn, Ni, Pb und Zn-Gehalte im küstennahen Wasser (30 – 32). Unterlegter grauer Balken entspricht den Hintergrundkonzentrationen.

Fig. 4-46: Seasonal cycle of solved element concentrations (Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) in coastal surface water (salinity 30 – 32). Grey bar represents background reference concentration (BRC).

Die Elemente Cadmium, Zink und in abgeschwächter Form auch Nickel weisen im ersten Quartal des Jahres ein Konzentrationsmaximum auf, das sich bis in den Som-

mer hinein verliert. Im weiteren jahreszeitlichen Verlauf wird in den Sommermonaten bis in den Herbst hinein ein Minimum nachgewiesen. Anschließend, im Spätherbst bis in den Winter hinein, nehmen die Konzentrationen dann wieder deutlich zu. Dieses jahreszeitliche Profil entspricht in groben Zügen dem biologischen Wachstums- und Remineralisierungszyklus, wie er auch maßgeblich für die im Meerwasser gelösten Nährstoffgehalte vorliegt. Der Jahresgang der Zinkgehalte erklärt sich aus seiner essenziellen Eigenschaft und seiner damit verbundenen Integration in den biologisch gesteuerten Stoffumsatz der Deutschen Bucht. Während der größten biologischen Aktivität sind die Gehalte gering, nach der abgeschlossenen Remineralisierung am höchsten. Cadmium und Nickel gelten dagegen nicht als essenzielle Elemente. Ihre direkte Beteiligung am biologischen Wachstum scheint damit nicht der Grund für einen vergleichbaren Jahresgang zu sein. Eventuell könnten Adsorptionsprozesse an, im Sommer üppiger vorhandenen, Schwebstoffmengen zu einer Abnahme der gelöst vorliegenden Gehalte führen.

Blei zeigt vor allem in den Spätherbst- und Wintermonaten erhöhte Gehalte sowie eine deutliche Zunahme der Messwertstreuung, dagegen werden im Frühling anders als beim Cadmium und Zink keine erhöhten Werte mehr gemessen. Die zum Cadmium, Zink und Nickel deutlich unterschiedliche Charakteristik des Jahresganges deutet auf andere, die jahreszeitliche Konzentrationsentwicklung dominierende Faktoren hin. Als Ursache wird resuspendiertes kolloidales Material gesehen, das während der stürmischen Wintermonate vermehrt in die Wassersäule gelangt und dort bis ins Oberflächenwasser transportiert wird. Dieses Material ist fein genug, um bei der Trennung von gelöster und schwebstoffgebundener Fraktion mit 0,45 µm Porenfiltern den Filter zu passieren und in das Filtrat zu gelangen. Für diese Hypothese spricht auch die starke Tendenz des Bleis sich am Schwebstoff anzureichern (vgl. *Abb. 4-43, S. 239*).

Einen Sonderfall bildet der Jahresgang der gelösten Mangankonzentrationen. Ähnlich wie Blei liegt Mangan im Frühjahr überwiegend partikelgebunden vor und zeigt, ähnlich wie Blei, in den Wintermonaten erhöhte Konzentrationen. Bemerkenswert ist aber die deutliche Zunahme vorliegender Mangankonzentrationen während der Sommermonate. Die Manganspeziation in der Wassersäule zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt. Mit abnehmendem Sauerstoffgehalt verschiebt sich das Gleichgewicht vom wasserunlöslichen Mn^{4+} (z. B. MnO_2) zum gelöst vorliegenden Mn^{2+} . Reduzierte Sauerstoffgehalte in der sommerlichen Wassersäule der Deutschen Bucht können die Ursache für die beobachteten erhöhten, gelöst vorliegenden Mangan Gehalte während der Jahresmitte sein.

Kupfer zeigt im Wasserkörper mit Salzgehalten zwischen 30 und 32 keine signifikant jahreszeitlich abhängige Konzentration, Quecksilber verhält sich eher ähnlich wie Cadmium, ist aber durch eine hohe Streuung der Messwerte überlagert, die eine eindeutige Zuordnung des Jahresganges zu einem bestimmten Typus verhindert.

Grundsätzlich zeigen die Monitoringergebnisse eine abnehmende saisonale Abhängigkeit der gelösten Metallgehalte mit zunehmenden Salz- und abnehmenden Schwebstoffgehalten.

4.4.3.4 Räumliche Verteilung im Oberflächenwasser der Dt. Bucht

In *Kap. 4.4.3.2, S. 240* und *Kap. 4.4.3.3, S. 243* wurde auf die saisonale Abhängigkeit der Metallgehalte im Wasser eingegangen. Um im jährlichen Vergleich der räumlichen Verteilungsmuster und bei der Analyse langjähriger Zeitreihen die Anzahl der Einflussfaktoren möglichst gering zu halten, werden in den folgenden, das Meerwasser

betreffenden, Kapiteln nur Messkampagnen aus dem ersten Quartal des Jahres berücksichtigt, also der Zeit geringster biologischer Aktivität.

Die Bedeutung der Süßwasserzuflüsse als Belastungsquelle der Deutschen Bucht zeigt sich u. a. in den räumlichen Konzentrationsverteilungen der gelösten Metallgehalte, welche in *Abb. 4-47* und *Abb. 4-48* für den Januar der Jahre 2006 und 2007 dargestellt sind. Bedingt durch das Orkantief ›Kyrill‹ (Höhepunkt 17./18. Januar) konnte 2007 nur ein Teil der Deutschen Bucht beprobt werden.

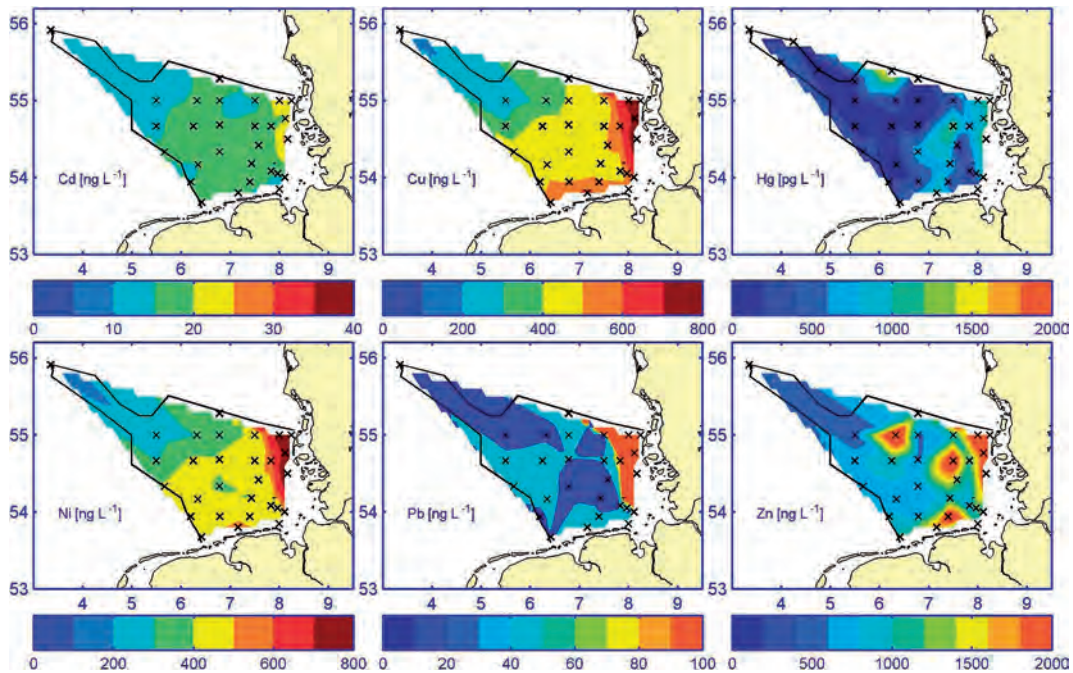


Abb. 4-47: Räumliche Elementverteilungen im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) im Januar 2006.

Fig. 4-47: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions in filtrated water in January 2006.

Vor allem überwiegend gelöst vorliegende Elemente (Cu, Ni, Cd) bilden einen deutlich ausgeprägten, von der Küste zur offenen See hin abnehmenden, Gradienten aus. Im Zeitraum der Probenahmen im Januar 2006 dominierten in der Deutschen Bucht zyklonale Strömungsverhältnisse (vgl. *Kap. 3.2.4, S. 125*). Die Strömung transportierte die Wassermassen von Westen in die Deutsche Bucht hinein und nach Norden aus ihr heraus. Entsprechend ist die Abflussfahne der Elbe, vom Mündungsbereich ausgehend, deutlich nach Norden hin ausgeprägt. In *Abb. 4-47* zeigt sich dies besonders deutlich durch die erhöhten Kupfer- und Nickelgehalte entlang der nordfriesischen Küste. Ebenso deutlich ist bei diesen Elementen der Beitrag der weiter westlich gelegenen Flusssysteme erkennbar. Die erhöhten Gehalte entlang der niedersächsischen Küste zeigen dies. Die hier deutlich flacheren, weit in die Deutsche Bucht hineinreichenden Gradienten zeigen jedoch, dass hier nicht allein die Abflüsse der Weser und Ems beitragen, sondern ebenso weiter westlich liegende Emissionen aus dem Rhein und anderen kontinentalen Flusssystemen, sowie direkte Oberflächenabflüsse. Die räumliche Struktur von Cadmium ist ähnlich, jedoch mit insgesamt deutlich flacheren Gradienten. Dies ist einerseits vor seinem insgesamt sehr niedrigen Konzentrationsniveau nahe den Hintergrundwerten zu bewerten, andererseits ist hierin ein Hinweis

darauf zu sehen, dass die Elbe für die Cadmiumbelastung der Deutschen Bucht eine deutlich weniger dominante Quelle ist, als es für Kupfer und Nickel der Fall ist. Blei, als ein Element mit starker Schwebstoffaffinität, gibt ebenfalls einen deutlichen Hinweis auf die Lage der Elbe-Abflussfahne. Sein Küsten-See-Konzentrationsgradient ist besonders stark ausgeprägt. Vermutlich trägt hierzu die Erfassung von resuspendiertem kolloidalen Sedimentmaterial in den flachen Küstenstreifen bei. Die räumliche Verteilung des Zinks hat Ähnlichkeiten mit der des Nickels und Kupfers, weist aber ähnlich starke Gradienten auf wie das Blei. Zink hat eine relativ große Affinität zum Schwebstoff, was mit dem Blei vergleichbar starke Konzentrationsgradienten erklären könnte. Anders als beim Blei werden vor der Emsmündung, entsprechend den dominierenden Strömungsverhältnissen etwas nach Osten versetzt, deutlich erhöhte Zink-Gehalte in den filtrierten Wasserproben nachgewiesen. Hier ist ein signifikanter Beitrag erkennbar. Auffällig sind weiterhin die in größerer Küstenentfernung befindlichen (55° N, $6^{\circ} 30'$ E), relativ unvermittelt auftretenden, erhöhten Zink-Gehalte. Eine Erklärung hierfür gibt es zurzeit nicht, jedoch werden in derselben Region immer wieder erhöhte Zinkwerte registriert. Die Gehalte an reaktivem Quecksilber im Oberflächenwasser der deutschen AWZ zeigen im Januar 2006 bei insgesamt niedrigem Niveau keine spezifischen Belastungsmuster.

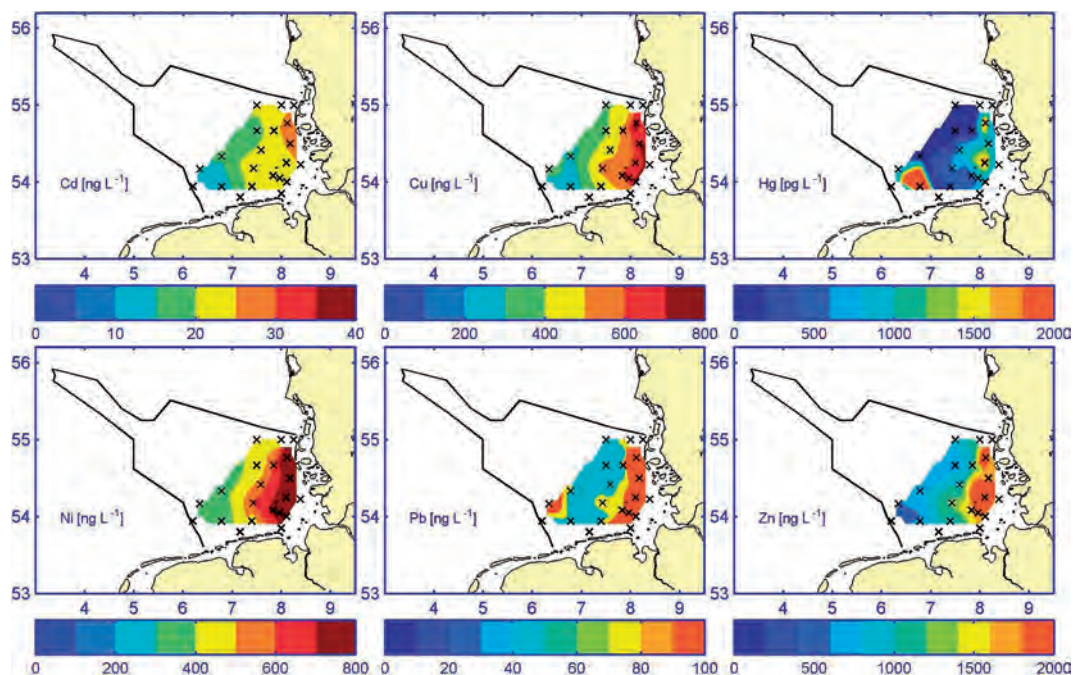


Abb. 4-48: Räumliche Elementverteilungen im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) im Januar 2007.

Fig. 4-48: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions in filtrated water in January 2007.

Im Januar 2007 dominierten nach Durchzug des Orkantiefs ›Kyrill‹ antizyklonale bzw. direktionale (SE-liche) Strömungsverhältnisse in der Deutschen Bucht (Tab. 3-2, S. 127). Das Wasser wurde von Norden bzw. Nordwesten in die Deutsche Bucht hineingedrückt und floss in Richtung Westen ab. Dies spiegelt sich in den räumlichen Elementverteilungen wieder. Es wurden erhöhte Kupfer-, Nickel- und abgeschwächt auch Cadmium-Gehalte westlich von Helgoland gemessen. Selbst die Blei-Gehal-

te, die westlich von Helgoland in der Regel unter 30 ng/L bleiben, waren mit knapp 80 ng/L deutlich erhöht. Das abfließende Elbewasser wurde durch die Wetterbedingungen zwischen dem 23. und 29. Januar 2007 in der inneren Deutschen Bucht aufgestaut und führte zu deutlich erhöhten Metallgehalten im Wasserkörper zwischen Elbemündung und Helgoland und darüber hinaus (Abb. 4-48).

4.4.3.5 Räumliche Verteilung im Oberflächenwasser der Nordsee

Die Ergebnisse der Spurenmetallmessungen im Probenfiltrat (gelöste Fraktion) sind in Abb. 4-49 zusammengefasst.

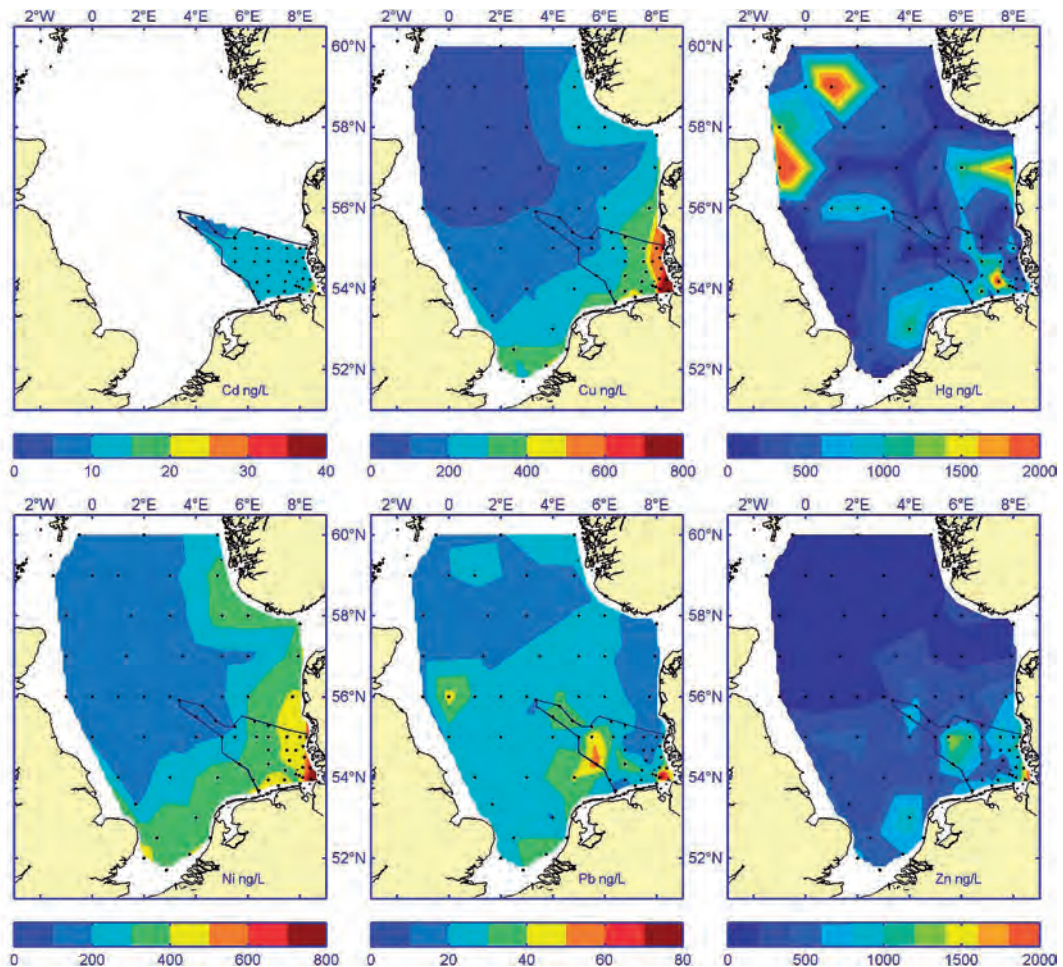


Abb. 4-49: Räumliche Struktur der gelösten Elementgehalte im filtrierten Oberflächenwasser im Sommer 2006.

Fig. 4-49: Spatial structure of solved element concentrations in near surface water during the summer survey 2006.

Cadmium-Messungen liegen nur aus der Deutschen Bucht vor. Die Sommeraufnahme 2006 zeigt eine typische räumliche Verteilungsstruktur, wie sie auch im Winter beobachtet wird, erwartungsgemäß bei insgesamt niedrigen Gehalten (vgl. Kap. 4.4.3.3, S. 243). Die räumliche Verteilung der Kupfer- und Nickelgehalte gleicht weitgehend der des Salzgehaltes (vgl. Kap. 3.6.2, S. 156). Leichte Unterschiede in den regionalen Konzentrationsausprägungen deuten auf Unterschiede der dominierenden Emissionsprofile hin. Beide Elemente zeigen invers zu den Salzgehalten erhöhte Gehalte

in der südlichen und östlichen Nordsee. Hierbei ist die Nickel-Verteilung durch einen weniger steilen Gradienten gekennzeichnet. Die 400 ng/L Ni-Linie reicht deutlich weiter in die mittlere Nordsee hinein, als dies für Kupfer der Fall ist. Auch vor der südenglischen und norwegischen Küste werden verglichen mit Kupfer höhere Nickelgehalte gemessen. Dagegen ist die nach Norden gerichtete Elbefahne vergleichsweise stärker durch das Element Kupfer ausgeprägt. Die räumliche Verteilung der beider Elemente gibt Hinweise darauf, dass die Nickelbelastung der Deutschen Bucht stärker auf diffuse Einträge (atmosphärische Deposition, Oberflächenablauf) und auf Einträge westlich der deutschen AWZ gelegener Flusssysteme zurückzuführen ist, als dies für Kupfer der Fall ist. Auch der Eintrag aus der Ostsee, welcher sich an der südnorwegischen Küste bemerkbar macht, liefert offensichtlich höhere Nickel- als Kupfereinträge in die Nordsee. Dagegen ist die Elbe eindeutig die stärkste Punktquelle für die Kupferbelastung der Nordsee.

Die räumlichen Verteilungen von Blei, Quecksilber und Zink sind durch vielfältige Mechanismen beeinflusst. Einfache Erklärungsmuster, wie sie für die überwiegend gelöst vorliegenden Elemente funktionieren, gibt es hier nicht. Folgende Beobachtungen lassen sich aber zusammenfassen: Zink zeigt, wie im Januar 2006, auch im Sommer 2006 erhöhte Gehalte im Elbe-Ästuar und vor der Wesermündung. Das in der südlichen Nordsee liegende Konzentrationsmaximum nordöstlich der Rhein-Scheldemündung lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf dort lokalisierte Abflüsse zurückführen. Interessanterweise werden auch im Sommer, ähnlich wie im Januar, in der zentralen deutschen AWZ auf 55° N deutlich erhöhte Zinkgehalte nachgewiesen, eine Erklärung hierfür gibt es zurzeit nicht. Dagegen werden die niedrigsten Zinkgehalte in der nördlichen Nordsee gemessen. Zur Interpretation der erhöhten Bleigehalte in der zentralen und westlichen Nordsee sowie der punktuell erhöhten Quecksilberbelastungen in der nördlichen Nordsee sind weitere Untersuchungen notwendig, eine Interpretation ist auf Basis der vorhandenen Daten nicht möglich.

4.4.3.6 Langzeitentwicklung der Metallbelastung der Dt. Bucht

Die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Metallgehalte im Oberflächenwasser wird auf Basis der Messungen im küstennahen Wasser (30 – 32) durchgeführt. Dieser Wasserkörper ist einerseits noch durch die regionalen Küsten- und Süßwasserzuflüsse beeinflusst, andererseits bleibt hier aber die direkte Wirkung lokaler küstennaher Einzelquellen gering, genauso wie starke Einflüsse durch sehr flache Küstenstreifen. Insgesamt ist in diesem Wasserkörper die Untersuchung übergeordneter Trends möglich, da die Variabilität im Datensatz überschaubar bleibt. Weiterhin werden nur Messungen aus dem jeweils ersten Quartal des Jahres berücksichtigt, um die jahreszeitlich verursachte Messwertstreuung aus der Bewertung auszuklammern. In *Abb. 4-50* sind die jährlichen Verteilungsstatistiken der Elemente Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn im Zeitraum von 1990 bis 2007 in Boxsymbolen als Zeitreihe dargestellt. Weiterhin ist zur Orientierung das Intervall der OSPAR BRC (Hintergrundkonzentrationen) als grauer Balken hinzugefügt.

Die Elemente Quecksilber (reaktiv) und Blei zeigen keinen ausgeprägten Trend. Die Messwerte streuen stark. In beiden Fällen ist die Ursache in lokalen spezifischen und/oder kurzzeitigen Ereignissen zu suchen. Die hohen Bleigehalte im Januar 2007 sind auf die Messung resuspendierten kolloidalen Sediments infolge des Orkans ›Kyrill‹ zurückzuführen. Gegenüber den Vorjahren wurden 2006 und 2007 deutlich erhöhte Bleigehalte gemessen. Die Quecksilbergehalte bewegten sich im üblichen Rahmen, im Wesentlichen unter 2 ng/L.

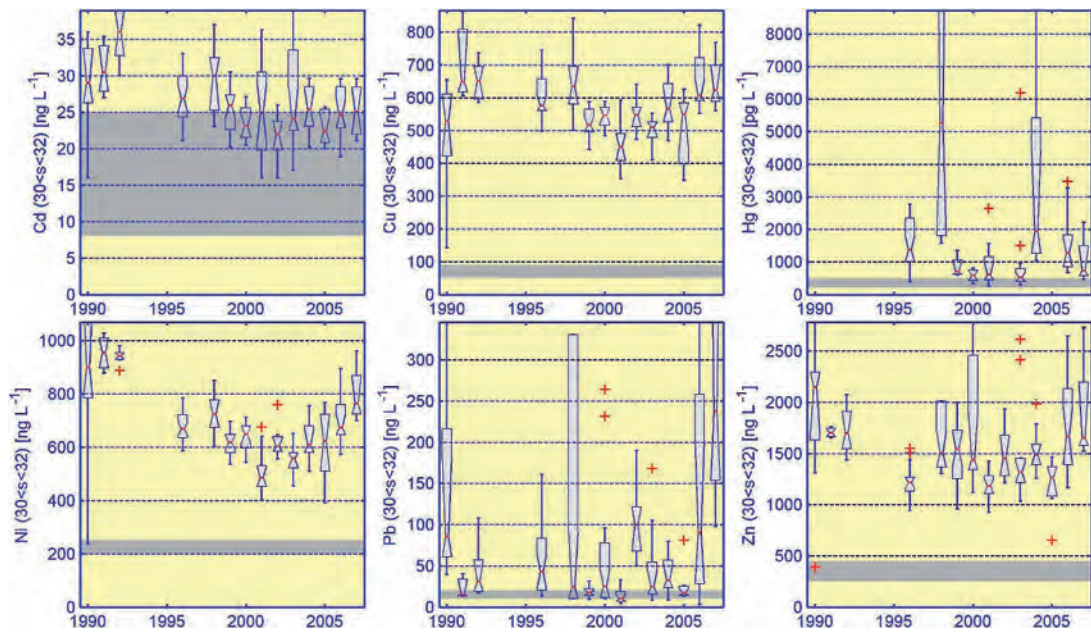


Abb. 4-50: Zeitreihe der jährlichen Verteilungsstatistiken der gelösten Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) im Winter (Jan., Feb., Mrz.) im filtrierten küstennahen (30 – 32) Oberflächenwasser bei 10 m Wassertiefe in einer Boxdarstellung. Graue Balken: OSPAR-Hintergrundwerte.

Fig. 4-50: Time series of yearly winter (JFM) distribution statistics in coastal (salinity 30 – 32) near surface (10 m) water as box and whisker plot. OSPAR background reference concentrations are displayed as grey bar.

Die anderen, eher gelöst vorliegenden Elemente beschreiben Anfang der neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts einen vergleichbaren Trend, besonders ausgeprägt bei den Elementen Nickel und Kupfer, aber auch beim Blei und Zink erkennbar. Die mittleren Gehalte nahmen mit einer gewissen Streuung bis zum Anfang des neuen Jahrtausends ab. Ein Minimum der Cu-, Ni- und Zn-Gehalte wurden im Jahr 2001 gemessen. Seitdem blieben die Cadmiumgehalte mit gewissen Schwankungen nahe den Hintergrundkonzentrationen auf gleichbleibendem Niveau. Besonders deutlich nahmen seit 2003 bis 2007 die Nickelgehalte kontinuierlich zu. Überlagert durch eine etwas größere Streuung, aber ebenfalls deutlich, nahmen im selben Zeitraum die Kupfer und Zinkgehalte zu. Insgesamt befand sich das Konzentrationsniveau der Elemente Zn, Ni, Pb und Cu um den Faktor 3 bis 7 über den angenommenen Hintergrundwerten.

4.4.3.7 Bewertung Wasser

Zur Bewertung der Metallgehalte im Wasserkörper wird ein dreistufiges Bewertungssystem verwendet, wie es in ähnlicher Form von OSPAR für die Sedimentbewertung im Rahmen des QSR 2010 (OSPAR 2009A) verwendet wurde (Tab. 4-6). Es wird zunächst getestet, ob die gemessenen Gehalte nahe oder gleich der »natürlichen« Hintergrundbelastung sind. Hiermit wird die Erreichung des gleichlautenden Ziels der OSPAR-Meeresschutzkonvention geprüft. Bei Erreichen dieses Zustandes wird die Belastung »blau« eingestuft. Bei Nicht-Erreichen der Hintergrundwerte wird gegen ein ökotoxikologisches (Effekt-) Bewertungskriterium geprüft (s. a. Kap. 4.4.2.1, S. 235). Bei Nicht-Erreichen der Hintergrundwerte und Nicht-Überschreiten des ökotoxikologischen Prüfwertes wird die Belastung »grün« und bei Überschreiten »rot« eingestuft.

TIME	SALINITY	ELEMENT	SAMPLES (N)	25 TH PERC.	MEDIAN	75 TH PERC.
JFM 2006	30 – 32	CD	13	22.88	24.63	28.51
		CU	13	591.03	606.23	721.42
		HG	13	0.85	1.27	1.82
		NI	13	646.26	672.59	759.43
		PB	13	28.14	90.22	258.38
		ZN	13	1388.31	1667.74	2134.63
	≥ 34	CD	29	12.97	15.44	16.78
		CU	29	201.19	356.84	445.11
		HG	34	0.17	0.56	0.96
		NI	29	243.35	382.02	423.4
		PB	29	24.48	32.78	50.8
		ZN	29	512.89	678.46	973.86
JFM 2007	30 – 32	CD	4	21.95	25.11	28.49
		CU	4	589.02	623.26	698.76
		HG	4	0.57	0.73	1.49
		NI	4	725.11	764.12	868.65
		PB	4	153.37	237.31	503.78
		ZN	4	1577.14	1652.48	2197.47
	≥ 34	CD	4	11.88	13.92	15.41
		CU	4	235.67	269.13	337.10
		HG	4	0.19	0.45	2.69
		NI	4	297.16	338.02	390.56
		PB	4	48.67	50.22	110.79
		ZN	4	562.12	638.90	719.24

Tab. 4-6: Metallgehalte (ng/L) im küstennahen Wasser (Salzgehalte: 30 – 32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (Salzgehalte: ≥ 34) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) der Jahre 2006 und 2007 in 10m Wassertiefe. Angegeben sind die Anzahl der Proben (n) und die 25 %, 50 % (Median) und 75 % Perzentile der gemessenen Metallgehalte.

Table 4-6: Element concentration (ng/L) in filtered samples in coastal (salinity 30 – 32) and open North Sea (salinity ≥ 34) near surface waters during the first quarter (JFM) of the years 2006 and 2007. Given are the number of samples and the 25 %, 50 % and 75 % percentiles.

Für einen einfachen Überblick sind in Abb. 4-51 die Verteilungsstatistiken der betrachteten Metallbelastungen in küstennahen (oben) und küstenfernen Wasserkörpern (unten) in den Jahren 2006 und 2007 gemeinsam dargestellt, wobei die unterschiedlichen Bewertungsbereiche auf der Ordinate farblich gekennzeichnet sind. So lässt sich die Lage der Belastungswerte innerhalb des dreigliedrigen Bewertungssystems schnell erfassen. Auf der rechten Ordinate jeder Teilgrafik ist zudem die Eingruppierung der Median-Metallbelastung für das Jahr 2007 als farbcodierter Kreis dargestellt. Dieser ist durch einen auf-/abwärtsgerichteten Pfeil ergänzt, sofern innerhalb der letzten fünf Jahre ein signifikanter auf-/abwärtsgerichteter zeitlicher Trend in der jährlichen Belastung nachweisbar war. Grundlage der Trendanalyse waren die mittleren Metallbelastungen (Median) im ersten Quartal der vergangenen fünf Jahre, also im Zeitraum von 2003 bis 2007. Richtung und Signifikanz identifizierter Trends wurden mit dem nicht-parametrischen Rangkorrelationsverfahren nach Spearman geprüft.

Nur die Nickel- und Cadmium-Gehalte im küstenfernen Gewässer erreichten im ersten Quartal 2007 den Hintergrundwert. Alle anderen Metallgehalte, insbesondere im küstennahen Gewässer, lagen über den Hintergrundwerten, wenn auch zum Teil recht knapp. Vor allem Blei und Quecksilber zeigten im Allgemeinen recht niedrige Gehalte. Kupfer und Zink überschritten die Hintergrundwerte dagegen deutlich (um den Faktor 3 bis 6), blieben jedoch unter den Effektwerten. Keines der untersuchten Elemente überschritt diese Grenze in Wasserkörpern mit Salzgehalten über 30. Deutlich zunehmende zeitliche Trends wiesen die Elemente Cu und Ni innerhalb des Zeitraums 2003 bis 2007 im küstennahen Bereich auf. Im küstenfernen Wasser zeigte lediglich Blei einen schwach ausgeprägten zunehmenden Trend auf insgesamt sehr niedrigem Konzentrationsniveau.

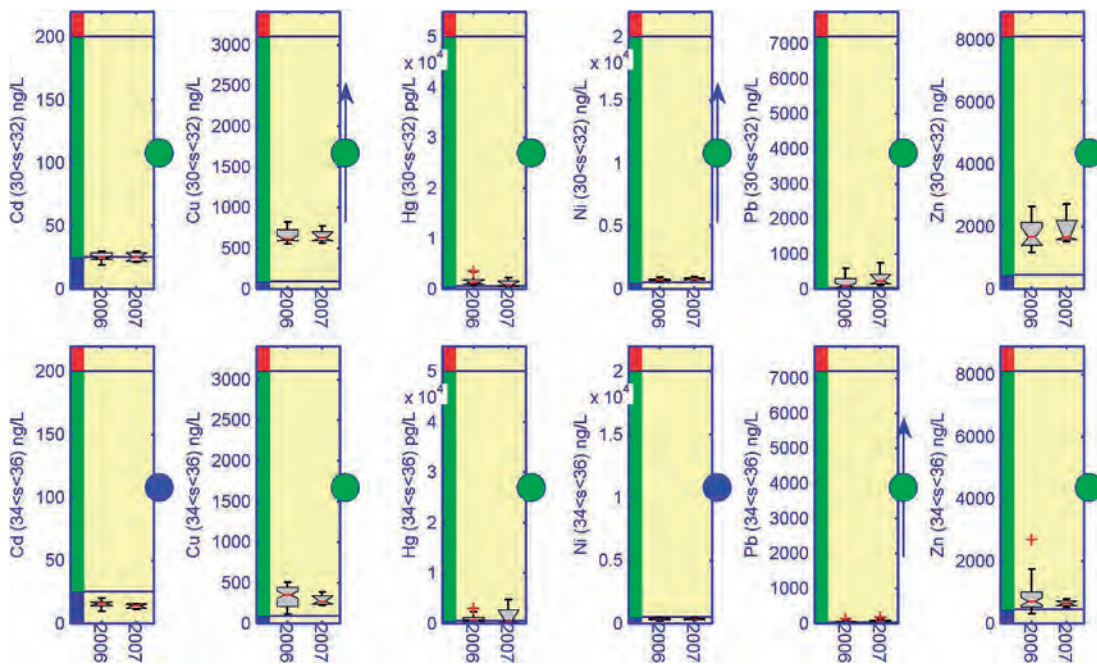


Abb. 4-51: Zusammenfassende Bewertung der Metallbelastung im filtrierten Oberflächenwasser (10m) der Nordsee. Verteilungsstatistiken der Metallgehalte im küstennahen Wasser (Salzgehalte 30 – 32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (> 34, Entenschnabel) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) der Jahre 2006 und 2007 in einer Boxdarstellung. An der Ordinate sind, den Bewertungskriterien entsprechend, Farbcodes aufgetragen. Blau: Gehalt < OSPAR-BRC; Grün: BRC < Gehalt < Effekt; Rot: Gehalt > Effekt. (vgl. Kap. 4.4.2.1, S. 235 und Tab. 4-4, S. 236; Effekt (Cd, Hg, Ni, Pb) = WRRLL AA-EQS, Effekt (Cu, Zn) = US EPA WQS). Rechte Abszisse: Bewertungssymbol: Die Farbe des Kreises gibt die Bewertung des Elementgehaltes im Jahr 2007 wieder. Ein signifikanter Trend (95 %) innerhalb der vergangenen fünf Jahre wird durch einen auf-/abwärts gerichteten Pfeil angezeigt.

Fig. 4-51: Assessment of element burdens in filtered near surface water (10m). Distribution statistics of measurements in coastal (salinity 30 – 32, upper row of figures) and open North Sea (salinity > 34, lower row of figures) water during the first quarter (JFM) of the years 2006 and 2007 as box and whisker plot. The left hand colour code indicates the assessment ranges. Blue: less than OSPAR-BRC; Green: greater than BRC and less than effect assessment value; Red: greater than effect assessment value (cf. ch. 4.4.2.1, p. 235). The right hand colored dot relates to the assessment result of 2007. An additional up-/downward arrow indicates a significant temporal trend during the recent five years.

4.4.4 Sediment

Der Meeresboden stellt die wichtigste Senke für Spurenmetalle im marinen Ökosystem dar. Er kann jedoch durch Resuspension von historisch deponiertem, höher belasteten Material regional auch als Belastungsquelle wirken (vgl. Kap. 4.4.3.3, S. 243). Die Funktionsweise des Meeresbodens ist u. a. von Strömungsstärke, Turbulenz, Bathymetrie und den Eigenschaften des Sediments selbst abhängig. Hierbei können seine physikalischen Eigenschaften und seine chemische Zusammensetzung regional stark variieren. In der Deutschen Bucht wird die volle Variationsbreite vom schlickigen über sandige bis hin zu steinigen Sedimenttypen vorgefunden, wobei jeder individuelle Typ an sich eine spezifisch ausgeprägte Affinität zu Schadstoffen/Metallen aufweist. Um die Vergleichbarkeit von Belastungsuntersuchungen in unterschiedlichen Regionen zu erhöhen, werden Normierungsverfahren angewendet. Hier hat sich für die Bestimmung von Metallgehalten im Sediment deren Normierung auf den Feinkornanteil (Korngrößen $< 20 \mu\text{m}$) bzw. deren direkte Bestimmung in der Feinkornfraktion durchgesetzt, die in der deutschen Meeresüberwachung bereits seit über 20 Jahren durchgeführt wird. Daneben werden auf internationaler Ebene (z. B. OSPAR 2002) auch Normierungen auf die Aluminium- oder Lithiumgehalte, sowie für organische Schadstoffe auf gesamtorganischen Kohlenstoff (TOC) verwendet. Eine Normierung auf die Gehalte von Matrixelementen, z. B. 5 % AL oder 50 mg/kg Li, liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie die Normierung auf den Feinkornanteil, da beide Elemente deutlich in dieser Sedimentfraktion angereichert sind. Eine Normierung auf TOC versucht hingegen, die besondere Affinität organischer Schadstoffe zum organischen Kohlenstoffanteil im Sediment auszugleichen.

In den Jahren 2006 bis 2007 wurden alle Trendmonitoringstationen jeweils einmal beprobt. Drei Stationen südöstlich von Helgoland wurden, über das jeweilige Jahr verteilt, viermal untersucht. Die höhere Probenahmefrequenz im äußeren Elbe-Ästuar dient der Erfassung der deutlich erhöhten Dynamik im Oberflächensediment dieses Seegebietes. Weiterhin wurden während der Nordseeaufnahme im August 2006 flächendeckend auf dem Stationsraster der ozeanographischen Messungen Oberflächensedimentproben im gesamten Nordseegebiet entnommen, um zusätzliche Informationen über die Randbedingungen der räumlichen Elementverteilung in der Deutschen Bucht zu erhalten. Für die im folgenden Text beschriebenen Trenduntersuchungen sowie die Belastungsbewertungen wurden zur Verbesserung der Statistik Stationen zu Gruppen zusammengefasst. Die räumliche Lage der Stationen und Ausdehnung dieser Gruppen ist in Abb. 4-52 (rechts) durch rote Ellipsen markiert. Im Einzelnen handelt es sich um drei Stationen in der zentralen Nordsee (TE), vier im Bereich der Weißen Bank (WB), zwei Stationen vor Sylt (L), weitere zwei Stationen vor der Emsmündung (ES) und zwei Stationen im Schlickfallgebiet südöstlich von Helgoland (KS).

4.4.4.1 Merkmale des Feinkornanteils

Die vorwiegend am Schwebstoff gebundenen Spurenelemente 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 %.

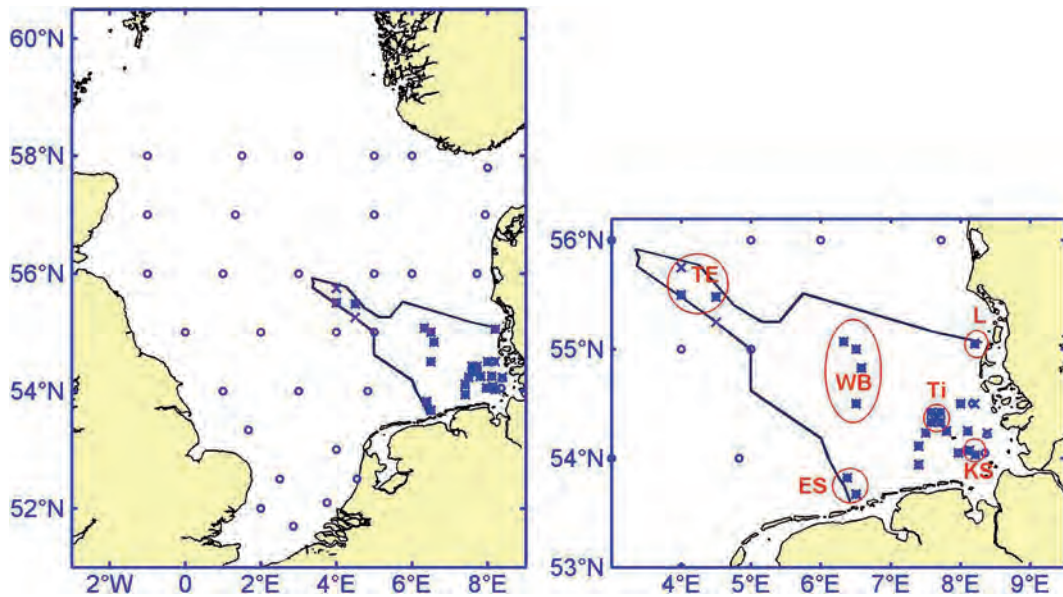


Abb. 4-52: Sedimentprobenahmestationen Deutsche Bucht (rechts), gesamte Nordsee (links). Probenahmen in den Jahren 2006 sind durch ein (o), 2007 durch ein (x) gekennzeichnet. In der linken Grafik sind einzelne Trendstationen zu Gruppen zusammengefasst (rote Ellipse). Metallgehalte und Trends werden in diesen ›Trendregionen‹ zusammengefasst bewertet.

Fig. 4-52: Sediment sampling sites German Bight (right), North Sea (left). 2006 sites are indicated by an (o), 2007 sites by an (x). For any subsequent assessment of temporal trend and concentration level in sediment, the sites are combined to regional site groups, which are indicated by red circles.

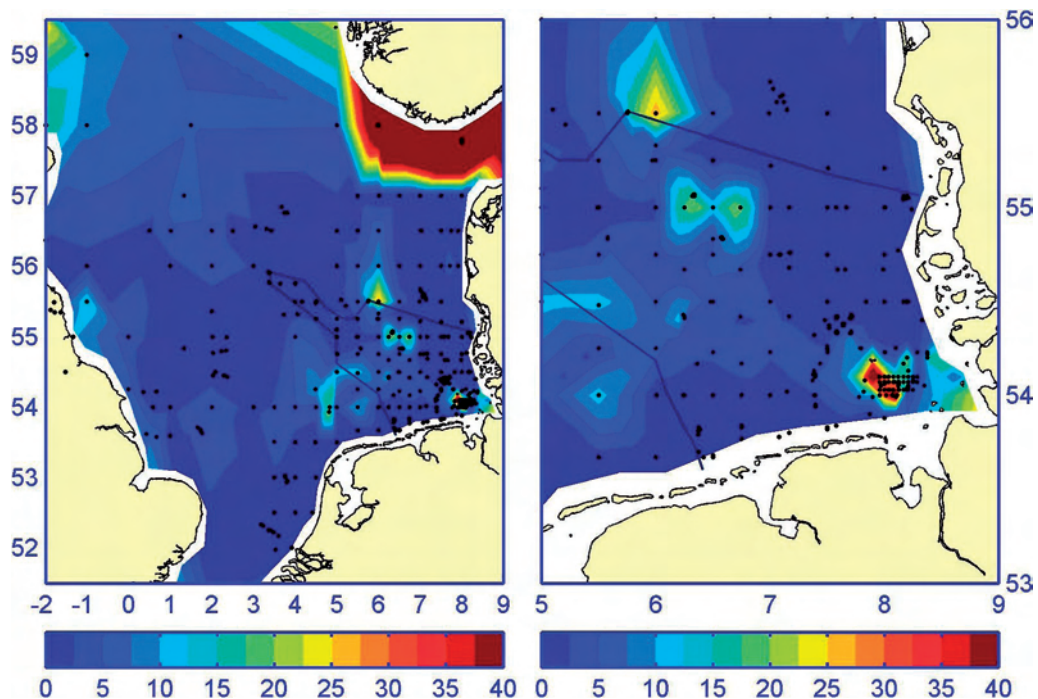


Abb. 4-53: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion (< 20 µm) im Gesamtsediment 1995 – 2007 (Nordsee und Detailansicht Deutsche Bucht).

Fig. 4-53: Spatial distribution of percent fraction of sediment fines (< 20 µm); left: North Sea, right: zoomed view on the German Bight.

Dagegen sind weite Teile des Meeresbodens der Nordsee mit Sanden bedeckt, die nur geringe Feinkornanteile im unteren Prozentbereich enthalten. In diesen als dispersiv geltenden Gebieten findet keine Nettosedimentation statt. Die rechte Karte in *Abb. 4-53* (Deutsche Bucht) zeigt die Ergebnisse von Korngrößenanalysen im Oberflächensediment des deutschen Festlandsockels aus dem Zeitraum 1995 bis 2007. Die schlickigen bzw. feinsandigen Gebiete in der inneren Deutschen Bucht und auf der Weißen Bank treten durch einen hohen Feinkornanteil deutlich hervor. Auf der Karte der gesamten Nordsee (links) fällt vor allem der hohe Feinkornanteil in der sehr tiefen Region vor der südnorwegischen Küste bis hinein in den Skagerrak auf.

Die grobe Sandfraktion des Sediments besteht vor allem aus Silikaten. Durch ihre chemische Beschaffenheit und infolge ihrer relativ kleinen Oberfläche zeigt diese Fraktion nur eine geringe Neigung zur Anreicherung von Spurenmetallen. Die Feinkornfraktion setzt sich hingegen vor allem aus Tonmineralen und organischem Material zusammen, enthält Eisen(III)-oxid-hydrate, Mangan(IV)-oxid-hydrate und Eisen(II)-sulfide, die zur effizienten Bindung vieler Spurenelemente beitragen. Um die Metallbelastung von sandigen dispersiven Gebieten mit der in eher schlickigen Akkumulationsgebieten vergleichen zu können, werden im BSH-Monitoringprogramm die Elementgehalte der Oberflächensedimentproben direkt in der Korngrößenfraktion $< 20 \mu\text{m}$ bestimmt. Auf diese Weise wird eine Verdünnung der Sedimentprobe durch grobkörniges, chemisch inertes Material (Sande) vermieden. Zur vergleichenden Bewertung wird also nur die Sedimentfraktion betrachtet, die ein hohes Potenzial zur Bindung der Spurenelemente besitzt.

4.4.4.2 Metallgehalte in Trendmonitoringgebieten (Dt. Bucht 2006/07)

In den Jahren 2006 und 2007 wurden alle Trendmonitoringstationen in der deutschen AWZ beprobt. Die Ergebnisse der Untersuchungen in den sechs differenzierten Untersuchungsgebieten (vgl. *Abb. 4-52*, S. 253) sind in *Tab. 4-7* zusammengefasst. Sie enthält Mittelwerte und Standardabweichungen der wichtigsten sechs Schwermetalle und der dazugehörigen Normierungsparameter (Matrixelemente und Korngrößenanteil). Die Matrixelemente Aluminium und Lithium weisen in der Feinkornfraktion Gehalte zwischen 6,4 und 7,4% bzw. 59 und 75 mg/kg auf. Diese Werte liegen für Aluminium um den Faktor 1,3 bis 1,5 bzw. für Lithium 1,2 bis 1,5 über den von OSPAR zu Normierungszwecken verwendeten Werten von 5% (Al) bzw. 50 mg/kg (Li).

Auffällig ist weiterhin der hohe Eisenwert im ehemaligen Dünnsäureverklappungsgebiet (Ti) nordwestlich von Helgoland. Erhöhte Eisengehalte, aber auch relativ hohe Arsen-, Zink- und Bleigehalte, werden in diesem Gebiet seit Jahren regelmäßig beobachtet. Nach heutigem Kenntnisstand ist hierfür die Verklappung von Dünnsäure aus der Titandioxidproduktion verantwortlich. Sie wurde in dieser Region 1989 eingestellt (BSH 1991), ist in der Zusammensetzung des Sedimentes aber immer noch deutlich sichtbar.

Vor allem die Elemente Kupfer, Cadmium und Nickel (für Nickel liegen nur OSPAR Hintergrundwerte (BC und BAC) zur Bewertung vor) bewegen sich in den meisten Regionen der deutschen AWZ bei niedrigen Gehalten oder im Bereich der Hintergrundkonzentrationen. Alle Schwermetalle zeigen in Küstennähe erhöhte Gehalte, entlang der ostfriesischen Inseln weniger ausgeprägt als entlang der nordfriesischen Küste. Durchweg wurden im Bereich der Weißen Bank (WB) niedrige Metallgehalte gemessen, nur die Quecksilber- und Cadmium-Gehalte nehmen zur zentralen Nordsee hin (TE) weiter ab. Diese sehr deutlichen Gradienten, mit erhöhten Gehalten in Küsten-

2006 & 07	TE	ES	KS	L	Ti	WB
< 20	0.4 ± 0.2	1.2 ± 0.1	23.4 ± 18.1	1.6 ± 0.6	0.9 ± 0.4	11.0 ± 6.3
AL	7.4 ± 0.2	6.5 ± 0.5	6.4 ± 0.3	7.0 ± 0.1	6.9 ± 0.3	7.4 ± 0.3
LI	65 ± 3	59 ± 6	61 ± 4	72 ± 5	75 ± 4	74 ± 4
FE	5.9 ± 0.6	4.7 ± 0.5	4.3 ± 0.5	7.8 ± 1.5	8.9 ± 1.5	4.7 ± 0.3
CD	0.35 ± 0.07	0.82 ± 0.68	0.77 ± 0.30	1.47 ± 0.30	0.71 ± 0.33	0.42 ± 0.48
CU	24.1 ± 3.6	26.9 ± 9.6	26.4 ± 2.8	35.2 ± 12.0	34.1 ± 6.4	20.1 ± 1.5
HG	0.06 ± 0.01	0.16 ± 0.06	0.50 ± 0.16	0.29 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.14 ± 0.01
NI ¹	52 ± 3	43 ± 3	40 ± 3	48 ± 2	52 ± 4	45 ± 20
PB	170 ± 30	74 ± 8	82 ± 12	146 ± 24	160 ± 23	69 ± 10
ZN	173 ± 17	218 ± 52	237 ± 44	658 ± 212	660 ± 211	149 ± 16

1: no sensible effect criterion available for Ni; all values above OSPAR BAC limits by factors 1.5 to 1.8 (cf. Table 4-5, p. 237).

Tab. 4-7: Zusammenfassung der Messergebnisse im Zeitraum 2006 – 2007; Prozentualer Massenanteil der Feinkornfraktion (< 20 µm) an der Gesamtprobe und Metallgehalte in der Feinkornfraktion (< 20 µm Korngröße) des Oberflächensediments in den Trendüberwachungsgebieten der deutschen Nordsee (AWZ). Mittelwert und Standardabweichungen in mg/kg TM; Feinkornanteil, Aluminium und Eisen in %. Zur Lage der Gebiete vgl. Abb. 4-52. Zur Normierung geeignete Parameter sind grau eingefärbt.

Table 4-7: Average and standard deviation of surface sediment fines percent fraction of total, as well as element burdens in surface sediment fines (< 20 µm). All 2006 and 2007 samples (< 20 µm fraction, Al, Fe in (%)) and all other elements in (mg/kg DW). Standard normalization parameters are given in grey.

nähe und sehr niedrigen Gehalten in der zentralen Nordsee, deuten auf eine dominierende Rolle der Süßwasserzuflüsse als Quelle der Metallbelastung hin. Dagegen zeigt vor allem Blei in der zentralen Nordsee ebenfalls deutlich erhöhte Gehalte, die sogar über denen der an küstennahen Stationen gemessenen liegen. Dieser Punkt wird im folgenden Abschnitt noch einmal aufgegriffen. Nickel zeigt in der Deutschen Bucht nur sehr schwach ausgeprägte Gradienten in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments. Seine räumliche Struktur lässt kaum Rückschlüsse auf Belastungsschwerpunkte zu.

4.4.4.3 Metallgehalte im Oberflächensediment der Nordsee

Im Jahr 2006 wurde während der Sommeraufnahme eine großräumige Beprobung der Oberflächensedimente in der gesamten Nordsee durchgeführt. Die vorliegenden Ergebnisse sind in Abb. 4-54 zusammengefasst. Die den räumlichen Verteilungen zugrunde liegenden Stationen sind durch schwarze Punkte dargestellt. Um den Nordseedatensatz in die Deutsche Bucht hinein zu erweitern, wurde er um die im Jahr 2000 hier durchgeführten, räumlich hoch aufgelösten Messungen ergänzt.

Im Oberflächensediment der zentralen Nordsee zeigen die untersuchten Elemente mit Ausnahme von Blei nur sehr schwache Gradienten. Bezogen auf die OSPAR-Hintergrundwerte liegen deren Gehalte, bis auf Blei und Nickel, in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes in der Nähe der Hintergrundkonzentrationen. Die im Routinemonitoring der Deutschen AWZ festgestellten hohen Bleigehalte in der zentralen Nordsee konnten nur durch zwei weitere in der Nähe liegende Messpunkte, entlang

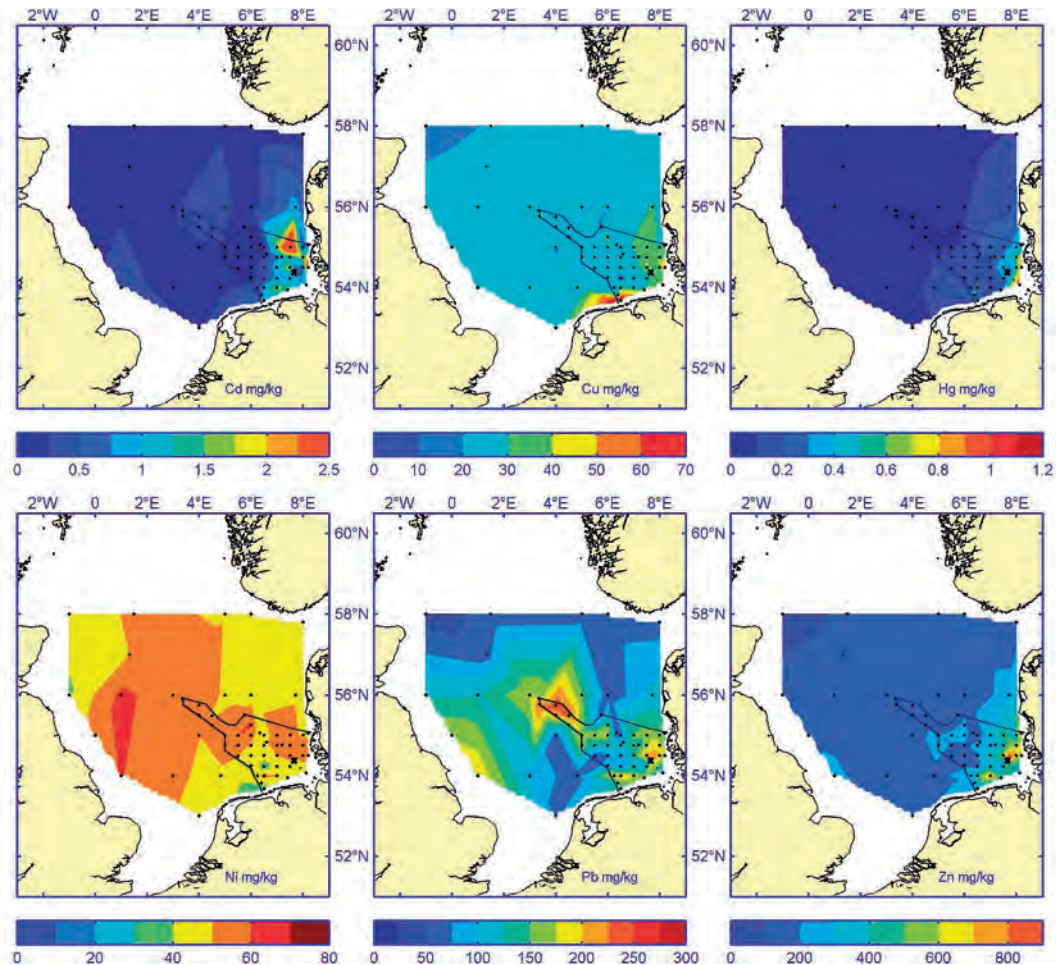


Abb. 4-54: Räumliche Verteilung der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments. Kombination der Messergebnisse der Nordseeaufnahme im Sommer 2006 und der Gesamtaufnahme der Deutschen AWZ im Frühjahr 2000.

Fig. 4-54: Spatial distribution of element burdens in surface sediment fines. The map combines results of the 2006 North Sea Sediment Survey and of the extended 2000 sediment survey in the German Bight.

56° N, bestätigt werden. Weiterhin wurden vor der englischen Küste ebenfalls erhöhte Bleigehalte nachgewiesen. Die Gründe hierfür sind bisher nicht geklärt. Die Gebiete erhöhter Bleigehalte im Oberflächensediment könnten mit den Vorzugsströmungen in der Nordsee und dem damit zusammenhängenden Schwebstofftransport gekoppelt sein. Aber auch geologische Unterschiede am Meeresboden oder lokale Emissionen könnten eine Erklärung bieten. Das Fehlen weiterer markanter Hinweise auf Kontaminationen durch andere kontinentale Zuflüsse außerhalb der deutschen AWZ oder von der britischen Insel ist vermutlich auf die sehr grobe räumliche Auflösung des Probenahmerasters und auf den Mangel küstennaher Stationen zurückzuführen.

4.4.4.4 Langzeitentwicklung: Metallbelastung im Oberflächensediment

Untersuchungen der Feinkornfraktion im Oberflächensediment werden an einzelnen Stationen bereits seit Mitte der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts durchgeführt. Dabei blieben die Bestimmungsmethoden weitgehend unverändert. Abb. 4-55 fasst die Zeitreihen der Messungen in zwei Trendregionen zusammen. Es handelt sich

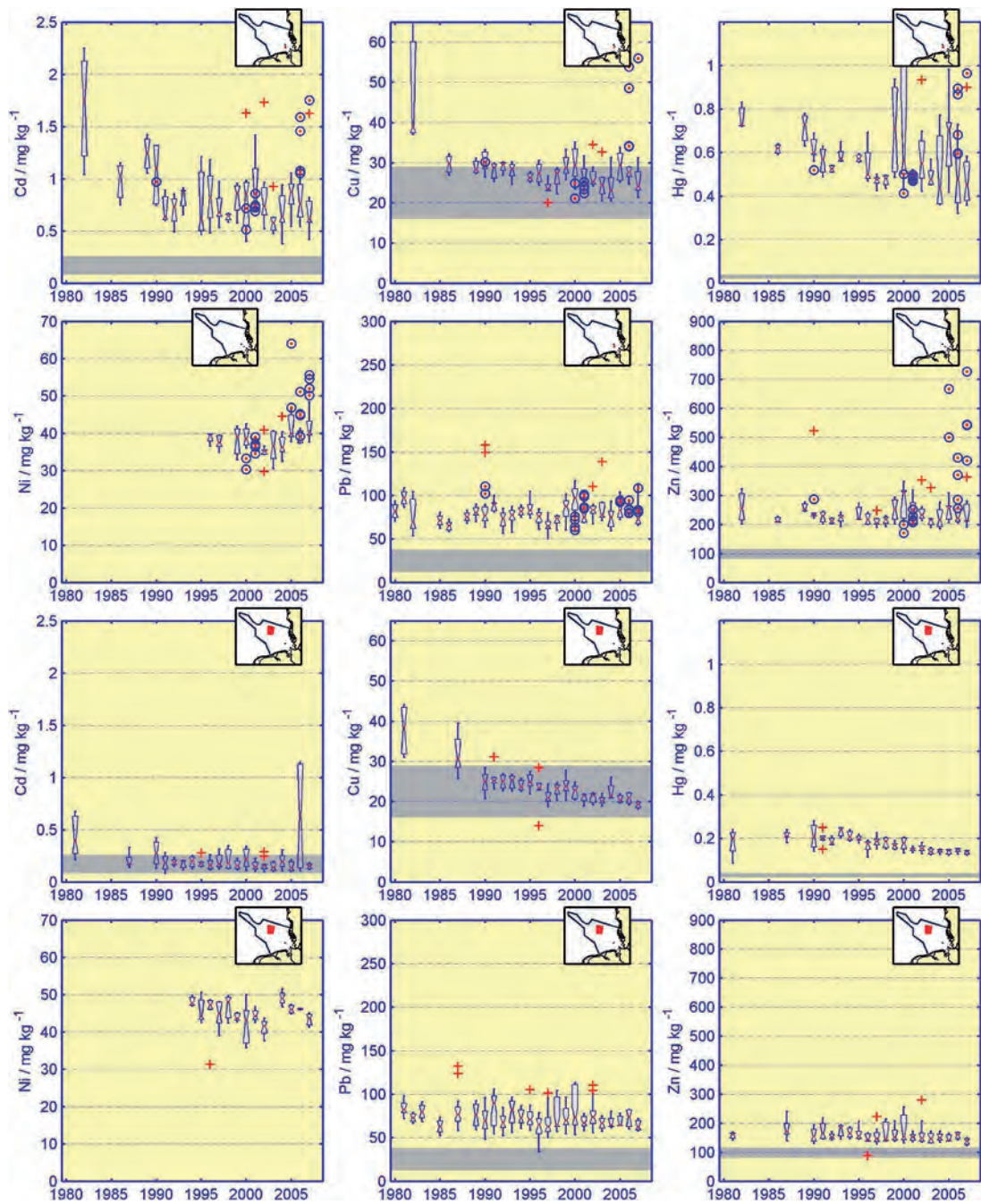


Abb. 4-55: Zeitreihen der Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) in den Regionen KS (SE Helgoland) und Weiße Bank (WB). Zusätzlich sind in den ersten sechs Grafiken Einzelmesswerte von der Klappstelle Tonne E3 dargestellt (blaue Kreise). BSH-Hintergrundwerte sind als graue Balken hinzugefügt. (Vgl. Tab. 4-5).

Fig. 4-55: Time series of element burdens in surface sediment fines in trend region KS (upper two rows of figures) and WB (lower two rows of figures). The first six figures are extended by concentration measurements at the dredge material dumping site E3 which is close to KS, (blue circles).

einerseits um die schlickigen Stationen im Klärschlammgebiet SE-lich von Helgoland (KS) im äußeren Elbe-Ästuar, die u. a. deutlich erhöhte Quecksilberkontaminationen aufweist. Andererseits sind in den unteren sechs Einzelgrafiken Zeitreihen aus dem eher gering belasteten Gebiet im Bereich der Weißen Bank zusammengefasst. In

der oberen rechten Ecke jeder Einzelgrafik sind die Probenahmeregionen durch rote Flächen gekennzeichnet. Die einzelnen Zeitreihen sind aus jährlich in Boxsymbolen zusammengefassten Verteilungsstatistiken zusammengesetzt.

Die ersten sechs Grafiken der Abbildung sind durch einzelne Messpunkte ergänzt, die aus Messungen an der Klappstelle in der Nähe der Tonne E3 (ca. 6 sm westlich der KS Stationen) stammen. Dort hin wird seit 2005 Baggergut aus der Fahrwasserunterhaltung im Hamburger Hafengebiet verbracht. Zur Reduktion der durch Kreislaufbaggerei (Hamburger Hafen/Neßsand) verursachten hohen Baggermengen vereinbarten die Hamburg Port Authority (HPA) und die Schifffahrtsverwaltung des Bundes im Juli 2005 die Umlagerung von Hafensediment ins Seegebiet südöstlich Helgoland. Im Zeitraum von 2005 bis 2007 wurden 1,9 Mio. t (TM) Hafensediment dorthin verbracht (SCHUBERT ET AL. 2010).

Die Schwermetallbelastung im Oberflächensediment der AWZ ist in den vergangenen 30 Jahren insgesamt eher rückläufig (Cd, Cu, Hg) oder ohne eindeutigen Trend (Ni, Pb, Zn). Eine Sonderstellung nimmt das Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland ein. Hier ist die Streuung einiger Elementgehalte seit 1999 deutlich zu beobachten. Genauso wie an weiter nördlich im nordfriesischen Küstenstreifen liegenden Stationen, wurden hier wieder deutlich höher belastete Einzelproben gemessen.

Beispielhaft für diese Entwicklung ist die Zeitreihe der Quecksilberbelastung in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments der KS-Region, die in *Abb. 4-55* (oben rechts) dargestellt ist. Die Konzentrationen lagen im gesamten Beobachtungszeitraum erheblich oberhalb des Hintergrundintervalls (grau). Von 1990 bis 1998 dominierte ein signifikant abnehmender Trend die zeitliche Entwicklung der Belastung. In diesem Zeitraum halbierten sich die Quecksilbergehalte im Oberflächensediment nahezu. Dieser signifikante Abwärtstrend brach im Untersuchungsgebiet KS im Jahr 1999 ab, als eine Phase grundlegend veränderter Verhältnisse einsetzte, die sich in einer sprunghaften und erheblichen Zunahme sowohl des mittleren Quecksilbergehalts (arithmetisches Mittel), als auch der Streuung der Messwerte abbildet. Ein ähnliches, wenn auch deutlich schwächeres Signal, wurde auch für Blei, Kupfer und Zink nachgewiesen. Weiter nördlich liegende Stationen zeigten ähnliche Effekte, weiter westlich liegende dagegen keine Veränderungen in diesem Zeitraum. Dieser Umstand und die Nähe der betroffenen Untersuchungsgebiete zum Elbe-Ästuar weisen auf ursächliche Veränderungen in der Elbe hin, sind jedoch mit Sicherheit nicht auf erhöhte Emissionen aus der Elbe zurückzuführen. Wahrscheinlicher sind Umlagerungsvorgänge am Meeresboden in der betroffenen Region, die ältere, höher belastete Sedimenthorizonte an die Oberfläche befördert haben, und damit die veränderten Messwerte im Oberflächensediment verursachten.

In der wesentlich weiter nordwestlich liegenden Region WB werden keine ähnlichen Effekte beobachtet. Die Quecksilbergehalte nehmen hier bei geringer Streuung weiterhin ab. Ähnliches gilt auch für die Kupfergehalte (*Abb. 4-55*).

Die Auswirkung der Verklappungsaktivität an der Tonne E3 auf die Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments ist aus *Abb. 4-55* ablesbar (Grafiken Reihe 1 und 2; roter Punkt mit blauem Kreis). Referenzmessungen aus der unmittelbaren Umgebung (< 3 sm) der Klappstelle und den Jahren 1990, 2000 und 2001, also vor der Verklappungsaktivität, welche gut mit denen aus der 6 sm entfernten KS-Region korrelieren, zeigten zuletzt (2001) eine Belastung von etwa 0,4 mg/kg (Hg), 25 mg/kg (Cu), 0,7 mg/kg (Cd), 35 mg/kg (Ni), 80 mg/kg (Pb) und 230 mg/kg (Zn) an. Mit Aufnahme der Sedimentumlagerung im August 2005 vervielfachten sich hier die Gehalte

einiger Elemente. In den Jahren 2006 bis 2007 lagen hier die Gehalte der Elemente (Ni < Zn < Cu < Hg < Cd) um den Faktor 1,5 bis 3 über den historischen Referenzwerten. Schwebstoff- und Wasserproben wiesen an der Umlagerungsstelle hingegen keine ungewöhnlich erhöhten Konzentrationen auf. Umfangreiche Untersuchungen zu diesem Thema wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde publiziert (SCHUBERT ET AL. 2010).

4.4.4.5 Bewertung Sediment

Die Bewertung der Sedimentqualität in der Deutschen Bucht wurde auf Basis der in *Kap. 4.4.2.2, S. 236* vorgestellten Bewertungskriterien durchgeführt. Die Vorgehensweise orientiert sich weitgehend am von OSPAR eingeführten Bewertungsverfahren. Es wurden die Jahresmediane der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments, der in Regionen zusammengefassten Trendstationen, gegen die Hintergrundkonzentration getestet. Der Test dient zur Beantwortung der Frage, ob die gemessenen Metallgehalte nahe oder gleich dem natürlichen Hintergrund sind. Hierbei wurden die Gehalte der Elemente Cd, Cu, Hg, Pb und Zn mit der oberen Grenze des BSH-Hintergrundwertes verglichen (s. *Tab. 4-5, S. 237*). Für Nickel wurde mangels Alternative der OSPAR-BAC-Wert verwendet. Wird der Hintergrundwert überschritten, wird gegen den niedrigeren Effektwert für Salzwassersysteme, der von der US-amerikanischen ozeanographischen und atmosphärischen Behörde (NOAA) entwickelt wurde, getestet. Wird dieser ebenfalls überschritten, sind biologische Effekte möglich, die auf die Belastung durch den betreffenden Schadstoff zurückzuführen sind. Damit wurde folgendes dreistufiges Bewertungsschema verwendet.

Blau: Gehalte nahe oder gleich dem natürlichen Hintergrund.

Grün: Gehalte über dem Hintergrundwert, es sind jedoch keine biologischen Effekte zu erwarten.

Rot: Gehalte, bei denen biologische Effekte auftreten können.

Zusätzlich zur Einschätzung des aktuellen Belastungsstatus (hier das Jahr 2007) wurde dessen zeitliche Entwicklung innerhalb der vergangenen 10 Jahre untersucht. Trends wurden auf Basis der nicht-parametrischen Rangkorrelation nach Spearman ermittelt. Grundlage waren die jährlichen Mediane der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments, welche für die oben beschriebenen Trendregionen separat berechnet wurden. *Abb. 4-56* fasst die Bewertungsergebnisse in Kartendarstellungen zusammen. Neben dem als Punkt dargestellten Farbcode und dem Trendsymbol (nach oben/unten gerichtetes Dreieck) sind in jeder Bewertungsregion ebenfalls das zugrundeliegende Bewertungsjahr (oben) und der Metallgehalt (unten) in mg/kg angegeben.

Die Kupferbelastung erreichte 2007 in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes Hintergrundwerte. Auch die Cadmium- und Nickelgehalte waren weitgehend recht niedrig, überstiegen jedoch den Hintergrundwert meistens. Die höchsten Cadmium-, Kupfer-, und Zinkgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments wurden querab Sylt in der Region L gemessen. Auch die Nickelwerte waren hier erhöht. Hier zeigt sich der starke Einfluss der Elbe-Abflussfahne entlang der nordfriesischen Küste. Alle untersuchten Elemente lagen hier in Gehalten vor, die entsprechend dem Bewertungsschema biologische Effekte zulassen. Wird der Metallgehalt im Feinkornanteil (so wie er hier bestimmt wurde) auf die nicht fraktionierte Gesamtprobe bezogen, sind die Gehalte allerdings eher gering, denn der Feinkornanteil des Sediments vor Sylt enthält weniger als 5% Feinkornanteil (vgl. *Abb. 4-53, S. 253*).

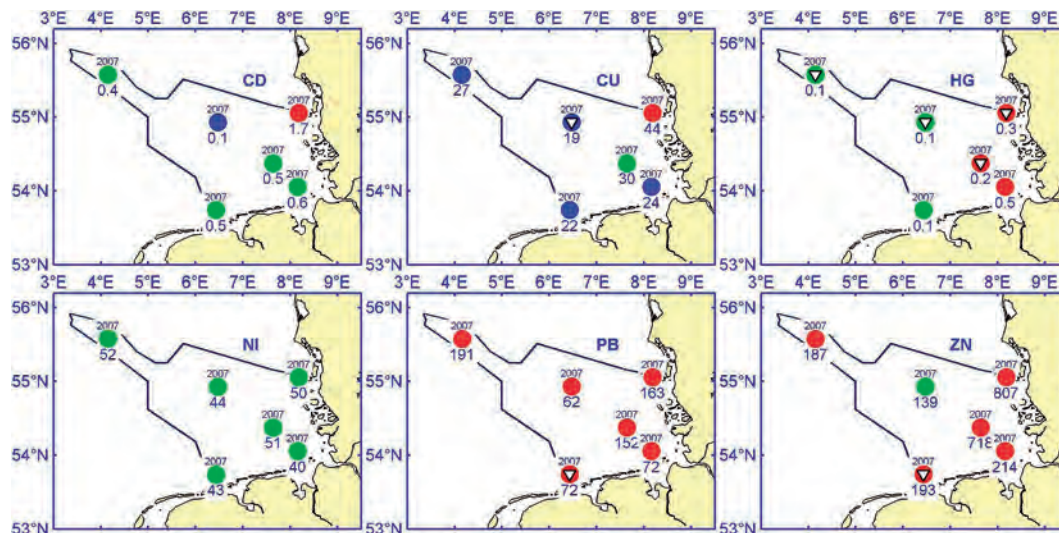


Abb. 4-56: Bewertung der Metallbelastung der Oberflächensedimente im Jahr 2007 und Abschätzung der zeitlichen Entwicklung innerhalb der vergangenen 10 Jahre. Rot: geringe Wahrscheinlichkeit von Effekten. Grün: keine Effekte zu erwarten, aber Hintergrundwert überschritten. Blau: Belastung nahe oder gleich dem Hintergrundwert. Ein signifikanter zeitlicher auf-/abwärts gerichteter Trend innerhalb der vergangenen 10 Jahre wird durch ein nach oben/unten gerichtetes weißes Dreieck symbolisiert. Oberhalb jedes Symbols ist das Bewertungsjahr angegeben, unterhalb der Gehalt (Median in mg/kg TM).

Fig. 4-56: Assessment of element burdens in surface sediment fines sampled in 2007. Blue: less than OSPAR-BAC, green: greater than BAC and less than effect assessment value, red: greater than effect assessment value (cf. ch. 4.4.2.2, p. 236). A significant temporal trend in each region during the recent 10 years is indicated by an up-/downward white triangle. The year of assessment and the median concentration (mg/kg DW) during that year is given above/below each symbol.

Die Quecksilber-, Nickel-, Blei- und Zinkgehalte erreichten 2007 an keiner Stelle des Untersuchungsgebietes den natürlichen Hintergrundwert. Der Effektgrenzwert wurde entlang der nordfriesischen Küste durch Quecksilber, Zink und Blei, vor der Emsmündung nur durch Zink und Blei, überschritten. Blei ist das einzige Element im gesamten Untersuchungsgebiet, das entsprechend dem Bewertungsschema über dem Effektgrenzwert lag.

Kupfer, Blei und Zink zeigten im Zeitraum zwischen 1997 und 2007 in einzelnen Regionen signifikant abnehmende zeitliche Trends. Die insgesamt bereits auf einem niedrigen Niveau befindlichen Kupfergehalte im Bereich der Weißen Bank nahmen mit einer ausgesprochen geringen Schwankungsbreite weiter ab; vgl. hierzu auch Abb. 4-55 (3. Reihe Mitte). Obwohl die Blei- und Zinkgehalte vor der Emsmündung stark streuten, konnte hier ein signifikant abnehmender Trend dennoch detektiert werden.

Im Vergleich zu den anderen untersuchten Elementen nahmen im Betrachtungszeitraum die Quecksilbergehalte eher weiträumig ab. Nur vor der Elbemündung (Region KS) und der Emsmündung (EL) konnten keine signifikant abnehmenden Quecksilbertrends festgestellt werden. Vor der Emsmündung ist die grundsätzlich hohe Streuung der Messwerte dafür verantwortlich. In der Region KS wurde dagegen zwar bis einschließlich 1999 ein signifikant abnehmender Trend festgestellt, die anschließend eintretenden Veränderungen unterbrachen diesen jedoch. Seit 1999 werden wieder deutlich erhöhte Gehalte (deutliche Zunahme der Streuung der Messwerte) in die-

ser Region gemessen. Sie werden in der hier durchgeführten Analyse jedoch nicht als zunehmender Trend angezeigt, da den Berechnungen der sehr robuste Median zugrunde liegt und dieser durch die auftretenden hohen Einzelmessungen kaum beeinflusst wird.

4.4.5 Zusammenfassung

□ Wasser

Im Wasser der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) wurden in den Jahren 2006 und 2007 keine Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn, gelöst) gemessen, die negative Auswirkungen auf die belebte Natur wahrscheinlich machen würden. Grundlage dieser Einschätzung ist die Anwendung des WRRL-Umweltqualitätsstandards AA-EQS auf die Cadmium-, Blei-, Quecksilber- und Nickelgehalte. Kupfer und Zink wurden auf Basis der Wasserqualitätsstandards (WQS) der US EPA bewertet.

Hintergrundwerte erreichten die Metallgehalte (gelöst) nur in der äußeren AWZ, und dort auch nur die Elemente Cadmium und Nickel. Auch in direkter Nähe zur Küste in Wasserkörpern mit Salzgehalten > 28 wurden in keinem Fall die Effektgrenzwerte erreicht. Allerdings ist die Bestimmung und Evaluation geeigneter Effektgrenzwerte für marine Ökosysteme nach wie vor Gegenstand der Forschung und wissenschaftlichen Diskussion.

Zwischen 2003 und 2007 zeigten die Zeitreihen der Elemente Kupfer und Nickel (gelöst) im küstennahen Wasser signifikant zunehmende Trends, die Gehalte blieben jedoch sehr deutlich unter den Effektgrenzwerten.

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.

Cadmium, Zink und Nickel zeigen ausgeprägte Jahresgänge mit erhöhten Gehalten im Frühjahr und Minima im Spätsommer bis Herbst. Dagegen zeigt das gelöst vorliegende Mangan ein deutliches Maximum im Sommer, was auf Sauerstoffmangelsituationen in der Wassersäule hinweist.

Nach heutigem Kenntnisstand geht von den gemessenen Metallbelastungen des Meerwassers keine Gefahr für das marine Ökosystem aus.

□ Sediment

Entlang der nordfriesischen Küste erreicht die Metallbelastung der Feinkornfraktion (< 20 µm) im Oberflächensediment Gehalte, die negative biologische Effekte verursachen können. Von den sechs untersuchten Elementen (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) überschreiten fünf (nur Nickel nicht) in Küstennähe vor Sylt den Effektgrenzwert. Zink zeigt im gesamten deutschen Küstenbereich entsprechend erhöhte Werte, Quecksilber nur entlang der nordfriesischen Küste bis zur Elbemündung. Blei ist das einzige Element, das den Effektgrenzwert in der gesamten deutschen AWZ überschreitet. Die niedrigste Belastung wird im Gebiet der Weißen Bank gemessen, hier erreichen die Elemente Cadmium und Kupfer in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments ihre Hintergrundwerte. Das dieser Auswertung zugrundeliegende Bewertungsverfahren

ren ist weitgehend an das von OSPAR angewendete Bewertungsschema angelehnt. Es wurden die Effektgrenzwerte (ERL) der US-amerikanischen ozeanographischen und atmosphärischen Behörde (NOAA) angewendet.

Signifikante zeitliche Trends, die im Zeitraum zwischen 1998 und 2007 ermittelt wurden, waren alle abnehmend (Weiße Bank (Cu), Ems (Zn, Pb), deutsche Bucht (Hg)). Quecksilber zeigte seit 1997 in nahezu der gesamten deutschen Bucht signifikant abnehmende Trends. Eine Ausnahme stellen allerdings Veränderungen in der inneren deutschen Bucht, südöstlich Helgoland, dar, die hier seit 1999 zu einer deutlich erhöhten Variabilität der Quecksilbergehalte führten. Die Ursache hierfür liegt mit Sicherheit nicht in gestiegenen Emissionen aus der Elbe, sondern vermutlich eher in regionalen Umlagerungen am Meeresboden, die tiefer liegende, höher belastete Sedimenthorizonte an die Oberfläche befördert haben.

Unabhängig von diesen seit 1999 beobachteten Veränderungen, führte die Umlagerung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen zur Tonne E3 zu einer regional begrenzten Zunahme der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments. Vor allem handelt es sich hierbei um die Elemente Cadmium, Kupfer, Quecksilber und Zink.

4.5 Radioaktive Stoffe

<•> J. Herrmann & P. Loewe

4.5.1	Einführung	... 263
4.5.2	Quellen künstlicher Radionuklide	... 266
4.5.3	Caesium-137 und Strontium-90	... 267
4.5.4	Tritium	... 271
4.5.5	Transurane	... 272
4.5.6	Zusammenfassung	... 272

4.5.1 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}C , ^7Be und ^{32}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}Th mit den intermediären Produkten der zugehörigen drei natürlichen Zerfallsreihen, sowie ^{87}Rb und ^{40}K . Uran liegt im Meerwasser in relativ hoher Konzentration von etwa 3,3 mg/L vor, während ^{40}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}Po (aus der Zerfallsreihe des $^{238}\text{Uran}$), weil es in manchen Meeresorganismen stark angereichert wird. In *Tab. 4-8* sind für eine Reihe natürlicher Radionuklide neben den Halbwertszeiten typische Hintergrundaktivitäten in Meerwasser und Sediment angegeben.

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 jedoch 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. Jedoch stammen auch im Jahr 2000 noch mehr als 90% des im Weltozean vorhandenen Inventars des wichtigsten Radionuklids ^{137}Cs aus dem Fallout (AARKROG 2003).

Alle der weit über 2000 verschiedenen künstlich erzeugten Kerne, die nicht in der Natur vorkommen, sind radioaktiv. Zu jedem Element ist heute mindestens ein radio-

Tafel 4-9: 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. α - oder β -Strahlung) oder der Energiezustand des Kerns (γ -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 Standardmenschens 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 2007). Die Aktivität der Rn-Isotope und ihrer Zerfallsprodukte, welche den Hauptbeitrag zur Dosis leisten, ist hingegen mit insgesamt 45 Bq verschwindend gering.

aktives Isotop bekannt. Der Umstand, dass sich diese Isotope chemisch praktisch nicht von den stabilen (nicht radioaktiven) Isotopen des jeweiligen Elements unterscheiden, hat zur Folge, dass eventuelle Anreicherungsprozesse in der Nahrungskette nicht von den radioaktiven Eigenschaften, sondern von der Chemie der jeweiligen Elemente bestimmt werden.

Das Nuklid ^{99}Tc (Halbwertszeit 210 000 Jahre) reichert sich beispielsweise mit einem Faktor $> 10^5$ (gegenüber der Volumenaktivität im Meerwasser) in Braunalgen, wie Blasentang oder Sägezahntang aber auch Hummer an, während der Anreicherungsfaktor für das dosisrelevante Nuklid ^{137}Cs (Halbwertszeit 30 Jahre) in Meeresfischen nur

etwa 100 beträgt (IAEA 1985, AARKROG ET AL. 1994/1996, 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}Tc , ^{137}Cs , ^{90}Sr und einige Transurane¹ (^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{244}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}Pu aus und gelten als radiologisch relevant für eine mögliche Strahlenexposition des Menschen über den Meerespfad.

Radio Nuclide	Half-Life yrs	Sea Water Bq/m³	Sediment Bq/kg
Tritium	12.3	20 – 100 [†]	–
⁷Be	0.146	1.1 – 3.4	–
¹⁴C	5.73×10^3	5.5 – 6.7	–
³²Si	172 ± 4	$0.2 - 3.3 \times 10^{-3}$	–
⁴⁰K	1.28×10^9	11800 – 12300	100 – 100
⁸⁷Rb	4.8×10^{10}	30	–
²³²Th	1.41×10^{10}	$0.4 - 30 \times 10^{-3}$	12 – 50
²²⁸Ra	5.76	0.8 – 8	–
²²⁸Th	1.91	0.004 – 0.3	–
²³⁵U	7.04×10^8	1.9	0.1 – 10
²³⁸U	4.47×10^9	40 – 44	2 – 200
²³⁴Th	0.066	0.6 – 0.8	#
²³⁴U	2.45×10^5	47	#
²³⁰Th	8.0×10^4	2.52×10^{-3}	#
²²⁶Ra	1617	0.8 – 8	20 – 80
²¹⁰Pb	22.3	0.4 – 2	100 – 300 [‡]
²¹⁰Po	0.378	0.6 – 1.9	100 – 300 [‡]

† Holds for oceanic deep-water, free of anthropogenic contributions.
In North Sea sediments equilibrium with Uranium-238 is assumed.
‡ Holds for surface sediments.

Tab. 4-8: Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser und Sediment der Nordsee.

Table 4-8: Activity of some natural radio nuclides for North Sea sea-water and sediment.

Die Kontamination des Meerwassers wird als Volumenaktivität oder auch Aktivitätskonzentration in Bq/m³ 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 4-9*.

1. Transurane stehen im Periodensystem oberhalb des schwersten natürlichen Elements – $^{92}\text{Uran}$.

4.5.2 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) – haben bewirkt, dass die in den 1970er Jahren sehr hohen Einleitungen beider Wiederaufbereitungsanlagen kontinuierlich reduziert wurden. Das Meerwasser der Nordsee ist deshalb inzwischen nur noch sehr gering durch künstliche Radionuklide belastet.

Ein Großteil der Belastung durch ^{137}Cs und Transurane resultiert inzwischen aus resuspendierten Partikeln des Sediments der Irischen See und weniger aus den gegenwärtigen Ableitungen der Wiederaufbereitungsanlagen (KERSHAW ET AL. 1999). Das Sediment der Irischen See wurde vor allem in den 1970er Jahren hoch kontaminiert. Die Quellstärke des Sediments für ^{137}Cs wird auf 50 bis 70 TBq/Jahr geschätzt, was ungefähr dem 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. An den wenigen Stationen, z. B. auf der Weissen Bank oder im Schlickfallgebiet südöstlich Helgoland, bei denen man überhaupt eine Anreicherung von künstlichen Radionukliden im Sediment feststellen kann, liegen die spezifischen Aktivitäten für ^{137}Cs unter 5 Bq/kg, für Transurane unter 1 Bq/kg Trockenmasse. Zum Vergleich: die spezifische Aktivität des natürlichen ^{40}K in diesen Sedimenten liegt zwischen 300 und 600 Bq/kg. 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 konstanten Volumenaktivitäten von ^{137}Cs und ^{90}Sr (Abb. 4-57) 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 die norwegische Rinne verlässt. Ableitungen aus Kernkraftwerken oder anderen kerntechnischen Einrichtungen spielen für das Aktivitätsinventar der Nordsee kaum eine Rolle. Sie sind al-

lenfalls 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.

4.5.3 Caesium-137 und Strontium-90

^{137}Cs und ^{90}Sr werden seit den atmosphärischen Kernwaffenversuchen in den 50er und 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts als die künstlichen Radionuklide angesehen, deren Überwachung aufgrund der auftretenden Umweltkonzentrationen, ihrer Radiotoxizität und ihrer chemischen Eigenschaften dringend notwendig ist. Messungen ihrer Aktivitätskonzentration im Meerwasser wurden daher schon sehr frühzeitig begonnen.

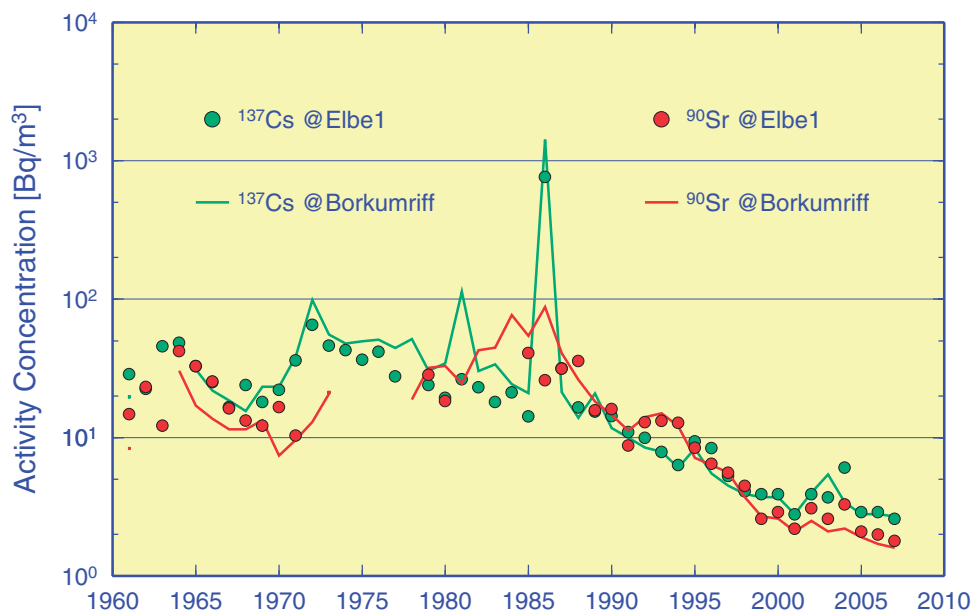


Abb. 4-57: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr in Oberflächenwasser an den früheren Positionen der Feuerschiffe ›Borkumriff‹ und ›Elbe 1‹.

Fig. 4-57: Time series of annual maximum activity concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr in surface seawater at former positions of light vessels ›Borkumriff‹ and ›Elbe 1‹.

Die zeitliche Entwicklung der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs und ^{90}Sr seit 1961 ist in Abb. 4-57 für die Positionen der früheren Feuerschiffe ›Elbe 1‹ und ›Borkumriff‹ dargestellt. Deutlich treten die hohen Konzentrationen von ^{137}Cs aus dem Fallout nach dem Tschernobyl-Unfall hervor, der sich im April 1986 ereignete. An der Position ›Elbe 1‹ in der inneren Deutschen Bucht wurden längere 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}Cs im Jahr 1981 bei der Station ›Borkumriff‹ ist auf das Vordringen höher kontaminierter Wassermassen aus nördlicheren Seegebieten zurückzuführen. Dieser Konzentrationsanstieg ging einher mit einer verminderten Aktivität von ^{90}Sr , was Sellafield eindeutig als Quelle ausweist, denn das Nuklidmuster der Emissionen von Sellafield und La Hague unterschied sich zu diesem Zeitpunkt deutlich voneinander.

Der weitgehend kontinuierliche, exponentielle Rückgang der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs und ^{90}Sr seit Ende der 1980er Jahre ist nur zum geringen Teil auf den radioaktiven Zerfall selbst zurückzuführen. Der Hauptgrund hierfür liegt vielmehr in den geringeren Ableitungen dieser Radionuklide durch beide Wiederaufbereitungsanlagen. Dieser Rückgang wurde auch 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 10 Jahren setzte sich diese Verringerung allerdings nicht weiter fort, wie aus den stagnierenden Volumenaktivitäten von ^{137}Cs und ^{90}Sr ersichtlich ist (Abb. 4-57).

Die räumlichen Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr im Verlauf des Jahre 2006 und 2007 sind in Abb. 4-58 bis Abb. 4-61 für die Deutsche Bucht zusammengefasst. Systematische jahreszeitliche Unterschiede sind nicht erkennbar. Gegenüber dem Fallout leicht erhöhte Konzentrationen von ^{137}Cs traten lediglich im Nordwesten auf. Diese leicht 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}Cs liegt im Meerwasser der Nordsee inzwischen unterhalb der Nachweisgrenze von $0,2 \text{ Bq/m}^3$.

Die Konzentrationen von ^{90}Sr waren räumlich ebenfalls relativ homogen verteilt. Die gegenüber ^{137}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.

Die im Einflussbereich der Elbe erhöhten Konzentrationen von ^{90}Sr erklären sich aus dem Umstand, dass dieses Falloutnuklid in den Tonmineralen der Landfläche weniger stark als ^{137}Cs adsorbiert wird und folglich über den Süßwasserkreislauf stärker ins Meer eingetragen wird. Ein Jahresgang ist hier nicht zu erkennen.

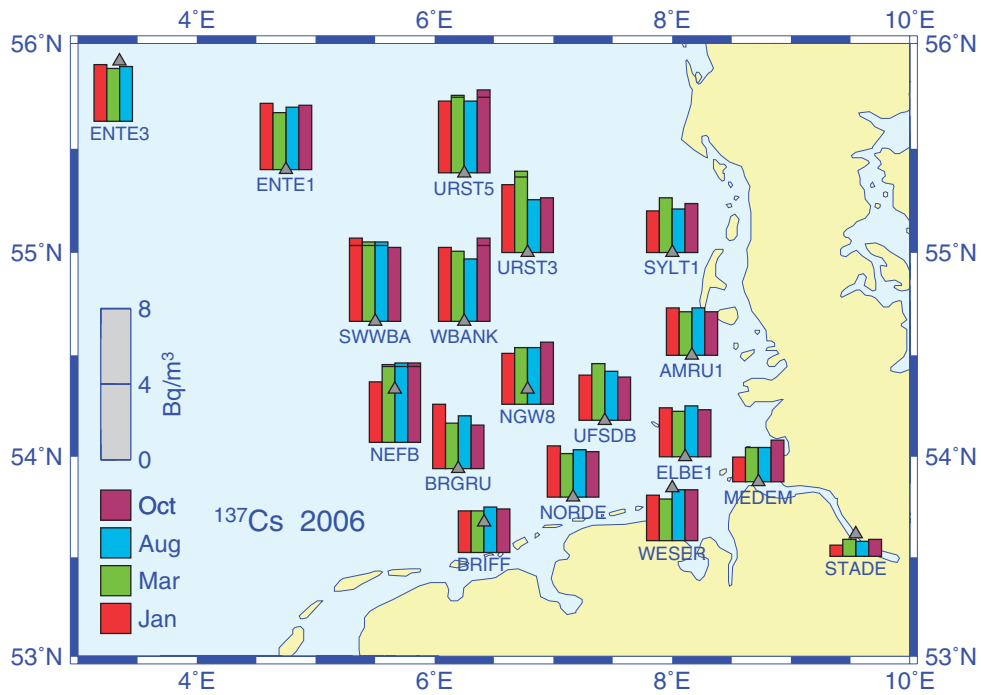


Abb. 4-58: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2006. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-58: Distribution of ^{137}Cs activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2006. Underneath columns station IDs.

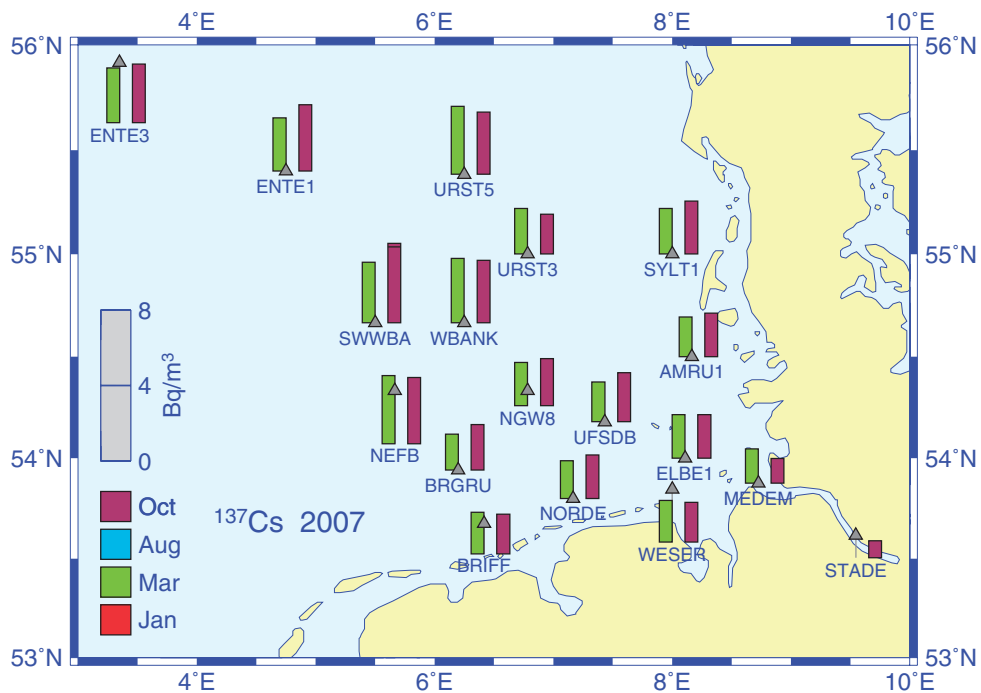


Abb. 4-59: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2007. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-59: Distribution of ^{137}Cs activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2007. Underneath columns station IDs.

4 Meereschemie

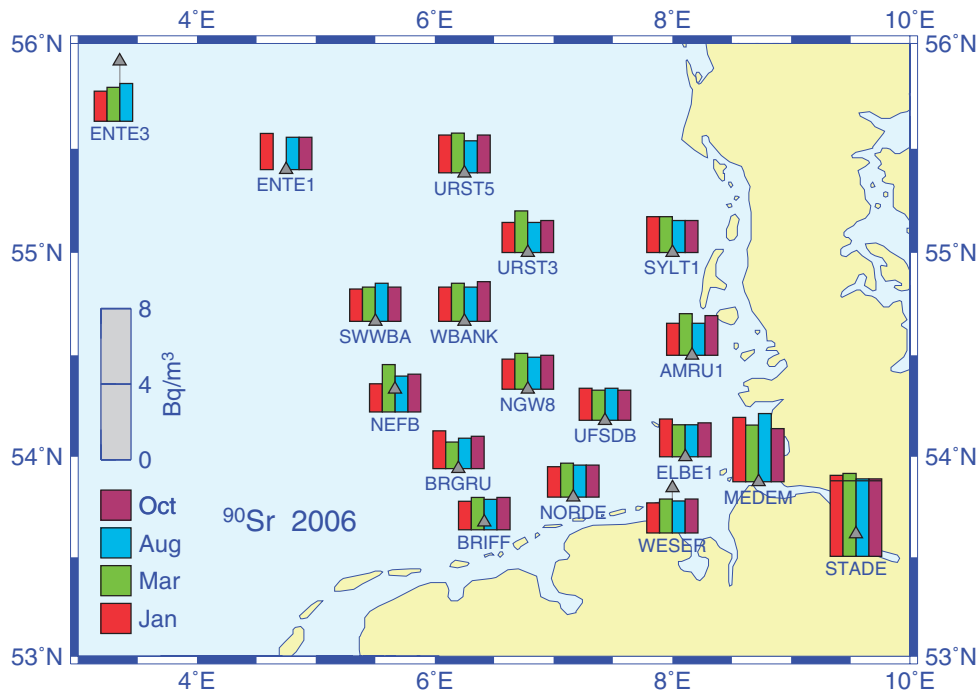


Abb. 4-60: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2006. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-60: Distribution of ^{90}Sr activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2006. Underneath columns station IDs.

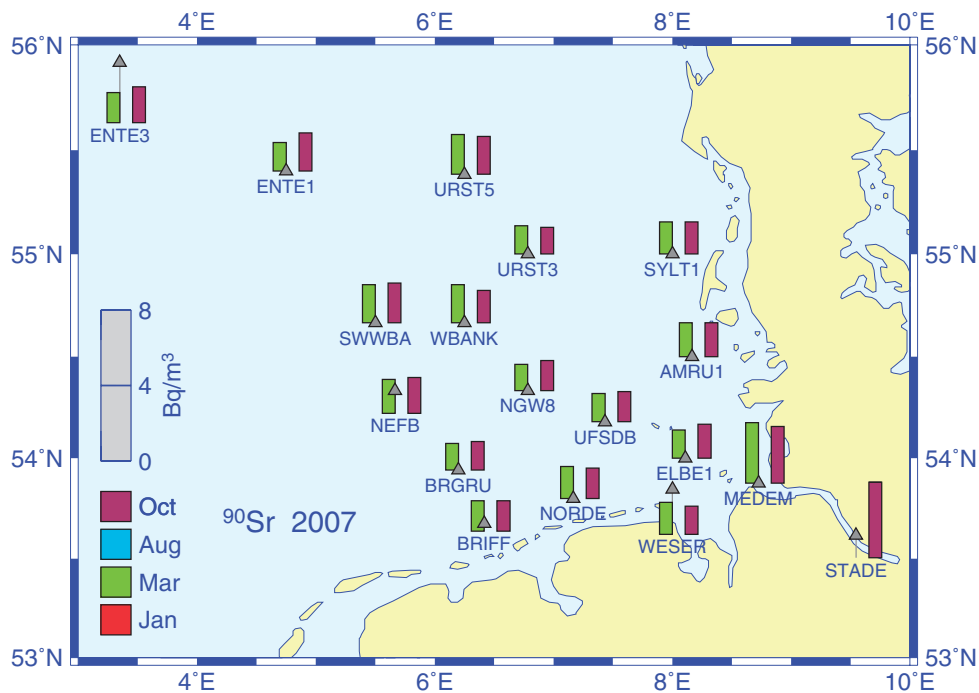


Abb. 4-61: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2007. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-61: Distribution of ^{90}Sr activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2007. Underneath columns station IDs.

4.5.4 Tritium

Tritium (^3H) wird sowohl natürlich in geringem Maße in der Atmosphäre durch Höhenstrahlung gebildet als auch von fast jeder kerntechnischen Anlage gasförmig oder flüssig emittiert. Auf der einen Seite ist das Zurückhalten und Abscheiden von Tritium technisch außergewöhnlich anspruchsvoll, auf der anderen Seite ist die Radiotoxizität nach gegenwärtigem Kenntnisstand vernachlässigbar, so dass Tritiumemissionen und -konzentrationen in der Umwelt als unbedenklich eingestuft werden. Eine Konzentration innerhalb der Nahrungskette findet, im Gegensatz zu anderen Radionukliden, durch die chemischen Eigenschaften des Wasserstoffes nicht statt. Im Rahmen internationaler Vereinbarungen (OSPAR) wird die Verfolgung der Tritiumaktivitätskonzentration im Meerwasser jedoch als wesentlich erachtet, um mittels dieses Indikators Langzeittrends der radioaktiven Einleitungen abschätzen zu können.

In Abb. 4-62 ist die räumliche Verteilung der ^3H -Aktivitätskonzentration in der Deutschen Bucht im März 2006 und im Oktober 2007 zusammengefasst. Die Konzentration des ^3H ist grundsätzlich um drei Größenordnungen höher als bei den radiotoxikologisch relevanten Nukliden ^{137}Cs und ^{90}Sr . Es ist offensichtlich, dass die Küstengewässer deutlich höher kontaminiert sind als die zentrale Nordsee. Dies ist sowohl auf die Einleitungen der Anlage La Hague als auch auf die Ableitungen der kontinentalen kerntechnischen Anlagen über die Flüsse zurückzuführen. Die Tritiumeinleitungen der Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield machen nur ein Zehntel der der Anlage La Hague aus. Durch den zusätzlichen Verdünnungseffekt während des langen Transportweges nördlich um die britischen Inseln herum ergeben sich für die zentrale Nordsee sehr geringe Konzentrationen.

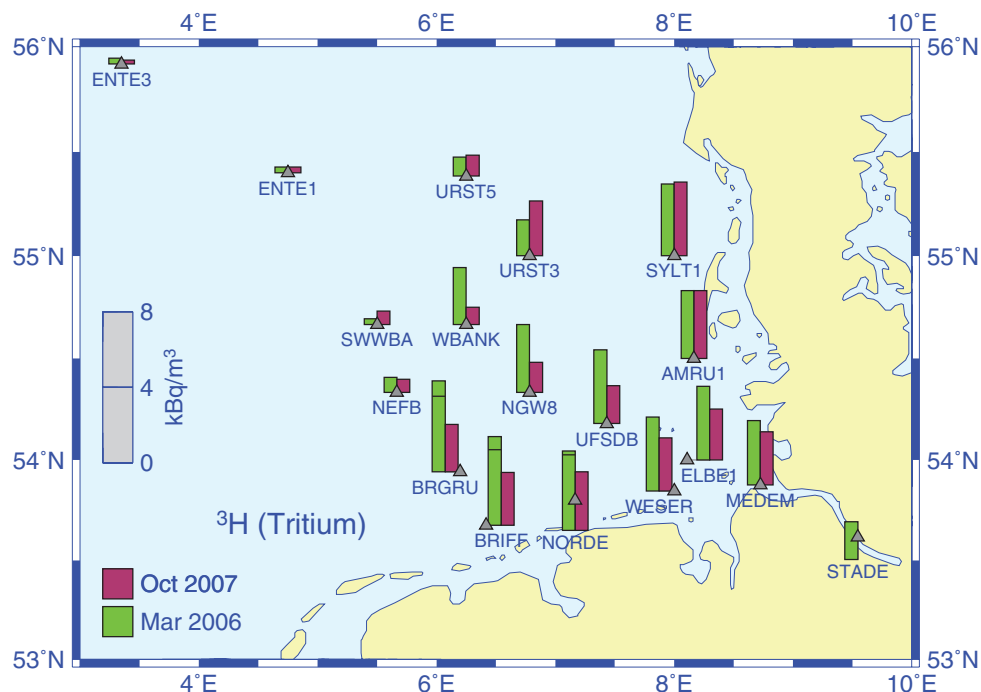


Abb. 4-62: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von Tritium im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht in den Jahren 2006 und 2007. Unterhalb der Säulen Stationskennungen.

Fig. 4-62: Distribution of ^3H activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2006 and 2007. Underneath columns station IDs.

4.5.5 Transurane

Als Transurane bezeichnet man Elemente mit Ordnungszahlen >92 . Sie stehen im Periodensystem jenseits von ${}_{92}\text{Uran}$ und sind überwiegend wie die hier untersuchten Plutonium- und Americiumnuklide langlebige Alphastrahler. Die hier gefundenen Aktivitätskonzentrationen in der Meeresumwelt liegen um drei Größenordnungen niedriger als von ${}^{137}\text{Cs}$ oder ${}^{90}\text{Sr}$.

Räumliche Verteilungen der Aktivitätskonzentration von $({}^{239+240})\text{Pu}$, ${}^{238}\text{Pu}$ und ${}^{241}\text{Am}$ in der Deutschen Bucht sind in *Abb. 4-63* und *Abb. 4-64* für Oktober des Jahres 2006 bzw. 2007 dargestellt. Die Konzentrationen variierten zwischen 4 und 47 mBq/m^3 beim $({}^{239+240})\text{Pu}$, 1 und 12 mBq/m^3 beim ${}^{238}\text{Pu}$ und 3 bis 52 mBq/m^3 beim ${}^{241}\text{Am}$. Die höchsten Konzentrationen finden sich in der Elbe und deren Ästuar und in der äußeren Deutschen Bucht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Elbe natürliche Anreicherungsprozesse an Schwebstoffen eine Rolle spielen. Die hier gezeigten Analysewerte werden grundsätzlich aus ungefilterten Wasserproben gewonnen. Höhere Messwerte von Transuranen an schwebstoffreichen Proben sind nichts Ungewöhnliches, da diese Substanzen eine starke Affinität zu Schwebstoffen und Sedimenten haben.

Die Aktivitätsverhältnisse geben Aufschluss über die Herkunft dieser Nuklide. Während für den globalen Fallout der atmosphärischen Kernwaffentests ${}^{238}\text{Pu}/({}^{239+240})\text{Pu}$ -Aktivitätsverhältnisse von 0,04 – 0,06 charakteristisch sind, liegen diese für die Einleitungen aus den Wiederaufbereitungsanlagen mit ca. 0,2 (Sellafield) und 0,4 bis 0,5 (La Hague) deutlich darüber. Die aktuellen Aktivitätsverhältnisse in der Deutschen Bucht, die im Mittel bei 0,3 lagen, zeigen, dass die Quelle nicht im Fallout, sondern in den Wiederaufbereitungsanlagen zu suchen ist. Gleiches gilt für das Aktivitätsverhältnis ${}^{241}\text{Am}/({}^{239+240})\text{Pu}$, welches im Fallout bei 0,4 liegt. Dieses Verhältnis lag im Berichtszeitraum in der Deutschen Bucht im Mittel bei 0,75, also weit von Falloutverhältnissen entfernt.

Da die Einleitungen der Wiederaufbereitungsanlagen an Transuranen in den letzten Jahren glücklicherweise sehr gering geworden sind, lassen sich die hier gefundenen Aktivitätskonzentrationen, obwohl sehr gering, nur mit Resuspension aus dem Sediment der Irischen See, aber auch der europäischen Kontinentalküste erklären.

4.5.6 Zusammenfassung

Die Überwachung auf radioaktive Stoffe war in den Jahren 2006 und 2007 auf die Radionuklide ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{90}\text{Sr}$, Tritium 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 gegenüber früheren Jahren 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 zustande. In den Konzentrationsverteilungen von ${}^{90}\text{Sr}$ war ein charakteristischer Süßwasser eintrag aus der Elbe erkennbar.

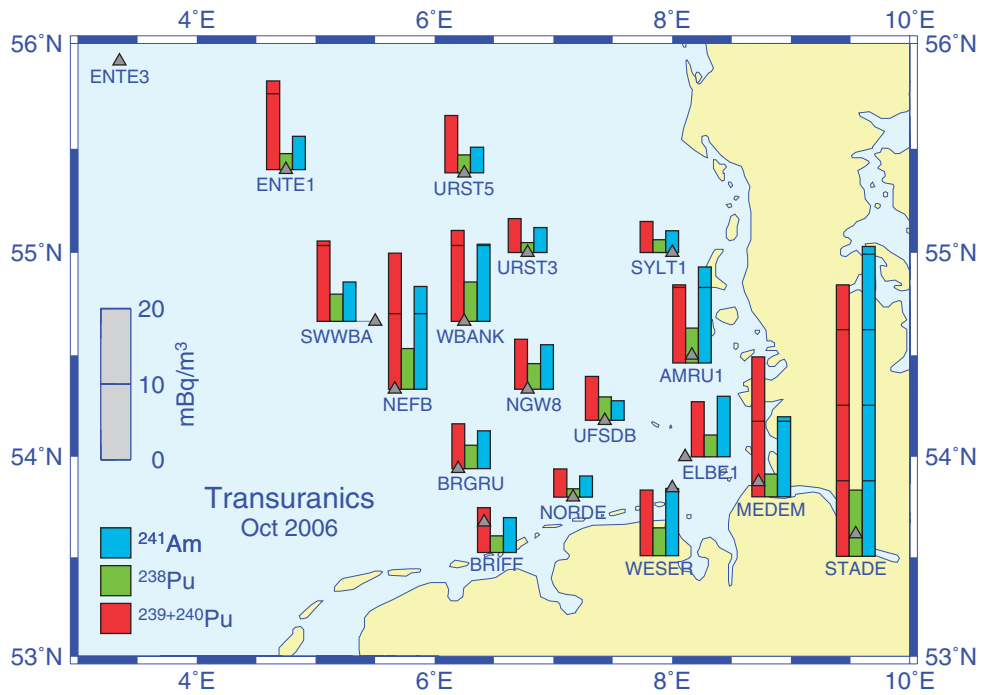


Abb. 4-63: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $(^{239+240})\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2006.

Fig. 4-63: Distributions of activity concentrations of ^{238}Pu , $(^{239+240})\text{Pu}$, and ^{241}Am in surface sea-water of the German Bight in October 2006.

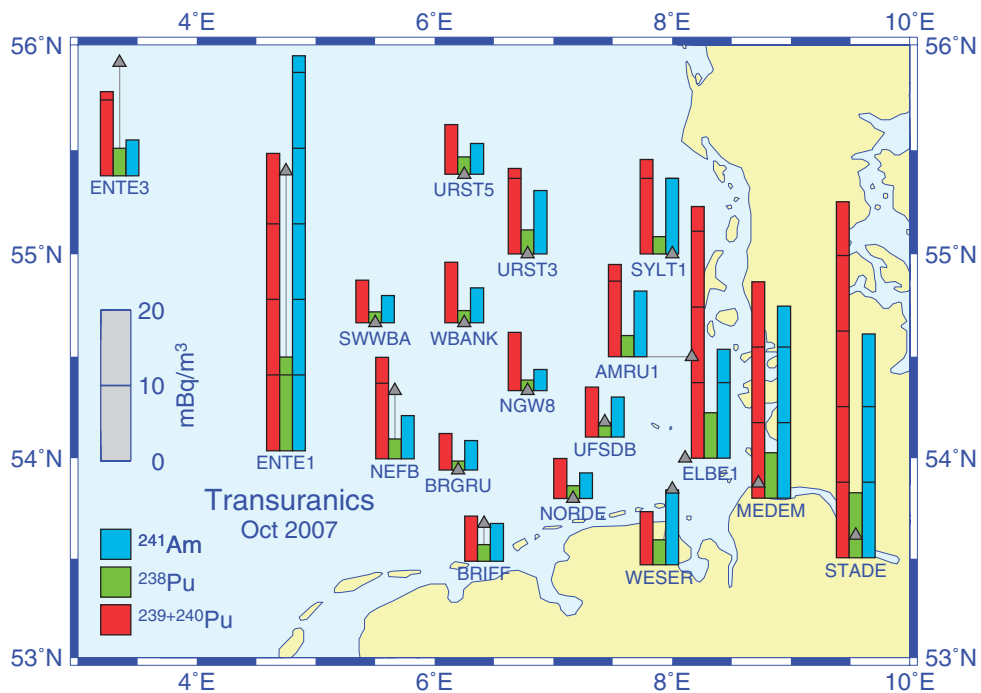


Abb. 4-64: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $(^{239+240})\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2007.

Fig. 4-64: Distributions of activity concentrations of ^{238}Pu , $(^{239+240})\text{Pu}$, and ^{241}Am in surface sea-water of the German Bight in October 2007.

Die im Bereich der Elbe und ihrem Ästuar erhöhten Aktivitätskonzentrationen von Transuranen entstammen anhand der Aktivitätsverhältnisse eindeutig nicht dem Fallout, lassen sich jedoch auch nicht einer lokalen Quelle zuordnen. Im letzteren Fall müssten auch andere künstliche Radionuklide in deutlich erhöhten Konzentrationen nachzuweisen sein, was nicht der Fall ist. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand bleibt nur die Hypothese einer Anreicherung in der Tideelbe über natürliche Transportprozesse durch Adsorption an Schwebstoffen.

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 0,3 $\mu\text{Sv/a}$, die deutlich unter der laut Strahlenschutzverordnung »trivialen Dosis für eine einzelne Quelle« (10 $\mu\text{Sv/a}$) bleibt und dementsprechend aus der Sicht des Strahlenschutzes außer Acht gelassen werden kann. 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.

4.6 Literatur

- Aarkrog, A., M. S. Baxter, A. O. Bettencourt, R. Bojanowski, A. Bologna, S. Charmasson, 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}Cs and ^{210}Po in marine food: A major international study, *J. Environ. Radioact.*, 34, 69-90, 1997.
- Aarkrog, A., Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean, *Deep-Sea Research II*, 50, 2597-2606, 2003.
- 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., D. Topcu und M. Schütt, Assessment of the eutrophication status of the German Bight according to the OSPAR Comprehensive Procedure, Assessed period: 2001-2005, *Documents*, 145pp, OSPAR Commission, London, 2007.
www.ospar.org/documents/07-08/icgcomp2/docs-e/00108rev1_de_revised_comp2_report.pdf
- BSH, Abfallbeseitigung auf der Hohen See. 68-78 in: *Jahresbericht des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 1990*, BSH, Hamurg und Rostock, 1991.
- BSH, MURSYS (Meeresumweltreportsystem), 2006. www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/MURSYS-Umweltreportsystem/Mursys_031/seiten/nozubi01.jsp#juli2006
- 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.
- European Union, Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, *Official Journal of the European Union*, L348, 84-97, 2008. eur-lex.europa.eu/JOIndex.do
- IAEA, Sediment K_d s and concentration factors for radionuclides in the marine environment, *Tech. Rep. Series*, No. 247, International Atomic Energy Agency, 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.
www1.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*, 57pp, BSH, Hamburg und Rostock, 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., G. Becker, U. Brockmann, S. Dick, A. Frohse, J. Herrmann, B. Klein, H. Klein, H. Nies, S. Schmolke, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald, S. Weigelt, Nordseezustand 2004, *Berichte des BSH*, Nr. 40, 217pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2006. www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht40/index.jsp

Loewe, P. (Ed.), System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen, *Berichte des BSH*, Nr. 44, 261pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2009. www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht44/index.jsp

Nies, H., H. Gaul, F. Oestereich, H. Albrecht, S. Schmolke, N. Theobald, G. Becker, A. Schulz, A. Frohse, S. Dick, S. Müller-Navarra, K. Herklotz, Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht, *Berichte des BSH*, Nr. 32, 81pp, BSH, Hamburg und Rostock, 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. 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, 116pp, BfS, Salzgitter, 2005.

NOAA, N S & T Program, Sediment Quality Guidelines developed for the National Status and Trends Program, Center for Coastal Monitoring and Assessment, *CCMA Publications*, Silver Spring, MD, 1999. ccma.nos.noaa.gov/publications/sqg.pdf

OSPAR, Agreed background/reference concentrations for contaminants in sea water, biota and sediment, *Meeting Document No. OSPAR 97/15/1*, Annex 5, 5pp, OSPAR Commission, London, 1997a.

OSPAR, Agreed ecotoxicological assessment criteria for metals, PCBs, PAHs, TBT and some organochlorine pesticides, *Meeting Document No. OSPAR 97/15/1*, Annex 6, 2pp, OSPAR Commission, London, 1997b.

OSPAR, Integrated Assessment of Inputs to the OSPAR Convention Area 1990-1996. Outcome of INPUT Special Assessment Workshop, Den Haag 26.-27. März 1998, *Meeting Document ASMO 98/5/9*, 122pp, OSPAR Commission, London, 1998.

OSPAR, JAMP Guidelines for Monitoring Contaminants in Sediments, *Agreements*, OSPAR Commission, London, 2002. www.ospar.org/documents/dbase/decrecs/agreements/02-16e_JAMP_guidelines_contaminants_in_sediments.doc

OSPAR, Agreement on Background Concentrations for Contaminants in Seawater, Biota and Sediments (OSPAR Agreement 2005-6), *Agreements*, OSPAR Commission, London, 2005. www.ospar.org/documents/dbase/decrecs/agreements/05-06e_agreement_bcs.doc

OSPAR, CEMP Assessment Manual, Co-ordinated Environmental Monitoring Programme Assessment Manual for contaminants in sediment and biota, *Monitoring and Assessment Series*, 379, ISBN 978-1-906840-20-4, OSPAR Commission, London, 2008. www.ospar.org/documents/dbase/publications/p00379_cemp_assessment_manual.pdf

- OSPAR, Agreement on CEMP Assessment Criteria for the QSR 2010 (OSPAR Agreement 2009-2), *Agreements*, OSPAR Commission, London, 2009a. qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00390_supplements/09-02e_Agreement_CEMP_Assessment_Criteria.pdf
- OSPAR, Background Document on CEMP Assessment Criteria for QSR 2010, *Monitoring and Assessment Series*, 461, ISBN 978-1-907390-08-1, OSPAR Commission, London, 2009b. www.ospar.org/documents/dbase/publications/p00461_background_doc_cemp_assessmt_criteria_haz_subs.pdf
- Ott, J., Meereskunde, *UTB für Wissenschaft*, 2. Auflage, 424pp, 1996.
- Pätsch, J. und H.-J. Lenhart, Daily loads of nutrients, total alkalinity, dissolved inorganic carbon and dissolved organic carbon of the European continental rivers for the years 1977-2002, *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung*, Reihe B: Ozeanographie, 48, 159pp, Institut für Meereskunde, Hamburg, 2004. www.ifm.zmaw.de/fileadmin/files/images/Staff/paetsch/river-zmk-48.pdf
- Raabe, T. und K.H. Wiltshire, Quality control and analyses of the long-term nutrient data from Helgoland Roads, *J. Sea Res.*, 61, 3-16, 2009.
- 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*, 348pp, Liverpool, UK, 1934.
- Schubert, B., U. Hentschke, C. Blasi, A. Winterscheid, A. Schöl, D.-S. Wahrendorf, M. Wetzel, C. von Landwüst, H. Büttner, H. Leuchs, Überprüfung der ökologischen Auswirkungen der Verbringung von Baggergut aus der Hamburger Delegationsstrecke der Elbe auf die Umlagerungsstelle Tonne E3 nordwestlich von Scharhörn im Rahmen des Sedimentmanagementkonzeptes Tideelbe – Zwischenbericht 2008, *Berichte und Gutachten: BfG-1659*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 2010.
- Theobald, N., Identifizierung neuer Schadstoffe im Rahmen der Meeresumwelt-Überwachung (Target- und Non-Target-Screening), *Dt. Hydrogr. Z.*, Suppl. 8, 27-37, 1998.
- Theobald, N. und P. Loewe, Organische Stoffe. 177-216 in: Loewe, P. (Ed.), System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen, *Berichte des BSH*, Nr. 44, 261pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2009.
- US-EPA, National Recommended Water Quality Criteria, U. S. Environmental Protection Agency, 2010. water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/current/index.cfm
- van Beusekom, J. E. E., U. Brockmann, K. Hesse, W. Hickel, K. Premba, U. Tillmann, The importance of sediments in the transformation and turnover of nutrients and organic matter in the Wadden Sea and the German Bight, *Dt. Hydrogr. Z.*, Supp. 51, 245-266, 1999.
- van Beusekom, J. E. E., S. Weigelt-Krenz und P. Martens, Long term variability of winter nitrate concentrations in the Northern Wadden Sea driven by freshwater discharge, decreasing riverine loads and denitrification, *Helgol. Mar. Res.*, 62, 49-57, 2008.
- Volkmer, M., Kernenergie Basiswissen, Informationskreis KernEnergie, 100pp, Berlin, 2007. www.kernfragen.de/kernfragen/documentpool/018basiswissen2007.pdf

Abbildungsverzeichnis

Atmosphärenphysik

- Abb. 2-1: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 18. März 2007 (Orkantief ›Orkun‹) mit Gitterpositionen zur Wetterlagenklassifizierung.41
- Abb. 2-2: Rel. Häufigkeitsverteilung der täglichen Zirkulationszustände im Zeitraum 1971 – 2000 mit Klassifizierungskriterien. Demarkationslinien (grün) zwischen Richtungs- und Hybridsektoren ($\zeta^*/V^* = \pm 1$) sowie Hybrid- und Rotationssektoren ($\zeta^*/V^* = \pm 2$). Schwellwerte G_{thr}^* für Sturmellipsen (blau): 28,3 (gale), 36,6 (severe gale), 44,6 hPa (very severe gale); Halbachsen: $a^* = 2 G_{thr}^*$, $b^* = a^*/2$. Obere und rechte Achsenskalierung: $V = 0,62V^*$, $\zeta = 2,72\zeta^*$42
- Abb. 2-3: Luftströmung um Hoch (A) und Tief (C).46
- Abb. 2-4: Relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen für 2006 (blau) und 2007 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971 – 2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppenlinie), 75 und 90%.52
- Abb. 2-5: Wie Abb. 2-4, jedoch für monatliche absolute Häufigkeiten (Tage).53
- Abb. 2-6: Skalierte Histogramme (gestapelt) für die Lauflänge (rl) der Wetterlagen (w) in den Jahren 2006 & 2007. Basis %-Skala: 365 Tage. Höhe Stapелеlemente: $rl \times \text{Anzahl Läufe } r(w,rl)$. Schwarze Zahlen: $r(w,rl)$, blau: $r(rl)$. + Symbole: $rl \times r(rl) \times 365/10958$ d für 1971 – 2000. .55
- Abb. 2-7: Kumulative empirische vs. geometrische Überlebenswahrscheinlichkeiten (P-P-Plot) für Wetterlagenepisoden (5438 insges.) im Zeitraum 1971 – 2000 (10958 Tage). p ist der Kehrwert der mittleren Lebensdauer (s. Tab. 2-10), $1-p$ die Überlebenswahrscheinlichkeit. Die Potenzen $(1-p)^k$ liefern die lateren Fadenkreuzpositionen zur Überlebensfunktion S (= 1-GeoCDF). Die Position $k=1$ gibt den Prozentsatz der Episoden, die ein Mindestalter von 2 Tagen erreichen.58
- Abb. 2-8: Wetterlagenübergänge, Jahresklimatologie. Die Bogenlänge eines Ringsektors entspricht der Häufigkeit f in Tagen von Wetterlage X , d. h. der jeweiligen Randsumme der Countmatrix ζ in Tab. 2-11. Häufigkeiten der Übergänge $Y \neq X \rightarrow X$ (Spalteneinträge) sind als nach Y eingefärbte Segmente innerhalb Sektor X dargestellt; der freibleibende Sektorbereich entspricht Selbstübergängen $Y=X \rightarrow X$. Die Sockel der Bézierbänder kennzeichnen Übergänge $X \rightarrow Y \neq X$ (Zeileneinträge) und sind wie Wetterlage Y eingefärbt. Die Bézierbänder haben Farbe X , wenn $f(X \rightarrow Y) \geq f(Y \rightarrow X)$, sonst Farbe Y62
- Abb. 2-9: Wie Abb. 2-8, jedoch für die Jahre 2006 und 2007.63
- Abb. 2-10: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: UKMO Klimatologie (1971 – 2000), Konturintervall 1 hPa. Mitte: wie links, jedoch für NCEP/NCAR. Rechts: NCEP/NCAR minus UKMO, Konturintervall 0,25 hPa. JFM, AMJ, ... = Winter, Frühling, ... Allen Darstellungen liegen MSLP-Daten in der horizontalen Auflösung der UKMO-Felder zugrunde (5×10 Grad).70
- Abb. 2-11: Klimatologische Abweichungen (1971 – 2000) vom »beobachteten« Luftdruck im Meeresniveau auf der WMO-Station 01492 Oslo-Blindern ($59^\circ 56' 34''$ N, $10^\circ 43' 15''$ E, 94 m ü. d. M.) für UKMO, NCEP/NCAR und ERA-40 MSLP bei 60° N, 10° E.71
- Abb. 2-12: NCEP/NCAR Klimatologie (1971 – 2000) der saisonalen Höhenverteilungen (gpm) der 925 hPa Fläche. Diese Druckfläche befindet sich im Gipfelniveau der Modell-Skanden (600 – 700 m). Die Isohypsen sind in gleicher Weise zu interpretieren wie die Isobaren in den MSLP-Verteilungen der Abb. 2-10.72

Abb. 2-13: Winter: Monatliche/saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (hPa) mit Klassifizierung. Links: NCEP/NCAR Klimatologie (1971 – 2000). Mitte: 2006. Rechts: Anomalien. J, F, M, JFM = Januar, Februar ... 77

Abb. 2-14: Wie Abb. 2-13, jedoch für Frühling 2006. 78

Abb. 2-15: Wie Abb. 2-13, jedoch für Sommer 2006. 79

Abb. 2-16: Wie Abb. 2-13, jedoch für Herbst 2006. 80

Abb. 2-17: Wie Abb. 2-13, jedoch für Winter 2007. 81

Abb. 2-18: Wie Abb. 2-13, jedoch für Frühling 2007. 82

Abb. 2-19: Wie Abb. 2-13, jedoch für Sommer 2007. 83

Abb. 2-20: Wie Abb. 2-13, jedoch für Herbst 2007. 84

Abb. 2-21: Saisonale 50%-Wahrscheinlichkeitsellipsen des ›Nordseewindes‹ (1 = Winter = JFM, 2 = Frühling, etc.); oben: 2006, unten: 2007. 86

Abb. 2-22: Virtuelle Trajektorie des ›Nordseewindes‹ mit Ensemble und Klimatologie. Zeitmarken kennzeichnen Monatsanfänge, Jahreszahlen die Endpunkte der Ensemblemitglieder. 89

Abb. 2-23: UKMO vs. NCEP: Gesamtanzahl jährlicher Sturmtage für einen Schwellwert G^* von 30 hPa. Die Mittelung der SLP-Daten über 4 Tagestermine im NCEP-Fall verursacht eine systematische Unterschätzung von Stürmen um –27 % gegenüber UKMO (nur 0Z-Termin). Das Verschwinden des Offset ab 2002 weist auf eine Inhomogenität der UKMO-Daten hin. 93

Abb. 2-24: Sturmquantile für feste Überschreitungswahrscheinlichkeiten (1 – CDF) aufgrund der empirischen, der Gamma- und der Verallgemeinerten Pareto-Verteilung (GPD) für den Sturmindex G^* im Zeitraum 1971 – 2000. Oben: UKMO, unten: NCEP. 95

Abb. 2-25: Sturmhäufigkeiten für 2005/06 (blau) und 2006/07 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971 – 2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppenlinie), 75 und 90 %. 100

Abb. 2-26: Jahresgänge der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971 – 2000) mit 95%-Band ($\pm 1,96$ zwischenjährliche Standardabweichungen). 1 kJcm^{-2} entspricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm^{-2} . Rohdaten: DEUTSCHER WETTERDIENST. 104

Abb. 2-27: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ zwischenjährliche Standardabweichungen). Rohdaten: DWD. 104

Abb. 2-28: Hemisphärische Temperaturanomalien (K) für Juli 2006 (oben) und Jan. 2007. Basisperiode 1971 – 2000. Konturen, voll: 0 & $\pm 2^k$, gestrichelt: $\pm 0,5$ & $\pm 3 \times 2^{k-1}$, $k=0, 1, 2, 3$; Label, rot/blau: +/- . Quelldaten: NCDC, merged land-ocean sfc. temp. (GHCM-M v3.1.0 & ICOADS/ERSST v3b), www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-products.php. 105

Meeresphysik

Abb. 3-1: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2006. Vektormittel aus Strömungsfeldern des ›BSHcmod‹. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel. 118

Abb. 3-2: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im Jahr 2007. Vektormittel aus Strömungsfeldern des ›BSHcmod‹. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis Vektormittel zu Betragsmittel. 120

Abb. 3-3: Wassertransport durch die Straße von Dover in den Jahren 2006 (oben) und 2007 (unten). Modelldaten ›BSHcmod‹; $1 Sv = 10^6 m^3/s$	123
Abb. 3-4: Wassertransport in den Jahren 2006 (oben) und 2007 (unten) durch den Westrand der Deutschen Bucht von $53^\circ 15'$ bis $55^\circ N$ entlang $6^\circ 20' E$. Modelldaten ›BSHcmod‹; $1 Sv = 10^6 m^3/s$	124
Abb. 3-5: Wassertransport durch das Kattegat in den Jahren 2006 (oben) und 2007 (unten). Modelldaten ›BSHcmod‹; $1 Sv = 10^6 m^3/s$	125
Abb. 3-6: Saisonale und jährliche Häufigkeiten der Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für die Jahre 2006 und 2007 mit Perzentilen der empirischen Verteilungen für 2000 – 2009 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, Treppe), 75 und 90 %.	129
Abb. 3-7: Saisonale geographische Verteilungen von Wellenhöhe, Windsee und Dünung im Jahr 2006 (›WAM‹ Modell); JFM = Januar, Februar, März etc.	132
Abb. 3-8: Saisonale geographische Verteilungen von Wellenhöhe, Windsee und Dünung im Jahr 2007 (›WAM‹ Modell); JFM = Januar, Februar, März etc.	133
Abb. 3-9: Seegangparameter an der Messstation FINO-1 während des starken Sturms am 31. Oktober und 1. November 2006. Oben: Signifikante Wellenhöhe (rot) und Peakperiode (blau). Unten: Windgeschwindigkeit (rot) und Windrichtung (blau).	134
Abb. 3-10: Luftdruck, Wind und Wellenhöhe im Verlauf des Sturmes am 1. November 2006 (›WAM‹ Modell). Eingezeichnet: Gemessene Wellenhöhen an den Stationen Brent, Ekofisk, FINO-1 und Euro (von N nach S, r. u.).	135
Abb. 3-11: Schäden durch Extremseegang an der Messplattform FINO-1.	136
Abb. 3-12: Monatliche Wasserstandsmittelwerte (rot) am Pegel Cuxhaven 1918 – 2009 mit Langzeittrend (blau) und Trendbeschleunigung (türkis, rechte Skala).	139
Abb. 3-13: Jahresgänge 2006/07 der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen mit Ensemble der Jahresgänge seit 1971 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971 – 1993) und zwischenjährlichen Standardabweichungen (Kreisradius).	143
Abb. 3-14: Jahresgänge 2006/07 der monatlichen Oberflächentemperatur (und intramonatliche Extrema) bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ Standardabweichungen). (Rohdaten: K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)	143
Abb. 3-15: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2006 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0,5 K. Kürzel, oben rechts, bezeichnen atmosphärische Zirkulationsanomalien (Abb. 2-13, S. 77 ff.).	145
Abb. 3-16: Monatliche Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2007 als Abweichungen von der 1971 – 1993 Klimatologie. Konturintervall 0,5 K. Kürzel, oben rechts, bezeichnen atmosphärische Zirkulationsanomalien (Abb. 2-17, S. 81 ff.).	146
Abb. 3-17: Temperaturschichtung ($^\circ C$) im Sommer 2006 (FS Gauß, Reise #463).	148
Abb. 3-18: Temperaturschichtung ($^\circ C$) im Sommer 2007 (FS Pelagia, Reise #273).	149
Abb. 3-19: Temperaturschichtung ($^\circ C$) an den MARNET-Stationen ›NSB III‹ ($54^\circ 41' N$, $6^\circ 47' E$) und ›Ems‹ ($54^\circ 10' N$, $6^\circ 21' E$). Wasser- und Sensortiefen: 40 m & 4, 6, 11, 15, 20, 25, 30, 35 m und 33 m & 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30 m.	152
Abb. 3-20: Temperaturschichtung an der MARNET-Station ›Ems‹ im Jahr 2006. Mitte: Temperaturdifferenz Oberfläche minus Boden. Oben: ›Nordseewind‹ (blau, vgl. Kap. 2.5, S. 85) und lokaler 10 m Wind (schwarz, Tagesmittel mit Spannweite). Unten: Globalstrahlung auf Norderney (Kap. 2.7, S. 102).	153

Abb. 3-21: Eisverhältnisse an der deutschen Nord- und Ostseeküste am 27. Januar 2006, dem Zeitpunkt maximaler Vereisung im Winter 2005/06. 154

Abb. 3-22: Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- (links) und Bodennähe (rechts) im Winter (oben) und Sommer (unten) des Jahres 2006. 157

Abb. 3-23: Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- (links) und Bodennähe (rechts) im Winter (oben) und Sommer (unten) des Jahres 2007. 158

Abb. 3-24: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2006 (FS Gauß, Reise #463a). 159

Abb. 3-25: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2007 (FS Pelagia, Reise #273a). 160

Abb. 3-26: Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Langzeitmittel (1971 – 2000) und 95%-Grenzen. $1 \text{ km}^3/\text{a}$ entspricht $31,7 \text{ m}^3/\text{s}$. (Rohdaten: WSA-Lauenburg.) 162

Abb. 3-27: Monatsmittel und max. Abflussraten der Elbe in den Jahren 2006 und 2007 am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ Std. Abw.). $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechen $2,592 \text{ km}^3/\text{Monat}$. (Datenquelle: BfG/WSA-Lauenburg.) 163

Abb. 3-28: Jahresgänge 2006/07 des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und intra-monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971 – 2000) und 95%-Band (Klima $\pm 1,96$ Std. Abw.). (Rohdaten: K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.) 164

Meereschemie

Abb. 4-1: Stationsnetz zur Schadstoff- und Nährstoffüberwachung in der Deutschen Bucht und der Nordsee. 169

Abb. 4-2: Stickstoff- und Phosphorfracht der Weser und Elbe in absoluten (oben) und spezifischen Einheiten. Die Daten basieren auf Messungen von FFG Weser und FFG Elbe. ... 172

Abb. 4-3: Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) für Phosphat, DIN und Silikat im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Januar 2006. 174

Abb. 4-4: Salzgehaltsverteilung im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Januar 2006. 175

Abb. 4-5: Redfield-Verhältnis ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) im Bodenwasser der Dt. Bucht im Januar 2006. 175

Abb. 4-6: Phosphatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007. 176

Abb. 4-7: Nitratkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007. 177

Abb. 4-8: Redfield-Verhältnis im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007. 178

Abb. 4-9: Nitritkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007. 179

Abb. 4-10: Ammoniumkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007. 180

Abb. 4-11: Silikatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Oberflächen- und Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2007. 180

Abb. 4-12: Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumkonzentrationen im Seewasser an den Monitoringstationen EIDER, NSB2, ENTE1 (Okt. 2004 bis Okt. 2007). 182

Abb. 4-13: Phosphatkonzentrationen im Seewasser an den Monitoringstationen EIDER, NSB2, ENTE1 (Okt. 2004 bis Okt. 2007). 183

Abb. 4-14: Phosphat-, DIN-, Silikatkonzentration vs. Salzgehalt in der Deutschen Bucht im Februar 2006. 185

Abb. 4-15: Zeitserien der berechneten winterlichen Nährstoffkonzentrationen im Küstenwasser der Deutschen Bucht (Salzgehalt 30) mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Vergleichswerten von 1936, soweit verfügbar.	187
Abb. 4-16: Chlorophyll-a-Konzentration ($\mu\text{g/L}$) im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2006 und 2007.	189
Abb. 4-17: Sauerstoffsättigung (%) im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2006 & 2007.	190
Abb. 4-18: Sauerstoffsättigung (%) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2006 & 2007.	190
Abb. 4-19: Geographische Verteilung des TOC-Gehalts im Oberflächensediment der Deutschen Bucht (Mittelwerte von Mai 2006 und Mai 2007).	195
Abb. 4-20: HCH-Konzentrationen und α/γ -HCH Verhältnis für Oberflächenwasser (5 m) der DB im Mai (links) und August (rechts) 2007.	197
Abb. 4-21: HCH-Konzentrationen und α/γ -HCH Verhältnis des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im August 2007.	199
Abb. 4-22: Zeitliche Entwicklung der α -, β - und γ -HCH-Konzentrationen bei Stade (Elbe) seit 1995.	200
Abb. 4-23: Zeitliche Entwicklung der α - und γ -HCH-Konzentrationen an Station ›Eider‹ seit 1987.	201
Abb. 4-24: Zeitliche Entwicklung der α - und γ -HCH-Konzentrationen in der äußeren Deutschen Bucht (Station ›NSB2‹) seit 1989.	201
Abb. 4-25: CB153-Konzentrationen des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im August 2007.	204
Abb. 4-26: HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2007.	205
Abb. 4-27: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2006 und 2007.	207
Abb. 4-28: Beispiele für Konzentrationsmuster von n-Alkanen im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im August 2007. Hintergrundbelastung mit Resten bio- und petrogener Alkane (›ST013‹), hohe Alkananteile von terrestrischen Pflanzen (›MEDEM‹), von Algenstoffwechselprodukten (›NORDE‹, ›MEDEM‹) und infolge Ölverschmutzung (›BRIFF‹). Zur Lage der Stationen vgl. Abb. 4-1, S. 169.	208
Abb. 4-29: Geographische Konzentrationsverteilung für die Summe der n-Alkane von C_{20} bis C_{30} im Oberflächenwasser der Nordsee (5 m) im August 2007.	209
Abb. 4-30: Geographische Konzentrationsverteilungen für die n-Alkane C_{13} bis C_{19} im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im August 2007. Säulenhöhen in ng/L, unterhalb der Säulen Stationskennungen.	210
Abb. 4-31: Konzentrationen ausgesuchter PAK im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Aug. 2007. Säulenhöhen in ng/L; unterhalb der Säulen Stationskennungen.	214
Abb. 4-32: Median-Werte der PAK-Konzentrationen in der Deutschen Bucht.	215
Abb. 4-33: PAK-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2007.	216
Abb. 4-34: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im August 2007.	219
Abb. 4-35: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im August 2007.	220

Abb. 4-36: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Phenoxyessigsäure-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im August 2007.	221
Abb. 4-37: Herbizid-Konzentrationen in der Deutschen Bucht als %-Anteil der Stadelkonzentrationen im August 2006.	222
Abb. 4-38: Zeitlicher Verlauf der Herbizid-Konzentrationen auf ausgewählten Stationen der Deutschen Bucht.	224
Abb. 4-39: Mediankonzentrationen von küstennahen Stationen ($S = 27,8 - 31,8$) im Zeitraum 2004 - 2005.	225
Abb. 4-40: PFC-Konzentrationen (ng/L) im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im August 2007.	228
Abb. 4-41: PFC-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2004.	229
Abb. 4-42: PFOA und PFOS-Konzentrationen in einem Sedimentkern aus dem Skagerrak ($57^{\circ} 48' N, 8^{\circ} 0' E$) vom August 2005 im Vergleich zu CB153, pp'-DDD und HCB.	230
Abb. 4-43: Verteilungsstatistik der prozentualen Anteile der gelösten Fraktion an den Gesamtmetallgehalten in der Wassersäule, in einer Boxdarstellung. Jede Box stellt die Streuung aller Wintermesswerte (JFM) eines Elements zwischen 1999 und 2005 dar. Die vier Grafiken sind nach zunehmenden Salzgehalten differenziert; links oben: $S = 0 - 28$, r. o.: $28 - 30$, l. u.: $30 - 32$, r. u.: $32 - 34$	239
Abb. 4-44: Korrelation der gelöst vorliegenden Elementgehalte mit dem Salzgehalt im Januar 2006. Es wurden nur Proben mit Salzgehalten größer 20 berücksichtigt; Rote Linie: Regressionsgerade (kleinste Fehlerquadrate) und Regressionsgleichung; Schwarz gestrichelte Linie: robuste Regression (gewichtete Residuen).	241
Abb. 4-45: Regressionsanalyse der Elementgehalte versus Salzgehalt im Zeitraum 2000 - 2009. Verteilungsstatistik der Regressionsmodellparameter und Bestimmtheitsmaße aller untersuchten Reisen als Boxdarstellung ($y = ax + b$; Schnittpunkt (b), Steigung (a), Bestimmtheitsmaß (R^2)). (Median, 25 %, 75 % Quantil, Minimum, Maximum, Extremwerte). Oben: zusätzlich die Gesamtzahl der pro Quartal untersuchten Reisen (schwarz) und die Anzahl der Reisen mit einer Element/Salzgehalt-Korrelation ($R^2 \geq 0,5$) (rot). Die Diagramme zu Schnittpunkt und Steigung zeigen lediglich Werte aus Regressionsmodellen mit einem Bestimmtheitsmaß $\geq 0,5$	242
Abb. 4-46: Jahresgänge (Boxdarstellung) der gelösten Cd, Cu, Mn, Ni, Pb und Zn-Gehalte im küstennahen Wasser (30 - 32). Unterlegter grauer Balken entspricht den Hintergrundkonzentrationen.	243
Abb. 4-47: Räumliche Elementverteilungen im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) im Januar 2006.	245
Abb. 4-48: Räumliche Elementverteilungen im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) im Januar 2007.	246
Abb. 4-49: Räumliche Struktur der gelösten Elementgehalte im filtrierten Oberflächenwasser im Sommer 2006.	247
Abb. 4-50: Zeitreihe der jährlichen Verteilungsstatistiken der gelösten Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) im Winter (Jan., Feb., Mrz.) im filtrierten küstennahen (30 - 32) Oberflächenwasser bei 10 m Wassertiefe in einer Boxdarstellung. Graue Balken: OSPAR-Hintergrundwerte.	249
Abb. 4-51: Zusammenfassende Bewertung der Metallbelastung im filtrierten Oberflächenwasser (10m) der Nordsee. Verteilungsstatistiken der Metallgehalte im küstennahen Wasser (Salzgehalte 30 - 32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (> 34 , Entenschnabel) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) der Jahre 2006 und 2007 in einer Boxdarstellung. An	

- der Ordinate sind, den Bewertungskriterien entsprechend, Farbcodes aufgetragen. Blau: Gehalt < OSPAR-BRC; Grün: BRC < Gehalt < Effekt; Rot: Gehalt > Effekt. (vgl. Kap. 4.4.2.1, S. 235 und Tab. 4-4, S. 236; Effekt (Cd, Hg, Ni, Pb) = WRRL AA-EQS, Effekt (Cu, Zn) = US EPA WQS). Rechte Abszisse: Bewertungssymbol: Die Farbe des Kreises gibt die Bewertung des Elementgehaltes im Jahr 2007 wieder. Ein signifikanter Trend (95 %) innerhalb der vergangenen fünf Jahre wird durch einen auf-/abwärts gerichteten Pfeil angezeigt. 251
- Abb. 4-52: Sedimentprobenahmestationen Deutsche Bucht (rechts), gesamte Nordsee (links). Probenahmen in den Jahren 2006 sind durch ein (o), 2007 durch ein (x) gekennzeichnet. In der linken Grafik sind einzelne Trendstationen zu Gruppen zusammengefasst (rote Ellipse). Metallgehalte und Trends werden in diesen ›Trendregionen‹ zusammengefasst bewertet. 253
- Abb. 4-53: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion (< 20 µm) im Gesamtsediment 1995 – 2007 (Nordsee und Detailansicht Deutsche Bucht). 253
- Abb. 4-54: Räumliche Verteilung der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments. Kombination der Messergebnisse der Nordseeaufnahme im Sommer 2006 und der Gesamtaufnahme der Deutschen AWZ im Frühjahr 2000. 256
- Abb. 4-55: Zeitreihen der Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) in den Regionen KS (SE Helgoland) und Weiße Bank (WB). Zusätzlich sind in den ersten sechs Grafiken Einzelmesswerte von der Klappstelle Tonne E3 dargestellt (blaue Kreise). BSH-Hintergrundwerte sind als graue Balken hinzugefügt. (Vgl. Tab. 4-5). 257
- Abb. 4-56: Bewertung der Metallbelastung der Oberflächensedimente im Jahr 2007 und Abschätzung der zeitlichen Entwicklung innerhalb der vergangenen 10 Jahre. Rot: geringe Wahrscheinlichkeit von Effekten. Grün: keine Effekte zu erwarten, aber Hintergrundwert überschritten. Blau: Belastung nahe oder gleich dem Hintergrundwert. Ein signifikanter zeitlicher auf-/abwärts gerichteter Trend innerhalb der vergangenen 10 Jahre wird durch ein nach oben/unten gerichtetes weißes Dreieck symbolisiert. Oberhalb jedes Symbols ist das Bewertungsjahr angegeben, unterhalb der Gehalt (Median in mg/kg TM). 260
- Abb. 4-57: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von ¹³⁷Cs und ⁹⁰Sr in Oberflächenwasser an den früheren Positionen der Feuerschiffe ›Borkumriff‹ und ›Elbe 1‹. 267
- Abb. 4-58: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ¹³⁷Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2006. Unterhalb der Säulen Stationskennungen. 269
- Abb. 4-59: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ¹³⁷Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2007. Unterhalb der Säulen Stationskennungen. 269
- Abb. 4-60: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ⁹⁰Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2006. Unterhalb der Säulen Stationskennungen. 270
- Abb. 4-61: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ⁹⁰Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2007. Unterhalb der Säulen Stationskennungen. 270
- Abb. 4-62: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von Tritium im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht in den Jahren 2006 und 2007. Unterhalb der Säulen Stationskennungen. 271
- Abb. 4-63: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ²³⁸Pu, (²³⁹+²⁴⁰)Pu und ²⁴¹Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2006. 273
- Abb. 4-64: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ²³⁸Pu, (²³⁹+²⁴⁰)Pu und ²⁴¹Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2007. 273

Tabellenverzeichnis

Atmosphärenphysik

Tab. 2-1: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2006. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	44
Tab. 2-2: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2006 (%).	44
Tab. 2-3: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2007. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	45
Tab. 2-4: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2007 (%).	45
Tab. 2-5: Saisonale und jährliche relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen in den Jahren 2006 und 2007.	47
Tab. 2-6: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2006.	48
Tab. 2-7: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2006.	48
Tab. 2-8: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2007.	49
Tab. 2-9: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2007.	49
Tab. 2-10: Mittlere Lebensdauer in Tagen für die reduzierten Wetterlagen und das anonyme »Ding-an-sich« (NN) in der Periode 1971 – 2000 und den Jahren 2006 und 2007.	56
Tab. 2-11: Wetterlagenübergänge für Basisperiode 1971 – 2000 (NCEP). ζ : Übergangshäufigkeiten (gerundet) für das klimatologische Jahr. G : Übergangshäufigkeiten für Markovkette (MK) 0. Ordnung, $g_{ij} = RS_i CS_j / 364$. $P (= P^1)$: Übergangswahrscheinlichkeiten für MK 1. O. (aus ζ via ζ_{ij} / RS_i); π : Eigenvektor ($\pi = \pi P$), stationäre (unbedingte, klimatologische) Grenzverteilung. Die p_{ij} (${}_2 p_{ij}$, ${}_6 p_{ij}$) der Matrix $P = P^1 (P^2, P^6)$ sind bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Übergang der Kette vom aktuellen Zustand s_i in den Zustand s_j in 1 (2, 6) Zeitschritten (Tagen). E : ÜW für eingebettete Markovkette ohne Verweilzeiten (aus ζ wie P für $\zeta_{ij} = 0$).	60
Tab. 2-12: Wie Tab. 2-11, jedoch für die Jahre 2006 (links) und 2007.	66
Tab. 2-13: Nordseewindstatistik. Mittelwerte und Standardabweichungen (m/s) für zonale (u , s_u) und meridionale (v , s_v) Windkomponenten, Vektorwind und -richtung (V , V_{DIR}), skalarer Wind (VEL), Persistenz (V/VEL in %) und »Fläche« der 50%-Wahrscheinlichkeitsellipse ($FE_{50} = 1,3863 \pi s_a s_b$ in J/kg).	85
Tab. 2-14: Nordseewind. Monatsstatistik: Windrichtung, vektorielle (V) und skalare (VEL) Windgeschwindigkeit (m/s) und Persistenz (V/VEL in %).	90
Tab. 2-15: Überschreitungswahrscheinlichkeiten der empirischen kumulativen Verteilung (Reihe 2) für originäre Jenkinson-Collison Sturmschwellwerte (R. 1) und Sturmschwellwerte (R. 4 bis 6) für »runde« Überschreitungswahrscheinlichkeiten (R. 3) verschiedener Verteilungen.	94
Tab. 2-16: Wiederkehrzeiten für Stürme der Mindeststärke G^* aufgrund der GPD. V und ζ sind zugehörige, durch die Halbachsen der Sturmellipsen ($G^* = b^* = a^*/2$) festgelegte, maximale Windgeschwindigkeiten und Wirbelstärken ($rpd =$ Umdrehungen/Tag). Die NCEP-Schwellwerte für Sturm (G), schweren (SG) und sehr schweren Sturm (VSG) sind fett gedruckt. Aufgrund der positiven Formparameter der GPDs sind Stürme oberhalb der in der letzten Zeile angegeben Stärke nicht möglich.	94
Tab. 2-17: Die 10 schwersten Stürme im Zeitraum 1948 – 2011 (NCEP). $rDV_1 = V/V_{max}(T_1) - 1$ ist die relative Abweichung der Windgeschwindigkeit von der zum VSG-Schwellwert (Wiederkehrzeit 1 Jahr) gehörigen Maximalgeschwindigkeit (s. Tab. 2-16, S. 94).	97

Tab. 2-18: Anzahl der Tage mit starkem bzw. sehr starkem Sturm (SG|VSG).98
 Tab. 2-19: Anzahl Sturmtage (G+SG+VSG).99

Meeresphysik

Tab. 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für das Jahr 2006. Im Gegensatz zur Windrichtung gibt die Strömungsrichtung an, wohin der Strom setzt. 126
 Tab. 3-2: Kalender der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für das Jahr 2007. Im Gegensatz zur Windrichtung gibt die Strömungsrichtung an, wohin der Strom setzt. 127
 Tab. 3-3: Häufigkeiten der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für 2000 – 2009 mit standardisierten Abweichungen vom 10-Jahresmittel (m). Anomalien größer |1| Standardabweichung (s) fett. 128
 Tab. 3-4: Häufigkeitsverteilung des Windstaus für die Jahre 2006 und 2007 am Pegel Cuxhaven. 140
 Tab. 3-5: Sturmfluthäufigkeiten in den Zeiträumen 1951 – 2007 und 2006 – 2007 mit MHW-Entwicklung (cm über PN). Borkum: Bis 1962 Pegel Südstrand, danach Fischerbalje. .. 140
 Tab. 3-6: Wärmeinhalt (HC) der Nordsee mit Volumen- (SVT) und Oberflächentemperatur (SST) basierend auf 10 Sommeraufnahmen mit FS Gauß und FS Pelagia. Das Analysegebiet hat ein Volumen von $35,6 \times 10^3 \text{ km}^3$, eine Fläche von $404,1 \times 10^3 \text{ km}^2$ und eine mittlere Tiefe von 88 m. Während HC ~ SVT, besteht ein einfacher Zusammenhang zur SST nicht. ... 150
 Tab. 3-7: Gesamter Salzinhalt der Nordsee (S) mit standardisierter Abweichung (SA) vom Mittelwert 2000 - 2009 ($1,142 \pm 0,006 \times 10^{12} \text{ t}$, ohne 2001). Die Analyse basiert auf den Daten der Sommeraufnahmen mit FS Gauß und FS Pelagia. 161

Meereschemie

Tab. 4-1: Durchgeführte Überwachungsfahrten in 2006/07 und in der Zustandsanalyse verwendete Daten (X). 169
 Tab. 4-2: Berechnete Nährstoffkonzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich ($\mu\text{mol/L}$) für Küstenwasser (S_{30}), Meerwasser der mittleren Deutschen Bucht (S_{33}) und äußerer Deutschen Bucht (S_{34}). 184
 Tab. 4-3: PAK-Konzentrationen (ng/L) in der Elbe und der Deutschen Bucht. 213
 Tab. 4-4: Kriterien (ng/L) zur Bewertung der Metallgehalte in der Wassersäule. EU Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), OSPAR Konvention zum Schutz des Nord-Ost-Atlantik, US Environmental Protection Agency (US EPA). 236
 Tab. 4-5: Kriterien (mg/kg) zur Bewertung der Metallgehalte im marinen Sediment. Angegeben sind Hintergrundwerte ($< 20 \mu\text{m}$) in der deutschen AWZ (BSH BC-low, BSH BC-high), Hintergrundwerte aus der OSPAR Region (OSPAR BC, BAC, normiert auf 5 % Al) und ökologische (Effekt) Bewertungskriterien der US NOAA (NOAA ERL). 237
 Tab. 4-6: Metallgehalte (ng/L) im küstennahen Wasser (Salzgehalte: 30 – 32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (Salzgehalte: ≥ 34) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) der Jahre 2006 und 2007 in 10m Wassertiefe. Angegeben sind die Anzahl der Proben (n) und die 25 %, 50 % (Median) und 75 % Perzentile der gemessenen Metallgehalte. 250

Tab. 4-7: Zusammenfassung der Messergebnisse im Zeitraum 2006 – 2007; Prozentualer Massenanteil der Feinkornfraktion (< 20 µm) an der Gesamtprobe und Metallgehalte in der Feinkornfraktion (< 20 µm Korngröße) des Oberflächensediments in den Trendüberwachungsgebieten der deutschen Nordsee (AWZ). Mittelwert und Standardabweichungen in mg/kg TM; Feinkornanteil, Aluminium und Eisen in %. Zur Lage der Gebiete vgl. Abb. 4-52. Zur Normierung geeignete Parameter sind grau eingefärbt. 255

Tab. 4-8: Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser und Sediment der Nordsee. 265

Tafelverzeichnis

Meereschemie

<i>Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar</i>	171
<i>Tafel 4-2: HCH-Isomere</i>	196
<i>Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)</i>	203
<i>Tafel 4-4: Kohlenwasserstoffe</i>	207
<i>Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</i>	212
<i>Tafel 4-6: Herbizide</i>	217
<i>Tafel 4-7: Perfluorierte Chemikalien</i>	227
<i>Tafel 4-8: Metalle mit toxischem Potential in der Meeresumwelt</i>	233
<i>Tafel 4-9: Radioaktivität</i>	264

List of Figures

Atmospheric Physics

- Fig. 2-1: Sea level pressure (hPa) for the very severe gale »Orkun« of March, 18 2007 together with grid positions of weather-typing scheme.41
- Fig. 2-2: Percent frequency distribution of daily circulation states for the period 1971 – 2000 together with classification criteria. Boundary lines (green) separating directional from hybrid ($\zeta^*/V^* = \pm 1$), and hybrid from rotational sectors ($\zeta^*/V^* = \pm 2$). Thresholds G_{thr}^* for elliptical gale shells (blue): 28.3 (gale), 36.6 (severe gale), 44.6 hPa (very severe gale); half axes: $a^* = 2 G_{thr}^*$, $b^* = a^*/2$. Top and right axes: $V = 0.62 V^*$, $\zeta = 2.72 \zeta^*$42
- Fig. 2-3: Air circulation around high (A) and low pressure systems (C).46
- Fig. 2-4: Percent frequencies of reduced weather types for 2006 (blue) and 2007 (red) along with empirical distributions for 1971 – 2000 (stacked columns). Percentile range Min to Max, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, continuous stepline), 75 and 90%. ..52
- Fig. 2-5: As Fig. 2-4, except for monthly absolute frequencies (days).53
- Fig. 2-6: Scaled histograms (stacked) of run length (rl) of weather types (w) in 2006 & 2007. Base %-scale: 365 d. Height of column blocks: $rl \times \text{number of runs } r(w,rl)$. Black figures: $r(w,rl)$, blue: $r(rl)$. + Symbols: $rl \times r(rl) \times 365/10958$ d for 1971 – 2000.55
- Fig. 2-7: Cumulative empirical vs. geometric survival function (PP-Plot) for weather-type runs (5438 altogether) during 1971 – 2000 (10958 d). p is the inverse of the mean life time (cf. Table 2-10), $1-p$ the probability of surviving. Powers $(1-p)^k$ yield the crosshairs lateral position due to the survival function $S (= 1 - \text{GeoCDF})$. The topmost position ($k=1$) gives the percentage of runs or episodes that reach a minimum age of 2 days.58
- Fig. 2-8: Weather-type transitions, annual climatology. The arc length of a ring section reflects the frequency f in days of weather type X (marginal sum of countmatrix ζ in Table 2-11). The segments within section X depict stacked frequencies of transitions $Y \neq X \rightarrow X$ (column entries); they are colored after the preceding weather type and given in ascending order; the leftover portion of section X is associated with self transitions $Y = X \rightarrow X$. Transitions $X \rightarrow Y \neq X$ (row entries), colored after the succeeding weather type, are identified by the sockets of Bézier ribbons. The ribbons have color X , if $f(X \rightarrow Y) \geq f(Y \rightarrow X)$, otherwise color Y62
- Fig. 2-9: Same as Fig. 2-8, except for 2006 and 2007.63
- Fig. 2-10: Classified seasonal sea level pressure distributions (hPa). Left: UKMO climatology (1971 – 2000), contour interval 1 hPa. Middle: same as left, except for NCEP/NCAR. Right: NCEP/NCAR minus UKMO, contour interval 0.25 hPa. JFM, AMJ, ... = winter, spring, ... All distributions displayed at the horiz. resolution inherent in the UKMO dataset (5×10 deg.).70
- Fig. 2-11: Climatological departures (1971 – 2000) from »observed« sea level pressure at WMO station 01492 Oslo-Blindern ($59^\circ 56' 34''$ N, $10^\circ 43' 15''$ E, elevation: 94 m) for UKMO, NCEP/NCAR, and ERA-40 MSLP at 60° N, 10° E.71
- Fig. 2-12: NCEP/NCAR climatology (1971 – 2000) of seasonal height distributions (gpdm) of the 925 hPa level. This pressure level has about the same height as the Scandes in the model's orographic representation of this mountain range (600 – 700 m). Isohypsyes play the same role as isobars in the MSLP distributions of Fig. 2-10.72

List of Figures

Fig. 2-13: Winter: classified monthly/seasonal sea level pressure distributions (hPa). Left: NCEP/NCAR climatology (1971 – 2000). Middle: 2006. Right: anomalies. J, F, M, JFM = January, February ...	77
Fig. 2-14: As Fig. 2-13, except for spring 2006.	78
Fig. 2-15: As Fig. 2-13, except for summer 2006.	79
Fig. 2-16: As Fig. 2-13, except for fall 2006.	80
Fig. 2-17: As Fig. 2-13, except for winter 2007.	81
Fig. 2-18: As Fig. 2-13, except for spring 2007.	82
Fig. 2-19: As Fig. 2-13, except for summer 2007.	83
Fig. 2-20: As Fig. 2-13, except for fall 2007.	84
Fig. 2-21: Seasonal 50 % probability ellipses for the ›North Sea Wind‹ (1 = winter = JFM, 2 = spring, etc.); top: 2006, bottom: 2007.	86
Fig. 2-22: 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.	89
Fig. 2-23: UKMO vs. NCEP: Total number of annual gale days for threshold $G^* = 30$ hPa. The systematic offset of –27 % in NCEP storm frequency vanishes after 2001 thus disclosing an inhomogeneity in the UKMO dataset. The offset results from the fact that NCEP-SLPs are daily means of 4 states (0, 6, 12 & 18 Z), while UKMO-SLPs reflect the state at 0 Z, only.	93
Fig. 2-24: Gale quantiles for fixed exceedance probabilities (1 – CDF) due to the empirical, the Gamma-, and the Generalized Pareto Distribution (GPD) for the gale index G^* during 1971 – 2000. Top: UKMO, bottom: NCEP.	95
Fig. 2-25: Gale frequencies for 2005/06 (blue) and 2006/07 (red) along with empirical distributions for 1971 – 2000 (stacked columns). Percentile range Min to Max, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, continuous stepline), 75 and 90 %.	100
Fig. 2-26: Seasonal cycles of monthly averaged daily global radiation totals at Norderney together with intramonthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means, and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). 1 kJcm^{-2} is equivalent to a radiation flux density of 116 Wm^{-2} . Raw data: DEUTSCHER WETTERDIENST.	104
Fig. 2-27: Monthly air surface temperatures at Norderney with 1971 – 2000 base period means, and 95%-band (climatology ± 1.96 std. deviations). Raw Data: DEUTSCHER WETTERDIENST.	104
Fig. 2-28: Hemispheric temperature anomalies (K) in July 2006 (top) and Jan. 2007. Base period 1971 – 2000. Contours, solid: 0 & $\pm 2^k$, stippled: ± 0.5 & $\pm 3 \times 2^{k-1}$, $k=0, 1, 2, 3$; red/blue labels: +/- . Source data: NCDC, merged land-ocean sfc. temperatures (GHCM v3.1.0 & ICOADS/ERSST v3b), www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-pro-ducts.php .	105

Physical Oceanography

Fig. 3-1: Monthly surface circulation of the North Sea in 2006. Vector mean currents from ›BSH-cmod‹. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude. .	119
Fig. 3-2: Monthly surface circulation of the North Sea in 2007. Vector mean currents from ›BSH-cmod‹. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude. .	121
Fig. 3-3: Volume transport through the Strait of Dover in 2006 (top) and 2007 (bottom). Model data ›BSHcmod‹; 1 Sv = $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.	123

Fig. 3-4: Volume transport in 2006 (top) and 2007 (bottom) through western boundary transect of the German Bight; extending from 53° 15' to 55° N along 6° 20' E. Model data ›BSHcmod‹; 1 Sv = 10 ⁶ m ³ /s.	124
Fig. 3-5: Volume transport through the Kattegat in 2006/2007. Model data ›BSHcmod‹; 1 Sv = 10 ⁶ m ³ /s.	125
Fig. 3-6: Seasonal and annual frequencies of circulation patterns in the German Bight for 2006 and 2007 along with percentiles of empirical distributions for 2000 – 2009 (stacked columns). Percentile range Min to Max, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, stepline), 75 and 90 %.	129
Fig. 3-7: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2006 (›WAM‹ Modell); JFM = January, February, March etc.	132
Fig. 3-8: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2007 (›WAM‹ Modell); JFM = January, February, March etc.	133
Fig. 3-9: Observed wave parameters at FINO-1 during the severe gale of October 31 and November 1, 2006. Top: Significant wave height (red) and peak period (blue). Bottom: Wind speed (red) and wind direction (blue).	134
Fig. 3-10: Air pressure, wind and wave height during the gale of November 1, 2006 (›WAM‹ Modell). Encircled: Wave heights measured at Brent, Ekofisk, FINO-1 and Euro (from N to S, b. r. frame).	135
Fig. 3-11: Damage due to extreme waves at the observation tower FINO-1.	136
Fig. 3-12: Monthly water levels at tide gauge Cuxhaven (red) 1918 – 2009 together with long-term trend (blue) and trend acceleration (cyan, right scale).	139
Fig. 3-13: Seasonal cycles 2006/07 of areal mean weekly SST of the North Sea and ensemble of corresponding cycles since 1971. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971 – 1993.	143
Fig. 3-14: Seasonal cycles 2006/07 of monthly mean SST (& intramonthly extremes) at Helgoland Roads together with 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs.). (Raw data courtesy of K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)	143
Fig. 3-15: Fig. 3-15: Monthly SST anomalies in 2006 as departures from the 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. Letter codes (upper right) refer to atmospheric circulation anomalies (Fig. 2-13, p. 77 sqs.).	145
Fig. 3-16: Fig. 3-15: Monthly SST anomalies in 2007 as departures from the 1971 – 1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. Letter codes (upper right) refer to atmospheric circulation anomalies (Fig. 2-17, p. 81 sqs.).	146
Fig. 3-17: Temperature stratification (°C) in summer 2006 (RV Gauß, Cruise #463)	148
Fig. 3-18: Temperature stratification (°C) in summer 2007 (RV Pelagia, Cruise #273).	149
Fig. 3-19: Temperature stratification (°C) at MARNET stations ›NSB III‹ (54° 41' N, 6° 47' E) and ›Ems‹ (54° 10' N, 6° 21' E). Water and sensor depths: 40 m & 4, 6, 11, 15, 20, 25, 30, 35 m and 33 m & 3, 6, 10, 15, 20, 25, 30 m.	152
Fig. 3-20: Temperature stratification at MARNET station ›Ems‹ in 2006. Middle: temperature difference surface minus bottom. Top: ›North Sea Wind‹ (blue, cf. ch. 2.5, p. 85) & local 10 m wind (black, mean and range). Bottom: global radiation at Norderney (cf. ch. 2.7, p.102).	153
Fig. 3-21: Sea ice conditions at the German coasts on January 27, 2006 when ice coverage was at its peak seasonal extent.	154

List of Figures

Fig. 3-22: Near-surface (left) and -bottom (right) salinity distributions in winter (top) and summer (bottom) 2006.	157
Fig. 3-23: Near-surface (left) and -bottom (right) salinity distributions in winter (top) and summer (bottom) 2007.	158
Fig. 3-24: Salinity stratification in summer 2006 (RV Gauß, Cruise #463a).	159
Fig. 3-25: Salinity stratification in summer 2007 (RV Pelagia, Cruise #273a).	160
Fig. 3-26: Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971 – 2000) and 95 %-limits. 1 km ³ /a is equivalent to 31,7 m ³ /s. (Raw data courtesy of WSA-Lauenburg.)	162
Fig. 3-27: Monthly means and max. runoff of Elbe River in 2006/07 at Neu-Darchau weir together with 1971 – 2000 base period means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs.). 1000 m ³ /s are equivalent to 2.592 km ³ /month. (Source data: BfG/WSA-Lauenburg.)	163
Fig. 3-28: Seasonal cycles 2006/07 of monthly mean SSS at Helgoland Roads together with intramonthly extremes, 1971 – 2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs). (Raw data courtesy of K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland.)	164

Marine Chemistry

Fig. 4-1: Observational network for contaminant and nutrient monitoring in the German Bight and North Sea.	169
Fig. 4-2: Nitrogen and phosphorus loads of Weser and Elbe in absolute (top) and specific units. The data are based on measurements of FFG Weser and FFG Elbe.	172
Fig. 4-3: Geographical distributions (µmol/L) of phosphate, DIN and silicate in surface sea water of the German Bight in January 2006.	174
Fig. 4-4: Salinity distribution in surface sea water of the German Bight in January 2006. ..	175
Fig. 4-5: Redfield ratio (µmol/µmol) in the bottom water of the German Bight in January 2006.	175
Fig. 4-6: Phosphate concentration (µmol/L) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.	176
Fig. 4-7: Nitrate concentration (µmol/L) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.	177
Fig. 4-8: Redfield ratio in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.	178
Fig. 4-9: Nitrite concentration (µmol/L) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.	179
Fig. 4-10: Ammonium concentration (µmol/L) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.	180
Fig. 4-11: Silicate concentration (µmol/L) in near-surface and -bottom water of the North Sea in summer 2007.	180
Fig. 4-12: Nitrate, nitrite and ammonium concentrations in sea-water at the monitoring stations EIDER, NSB2, ENTE1 (October 2004 to October 2007).	182
Fig. 4-13: Phosphate concentrations in sea-water at the monitoring stations EIDER, NSB2, ENTE1 (October 2004 to October 2007).	183
Fig. 4-14: Phosphat-, DIN, silicate concentration vs. salinity in the German Bight in February 2006.	185

Fig. 4-15: Time series of wintry nutrient concentrations calculated 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.	187
Fig. 4-16: Chlorophyll-a-concentration ($\mu\text{g/L}$) in near-surface water of the North Sea in summer 2006 and 2007.	189
Fig. 4-17: Oxygen saturation (%) in near-surface water of the North Sea in summer 2006 & 2007.	190
Fig. 4-18: Oxygen saturation (%) in near-bottom water of the North Sea in summer 2006 & 2007.	190
Fig. 4-19: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight (mean values of May 2006 and May 2007).	195
Fig. 4-20: HCH concentrations and α/γ -HCH ratio for near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May (left) and August (right) 2007.	197
Fig. 4-21: HCH concentrations and α/γ -HCH ratio for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.	199
Fig. 4-22: Temporal evolution since 1995 of α -, β -, and γ -HCH concentrations near Stade (Elbe River).	200
Fig. 4-23: Temporal evolution since 1987 of α - and γ -HCH concentrations at station ›Eider‹.	201
Fig. 4-24: Temporal evolution since 1989 of α - and γ -HCH concentrations in the outer German Bight (station ›NSB2‹).	201
Fig. 4-25: CB153 concentrations for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.	204
Fig. 4-26: HCH-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2007.	205
Fig. 4-27: Pollution sightings in the German Bight in 2006 and 2007.	207
Fig. 4-28: Different n-Alkane patterns in near-surface sea water of the German Bight in August 2007. Background concentrations with remnants of bio- and petrogenic Alkanes (›ST013‹), high fractions from terrestrial plants (›MEDEM‹), from algae metabolites (›NORDE‹, ›MEDEM‹), and due to oil spill (›BRIFF‹). Cf. Fig. 4-1, S. 169 for a station map.	208
Fig. 4-29: Geographical distribution of total concentration of n-Alkanes from C_{20} to C_{30} for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007.	209
Fig. 4-30: Geographical distribution of concentrations of n-Alkanes C_{13} to C_{19} for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007. Column heights in ng/L, underneath columns station IDs.	210
Fig. 4-31: Concentrations of some PAHs in near-surface water (5 m) of the German Bight in August 2007. Column heights in ng/L; underneath columns station IDs.	214
Fig. 4-32: Median-values of PAH-concentrations in the German Bight.	215
Fig. 4-33: PAH concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2007.	216
Fig. 4-34: Concentrations (ng/L) of selected triazine herbicides in near-surface sea water of the North Sea in August 2007.	219
Fig. 4-35: Concentrations (ng/L) of selected phenylurea herbicides in near-surface sea water of the North Sea in August 2007.	220
Fig. 4-36: Concentrations (ng/L) of selected phenoxy acetic acid herbicides in near-surface sea water of the North Sea in August 2007.	221
Fig. 4-37: Concentrations of herbicides as % of concentration of Stade in August 2006. ...	222

List of Figures

- Fig. 4-38: Temporal evolution of herbicide concentrations at selected stations of the German Bight. 224
- Fig. 4-39: Median concentrations of coastal stations ($S = 27.8 - 31.8$) for 2004 – 2005. 225
- Fig. 4-40: PFC concentrations (ng/L) in near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August 2007. 228
- Fig. 4-41: PFC concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2004. 229
- Fig. 4-42: PFOA and PFOS concentrations in a sediment core of the Skagerrak ($57^{\circ} 48' N, 8^{\circ} 0' E$) from August 2005 in comparison to CB153, pp¹-DDD and HCB. 230
- Fig. 4-43: Distribution statistics of the percent fraction of dissolved to total metal concentrations in sea water as box and whisker plots. All boxstatistics are based on winter samples (JFM) from 1999 – 2005 and are separated in four figures by increasing salinity ranges (top left: $S = 0 - 28$, t. r.: $28 - 30$, b. l.: $30 - 32$, b. r.: $32 - 34$). 239
- Fig. 4-44: Scatter plots of solved metal concentrations during January 2006 versus salinity. Only samples of salinity greater than 20 are included. Red line and equation: Linear regression (least squares); Black dashed line: Robust regression (weighted residuals). 241
- Fig. 4-45: Linear regression of solved metal concentration versus salinity for the period 2000 to 2009. Distribution statistics of cruise-wise computed linear regression model parameters (intersect, slope, coefficient of determination R^2) in a box and whisker representation (median, 25 %, 75 % quantile, min, max, outliers). Each quarter of a year is represented by an individual box. Top row: red figures give the total number of included cruises, black figures the number of cruises with sufficient correlation of solved element concentration and salinity ($R^2 \geq 0.5$). Intersect and slope figures aggregate only regression with $R^2 \geq 0.5$ 242
- Fig. 4-46: Seasonal cycle of solved element concentrations (Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) in coastal surface water (salinity 30 – 32). Grey bar represents background reference concentration (BRC). 243
- Fig. 4-47: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions in filtrated water in January 2006. 245
- Fig. 4-48: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions in filtrated water in January 2007. 246
- Fig. 4-49: Spatial structure of solved element concentrations in near surface water during the summer survey 2006. 247
- Fig. 4-50: Time series of yearly winter (JFM) distribution statistics in coastal (salinity 30 – 32) near surface (10 m) water as box and whisker plot. OSPAR background reference concentrations are displayed as grey bar. 249
- Fig. 4-51: Assessment of element burden in filtered near surface water (10m). Distribution statistics of measurements in coastal (salinity 30 – 32, upper row of figures) and open North Sea (salinity > 34, lower row of figures) water during the first quarter (JFM) of the years 2006 and 2007 as box and whisker plot. The left hand colour code indicates the assessment ranges. Blue: less than OSPAR-BRC; Green: greater than BRC and less than effect assessment value; Red: greater than effect assessment value (cf. ch. 4.4.2.1, p. 235). The right hand colored dot relates to the assessment result of 2007. An additional up-/downward arrow indicates a significant temporal trend during the recent five years. 251
- Fig. 4-52: Sediment sampling sites German Bight (right), North Sea (left). 2006 sites are indicated by an (o), 2007 sites by an (x). For any subsequent assessment of temporal trend and concentration level in sediment, the sites are combined to regional site groups, which are indicated by red circles. 253

Fig. 4-53: Spatial distribution of percent fraction of sediment fines (< 20 µm); left: North Sea, right: zoomed view on the German Bight.	253
Fig. 4-54: Spatial distribution of element burden in surface sediment fines. The map combines results of the 2006 North Sea Sediment Survey and of the extended 2000 sediment survey in the German Bight.	256
Fig. 4-55: Time series of element burden in surface sediment fines in trend region KS (upper two rows of figures) and WB (lower two rows of figures). The first six figures are extended by concentration measurements at the dredge material dumping site E3 which is close to KS, (blue circles).	257
Fig. 4-56: Assessment of element burden in surface sediment fines sampled in 2007. Blue: less than OSPAR-BAC, green: greater than BAC and less than effect assessment value, red: greater than effect assessment value (cf. ch. 4.4.2.2, p. 236). A significant temporal trend in each region during the recent 10 years is indicated by an up-/downward white triangle. The year of assessment and the median concentration (mg/kg DW) during that year is given above/below each symbol.	260
Fig. 4-57: Time series of annual maximum activity concentrations of ¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr in surface seawater at former positions of light vessels ›Borkumriff‹ and ›Elbe 1‹.	267
Fig. 4-58: Distribution of ¹³⁷ Cs activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2006. Underneath columns station IDs.	269
Fig. 4-59: Distribution of ¹³⁷ Cs activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2007. Underneath columns station IDs.	269
Fig. 4-60: Distribution of ⁹⁰ Sr activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2006. Underneath columns station IDs.	270
Fig. 4-61: Distribution of ⁹⁰ Sr activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2007. Underneath columns station IDs.	270
Fig. 4-62: Distribution of ³ H activity concentrations in surface seawater of the German Bight during 2006 and 2007. Underneath columns station IDs.	271
Fig. 4-63: Distributions of activity concentrations of ²³⁸ Pu, (²³⁹⁺²⁴⁰)Pu, and ²⁴¹ Am in surface seawater of the German Bight in October 2006.	273
Fig. 4-64: Distributions of activity concentrations of ²³⁸ Pu, (²³⁹⁺²⁴⁰)Pu, and ²⁴¹ Am in surface seawater of the German Bight in October 2007.	273

List of Tables

Atmospheric Physics

Table 2-1: Calendar of daily weather types in 2006. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).	44
Table 2-2: Contingency table of weather types in 2006 (%).	44
Table 2-3: Calendar of daily weather types in 2007. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).	45
Table 2-4: Contingency table of weather types in 2007 (%).	45
Table 2-5: Seasonal and annual relative frequencies of reduced weather types in 2006 and 2007.	47
Table 2-6: Calendar of reduced weather types in 2006.	48
Table 2-7: Monthly frequencies of reduced weather types in 2006.	48
Table 2-8: Calendar of reduced weather types in 2007.	49
Table 2-9: Monthly frequencies of reduced weather types in 2007.	49
Table 2-10: Mean lifetime in days of reduced weather types and the anonymous ›thing-in-itself‹ (NN) for the period 1971 – 2000 and years 2006 and 2007.	56
Table 2-11: Weather-type transitions for base period 1971 – 2000 (NCEP). ζ : Count matrix of rounded transition frequencies for the climatological year. G: Transition frequencies for 0. order Markov chain, $g_{ij} = RS_i CS_j / 364$. $P (= P^1)$: Transition matrix of 1. order Markov chain, obtained from ζ via ζ_{ij} / RS_i ; π : Eigenvector ($\pi = \pi P$), stationary (unconditional climatological) distribution. Entries p_{ij} (${}_2 p_{ij}$, ${}_6 p_{ij}$) of matrix $P = P^1$ (P^2, P^6) are conditional probabilities for transitions of the Markov chain from current state s_i to state s_j within 1 (2, 6) time steps (days). E: Embedded transition matrix (without sojourn times, from ζ as P for $\zeta_{ii} = 0$).	61
Table 2-12: Same as Table 2-11, except for 2006 (left) and 2007.	66
Table 2-13: North Sea Wind statistics. 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).	85
Table 2-14: North Sea Wind. Monthly statistics: Wind direction, vector (V) and scalar (VEL) wind speed (m/s) and persistence (V/VEL in %).	90
Table 2-15: Excess probabilities of the empirical cumulative distribution function (row 2) for Jenkinson-Collison gale thresholds (row 1) and gale thresholds (row 4 – 6) for »trimmed« excess probabilities (row 3) of various distributions.	94
Table 2-16: Return periods for storms of minimum severity G^* due to the GPD. V and ζ are associated maximum windspeeds and vorticities ($rpm =$ revolutions per day) as given by the half-axes of the storm ellipses ($G^* = b^* = a^*/2$). NCEP-thresholds for gales (G), severe gales (SG), and very severe gales (VSG) are in bold print. Severities beyond those of the last row are impossible on account of the GPD's positive shape parameters.	94
Table 2-17: The 10 most severe gales during 1948 – 2011 (NCEP). $rDV_1 = V/V_{max}(T_1) - 1$ is the relative departure of windspeed from max. possible windspeed associated with VSG threshold (return period 1 yr, cf. Table 2-16).	97
Table 2-18: Number of severe and very severe gale days ($SG|VSG$).	98
Table 2-19: Total number of gale days ($G+SG+VSG$).	99

Physical Oceanography

<i>Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2006. Unlike wind direction current direction is the direction toward which the current flows.</i>	126
<i>Table 3-2: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight in 2007. Unlike wind direction current direction is the direction toward which the current flows.</i>	127
<i>Table 3-3: Frequencies of daily circulation patterns in the German Bight for 2000 – 2009 together with standardized departures from 10-year means (m). Bold: anomalies exceeding |1| standard deviation (s).</i>	128
<i>Table 3-4: Frequency distribution of wind set-up for 2006 and 2007 at tide gauge Cuxhaven.</i>	140
<i>Table 3-5: Storm surges for periods 1951 – 2007 and 2006 – 2007 together with MHW evolution (cm above gauge zero). Borkum: Until 1962 tide gauge Südstrand, thereafter Fischerbalje.</i>	140
<i>Table 3-6: North Sea heat content (HC) with SVT and SST based on 10 summer surveys with RV Gauß and RVPelagia. Volume, area, and mean depth of analysis domain are $35.6 \times 10^3 \text{ km}^3$, $404.1 \times 10^3 \text{ km}^2$, and 88 m, respectively. While $HC \sim SVT$, there is no simple relation to SST.</i>	150
<i>Table 3-7: Total North Sea salt content (S) and standardized departure (SA) from 2000 - 2009 mean ($1.142 \pm 0.006 \times 10^{12} \text{ t}$, w/o 2001). Analysis based on data from summer surveys with RV Gauß and RVPelagia.</i>	161

Marine Chemistry

<i>Table 4-1: Monitoring cruises in 2006/07, and data used in this state assessment (X).</i>	169
<i>Table 4-2: Calculated nutrient concentrations with 95 % prediction limits ($\mu\text{mol/L}$) for coastal water (S_{30}), sea water of the German Bight proper (S_{33}) and outer German Bight (S_{34}).</i>	184
<i>Table 4-3: PAH-concentrations (ng/L) in the river Elbe and the German Bight.</i>	213
<i>Table 4-4: Assessment criteria (ng/L) metals in water. EU Water Framework Directive (EU WFD), OSPAR Convention, US Environmental Protection Agency (US EPA).</i>	236
<i>Table 4-5: Assessment criteria (mg/kg) metals in sediment. German Bight Background Values in sediment fines (BSH ($< 20 \mu\text{m}$) BC-low and BC-high), Background Concentration Values and Assessment Values (OSPAR, BC and BAC normalised to 5 % Al) and effect assessment criteria (NOAA ERL).</i>	237
<i>Table 4-6: Element concentration (ng/L) in filtered samples in coastal (salinity 30 – 32) and open North Sea (salinity ≥ 34) near surface waters during the first quarter (JFM) of the years 2006 and 2007. Given are the number of samples and the 25 %, 50 % and 75 % percentiles.</i>	250
<i>Table 4-7: Average and standard deviation of surface sediment fines percent fraction of total, as well as element burden in surface sediment fines ($< 20 \mu\text{m}$). All 2006 and 2007 samples ($< 20 \mu\text{m}$ fraction, Al, Fe in (%)) and all other elements in (mg/kg DW). Standard normalization parameters are given in grey.</i>	255
<i>Table 4-8: Activity of some natural radio nuclides for North Sea sea-water and sediment.</i>	265

Autoren / Authors

Alexander Frohse	+49-40-3190-3212	frohse@bsh.de
Frank Janssen	+49-40-3190-3130	janssen@bsh.de
Holger Klein	+49-40-3190-3220	holger.klein@bsh.de
Peter Loewe	+49-40-3190-3214	loewe@bsh.de
Sylvin Müller-Navarra	+49-40-3190-3110	mueller-navarra@bsh.de
Dieter Schrader	+49-40-3190-3133	schrader@bsh.de
Achim Schulz	+49-40-3190-3213	achim.schulz@bsh.de

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

Jürgen Herrmann	+49-40-3190-3325	herrmann@bsh.de
Stefan Schmolke	+49-40-3190-3320	schmolke@bsh.de
Norbert Theobald	+49-40-3190-3300	theobald@bsh.de
Sieglinde Weigelt-Krenz	+49-40-3190-3310	weigelt-krenz@bsh.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Labor Sülldorf
Wüstland 2
22589 Hamburg

Natalija Schmelzer	+49-381-4563-787	schmelzer@bsh.de
--------------------	------------------	------------------

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Neptunallee 5
18057 Rostock

Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Verzeichnis der veröffentlichten Arbeiten

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

- 21 (1999) Nies, H., Karcher, M., Bahe, C., Backhaus, J., Harms, I. Transportmechanismen radioaktiver Substanzen im Arktischen Ozean - Numerische und experimentelle Studien am Beispiel der Barents- und Karasee, 134 pp.
- 22 (2000) Lorbacher, K. Niederfrequente Variabilität meridionaler Transporte in der Divergenzzone des nordatlantischen Subtropen- und Subpolarwirbels – Der WOCE-Schnitt A2, 156 pp.
- 23 (2000) Klein, H. The Subsurface Eastern Boundary Current of the North Atlantic between 32°N and 53°N – Data Report, 240 pp.
- 24 (2000) Klein, H. Strömungen und Seegangsverhältnisse westlich der Insel Hiddensee - Datenreport, 59 pp.
- 25 (2001) Goedecke, E. Der hydrographische Aufbau in der Deutschen Bucht vornehmlich dargestellt auf Grund der vorliegenden Unterlagen über Temperatur, Salzgehalt und Dichte, 202 pp.
- 26 (2001) Klein, H., Mittelstaedt, E. Strömungen und Seegangsverhältnisse vor Graal-Müritz und in der Tromper Wiek - Datenreport, 162 pp.
- 27 (2001) Klein, H., Mittelstaedt, E. Gezeitenströme und Tidekurven im Nahfeld von Helgoland, 24 pp. und Anhang.
- 28 (2001) Behnke, J., Berking, B., Herberg, J., Jonas, M., Mathes, S. Functional Scope and Model of Integrated Navigation Systems - A Toolbox for Identification and Testing. 181 pp.
- 29 (2001) Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S., Klein, H., Komo, H. The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. 49 pp.
- 30 (2002) Sy, A., Ulrich, J., Weichert, H.-J. Upper Ocean Climate Ship-of-Opportunity Programme of BSH – A Status Report. 45 pp.
- 31 (2003) Dahlmann, G. Characteristic Features of Different Oil Types in Oil Spill Identification. 48 pp.
- 32 (2003) Nies, H., Gaul, H., Oestereich, F., Albrecht, H., Schmolke, S., Theobald, N., Becker, G., Schulz, A., Frohse, A., Dick, S., Müller-Navarra, S., Herklotz, K. Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht. 81 pp.
- 33 (2003) Loewe, P., Becker, G., Brockmann, U., Frohse, A., Herklotz, K., Klein, H., Schulz, A. Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht
- 34 (2004) Schulz, G. Geomagnetic Results Wingst 1996, 1997, 1998 and 1999 including the complete Wingst data set since 1939 on CDrom
- 35 (2004) Gouretski, V. V., Koltermann, K. P. WOCE Global Hydrographic Climatology
- 36 (2004) Gayer, G., Dick, S., Pleskachevsky, A., Rosenthal, W. Modellierung von Schwebstofftransporten in Nord- und Ostsee
- 37 (2004) Schmelzer, N., Strübing, K., Stanislawczyk, 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., Schmolke, S., Becker, G., Brockmann, U., Dick, S., Frohse, A., Herrmann, J., Klein, B., Klein, H., Nies, H., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N., Weigelt, S. Nordseezustand 2004
- 41 (2007) Bork, I., Dick, St., Kleine, E., Müller-Navarra, S. Tsunami – a study regarding the North Sea coast
- 42 (2007) Schrum, C., Schmelzer, N. (Eds.) Fifth Workshop on Baltic Sea Ice Climate
Hamburg, Germany, 31 August – 2 September 2005
- 43 (2008) Müller, L. Sauerstoffdynamik der Nordsee – Untersuchungen mit einem drei-dimensionalen Ökosystemmodell
- 44 (2009) Loewe, P. (Ed.) System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen
- 45 (2009) Marzenna, S., Weidig, B., Stanisławczyk, I., Holfort, J., Kowalska, B., Mykita, M., Kańska, A., Krzysztofik, K., Perlet, I. Niedrigwasser in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)
Negative Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts)
- 46 (2009) Schmelzer, N., Holfort, J. Eiswinter 2004/05 bis 2008/09 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten
Ice Winters 2004/05 to 2008/09 on the German North and Baltic Sea Coasts
- 47 (2010) Müller-Navarra, S., Knüpfner, K. Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS) – Part I (Skew surge forecast)
- 48 (2012) BSH [Hrsg.] Öl im Meer, Risiken, Vorsorge und Bekämpfung, Tagungsband, Symposium vom 17. bis 19. November 2010 Hamburg
- 49 (2013) Loewe, P., Klein, H., Weigelt-Krenz, S. (Eds.) System Nordsee – 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen
-

