



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Nordseezustand

2008–2011

Mit Beiträgen von:

A. Frohse	N. Schmelzer
J. Herrmann	S. Schmied
F. Janssen	S. Schmolke
H. Klein	D. Schrader
Ch. Lefebvre	A. Schulz
P. Loewe	N. Theobald
D. Machoczek	S. Weigelt-Krenz
S. Müller-Navarra	

Berichte des Bundesamtes für
Seeschifffahrt und Hydrographie
Nr. 54/2016

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.

Nordseezustand 2008–2011 im Internet:

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

Quellenangaben für dieses Dokument:

[Gesamter Bericht]

BSH, Nordseezustand 2008-2011, Berichte des BSH, Nr. 54, 308 pp., Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 2016.

[Einzelnes Kapitel (Beispiel)]

Loewe, P. und Ch. Lefebvre, Atmosphärische Zirkulation, 29-80 in: Nordseezustand 2008-2011, Berichte des BSH, Nr. 54, 308 pp., Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 2016.

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2016
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.

Vorwort



Jeder, der an einem stürmischen Tag auf die Nordsee blickt, kann sich der Faszination der scheinbar ungestörten Naturgewalten kaum entziehen. Aktuelle Seekarten zeigen jedoch, dass die Nordsee längst nicht mehr nur ein Lebens-, Erholungs- und Naturraum ist, sie ist auch ein intensiv genutzter Wirtschaftsraum. Und die Nutzungen nehmen zu. Damit wächst die Notwendigkeit, die Nutzungs- und Schutzinteressen für die Nordsee sorgfältig gegeneinander abzuwägen, was nur auf der Basis gesicherter Kenntnisse über den Zustand der Nordsee möglich ist.

Im vorliegenden Nordsee-Zustandsbericht wird der atmosphärische, ozeanographische und chemische Zustand der Nordsee in den Jahren 2008 bis 2011 dokumentiert.

Eine überwiegend schwache atmosphärische Westzirkulation und langlebige Stagnationsperioden führten nicht selten zu extremen Anomalien vieler meteorologischer und ozeanographischer Variablen. Diese ereigneten sich zwar vor dem Hintergrund natürlicher Schwankungen, sind aber in der beobachteten Qualität ohne den anthropogenen Treibhauseffekt kaum mehr erklärbar. So war das Jahr 2008 für die Nordsee das fünftwärmste seit 1971. Der Gesamt-Salzinhalt war im Jahr 2011 der niedrigste seit 2001.

Während sich die Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht gegenüber derjenigen der Vorjahre kaum verändert hat, und die Konzentration der Stickstoffverbindungen in den Küstengewässern immer noch hoch ist, ging die Konzentration der klassischen Pestizide von 1989 bis 2011 weiter zurück. Bei neuen Substanzklassen wie perfluorierte Tenside war ein Anstieg der Konzentrationen zu beobachten. Auswirkungen des Reaktorunfalls von Fukushima auf die untersuchten Radionuklidkonzentrationen wurden nicht festgestellt.

Eine Balance zwischen dem Schutz und der nachhaltigen Nutzung der Nordsee zu finden und langfristig sicherzustellen ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die nur gemeinsam gelingen kann. Das BSH unterstützt diesen permanenten Prozess durch Messprogramme und qualitätsgesicherte Daten und Informationen. Dabei nehmen die langen Zeitreihen eine besondere Stellung ein. Nur mit ihnen ist es möglich, aktuelle Befunde richtig einzuordnen und zu bewerten.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine interessante Lektüre.

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

Monika Breuch-Moritz

Präsidentin des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Zusammenfassungen	7
Compilation of Summaries	17
1 Einführung	27
2 Atmosphärische Zirkulation	29
2.1 Vorbemerkungen	31
2.2 Zustand und Entwicklungen: 2008–2011	32
2.3 Materialsammlung	40
2.4 Literatur	79
3 Meeresphysik	81
3.1 Einführung	83
3.2 Strömung	84
3.3 Seegang	101
3.4 Wasserstand	108
3.5 Temperatur	112
3.6 Salzgehalt	134
3.7 Literatur	148
4 Meereschemie	151
4.1 Einführung	153
4.2 Nährstoffe	159
4.3 Organische Stoffe	187
4.4 Metalle	232
4.5 Radioaktive Stoffe	258
4.6 Literatur	279
Abbildungsverzeichnis	282
Tabellenverzeichnis	292
Tafelverzeichnis/List of Plates	295
List of Figures	296
List of Tables	305
Autoren/Authors	308

Zusammenfassungen

2 Atmosphärische Zirkulation

Die atmosphärische Zirkulation ist der Motor, der die Entwicklung des ozeanographischen Zustands der Nordsee wesentlich antreibt und steuert. Sie steht vielfach am Anfang von Wirkungsketten, die sich über ozeanographische Zustandsvariablen, Verteilungsmuster von Schad- und Nährstoffen bis hin zu bioökologischen Veränderungen erstrecken.

Zur Charakterisierung der bodennahen Zirkulation wurden NCEP/NCAR Reanalysen der Luftdruckverteilung im Meeresniveau herangezogen, auf täglichen, monatlichen und saisonalen Zeitskalen ausgewertet und mit klimatologischen Referenzzuständen verglichen. Als zentrales diagnostisches Werkzeug wurde ein Wetterlagenklassifizierungsverfahren nach Jenkinson und Collison auf den genannten Zeitskalen eingesetzt. Damit wurden nicht nur Zirkulationsmuster charakteristischen Wetter- und Witterungslagen qualitativ zugeordnet. Über die Berechnung eines repräsentativen Nordseewindes und die Identifizierung von Sturmereignissen wurde auch die Zirkulationsstärke quantifiziert.

Die Auswirkungen der atmosphärischen Zirkulation werden beispielhaft anhand von Lufttemperatur und Globalstrahlung auf Norderney sowie der Meerestemperatur der Deutschen Bucht aufgezeigt. Anomalien sind stets auf den klimatologischen Referenzzeitraum 1971–2000 bezogen. Hingegen gelten Rekord- oder Rangangaben, außer im Fall von Hurrels NAO-Index (1899–2013), für den Zeitraum 1971–2013. Die nachstehenden Ergebnisse für die Jahre 2008 bis 2011 sind chronologisch zusammengestellt und saisonal untergliedert. Abweichend von meteorologischen Usancen, sind hier die vier Jahreszeiten mit den Quartalen des Jahres gleichgesetzt.

2008 (32 ff.): (JFM) Eine starke und persistente W-Zirkulation mit hohem Sturmaufkommen verursachte anomal hohe Luft- und Meerwassertemperaturen in der DB. (AMJ) Die extreme Häufung von A- und E-Wetterlagen im Mai führten zu Rekordhöhen bei Globalstrahlung (Norderney) und DB-Temperatur. (JAS) Das signifikant erhöhte Aufkommen zyklonaler Wetterlagen und demzufolge unbeständige Witterung bedingten Lufttemperaturen auf klimatologischem Niveau. (OND) Die Luftdruckverteilung über der Nordsee entsprach klimatologischen Bedingungen, die sich in den hier analysierten Variablen spiegelten bzw. niederschlugen.

2009 (33 ff.): (JFM) Die für den vorausgegangenen Herbst festgestellten klimatologischen Verhältnisse dauerten an; so halbierte sich etwa das Sturmaufkommen gegenüber dem Vorjahreswinter auf normale 14 Tage. (AMJ) Die Dominanz von Hochdrucklagen ergab sich aus einem den gesamten April andauernden Omegablock über Skandinavien und persistentem Hochdruck über Island im Juni. Die Lufttemperatur stieg im April um 3.1 Standardabweichungen über das Klimanormal, normalisierte sich jedoch trotz weiterhin erhöhter Einstrahlung im Verlauf des Juni infolge der N-lichen Anströmung. (JAS) Ursache für die zyklonale Prägung der Hochsommermonate war ein stark positives Ostatlantikmuster, das eine sehr stabile Anströmung aus WSW, später

SW bedingte. Luft und Meerestemperatur lagen beständig um etwa 1.3 K über der Klimatologie. (OND) Ein tiefer Trog über dem NE-Atlantik war im November mit einem extrem hohen Sturmaufkommen sowie einem massiven, richtungsstabilen Einstrom milder Meeresluft aus SW verbunden. Im Dezember erreichte Hurrels NAO-Index einen Negativrekord von -2.95 . Diese konträren Bedingungen gingen mit einer drastischen Reduktion bzw. Erhöhung der Abkühlungsrate der Lufttemperatur einher.

2010 (34 ff.): (JFM) Der Rekordtiefststand (-2.54) des NAO-Index (Hurrel) im DJFM-Tertial bildete sich in einer beispiellos geringen Sturmfrequenz (4) ab. Zwar erreichte die Wintertemperatur sowohl auf Norderney, als auch in der Deutsche Bucht den seit 1996 tiefsten Stand. Dieser übertraf jedoch denjenigen von 1996 um fast 2 K. (AMJ) Die ANW-Witterungslage beinhaltete einerseits richtungsstabile Kaltlufttransporte über die Nordsee, andererseits Strahlungsüberschüsse unter Hochdruckeinfluss. Die Quartalsmittel von Luft- und Meerestemperatur unterschritten dabei die Klimanormalwerte nur geringfügig, lagen damit aber, ebenso wie im Winter, auf dem seit 1996 tiefsten Niveau. (JAS) Die Auswirkungen des langlebigen Omegablocks über Weißrussland beschränkte sich im Juli auf die südöstliche Nordsee. Die eigentliche Nordsee unterlag zunächst einer SW-lichen Anströmung und geriet ab der 3. Dekade unter den nachrückenden Höhentrog, der im August zu einer extremen Häufung von Tiefdrucklagen (11) führte und sich als CW-Witterungslage im Bodendruck abbildete. Die Lufttemperatur kletterte im Juli bei hohem Strahlungsüberschuss auf ihr dritthöchste Niveau und fiel im August auf das Klimanormal zurück. (SON) Die im Herbstverlauf zunehmend negative Auslenkung der NAO erreichte schließlich eine Stärke von -3.56 , womit der Rekordzustand des Vorjahresdezembers nochmals unterboten wurde. Mit Südverlagerung der Polarfront kam es – wie im Winter – zu einer extremen Häufung von Ostwetterlagen bei sehr geringer Sturmfrequenz (6). Die Herbsttemperatur auf Norderney fiel auf das Rekordminimum von 1993 (5.1 °C) zurück. Der Temperaturabfall der Meerestemperatur von November auf Dezember entsprach mit -5.0 K fast der Rekordabkühlungsrate von 1978 (-5.1).

2011 (36 ff.): (JFM) Nach 16 Monaten wechselte der NAO-Zustand im Februar in eine beständige, positive Phase. Die im Winterquartal vorherrschende Zufuhr milder Meeresluft aus WSW wurde nur episodisch durch Kaltlufttransporte aus NNW und SSE unterbrochen. Die Temperatur auf Norderney, die ihr saisonales Minimum gewöhnlich im Januar annimmt, kehrte zu dieser Zeit mit einem beispiellos starken Anstieg (3.3 K) zur Klimatologie zurück, der sie auch in den verbleibenden Wintermonaten folgte. (AMJ) Die Luftdruckverteilung im April stellte sich als Überlagerung des Winter- und Sommermusters des positiven NAO-Modes dar und glich damit den Verteilungen vom Juli 2006 und 2013, die mit extremen Hitzewellen einhergingen. Die Temperatur auf Norderney sprang auf das nach 2007 höchste Niveau (10.6 °C), die Meerestemperatur der DB vollführte einen Rekordsprung um 4.1 K auf 7.6 °C . Obgleich der weitere saisonale Anstieg in einer lebhaften WSW-Strömung flacher verlief, war es auf Norderney nur im Frühjahr 2007 wärmer. (JAS) Die Verbundhäufigkeiten für Juli und August von Hoch- (A) und Tiefdruckwetterlagen (C) erreichten Rekordstände von 6 und 19 Tagen. Die unbeständige Witterungsphase wurde im September durch eine lebhafte, richtungsstabile WSW-Anströmung abgelöst, die ab Monatsmitte antizyklonal geprägt war. Kräftige Strahlungsdefizite im Hochsommer und ein hoher Überschuss im September führten auf Norderney zu einem seitwärtigen, auf dem klimatologischen Quartalsniveau von 16.2 °C

stagnierenden Temperaturverlauf. (OND) Eine langlebige (22. 10.–23. 11.) Blockierung bedingte eine richtungsstabile S-liche Anströmung, die durch markante Windsprünge von zwei dauerhafte, stabile und kräftige W-Phasen begrenzt war. Die unter Ballung aller Novemberstürme (6) einsetzende W-Phase behielt ihren Sturmcharakter bis über den Jahreswechsel bei. Nicht nur die Anzahl schwerer Dezemberstürme erreichte eine neue Rekordhöhe (6), auch der NAO-Index nahm – nach dem Rekordminimum im Vorjahresdezember – ein zuvor nicht beobachtetes Maximum von 2.65 an. Die Temperatur auf Nordsee stagnierte im Dezember (5.9 °C) auf dem Niveau des Vormonats. Der Temperaturrückgang seit Juli halbierte sich gegenüber der Rekordamplitude von 21.6 K im Vorjahr auf bislang nur einmal unterschrittene 10.0 K (1974).

3 Meeresphysik

Strömung (Seite 84 ff.)

Sowohl die Oberflächenzirkulation der Nordsee als auch die Wassertransporte durch die untersuchten Querschnitte werden weitgehend von der atmosphärischen Zirkulation geprägt. So führte die Häufung von Starkwindereignissen aus westlicher Richtung im November 2009 zu einer extrem ausgeprägten nordseeweiten zyklonalen Zirkulation. Dies zeigt sich sowohl in den monatlichen Abbildungen der Oberflächenzirkulation als auch in den Transporten durch die Straße von Dover und in der Deutschen Bucht. Darauf folgte im Winter 2009/2010 eine langanhaltende Zirkulationsanomalie in der nördlichen Nordsee, wo durch die persistenten Ostwinde dieses relativ kalten Winters ein dreimonatiger Ausstrom im Bereich der norwegischen Rinne forciert wurde. Die beiden hier beschriebenen Anomalien stellen die herausragenden Ereignisse im betrachteten Zeitraum 2008 bis 2011 dar.

Die Zirkulationsstatistik für die Deutsche Bucht basiert auf der zeitlichen Abfolge der täglichen Zirkulationsmuster der Restströme mit neun typischen Mustern. Die Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster in den Jahren 2008 und 2009 liegt sehr dicht am 10-Jahresmittel. Auffällig in 2008 ist das Fehlen längerer Phasen konstanter zyklonaler Zirkulation, die in den Vorjahren bis zu 28 Tagen andauern konnten. 2008 wurde nur eine 11-tägige zyklonale Phase Anfang September beobachtet. Im November 2009 trat eine 20-tägige zyklonale Phase auf, die nur von einem Tag mit Nordströmung unterbrochen wurde. In 2010 kommt es zu signifikanten Abweichungen vom 10-Jahresmittel: Das generell dominante zyklonale Muster weist die geringste Häufigkeit seit 2000 auf, während das antizyklonale Muster die größte Häufigkeit seit 2000 aufweist. Ungewöhnlich ist auch eine Phase konstanter antizyklonaler Zirkulation über 8 Tage, da bisher längere konstante Phasen vom zyklonalen Typ gebildet wurden. 2011 verzeichnen der antizyklonale und direktionale Typ eine deutliche Abnahmen gegenüber dem 10-Jahresmittel die vom variablen Typ kompensiert wurde. Der variable Typ bildete mit 11 Tagen auch die längste Phase eines „konstanten“ Strömungstyps, was in diesen Fall aber 11 Tage ohne Richtungspräferenz bedeutet.

Seegang (Seite 101 ff.)

Das Seegangsklima der Jahre 2008–2011 wurde durch saisonale geographische Verteilungen von signifikanter Wellenhöhe, Windsee- und Dünungsrichtung charakterisiert. Die typischen Verteilungsmuster sind von den vorherrschenden Windverhältnissen und der geographisch-bathymetrischen Gestalt der Nordsee geprägt. Die mittlere Wellenhöhe war im Winter und Herbst 2008 sowie im Herbst 2011 in der nördlichen Nordsee deutlich höher als in dem Vergleichszeitraum 2000–2011. Im ganzen Jahr 2010 war sie überall niedriger, sonst meist durchschnittlich. Wind und Windsee kamen überwiegend aus Richtungen zwischen SW und NW. Im Winter 2009/10 und Herbst 2010 dominierten dagegen verbreitet östliche Richtungen. Außergewöhnlich extremer Seegang kam in den vier Jahren in der südlichen Nordsee nicht vor. Die stärksten Stürme und Wellenhöhen traten im Grenzgebiet zum Atlantik auf.

Wasserstand (Seite 108 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 2008–2011 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 Meeresspiegels lag weiter im Rahmen des langjährigen Anstiegs von etwa 20 cm pro Jahrhundert, und die Anzahl der Sturmfluten lag etwas unter dem Mittel der Jahre 1951–2011, es gab aber auch schon Jahre mit geringerer 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 (Seite 112 ff.)

Die Temperaturschichtungen der zonalen Schnitte der Sommeraufnahmen 2008–2011 belegen die große zwischenjährliche Variabilität der thermischen Schichtung. 2008 zeigen die Vertikalschnitte in der nordöstlichen Nordsee einen starken vertikalen Gradienten der deutlich nach Westen hin abnimmt, so dass dort teilweise gar keine Thermokline mehr ausgebildet wird. Alle Schnitte weisen an der Oberfläche einen horizontalen Gradienten mit von E nach W abnehmenden Temperaturen auf. Der 54° N-Schnitt ist infolge der Gezeitenreibung und starker Winde weitgehend vertikal durchmischt, ebenso wie das östliche Ende und der Bereich der Doggerbank auf dem 55° N-Schnitt. Der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee lag 0.6 Standardabweichungen unter dem 10-Jahresmittel.

2009 waren die vertikal durchmischten Gebiete vor der südlichen und der dänischen Küste mit fast 20 °C deutlich wärmer als 2008. Die Tiefe der Deckschicht betrug in der zentralen Nordsee und im Skagerrak über 40 m mit maximalen vertikalen Gradienten von über 3 K/m. Die Stärke des Gradienten in der Thermokline nahm nördlich von 57° N in Richtung Norden ab. Die in fast

allen Jahren beobachtete Depression der Thermokline über der Norwegischen Rinne bei etwa 7° E und 58° N erreichte 2009 ein Maximum von 80 m. Der Gesamt-Wärmeinhalt lag 1.4 Standardabweichungen über dem 10-Jahresmittel.

Der vertikal durchmischte Streifen wärmeren Wassers parallel zur kontinentalen Küste war 2010 etwa 1 K kühler als im Vorjahr. In den geschichteten Bereichen stieg die Temperaturdifferenz zwischen der warmen Deckschicht und dem Bodenwasser um etwa 2 K gegenüber 2009 an. Die Mächtigkeit der Deckschicht war mit 20–30 m deutlich geringer als im Vorjahr und auch die maximalen Gradienten in der Thermokline waren mit 1.5 K/m deutlich geringer. Eine scharf ausgebildete Thermokline fand sich nur auf den 55° N- und 56° N-Schnitten östlich der Doggerbank. Durch die geringere Mächtigkeit der Deckschicht konnte das kühlere Bodenwasser ein größeres Volumen besetzen, so dass der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee wieder abnahm und dicht am 10-Jahresmittel lag.

2011 hat sich der vertikal durchmischte Streifen wärmeren Wassers parallel zur kontinentalen Küste weiter abgekühlt (ca. 1 K) und in den geschichteten Bereichen hat sich die Differenz zwischen der warmen Deckschicht und dem Bodenwasser gegenüber 2010 von 10 auf 8 K verringert. Die maximale Deckschichttiefe betrug 40 m, die Gradienten in der Thermokline lagen zwischen 0.5 und 2.5 K/m. Im Vergleich zu 2010 stieg der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee leicht an und lag 0.4 Standardabweichungen über dem 10-Jahresmittel.

Die Tiefenverteilung der Temperatur in der Deutschen Bucht wurde anhand der Daten der MARNET-Station „Deutsche Bucht“ dokumentiert. Zu den dominanten Signalen im Beichtszeitraum gehört die positive Anomalie des Winterminimums 2007/2008 mit einer Abweichung von etwa 2 K infolge des Wärmeüberschusses aus den vorangegangenen Sommer- und Herbstmonaten. Im Winter 2008/2009 näherten sich die Winterminima wieder den klimatologischen Werten an. Die Sommermaxima der Tagesmittelwerte liegen bis zu 3 K über der Klimatologie. Besonders ausgeprägt war die Schichtung im Jahre 2010. Die Unterschiede von Oberflächen- und Bodentemperatur betrugen bis zu 8 K, wobei das saisonale Maximum in der Oberflächenschicht etwa 6 Wochen vor dem der Bodenschicht erreicht wurde. Ursache für die ausgeprägte Schichtung sind ungewöhnlich hohe Wärmeeinträge aus der Atmosphäre im April und Sommer 2010. 2011 lagen die Strahlungseinträge im Sommer deutlich unter dem langjährigen Mittel. Dies führte was zu einem geringeren Sommermaximum und einer nur schwach ausgeprägten Schichtung.

Salzgehalt (Seite 134 ff.)

Im Sommer 2008 wurde nach 2004 der zweithöchste Gesamt-Salzinhalt seit 1999 beobachtet. Im Winter 2008 drang das Atlantische Wasser (AW, $S > 35$) in der Boden- und Oberflächenschicht bis 56° N nach Süden vor, im Sommer erstreckte sich die 35er-Isohaline am Boden etwa parallel zum 57. Breitengrad und AW drang am Boden auf breiter Front bis 58° N vor nahm ein deutlich größeres Volumen ein als im Vorjahr. An der Oberfläche deckte der Bereich mit AW nur das Gebiet nördlich von 57° N und westlich des Nullmeridians ab.

Im Winter 2009 drang das AW in der gesamten Wassersäule bis 55° N nach Süden vor, gleichzeitig lag auch im Einstrombereich des Englischen Kanals eine

große Linse atlantischen Wassers. Im Sommer lag die 35er-Isohaline noch bei etwa 56° N, war aber an der Oberfläche deutlich schmaler als im Winter. Der Gesamt-Salzinhalt nahm gegenüber dem Vorjahr leicht ab. Die Gesamtabflussmengen der Elbe in 2008 und 2009 lagen mit etwa 20 km³/a etwas unterhalb des langjährigen Mittels.

Die winterliche Salzgehaltsverteilung in 2010 entsprach weitgehend der des Vorjahres, aber mit geringeren Salzgehalten vor der norwegischen Südküste. Dieses Minimum wurde auch noch im Sommer beobachtet. Auch die sommerliche Salzgehaltsverteilung hat sich gegenüber dem Vorjahr wenig geändert. Im Bereich des östlichen Kanalausgangs wurde im Sommer 2010 kein AW beobachtet. Der Gesamt-Salzinhalt der Nordsee entsprach in etwa dem des Vorjahres. Bedingt durch die stark erhöhten Abflussmengen in der zweiten Jahreshälfte stieg der Gesamtabfluss der Elbe in 2010 gegenüber den sieben vorangehenden Jahren deutlich an.

Für den Winter 2011/2011 fehlen Daten für den Bereich über der Norwegischen Rinne, die Verteilung in der nördlichen Nordsee entspricht aber weitgehend den beiden Vorjahren. In der südlichen Nordsee hingegen nahm der Salzgehalt gegenüber den Vorjahren deutlich ab. Im Sommer liegt die 35er-Isohaline deutlich nördlicher als im Winter und den Vorsommern. In der Oberflächenschicht war das Gebiet $S > 35$ deutlich kleiner, während der Streifen des salzärmeren KW parallel zur norwegischen Küste deutlich breiter war. Der Gesamt-Salzinhalt war mit 1.114×10^{12} t der niedrigste seit 2001. Im Januar und Februar 2011 lagen die monatlichen Abflussmengen signifikant über dem langjährigen Mittel, so das Gesamtabfluss 2011 mit 27 km³/a zwar niedriger als im Vorjahr war, aber noch immer deutlich über dem langjährigen Mittel lag.

4 Meereschemie

Nährstoffe (Seite 159 ff.)

Während die über die Elbe eingetragenen Stickstoff- und Phosphatfrachten in die Deutsche Bucht trotz interannueller Unterschiede eine deutlich abnehmende Tendenz zeigen, erreichen die Silikatfrachten von Jahr zu Jahr sehr unterschiedliche Konzentrationen. Ein Trend ist hier nicht zu erkennen.

Die Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht hat sich gegenüber derjenigen der Vorjahre im Rahmen der natürlichen Variabilität nur wenig verändert. Für das lösliche Phosphat wird der angestrebte Orientierungswert im Küstenbereich erreicht, nicht jedoch für Gesamtphosphor. Auch die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen liegen noch deutlich über dem Orientierungswert.

Die letzte im Jahr 2008 durchgeführte Klassifizierung (OSPAR Commission, 2008) stufte sowohl die Küstengewässer als auch die mittlere Deutsche Bucht als „problem area“ (PA) ein. In der äußeren Deutschen Bucht, die als „potential problem area“ (PPA) eingestuft wurde, liegen zwar die Nährstoffkonzentrationen im Bereich der Orientierungswerte, mit Sauerstoffmangelsituationen bzw. erhöhten Chlorophyllgehalten ist hier jedoch immer noch zu rechnen.

Bei der pH-Wert Entwicklung in der Deutschen Bucht zeichnet sich trotz jahreszeitlicher Schwankungen und interannualer Unterschiede ein abnehmender Trend ab. Die durch den Einfluss von Industrie und Verkehr steigende Kohlendioxidbelastung, die zu einem Sinken des pH-Wertes in den Weltmeeren führt, kann negative Auswirkungen auf die Meeresumwelt zur Folge haben.

Die Verteilung der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser war vergleichbar mit den Vorjahren (80–100%). Die stärksten Untersättigungen traten im Sommer 2009 und 2011 im nordöstlichen Elbeurstromtal bzw. im Entenschnabel auf, sie lagen hier bei 66 %.

Die Chlorophyllkonzentrationen waren aufgrund der in den Sommermonaten vorherrschenden Stickstofflimitierung gering. Höchste Konzentrationen wurden im küstennahen Gewässer vor Sylt mit 6,8 µg/L erreicht.

Organische Schadstoffe (Seite 187 ff.)

Wasser: Für die meisten Schadstoffe ist die Elbe die Haupteintragsquelle in die Deutsche Bucht. Generell nehmen daher die Schadstoffgehalte im Wasser mehr oder minder schnell von der Küste zur offenen See hin ab. Im Detail zeigten sich allerdings für die verschiedenen organischen Schadstoffe unterschiedliche räumliche Verteilungen bezüglich der absoluten Konzentrationen und der Steilheit der Konzentrationsgradienten.

Außerhalb der Elbfahne sind die Konzentrationen von unpolaren Schadstoffen gewöhnlich sehr niedrig. Ein sehr 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 im Küstenbereich stark von den Schwebstoffgehalten der Proben abhängig. In der offenen See wurden für diese lipophilen Stoffe ca. 100- bis 1 000-fach niedrigere Konzentrationen im Wasser beobachtet als in der Elbe. Aufgrund der niedrigen Bestimmungsgrenzen, die im BSH-Labor erreicht werden, waren aber die meisten Stoffe auch in der äußeren Deutschen Bucht in sehr geringen Konzentrationen (0,7 bis 10 pg/L) nachweisbar.

Polare, besser wasserlösliche Stoffe zeigten meist geringere Konzentrationsgradienten. Da sie außerdem häufig größere Quellstärken in den Flüssen aufwiesen als die klassischen lipophilen Stoffe, waren sie meist in deutlich höheren Konzentrationen im Meerwasser zu beobachten. Zu diesen Stoffen zählen insbesondere ‚moderne‘, eher polare Pestizide (z. B. Diuron, Simazin, Terbutylazin) aber auch neue Stoffklassen wie perfluorierte Tenside (PFOA, PFOS) oder persistente Stoffe, die in der Industrie oder auch in Haushalten in großen Mengen verwendet werden (Komplexbildner, Flammschutzmittel). Aufgrund ihrer polaren und beständigen (persistenten) Eigenschaften verhalten sich diese Stoffe relativ ‚konservativ‘, sodass meist recht gute inverse Korrelationen zwischen Stoffkonzentration und Salzgehalt gelten, welche die großen, in die südliche Nordsee entwässernden Flüsse als Haupteintragsquellen ausweisen. Diese Stoffe wurden im Küstenwasser in Konzentrationen bis zu 10 ng/L und in der offenen See im Bereich von 10 bis 500 pg/L beobachtet.

Die Gehalte der lipophilen CKW und PAK im Meerwasser lagen im Untersuchungszeitraum im Wertebereich der vorangegangenen Jahre. Ein zeitlicher Trend war auch mittelfristig (2000 bis 2011) nicht erkennbar, weil zum einen die Konzentrationsschwankungen im Meerwasser relativ groß sind zum anderen keine großen absoluten Änderungen beobachtet wurden. Diese werden momentan auch nicht erwartet, da die Stoffe seit langem geregelt sind (DDT und PCB) oder ubiquitär in der Umwelt vorkommen (PAK).

Die Konzentrationen der Hexachlorcyclohexan-Isomere α - und γ -HCH waren 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 unter 0,1 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. Eine solche war seit 2007 und in dem Untersuchungszeitraum 2008 bis 2011 nun auch für das γ -HCH zu beobachten. Somit waren in der Elbfahne keine weiter abnehmenden Trends mehr für die HCH-Isomere festzustellen. Außerhalb der Küstengewässer waren für das γ -HCH z. T. noch leicht rückläufige Tendenzen zu beobachten, allerdings waren diese nur noch sehr gering.

Die Konzentrationen der polaren Pestizide unterlagen auch in den Jahren 2008 bis 2011 recht starken jahreszeitlichen Schwankungen. Diese werden durch unterschiedliche Anwendungszeiten der verschiedenen Herbizide verursacht. Obwohl regelmäßige Analysen erst seit dem Jahr 2000 durchgeführt werden, war es möglich, erstmalig für einige Stoffe abnehmende Zeittrends nachzuweisen. Dies betraf sowohl geregelte Herbizide (Atrazin, Verbot seit Mitte der 1990er Jahre) als auch noch zugelassene Stoffe. Auch bei den seit 2002 beschränkten perfluorierten Tensiden wurden rückläufige Trends im Küstenbereich beobachtet. In der offenen See wurden hingegen kaum rückläufige Trends festgestellt.

Sediment: Obwohl lipophile Schadstoffe im Sediment stark angereichert werden und in ca. 10^4 - bis 10^6 -fach höheren Konzentrationen als im Meerwasser vorliegen, ließen sich Quellenkorrelationen in der Deutschen Bucht kaum feststellen. Vielmehr werden die räumlichen Verteilungen hauptsächlich durch die Sedimenteigenschaften (Korngrößenverteilung, TOC-Gehalte) bestimmt. Die Konzentrationen aller untersuchten Verbindungen unterlagen im Sediment hohen kleinskaligen räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Aufgrund dieser hohen Variabilitäten, die sich auch bei Normalisierung der Konzentrationen auf organischen Kohlenstoff (TOC) nicht hinreichend reduzieren ließen, konnten keine robusten zeitlichen Trends festgestellt werden.

Metalle (Seite 232 ff.)

Wasser: Im Wasser der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) wurden in den Jahren von 2008 bis 2011 keine Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) gemessen, die negative Auswirkungen auf die belebte Natur wahrscheinlich machen würden. Grundlage dieser Einschätzung ist die Bewertung der gelöst vorliegenden Elementkonzentration von Cadmium, Blei, Quecksilber

und Nickel auf Basis der WRRL-Umweltqualitätsstandards AA-EQS. Die Kupfer- und Zinkkonzentrationen wurden auf Basis der Wasserqualitätsstandards (WQS) der US-EPA bewertet, da keine entsprechenden WRRL-QS vorliegen.

Hintergrundwerte erreichten die Metallgehalte (gelöst) der Elemente Cadmium, Quecksilber, Nickel, Blei und Zink im offenen Meer (Salzgehalte > 34). 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 Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion.

Zwischen 2006 und 2011 zeigte die Bleizeitreihe im küstenfernen Wasser einen leicht aber signifikant abnehmenden Trend, bei bereits sehr niedrigen Konzentrationen um den Hintergrundwert.

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 (< 20µm) im Oberflächensediment Gehalte, die negative biologische Effekte verursachen können. Von den sechs untersuchten Elementen (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) überschreiten Quecksilber, Zink und Blei entlang der nordfriesischen Küste den Effektgrenzwert. Zink und Blei zeigen in der gesamten deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone erhöhte Werte, Quecksilber nur entlang der nordfriesischen Küste bis zur Elbemündung. Eine insgesamt niedrige Belastung wird im Gebiet der Weißen Bank festgestellt, hier erreichen die Elemente Cadmium und Kupfer in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments ihre Hintergrundwerte.

Signifikante zeitliche Trends, die im Zeitraum zwischen 2001 bis 2011 auf den Trendstationen ermittelt wurden, waren alle abnehmend ((Weiße Bank (Hg), Ems (Cu), Deutsche Bucht (Hg)). Quecksilber zeigte seit 2001 in nahezu der gesamten Deutschen Bucht signifikant abnehmende Trends (Ausnahme Ems).

Die Umlagerung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen zur Tonne E3 führte im Zeitraum zwischen 2005 und 2010 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. Im Jahr 2011 wurden auch hier keine über den ortsüblichen Rahmen erhöhten Metallgehalte mehr gemessen.

Radioaktive Stoffe (Seite 258 ff.)

Die Überwachung war in den Jahren 2008 bis 2011 auf die Radionuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr , Tritium und die Transurane ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$, und ^{241}Am in der Deutschen Bucht und der Nordsee fokussiert. Die Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen der Radionuklide wiesen in der Deutschen Bucht 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 Süßwassereintrag aus der Elbe erkennbar. Die höheren Konzentrationen über der Norwegischen Rinne für ^{137}Cs und ^{90}Sr erklären sich durch den Ostseeausstrom, welcher aufgrund des Reaktorunfalls von Tschernobyl und dem geringen Wasseraustausch der Ostsee noch immer höhere Konzentrationen mit sich führt als das Wasser der Nordsee.

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 Anreicherung an Schwebstoffen. Die erhöhten Konzentrationen nördlich und östlich der Britischen Inseln erklärt sich durch resuspendiertes Material der Irischen See. Die zeitweilige, anomale Erhöhung der $^{238}\text{Pu}/^{(230+240)}\text{Pu}$ -Aktivitätsverhältnisse in der zentralen Nordsee im Jahr 2009 ist auf eine Reinigungsaktion in der Nähe der Anlage Dounreay zurückzuführen.

Die spezifische Aktivität der Sedimente der Deutschen Bucht ging in den letzten zehn Jahren in Bezug auf ^{137}Cs und $^{(239+240)}\text{Pu}$ kontinuierlich zurück, was auf die Resuspension dieser Radionuklide hindeutet. Das Sediment der mittleren deutschen Bucht zeigt eine klassische Sellafielddesignatur, wobei südöstlich von Helgoland ein reines Falloutverhältnis vorliegt.

Auswirkungen auf eine Konzentrationserhöhung der untersuchten Radionuklide aufgrund des Reaktorunfalls von Fukushima konnten bis 2011 in keinem Falle nachgewiesen werden. Mit radiologischen Folgen ist nach bisherigem Kenntnisstand nicht zu rechnen.

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.

Compilation of Summaries

2 Atmospheric Circulation

The atmosphere is the motor, which drives and controls the development of the oceanographic state of the North Sea. Atmospheric circulation often marks the beginning of cause-effect chains extending from oceanographic state variables beyond distribution patterns of pollutants and nutrients down to bio-ecological change.

To characterize near-surface circulation, NCEP/NCAR reanalyses of mean sea level pressure were employed, evaluated on daily, monthly and seasonal time scales, and compared to climatological reference states. As a central diagnostic tool, a weather-typing scheme after Jenkinson and Collison was applied to sea level pressure distributions on the same time scales. In this way, circulation patterns were classified in a qualitative fashion as to rotational and directional flow state. Beyond that, circulation strength was quantified in terms of a representative North Sea wind and through the identification of gales.

The significance of atmospheric circulation is exemplified through its impact on surface air temperature and global radiation at Norderney and mean sea surface temperature of the German Bight. Anomalies always relate to the climatological base period 1971–2000. By contrast, information on records and ranks apply to the period 1971–2013, except for Hurrell's NAO index (1889–2013). Partitioned into quarterly sections, summaries of the years 2008 through 2011 are set out below in chronological order. Here, seasons are not defined in meteorological terms, but equated to the quarters of a year.

2008 (Page 32 et seq.): (JFM) A substantial number of gales were embedded in a strong and persistent W(esterly) flow. Consequently, air and sea temperatures in the G(erman) B(ight) were anomalously high. (AMJ) The extreme frequency of A(nticyclonic) and E(asterly) weather types in May gave rise to record heights in global radiation (Norderney) and temperature (GB). (JAS). In unsteady, inclement weather due to a significantly increased incidence of C(yclonic) weather types air temperatures did not depart from climatological levels. (OND) Sea level pressure over the North Sea region was in good accord with the climatological distribution, and so were other meteorological variables.

2009 (Page 33 et seq.): (JFM) Climatological conditions of the preceding fall continued into the winter; so, gale frequency, for instance, halved to normal 14 days in comparison to the winter of 2008. (AMJ) As a consequence of omega blocking over Scandinavia through April and persistent high pressure over Iceland in June, A weather types were dominant in spring. Air temperature rose over climate normal by 3.1 standard deviations in April, but, in spite of constantly enhanced insolation, returned to normal in northerly air flow in the course of June. (JAS) The cyclonic character of the atmospheric circulation in midsummer resulted from a strongly positive E-Atlantic pattern, which went along with very stable winds from WSW, later on SW. Air and sea temperatures were constantly 1.3 K over climatology. (OND) A deep trough over the NE-At-

lantic in November was accompanied by extremely frequent gales and a massive, directionally stable inflow of mild maritime air from SW. In December Hurrel's NAO index reached a provisional record low at -2.95 . These opposing conditions were in line with, at first, drastically reduced, then, enhanced cooling of air temperature.

2010 (Page 34 et seq.): (JFM) Hurrel's NAO index for the DJFM period fell to a historical low of -2.54 , which displayed itself in an unprecedentedly small number of gales (4). Both, winter air temperature at Norderney and sea temperature of the GB assumed their lowest levels since 1996. Even so, these relative minima exceeded those of the winter of 1996 by 2 K. (AMJ) The ANW general circulation entailed directionally stable cold air transports across the North Sea on the one hand, and a surplus of global radiation in high pressure weather on the other. Just as in winter, quarterly means of air and sea temperature undercut climatological normals no more than slightly, but were at their lowest levels since 1996 all the same. (JAS) Repercussions of a long-lived omega block over Belarus in July were limited to the southeastern North Sea. The North Sea proper firstly governed by SW-erly flow fell under the influence of the succeeding trough from the 3rd decade. Consequently, weather type C not only reached a record frequency of 11 days in August, but also dominated the monthly sea level pressure distribution, classified as CW. A significant surplus in global radiation in July made air temperature at Norderney climb to its 3rd highest level, from which it dropped back to normal in August. (SON) Becoming increasingly negative in the course of the last quarter, the state of the NAO culminated at -3.56 in December, thus undercutting the record negative deflection set exactly one year before. As in the previous winter, the southward shift of the polar front brought about an abundance of E weather types together with a dearth of gales (6). Fall temperature at Norderney fell to the record low of 1993 ($5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$). At -5.0 K , the sharp descent in GB temperature from November to December almost equaled the record cooling rate of 1978 (-5.1 K).

2011 (Page 36 et seq.): (JFM) For the first time in 16 months, the NAO resumed a steady, positive phase in February. Advection of mild maritime air from WSW in winter was disrupted but episodically through cold air transports from NNW and SSE. Air temperature at Norderney, usually assuming its seasonal minimum in January, returned to normal through an unparalleled ascent of 3.3 K in this month, thence following climatology until the end of winter. (AMJ) The sea level pressure distribution in April presented itself as a superposition of the winter and the summer pattern of the positive mode of the NAO, thus resembling those of July 2006 and 2013, which went along with extreme heat waves. At $10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, air temperature reached its highest level after 2007, while sea temperature performed an unprecedented jump of 4.1 K to $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Though vigorous WSW-erly winds caused a marked flattening in further seasonal ascent, spring temperature was higher at Norderney in 2007, only. (JAS) The joint frequency for July and August of high pressure weather types (A) reached a record low of 6 days, while low pressure weather types (C) at 19 days were never more abundant. This spell of unsteady weather came to an end in September through a vigorous and directionally stable flow from WSW that took on anticyclonic characteristics past mid-month. Due to substantial deficits in global radiation in midsummer and, conversely, a strong surplus in September air temperature evolved sideways, stagnating at the climatological seasonal mean level of $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. (OND) A long-lived (10/22–11/23) blocking episode caused a directionally stable S-erly flow, delimited from two sustained

and steady periods of high W-erly flow by distinctive wind shifts. The 2nd of these periods sprang up with a clustering of all November gales (6) and maintained its stormy character beyond the turn of the year. Not only did the number of severe December gales attain a new all-time high (6), the NAO index also hit a never observed peak level of 2.65, which stands out in stark contrast to the record low value of -3.56 set one year before. At 5.9 °C in December, air temperature at Norderney failed to drop against the preceding month. Against previous year's record amplitude (21.6 K) the descent in temperature since July halved to 10.0 K, a range underrun but once before (1974).

3 Ocean Physics

Currents (Page Seite 84 et seq.)

The near-surface circulation of the North Sea and volume transports through selected transects are largely influenced by atmospheric forcing. During the period under report two outstanding situations had been observed: The accumulation of strong westerly wind events in November 2009 induced a North Sea wide pronounced cyclonic circulation pattern. This is shown in the figures of the monthly near-surface circulation patterns and in the volume transports through the Dover Strait and in the German Bight. This event was followed by a long-lasting circulation anomaly in the northern North Sea in the winter 2009/2010, where a three-month outflow in the area of the Norwegian Trench was forced by persistent easterly winds during this relatively cold winter.

The circulation statistics for the German Bight are based on the chronological order of the daily residual currents which are assigned to nine typical circulation patterns. The frequency distribution of the circulation patterns in the years 2008 and 2009 is very close to the 10-year average. The lack of longer phases of constant cyclonic circulation, which had durations of up to 28 days in previous years, is striking in 2008. Only an 11-day cyclonic phase at the beginning of September was observed in 2008. In November 2009, a 20-day cyclonic phase occurred and was only interrupted by one day with a northerly current. In 2010, there were significant deviations from the 10-year average. The generally dominant cyclonic pattern shows the lowest frequency since 2000, while the anti-cyclonic pattern shows the greatest frequency since 2000. A phase of constant anti-cyclonic circulation over 8 days is also unusual, because in the past longer p

has of a constant circulation type had always been formed by the cyclonic pattern. In 2011, the anti-cyclonic and directional type show a clear decrease in comparison to the 10-year average, which was compensated by the variable type. The variable type also formed the longest phase of a "constant" current type with 11-days duration. In this case, however, it means 11 days with no directional preference.

Waves (Page Seite 101 et seq.)

The wave climate during the period 2008-2011 was characterized by seasonal geographic distribution of significant wave height, wind sea- and swell direc-

tion. The typical wave distribution patterns are determined by the prevailing wind conditions and by the geographic/bathymetric shape of the North Sea. In winter and autumn 2008 and in autumn 2011 the mean wave height in the northern part of the North Sea was significantly higher compared to the reference period 2000-2011. For the rest of the period 2008-2011 the mean wave height corresponded well to the long term average except for the whole year 2010 when it was generally lower. In all seasons, the main wind and wind sea directions were between SW and NW. In contrary easterly directions were dominating in winter 2009/10 and autumn 2010. Extraordinarily high waves did not occur in the southern North Sea during the four-year period. The strongest storms and wave heights appeared in the border area to the North Atlantic.

Water Levels (Page Seite 108 et seq.)

The wave climate during the period 2008-2011 was characterized by seasonal geographic distribution of significant wave height, wind sea- and swell direction. The typical wave distribution patterns are determined by the prevailing wind conditions and by the geographic/bathymetric shape of the North Sea. In winter and autumn 2008 and in autumn 2011 the mean wave height in the northern part of the North Sea was significantly higher compared to the reference period 2000-2011. For the rest of the period 2008-2011 the mean wave height corresponded well to the long term average except for the whole year 2010 when it was generally lower. In all seasons, the main wind and wind sea directions were between SW and NW. In contrary easterly directions were dominating in winter 2009/10 and autumn 2010. Extraordinarily high waves did not occur in the southern North Sea during the four-year period. The strongest storms and wave heights appeared in the border area to the North Atlantic.

Temperature (Page Seite 112 et seq.)

The thermoclines in the zonal sections for the 2008–2011 summer surveys demonstrate the considerable interannual variability of thermal stratification. In 2008, vertical sections in the north-eastern North Sea show a strong vertical gradient which declines apparently towards the west, so that no thermoclines are formed in these areas. At the surface, all sections exhibit a horizontal gradient with temperatures decreasing from east to west. Due to tidal friction and strong winds the 54° N section, the Dogger Bank area, and eastern part of the 55° N section are largely vertically mixed. The total North Sea heat content deviated by 0.6 standard deviations from the 10-year average.

In 2009, the vertically mixed areas off the southern and Danish coasts were considerably warmer than in 2008 at almost 20 °C. The depth of the upper mixed layer in the central North Sea and Skagerrak was over 40 m with maximum vertical gradients of over 3 K/m. Northwards of 57° N the gradient strength of the thermocline declined reaching further north. The thermocline depression over the Norwegian Deep at approximately 7° E and 58° N, observed almost every year, reached a maximum depth of 80 m in 2009. The total heat content exceeded the 10-year average by 1.4 standard deviations.

In 2010, the vertically mixed ribbon of warmer water parallel to the continental coast was approximately 1 K cooler than during the previous year. In the strati-

fied areas, the temperature difference between the warm surface layer and the bottom water increased by approximately 2 K compared to 2009. At 20–30 m, the surface layer thickness was considerably lower than in the previous year and the maximum gradients in the thermocline were also considerably lower at 1.5 K/m. A sharp thermocline was only to be found on the 55° N and on the 56° N sections east of Dogger Bank. Due to the lower thickness of the surface layer, the cooler bottom water could cover a larger volume, meaning that the entire heat content of the North Sea declined again and was close to the 10-year average.

The vertically mixed ribbon of warm water parallel to the continental coast continued to cool (approx. 1 K) in 2011. In the stratified areas, the difference between the warm surface layer and the bottom water decreased from 10 K to 8 K with respect to 2010. The maximum surface layer depth was 40 m; the thermocline gradients were between 0.5 and 2.5 K/m. Compared to 2010, the overall heat content of the North Sea increased slightly and exceeded the 10-year average by 0.4 standard deviations.

The vertical temperature distribution in the German Bight and its evolution in time was documented using data from the station “German Bight” of the BSH Marine Environmental Monitoring Network. The positive anomaly of the 2007/2008 winter minimum with a deviation of approximately 2 K as a result of the heat surplus from the preceding summer and autumn months was one of the dominant signals in the reporting period. The winter minima came closer to the climatological values again in the winter of 2008/2009. The summer maxima of the daily averages are up to 3 K above the climatology. The stratification was particularly pronounced in 2010. The surface and bottom temperature differences measured up to 8 K, while the seasonal maximum was reached in the surface layer approximately 6 weeks before that of the bottom layer. The pronounced stratification was caused by the unusually high atmospheric heat inputs in April 2010 and the following summer. In 2011, the summer’s solar radiation gains were significantly lower than the long-term average. This led to a lower summer maximum and a weakly developed stratification.

Salinity (Page Seite 134 et seq.)

In summer 2008, the second-highest total salt content since 1999 was recorded with 2004 at maximum. During winter 2008 Atlantic Water (AW $S > 35$) penetrated from the northern boundary southwards until 56° N in the bottom and surface layer. In the summer, the 35 isohaline in the bottom layer ran roughly along the 57° N parallel and AW with $S > 35.35$ penetrated southwards down to 58° N in a broad tongue and covered a considerably larger volume than during the previous year. At the surface, the area with AW only covered the area north of 57° N and west of the prime meridian.

In the winter of 2009, the AW advanced southwards down to 55° N in the entire water column. At the same time, a large, lens-shaped body of AW was located in the inflow area of the Channel. During the summer period, the tongue of AW reached still southwards until approximately 56° N, but was significantly narrower at the surface than during winter. The total salt content decreased slightly in comparison to the previous year. In 2008 and 2009, the total volume of water

discharge of the Elbe was slightly below the longterm average at approximately 20 km³/a.

The winter salt distribution in 2010 largely corresponded to that of the previous year, but with lower salinity off the southern Norwegian coast. This minimum was also observed during summer. The summer salt distribution also changed slightly compared with the previous year. No AW was observed in the area of the eastern outflow of the Channel in summer 2010. The total salt content of the North Sea corresponded more or less to that one of 2009. The overall water discharge of the Elbe increased considerably in comparison to the seven preceding years. This was caused primarily by increased run-off volumes in the second half of the year.

There are no data available for winter 2011/2012 for the Norwegian Trench area, but the distribution in the northern North Sea largely matches the two preceding years. In contrast, the salinity in the southern North Sea decreased considerably compared to previous years. In the summer, the 35 isohaline was much further north than in winter and previous summers. The area of AW ($S > 35$) was much smaller in the surface layer, while the ribbon of less saline coastal waters parallel to the Norwegian coast was considerably wider. The total salt content of 1.114×10^{12} t was the lowest since 2001. In January and February 2011, the total monthly volumes of water discharge exceeded the long-term average significantly, although the total water discharge in 2011 was lower than in the previous year, it was still significantly higher than the long-term average.

4 Marine Chemistry

Nutrients (Page 159 et seq.)

While nitrogen compounds and phosphate loads transported by the Elbe into the German Bight showed a significant downward trend despite interannual variability, silicate loads are subject to significant different concentrations between years. No temporal trend can be identified here.

Nutrient levels in the German Bight changed only slightly within the range of natural fluctuations compared with those of previous years. The “orientation value” of dissolved phosphate was recorded in the coastal zone, but not for total phosphorous. The concentrations of nitrogen compounds continued considerably above the “orientation value”. The last environmental assessment (OSPAR Commission, 2008) classified both coastal waters and the central German Bight as “problem areas” (PA). Although nutrient concentrations in the outer German Bight, classified as a “potential problem area” (PPA), are within the range of the “orientation value”, oxygen deficiency in deeper water horizons due to increasing chlorophyll levels are still to be expected here.

Despite seasonal variability and interannual differences, a statistically significant downward trend for the pH-value in the German Bight can be ascertained. Increasing atmospheric carbon dioxide concentration, due to fossil carbon burning is responsible for the ocean acidification effect by decreasing pH-value in seawater with its negative impacts to the marine environment. The distribution of oxygen saturation values in bottom water was comparable to those of previous years (80 %–100 %). The strongest oxygen deficits occurred during

the summer periods 2009 and 2011 in the north-eastern Elbe “Urstromtal” and “Entenschnabel” at 66 % saturation.

The chlorophyll concentrations were low with nitrate being the limiting factor during summer months. The highest concentrations were measured in coastal waters nearby Sylt at 6.8 µg/L.

Organic Pollutants (Page 187 et seq.)

Water: Water: Organic pollutants are mainly discharged by the river Elbe into coastal waters of the German Bight, and subsequently distributed and diluted in the North Sea. Generally, contaminants are detected in a gradient from the coastline towards the open sea. However, with regard to absolute concentrations and the decrease by the gradient of the concentration, varying spatial patterns of various organic pollutants were found.

Beyond the Elbe plume, the concentrations of lipophilic contaminants are usually very low. Therefore, the spatial distribution of strongly lipophilic substances like chlorinated hydrocarbons (e.g. HCBs, PCBs and DDT) and highly condensed polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) was characterized by a rapid decline of concentrations from the coast towards the open sea. Furthermore, the concentrations of these lipophilic pollutants are greatly dependent on the amount of suspended particulate matter (SPM). Consequently, in the open sea, where water contains less suspended particles, the concentrations of these substances were observed to be 100 to 1 000 times lower than in the river Elbe. Nonetheless, due to the low analytical limits of quantitation achieved by the laboratory of the Federal Maritime and Hydrographic Agency, it was possible to detect most of the substances in the outer German Bight, in very low concentrations (0.7 to 10 pg/L). Polar or hydrophilic substances showed predominantly smaller concentration gradients. Beside “modern” pesticides (e.g. Diuron, Simazin, Terbutylazin), these polar compounds include new substance categories such as perfluorinated surfactants (PFOA, PFOS) or other persistent substances which are used in large quantities in both industry and households (sequestrants, flame retardants). Due to the fact that discharges of these substances from rivers are often higher than the loads of “classical” lipophilic compounds, these compounds were consequently detected at higher concentrations in sea water (concentrations of up to 10 ng/L in coastal areas and in the open sea within the range of 10 pg/L to 500 pg/L). Based on their polar and persistent properties, relatively good inverse correlations between substance concentration and salinity are found, which identifies the large rivers, draining into the southern North Sea, as the major sources for the input of these compounds into the marine environment.

The amounts of the lipophilic chlorinated hydrocarbons and PAHs in sea water were comparable to those to previous years. No temporal trend could be identified between 2000 and 2011, what is explainable by relatively large variations in the detected concentration in sea water combined with only minor changes in absolute amounts. However, since these substances are either already restricted in their use (or even banished) for a long time (like DDT and PCB) and/or occur ubiquitously in the environment (like PAHs), profound changes regarding their amounts are currently not to be expected.

In contrast, the concentrations of the hexachlorocyclohexane isomers alpha- and gamma-HCH declined exponentially over the time span from 1989 to 2007. The amounts of alpha-HCH in the German Bight decreased by half every 4 years, while the amounts of gamma-HCH, depending on the sampling location, declined by 5 %–35 % roughly until 1998, and showed reductions of 50 % every two years to now. Today, the concentrations of both alpha- and gamma-HCH are lower than 0.1 ng/L. Already by the turn of the millennium, the long-term downward trend of alpha-HCH had changed to a more lateral trend in the waters off the North Frisian coast, which are influenced by the discharge of the river Elbe. A similar trend could be observed for gamma-HCH since 2007 and during the recent assessment period from 2008 to 2011. Thus, no decreasing trends were to be found for the HCH isomers in the Elbe plume. Beyond coastal waters, slightly minor downward trends were occasionally observed for gamma-HCH.

As in previous observation periods, the concentrations of polar pesticides displayed strong seasonal variations in the years 2008 to 2011. These variations are caused by different periods of application for various herbicides over the course of a year. Although regular monitoring for these compounds is only in place since the year 2000, for some polar pesticides a downward trend was ascertained within recent period of investigations. This pertained not only to controlled herbicides like Atrazin, which is banned since the mid-1990s, but also to substances which are still on the market. Declining trends in the coastal zone were also observed for perfluorinated surfactants which have been restricted since 2002. In contrast, hardly any downward trends were identified in the open sea.

Sediment: Although lipophilic substances are strongly enriched by sediments and are consequently present in concentrations approximately 100 times higher than in the water phase, it is hardly possible to correlate the amounts of these substances to potential sources in the German Bight. Instead, spatial distributions are mainly determined by sediment characteristics (grain size distribution, TOC contents). The concentrations of all investigated compounds in sediment samples showed considerable small-scale spatial and temporal variations. As a result of these variabilities, which could not be sufficiently reduced by organic carbon normalisation of the data, it was not possible to identify any robust, temporal trend.

Metals (Page 232 et seq.)

Water: Metal concentrations (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn) above levels, which could have a negative impact on the living nature, were not detected in the waters of the German Exclusive Economic Zone (EEZ) from 2008–2011. This assessment is based on the evaluation of the dissolved element concentration of cadmium, lead, mercury and nickel present on the basis of the EU Water Framework Directive AA-EQS. The copper and zinc concentrations were evaluated on the basis of the Water Quality Standard (WQA) of the United States Environmental Protection Agency (EPA) as no corresponding Water Framework Directive quality standard is available. The metal contents (dissolved) of the elements cadmium, mercury, nickel, lead and zinc reached background levels in the open sea (salinity > 34). The “effect limit” was not reached in any way, either in direct proximity to the coast or in water masses with > 28 salinity.

However, the determination and evaluation of suitable effect limits for marine ecosystems remains the subject of research and scientific discussion. Between 2006 and 2011, the lead time series in waters far from the coast showed a slight but significant downward trend with already very low concentrations, around the expected background level.

The spatial concentration distributions of the elements mercury, cadmium, lead, copper and zinc show similar patterns in surface waters of the German Bight. The contents decline significantly from coast towards the open sea. Most elevated concentrations were detected in the inner German Bight and the Elbe estuary and significant in the estuaries of the Weser and Ems rivers. Cadmium, zinc and nickel show pronounced seasonal cycles with increased concentrations during spring and at minimums in the later summer to autumn. In contrast, the dissolved manganese shows a clear maximum in the summer, which indicates oxygen deficiency events in the water column. According to the current level of awareness, there is no danger to the marine ecosystem arising from the measured metal concentration in sea water.

Sediment: Along the North Frisian coast, the metal pollution of the silt/clay fraction (< 20 µm) reaches contents in the surficial sediment which could have negative biological effects. Only mercury, zinc and lead exceed the effect limit of the six elements studied (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn), along the North Frisian coast.

Zinc and lead show increased levels throughout the entire German Exclusive Economic Zone; mercury is found only at enhanced levels along the North Frisian coast up to the Elbe estuary. Altogether low levels of pollution are determined in the area of the White Bank; the elements cadmium and copper reach their background levels here in the silt/clay fraction of the surficial sediment. Significant temporal trends detected during the period 2001 to 2011 on the trend stations were all downward (White Bank (Hg), Ems (Cu), German Bight (Hg)). Since 2001, there has been a significant downward trend in mercury virtually over the whole of the German Bight (with the exception of Ems). In the period between 2005 and 2010, the deposition of sediments from the dredging activities in the Port of Hamburg to buoy E3 led to local increased metal contents in the silt/clay fraction of the surficial sediment. This was mainly the case for the elements cadmium, copper, mercury and zinc. After 2011, there were also no longer metal contents detected at this site above previous usual ranges.

Radioactive Substances (Page 258 et seq.)

Monitoring in the years 2008 to 2011 focused on the radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , tritium and the transuranic elements ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in the German Bight and North Sea. Overall, the activity concentration distributions of radionuclides exhibited very minor spatial differences in the German Bight in comparison with previous years. The concentrations were slightly higher than those in the surface water of the North Atlantic, which can be attributed to the global fallout of atmospheric nuclear weapons testing. The slightly higher concentrations of ^{137}Cs in the north-west North Sea, compared to the coastal zone, are due to re-suspended material from the highly contaminated Irish Sea sediments. It was possible to identify a characteristic freshwater inflow from the Elbe in the distribution of the ^{90}Sr concentration. The higher concentrations

over the Norwegian Deep for ^{137}Cs and ^{90}Sr can be explained by the Baltic Sea outflow, which still carries higher concentrations than the water of the North Sea as a result of the Chernobyl reactor accident fallout, and the limited water exchange in the Baltic Sea.

On the basis of the activity ratios, the increased activity concentrations of transuranic elements in the area of the Elbe and its estuary definitely did not originate from the global weapon fallout, but cannot be assigned to a local source. In the latter case, other man-made radionuclides would also have to be found in significantly higher concentrations, which was not the case. With our current level of understanding, the only theory that remains is that of enrichment in the tidal Elbe via natural transportation processes due to the enrichment of suspended matter. The increased concentrations to the north and east of the British Isles can be explained by re-suspension material from Irish Sea sediments. The occasional, anomalous increase of $^{238}\text{Pu}/(^{230+240})\text{Pu}$ activity ratios in the central North Sea in 2009 can be attributed to a clean-up operation near to the Dounreay facility.

The specific activity in surface sediment samples of the German Bight has continuously declined in the past ten years with regard to ^{137}Cs and $^{(239+240)}\text{Pu}$, which gives hints to the re-suspension of contaminated sediment with these radionuclides. The sediment in the central German Bight shows a typical "Sellafield" derived radionuclide vector, while there is a pure fallout ratio southeast of Heligoland.

Based on the information presently available, radiological consequences are not expected. The average total effective dose is 4 mSv per year and per person in Germany, half of which can be attributed to medical and particularly diagnostic X-ray measures. The contamination of the North Sea from radionuclides only contributes to the population's exposure to radiation via the route "consumption of fish or seafood". Consumption of about 14 kg per year per person (average statistical consumption rate in Germany in 2013) results in a maximum effective dose of 0.3 $\mu\text{Sv/a}$, which remains considerably lower than the "trivial dose for an individual source" according to the Radiation Protection Ordinance (10 $\mu\text{Sv/a}$) and can therefore be neglected from the point of view of radiation protection. As there is no significant dose contribution for the population resulting from the enrichment of radionuclides in the food chain, this may be deemed the case for flora and fauna as well.

1 Einführung

Detlev Machoczek



1 Einführung

Steigender Schiffsverkehr durch eine Zunahme des globalen Handels, eine boomende Kreuzfahrtbranche und neue maritime Industrien wie die Offshore Windenergie führen zu einer zunehmenden Nutzung der Meere. Damit ist eine wachsende Belastung des marinen Ökosystems verbunden. Dabei gehört besonders die Nordsee im Bereich der Deutschen Bucht zu den weltweit am stärksten beanspruchten Meeresregionen.

Die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO) ist bemüht, durch Erarbeitung international gültiger Regelungen eine Balance zwischen Schutz und Nutzung der Meere herzustellen. In der europäischen Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) wird ein erstrebenswerter Umweltzustand formuliert, der durch die Entwicklung geeigneter Strategien und Maßnahmen erreicht werden soll. Wesentliche Grundlage und Voraussetzung der Zustandsbewertung der Nordsee sind die vom BSH routinemäßig erhobenen hydrographischen und chemischen Messungen. Sie erlauben Rückschlüsse auf den Zustand der Meeresumwelt und zeigen unter anderem die Folgen des Klimawandels auf. Sie helfen aber auch, den Umfang des Eintrags von Schadstoffen aus der Luft, den Flüssen und dem Hinterland, sowie der Schifffahrt selbst, zu bewerten und Hinweise für eine notwendige Reduzierung solcher Einträge zu geben.

Mit seinen aktuellen Beobachtungsdaten und Analysen leistet das BSH einen erheblichen Beitrag zur Sicherheit der Seeschifffahrt. Informationen zu Strömungen, Wellenhöhen, Wasserstand oder Eisgang unterstützen Nautiker in ihrer Schiffsführung.

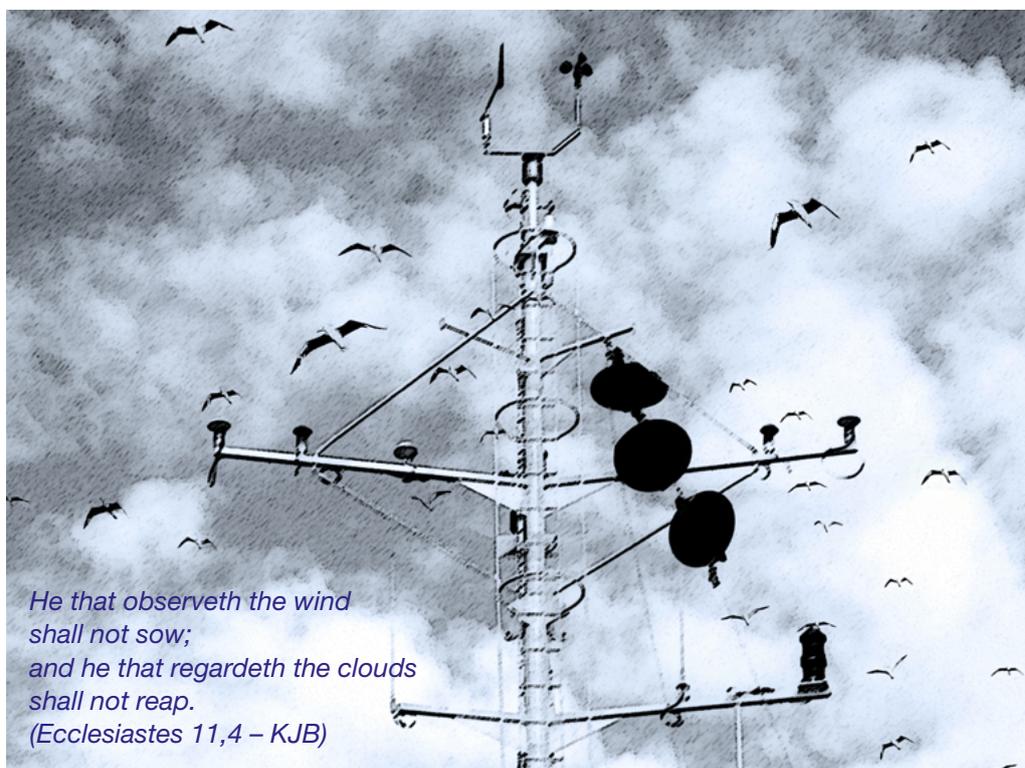
Die Umweltüberwachung des BSH erfasst die Belastung durch bekannte Schadstoffe und schafft so eine Datengrundlage zur Bewertung der Wirksamkeit von Reduktionsmaßnahmen. Daneben werden neue stoffliche Belastungen identifiziert und eine Informationsbasis für die Weiterentwicklung von Schutzmaßnahmen geschaffen.

Maßnahmen zur Reduzierung von Schadstoffen und das Verbot besonders umweltbelastender Stoffe zeigen positive Wirkungen (System Nordsee, 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen, Berichte des BSH Nr. 49; Die Nordsee, Naturraum und Wirtschaftszone, Zustand und Entwicklung 2006–2007). Trotzdem bedarf es ständiger Überwachung der Zustandsänderungen der Nordsee. Nur so kann die Wirksamkeit von internationalen und schifffahrts- und umweltrelevanten Übereinkommen überprüft und damit verbundene Maßnahmen bewertet und gegebenenfalls angepasst werden.

Im Nordseezustandsbericht für die Jahre 2008 bis 2011 werden die Ergebnisse der ständigen Überwachung der Nordsee durch das BSH in diesem Zeitraum zusammengefasst und dargestellt. Er liefert einen unverzichtbaren Beitrag zum Verständnis des komplexen Systems Nordsee.

2 Atmosphärische Zirkulation

P. Loewe & Ch. Lefebvre



RV Pelagia (PL 2010)

2.1	Vorbemerkungen	31
2.2	Zustand und Entwicklungen: 2008–2011	32
2.2.1	Einführung	32
2.2.2	2008	32
2.2.3	2009	33
2.2.4	2010	34
2.2.5	2011	36
2.2.6	Zusammenschau	38
2.3	Materialsammlung	40
2.3.1	Aufbau und Umfang	40
2.3.2	Datenquellen	41
2.3.3	Methoden	41
2.3.4	Interpretation	42
2.4	Literatur	79

2.1 Vorbemerkungen

Die Zielsetzung, Zustand und Entwicklungen der atmosphärischen Rahmenbedingungen in der Nordseeregion über nunmehr 4 Jahre hinweg abzudecken, macht eine strukturelle Neuausrichtung dieses Abschnitts erforderlich. Dazu wird das systemische Konzept früherer Ausgaben durch eine kompakte Dokumentation ersetzt, die dem verbreiteten Bedürfnis entgegenkommt, Informationen in pillenförmigen Kraftsätzen aufzunehmen.

Konkret ergibt sich eine zweiteilige Gliederung des Abschnitts in einen aphoristischen Textbeitrag und eine bilderbuchartige Materialsammlung. Der Kurzbericht beinhaltet Mitteilungen zu besonderen Ereignissen, Zuständen und Entwicklungen im Zeitraum 2008–2011, die mit Verweisen auf Bild- und Tabellenmaterial belegt und untermauert sind. Das thematisch geordnete Abbildungs- und Tabellenwerk orientiert sich in Aufbau und Umfang an früheren Berichtsausgaben und bedient so einen weitergehenden Informationsbedarf auf unterschiedlichsten Interessensgebieten.

2.2 Zustand und Entwicklungen: 2008–2011

2.2.1 Einführung

Luftdruckverteilungen im mittleren Meeresniveau (MSLP) repräsentieren die großskalige atmosphärische Zirkulation im Nordseeraum, denn sie implizieren die (geostrophische) Windverteilung an der Oberfläche. Charakteristisch für Herbst und Winter ist eine kräftige SW-liche Anströmung, 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.

Zur Charakterisierung der bodennahen Zirkulation wurden NCEP/NCAR MSLP-Reanalysen herangezogen (*KALNEY et al. 1996*), auf täglichen, monatlichen und saisonalen Zeitskalen ausgewertet und mit klimatologischen Referenzzuständen verglichen. Als zentrales diagnostisches Werkzeug wurde ein Wetterlagenklassifizierungsverfahren nach *JENKINSON und COLLISON (1977)* auf den genannten Zeitskalen eingesetzt. Damit wurden nicht nur die jeweiligen Zirkulationsmuster charakteristischen Wetter- und Witterungslagen qualitativ zugeordnet. Über die Berechnung eines repräsentativen Nordseewindes und die Identifizierung von Sturmereignissen wurde auch die Zirkulationsstärke quantifiziert.

Die Auswirkungen der atmosphärischen Zirkulation werden beispielhaft anhand von Lufttemperatur und Globalstrahlung auf Norderney sowie der Meerestemperatur der Deutschen Bucht aufgezeigt. Anomalien sind stets auf den klimatologischen Referenzzeitraum 1971–2000 bezogen. Hingegen gelten Rekord- oder Rangangaben, außer im Fall von Hurrels NAO-Index (1899–2013), für den Zeitraum 1971–2013. Die nachstehenden Ergebnisse für die Jahre 2008 bis 2011 sind chronologisch zusammengestellt und saisonal untergliedert. Abweichend von meteorologischen Usancen, sind hier die vier Jahreszeiten mit den Quartalen des Jahres gleichgesetzt.

2.2.2 2008

(JFM) Abgesehen von einer 11 Tage andauernden antizyklonalen Episode in der 2. Februardekade waren die Wintermonate von SW- und NW-Lagen beherrscht (*Tabelle 2-10; Tabelle 2-18*). Ein ähnlich hoher Anteil von über 60 % wurde im Berichtszeitraum nur im OND-Quartal 2011 erreicht. Daraus resultierte eine verstärkte W-Witterungslage (*Abbildung 2-9*), die durch einen Nordseewind von 8.6 (V) bzw. 12.9 m/s (Vel) bei hoher Richtungsstabilität (V/Vel=67 %) charakterisiert war (*Tabelle 2-21*). Das Sturmaufkommen war mit 28 Sturmtagen (20× Gale+5× Severe G+3× VerySG) ähnlich hoch wie im Winter 2007 (26=18+7+1), wobei die meisten Stürme jeweils im Januar eintraten (*Tabelle 2-2; Tabelle 2-24; Abbildung 2-19*). Als Folge der erheblich verstärkten W-Zirkulation blieb die Lufttemperatur auf Norderney im Winter um 2.2 K über dem klimatologischen Mittel von 3 °C (*Abbildung 2-22*). Ähnliches gilt für die Meeresoberflächentemperatur der Deutschen Bucht, die das Klimamittel von 3.9 °C um 1.8 K (1.3 StdAbw) übertraf (*Abbildung 2-23*).

(AMJ) Die typische Tendenz zur Gleichverteilung der Windrichtungen im Frühjahr war 2008 deutlich ausgeprägt (*Abbildung 2-15*), was auch aus der sehr geringen Richtungsstabilität (11 %) des Nordseewindes (*Tabelle 2-21*) und der zugehörigen diffusen Luftdruckverteilung

(Abbildung 2-9) ersichtlich ist. Strukturierte monatliche Luftdruckverteilungen belegen, dass die saisonalen Bedingungen aus sich kompensierenden, recht persistenten und entgegengesetzten Anströmungen im Mai und Juni resultierten (Abbildung 2-11). Bemerkenswert ist dabei die extreme Häufung von A- und E-Wetterlagen, welche den gesamten Mai und die erste Junidekade bestimmten (Tabelle 2-10, Tabelle 2-11). Mit einer Rekordhöhe von 238 Wm^{-2} lag die Globalstrahlung auf Norderney im Frühjahr um 2.4 StdAbw über dem Klimamittel (Abbildung 2-21). Der Mai war hier mit $13.4 \text{ }^\circ\text{C}$ der 2. wärmste des Zeitraums 1971–2013 (Abbildung 2-22), während die Meeresoberflächentemperatur der DB mit $12.7 \text{ }^\circ\text{C}$ in dieser Zeit nie höher war (Abbildung 2-23).

(JAS) Das Sommerquartal zeichnete sich durch ein signifikant erhöhtes Aufkommen von C-Wetterlagen aus (Tabelle 2-2; Abbildung 2-2), die als transiente Systeme typischerweise aus SW-Lagen hervorgehen und in NW-Lagen übergehen (Abbildung 2-7), so dass deren gehäuftes Auftreten insbesondere in den Hochsommermonaten kaum erstaunt (Tabelle 2-10, Tabelle 2-11). Lediglich in der 3. Julidekade und ab der 2. Septemberdekade konnten sich stabile A-Lagen oder antizyklonal geprägte SE-Lagen etablieren. Die Luftdruckverteilungen im Juli und August zeigen entsprechend der Zugbahn der Zyklonen eine SW-liche Anströmung über der Nordsee, die im September durch eine S-liche auf der Rückseite des quasistationären Hochdruckgebiets über Skandinavien abgelöst wurde (Abbildung 2-11). Bei insgesamt unbeständiger Witterung lag die Lufttemperatur auf Norderney im 3. Quartal mit $16.7 \text{ }^\circ\text{C}$ nur knapp über dem klimatologischen Niveau (Abbildung 2-22). Die Meeresoberflächentemperatur der DB fiel hingegen mit $17.4 \text{ }^\circ\text{C}$ um 0.9 K (1.1 StdAbw) merklich zu warm aus (Abbildung 2-23; Abbildung 3-10).

(OND) Die Luftdruckverteilung über der Nordsee entsprach im Herbst klimatologischen Verhältnissen (Abbildung 2-9), wobei sich die verstärkte W-Zirkulation im Oktober und die abgeschwächte SW-Zirkulation im Dezember kompensierten (Abbildung 2-11; Abbildung 2-17). Die Anzahl der Stürme (18), deren Eintrittszeiten Tabelle 2-2 zu entnehmen sind, lag im oberen Interquartilbereich (Abbildung 2-19). Die Lufttemperatur auf Norderney entsprach mit $6.9 \text{ }^\circ\text{C}$ praktisch dem OND-Klimamittel und unterlag auf monatlichen Skalen moderaten zirkulationskonformen Auslenkungen (Abbildung 2-22). Die Warmanomalie der Meeresoberflächentemperatur der DB schwächte sich im Herbstverlauf auf 0.5 K ab (Abbildung 2-23).

2.2.3 2009

(JFM) Die Luftdruckverteilung im Winter deckte sich hinsichtlich Muster und Ausprägung praktisch mit dem klimatologischen Feld (Abbildung 2-9). Die SW-liche Witterungslage entstand durch Überlagerung einer kräftigen und stabilen SW-lichen Anströmung im Januar, einer wechselhaften, insgesamt von NW-Lagen dominierten Zirkulation im Februar sowie einer lebhaften W-lichen Strömung im März (Abbildung 2-12; Abbildung 2-17). Die Anzahl der Sturmtage halbierte sich gegenüber dem Vorjahreswinter auf 14 und lag damit auf dem Normalniveau für diese Jahreszeit (Abbildung 2-19). Auch die Temperaturen zeigten keine auffälligen Abweichungen von der Klimatologie (Abbildung 2-22, Abbildung 2-23).

(AMJ) Kennzeichnend für das Frühjahr 2009 waren – wie 2008 – gleichverteilte Richtungswetterlagen (Abbildung 2-18) und ein resultierender Nordseewind, der mit 0.8 m/s fast verschwand (Abbildung 2-15; Tabelle 2-21). Die mit 35 % häufigste Wetterlage – nämlich A – prägte sich in der saisonalen Luftdruckverteilung aus (Abbildung 2-9). Bemerkenswert dominant waren A- und SE-Lagen in der Phase vom 29. März bis zum 2. Mai (Tabelle 2-12), die durch einen quasistationären Omegablock charakterisiert war (Abbildung 2-12). Die Apriltemperatur auf Norderney lag dabei mit $10.4 \text{ }^\circ\text{C}$ um 3.1 K (3.1 StdAbw) über dem Klimamittel (Abbildung 2-22) und damit auf Rang 3 hinter entsprechenden Mitteltemperaturen für 2007 ($11.0 \text{ }^\circ\text{C}$)

und 2011 (10.6 °C). Der starke Temperaturanstieg um 4.9 K gegenüber März ist konsistent mit einem Überschuss im Globalstrahlungsfluss von 29 Wm⁻² (1.5 StdAbw, *Abbildung 2-21*). Zwar wurden in den Folgemonaten ähnlich erhöhte Strahlungsflüsse gemessen, die Lufttemperatur fiel jedoch bis Juni aufgrund kompensierender Kaltlufttransporte aus N (*Abbildung 2-12*, *Abbildung 2-17*) fast auf den Normalwert von 14.3 °C zurück.

(JAS) Im Sommerquartal unterlag die Nordsee einer recht stabilen Anströmung, die in Richtung (WSW) und Stärke (4.6 m/s) mit derjenigen des vorausgegangenen Winters übereinstimmte (*Tabelle 2-21*). Zuströme subtropischer Warmluft und frischer Meeresluft aus dem NE-Atlantik befanden sich im Juli in ständigem Wechsel, wie aus der zyklonal geprägten Abfolge der täglichen Wetterlagen (*Tabelle 2-4*) oder der zonal gestreckten Tiefdruckrinne des Luftdruckmusters ersichtlich ist (*Abbildung 2-12*). Der August war im Rahmen eines positiv verstärkten Ostatlantikmusters durch eine kräftige SW-Zirkulation charakterisiert (*Abbildung 2-12*). Erst nach Durchzug des Ex-Tropensturms Danny am 3. und 4. September (*Tabelle 2-4*) konnten sich mit der NE-Ausdehnung des Azorenhochs (*Abbildung 2-12*) längere Episoden sommerlichen Hochdruckwetters einstellen. Während die Globalstrahlung auf Norderney die klimatologischen Werte in den Sommermonaten nur geringfügig übertraf (*Abbildung 2-21*), vollzog sich der monatliche Temperaturgang auf einem stabilen, etwa 1.3 K erhöhten Niveau (*Abbildung 2-2*). Auch die Meeresoberflächentemperatur der DB war mit beständigen 1.4 K erheblich zu warm (*Abbildung 2-23*). Die saisonale Mitteltemperatur (JAS) gehörte in beiden Fällen zu den höchsten im Zeitraum 1971–2013 (Rang 7).

(OND) Kennzeichnend für das 4. Quartal war eine gut ausgeprägte Meridionalzirkulation, die sich u. a. in der SSW-Orientierung des resultierenden Nordseewindes zeigt (*Abbildung 2-15*). Dabei kamen im Oktober, in dem Hochdruckeinfluss weiter vorherrschte (*Tabelle 2-13*; *Abbildung 2-12*), gerade SW-Lagen eher selten vor (*Abbildung 2-17*). Deren Häufigkeit stieg jedoch gemeinsam mit derjenigen von C-Lagen im November auf Jahreshöchstwerte von 15 respektive 9 an (*Abbildung 2-3*). Auch die sehr hohe Richtungsstabilität (79 %) des SW-lichen Nordseewindes (*Tabelle 2-22*), das mit 11 Sturmtagen zweithöchste Sturmaufkommen seit 1948 (*Tabelle 2-24*) sowie der damit einhergehende massive Einstrom milder Meeresluft in den Nordseeraum ergaben sich als Konsequenzen eines tiefen quasistationären Trogs über dem NE-Atlantik (*Abbildung 2-12*). Die ebenda wiedergegebene Luftdruckverteilung für Dezember illustriert die mit –2.95 bis dahin negativste Phase der Nordatlantischen Oszillation in irgendeinem Dezember seit 1899 (vgl. HURREL *et al.* 2013) und gleichzeitig eine schwache, relativ stabile S-liche Anströmung über der Nordsee (s. a. *Abbildung 2-17*). Für die Temperaturentwicklung auf Norderney ergaben sich zirkulationskonforme Änderungen, nämlich: eine Normalisierung im Oktober, eine auf $\frac{1}{3}$ der normalen Rate reduzierte Abkühlung und so die nach 2006 zweithöchste Novembertemperatur (8.8 °C) seit 1971 und schließlich eine 2,5-fach verstärkte Abkühlung auf 2.2 °C im Dezember (*Abbildung 2-22*). Das im letzten Punkt abweichende Verharren der Meeresoberflächentemperatur der DB auf anomal hohem Niveau im Dezember (*Abbildung 2-23*) resultierte aus dem andauernden Transport von Meerwasser aus der südlichen Nordsee durch den W-Rand der DB (*Abbildung 3-4* und *Abbildung 3-10*).

2.2.4 2010

Das Jahr 2010 zeichnete sich global durch eine Fülle signifikanter Klima-anomalien aus¹, die u. a. mit einer sehr langlebigen La Nina Episode und beständig negativen Zuständen der Nordatlantischen bzw. Arktischen Oszillation in Zusammenhang standen. Die Nordsee unterlag dabei einer extrem abgeschwächten und unbeständigen Zonalzirkulation. Belege hierfür finden sich in der sehr geringen Richtungsstabilität (14%) des Nordseewindes (*Tabelle 2-21*;

¹ www.ncdc.noaa.gov/sotc/service/global/significant-extremes/201013.gif

Abbildung 2-18), dessen Resultierende übers Jahr (und in den kalten Jahreszeiten) kaum 1 m/s übertraf (*Abbildung 2-16*), der mit Abstand (1963: 14 Sturmtage) geringsten Sturmfrequenz (8) seit 1948 (*Tabelle 2-24*), dem stark erhöhtem Vorkommen von E-Wetterlagen (NE & SE) zu Lasten von SW-Lagen (*Abbildung 2-8; Abbildung 2-6*) oder dem für Norderney (8.5 °C), die DB (9.8 °C) und die Nordsee (9.9 °C) kältesten Jahr seit 1996 (7.8, 8.6 resp. 9.3 °C).

(JFM) Die Nordatlantische Oszillation war bereits im Dezember 2009 in eine extrem negative Phase eingetreten und ging erst im März in einen moderaten, aber weiterhin negativen Zustand über. Dabei setzte Hurrells NAO-Index sowohl im DJF-Quartal (−2.93), als auch im DJFM-Tertial (−2.54) neue Rekordtiefstände für den Zeitraum 1899–2013 (*HURRELL et al. 2013*). Den Luftdruckanomaliefeldern für Januar und Februar entsprechen kräftige anomale E-Windkomponenten (*Abbildung 2-13*), so dass (durch additive Überlagerung mit klimatologischem SW-Wind) in beiden Monaten eine schwache SE-liche Anströmung vorherrschte (*Tabelle 2-22*), die schließlich im März auf eine ebenso schwache W-Anströmung umstellte. Auch die beispiellos niedrige Sturmfrequenz (2) im JFM-Quartal (*Abbildung 2-20, Abbildung 2-1*) ist Konsequenz des weit nach Süden verlagerten Tiefdruckbandes, das sich von der amerikanischen Ostküste bis in den östlichen Mittelmeerraum erstreckte und erst in der 2. Februarhälfte auch den Nordseeraum erfasste (*Abbildung 2-13; Tabelle 2-14, Tabelle 2-15*). Die Lufttemperatur auf Norderney fiel im Januar auf −1.6 °C ab und stieg über −0.4 °C im Februar auf den fast normalen Wert von 4.9 °C im März an (*Abbildung 2-22*). Die J-, F- und JFM-Temperatur (1.0 °C) waren jeweils die fünftkältesten im Zeitraum 1971–2013. Dabei fiel das Quartalsmittel gegenüber dem letzten kälteren und insgesamt kältesten Winter 1996 (JFM: −0.9 °C) um fast 2 K wärmer aus. Dies trifft gleichermaßen für die Meeresoberflächentemperatur der DB zu (JFM: 2.8 °C vs. 0.9 °C) und scheint *CATTIAUX et al. (2010)* zu stützen, die den Winter 2010 in Europa als „cold event mitigated by long-term climate warming“ sehen.

(AMJ) Mit 10.8 °C und nur geringfügiger Abweichung (−0.2 K) vom Klimamittel war die Lufttemperatur auf Norderney auch im Frühjahr 2010 die bis dahin kälteste seit 1996 (10.1 °C). Trotz eines Strahlungsüberschusses von 25 Wm^{−2} (1.7 StdAbw; *Abbildung 2-21*) erreichte der saisonale Temperaturanstieg um 9.5 K von März auf Juni nur Durchschnittshöhe (*Abbildung 2-2*). Dabei war der Anstieg von April auf Mai mit 1.2 K (−2.0 StdAbw) der geringste nach 1987 (0.6 K), derjenige von Mai auf Juni mit 4.8 K (1.9 StdAbw) der höchste im Zeitraum 1971–2013. Dieser Sachverhalt ergibt sich einerseits aus der hohen Frequenz von NE- (9) und NW-Lagen (10) im Mai (*Tabelle 2-15*) und folglich einem richtungsstabilen Kaltlufttransport über die Nordsee aus N (*Tabelle 2-22*); andererseits aus hohen Strahlungsüberschüssen, die durch das gehäufte Auftreten antizyklonaler Wetterlagen im April (12) und Juni (15) zustande kamen (*Abbildung 2-4, Abbildung 2-5*). Das Luftdruckanomaliefeld war im Frühjahr durch ein AN-Muster charakterisiert (*Abbildung 2-10*) und deckte sich wie gewöhnlich – für diese Jahreszeit und die zugehörigen Monate (*Abbildung 2-13*) – mit dem Luftdruckfeld (ANW). Auch die Meeresoberflächentemperatur der DB war nach 1996 (7.6 °C) stets wärmer als im Frühjahr 2010 (9.9 °C, −0.3 K) und verhielt sich intrasaisonal ähnlich wie die Lufttemperatur auf Norderney (*Abbildung 2-23*).

(JAS) Die Rahmenbedingungen für die atmosphärische Zirkulation über Europa waren im Hochsommer durch einen extrem langlebigen Omegablock mit Zentrum über Westrussland vorgegeben (*BARRIOPEDRO et al. 2011*). Dessen direkter Einfluss beschränkte sich wie der des zur Brückenbildung neigenden Azorenhochkeils auf die südöstliche Peripherie der Nordsee, die im Juli im Bereich des Vorzeichenwechsels des Luftdruckanomaliefeldes lag (*Abbildung 2-13*). Für die eigentliche Nordsee ergab sich dabei eine normale Anzahl von A-Lagen (8), während die Häufigkeit von SW-Lagen (11) das 90 % Quantil überschritt (*Abbildung 2-5*) und die Anströmung dominierte. Mit der SE-Verlagerung des Blocks kam der Nordseeraum ab der 3. Julidekade unter dem nachrückenden Höhentrog zu liegen, der sich im Meeresniveau als CW-Muster zeigt (*Abbildung 2-13*). Die starke Tiefdruckaktivität im August spiegelt sich

nicht nur in der extremen Häufung von C-Lagen (11, *Abbildung 2-5*), sondern auch in der Endlosschleife von (Selbst-)Übergängen zwischen C-, NW- und SW-Zuständen (*Tabelle 2-14*; *Abbildung 2-8*) und dem fast vollständigen Fehlen von A-Wetterlagen (1). Die unbeständige Witterung dauerte im September bei instabiler WSW-Anströmung an (*Tabelle 2-22*). Die Lufttemperatur auf Norderney stieg im Juli bei unverändert hohem Strahlungsüberschuss (*Abbildung 2-21*) um 5.0 K (1.7 StdAbw) auf 19.4 °C. Vom dritthöchsten Niveau im Zeitraum 1971–2013 fiel sie im August mit der drittstärksten Abkühlungsrate auf das Klimanormal von 17.2 °C zurück (*Abbildung 2-22*), so dass die Lufttemperatur im JAS-Mittel (16.2 °C, 0.7 K) nur Rang 12 erreichte. Dennoch ergab sich für die Amplitude des Temperaturgangs von Januar über Juli auf Dezember 2010 eine Rekordhöhe von ± 21 K. Die Meeresoberflächentemperatur der DB unterlag im Juli einem ähnlich extremen Anstieg auf 18.4 °C; der anschließende gedämpfte Rückgang auf annähernd normales Niveau war jedoch erst im September abgeschlossen (*Abbildung 2-23*).

(OND) Die atmosphärische Zirkulation im 4. Quartal glich in vielerlei Hinsicht derjenigen des vorausgegangenen Winters (*Abbildung 2-10*). Ausschlaggebend hierfür war die im Herbstverlauf zunehmend negative Auslenkung der Nordatlantischen Oszillation, deren Index im Dezember auf -3.56 abfiel und den Rekord von Dez. 2009 (-2.95) unterbot (*HURREL et al. 2013*). Die damit einhergehende S-Verlagerung der Polarfront ist aus *Abbildung 2-13* ersichtlich, zeigt sich aber insbesondere auch in extremen Häufungen von SE- und NE-Lagen auf Kosten von SW-Lagen (*Tabelle 2-18*; *Abbildung 2-4*). Die übliche (wahrscheinlichste) Übergangsabfolge für ein (mit geeigneter Geschwindigkeit bzw. Beobachtungsfrequenz) in E-Richtung über die zentrale Nordsee ziehendes Tief, nämlich SW–C/W–NW (*Abbildung 2-6*), änderte sich aufgrund der S-licheren Zugbahn zu SE–C/E–NE, wie sich anhand von Luftdruckverteilung und Übergängen im November nachvollziehen lässt (*Tabelle 2-6*, *Tabelle 2-14*). Auf Norderney waren die Herbsttemperaturen von 2010 und 1993 mit 5.1 °C die niedrigsten des Zeitraums 1971–2013. Die Lufttemperatur im Dezember (-1.2 °C) war nur 1995 (-1.4 °C) geringer. Der Abfall der Meeresoberflächentemperatur der DB von November auf Dezember (*Abbildung 2-23*) erreichte mit -5.0 K fast den Rekordwert von 1978 (-5.1 K). Das Dezembermittel von 4.5 °C fiel nur 1981 (3.9 °C) geringer aus.

2.2.5 2011

(JFM) Vom Rekordminimum im Dezember 2010 (-3.56) stieg der NAO-Index im Januar auf ein moderateres Niveau (-1.36), wechselte im Februar erstmals nach 16 Monaten in eine entschieden positive Phase (1.22) und verblieb in diesem Zustand (1.04) auch im März (*HURREL et al. 2013*). Mit dieser Entwicklung ging eine Abfolge spontan wechselnder Anströmungsepisoden einher, aus denen insgesamt ein gewöhnlicher WSW-Wind resultierte (*Tabelle 2-21*). Besonders hervorhebenswert erscheinen die beiden vom 18. bis 30. Januar und 12. bis 24. Februar andauernden Phasen (*Tabelle 2-8*), in denen arktische bzw. kontinentale Kaltlufteinbrüche aus NNW bzw. SSE die Zufuhr milder Atlantikluft unterbanden (*Abbildung 2-18*). Die Anzahl der Sturmtage (9) lag im JFM-Quartal auf dem Niveau des 10% Quantils, für die Herbst-Winter Saison (O2M: 15) und das Sturmjahr 2010/11 (J2J: 18) auf dem niedrigsten Stand seit 1970/71 (*Tabelle 2-24*; *Abbildung 2-20*). Die Lufttemperatur auf Norderney entsprach im Winterquartal (3.0 °C) und den zugehörigen Monaten den Klimanormalwerten (*Abbildung 2-22*). Der beispiellos hohe Anstieg um 3.3 K von Dez. auf Jan. lief dem regulären Temperaturgang zuwider, der in dieser Zeit zu einem gegenüber Dezember um 1.5 K kälteren jahreszeitlichen Minimum führt. Mit 3.2 °C blieb die Meeresoberflächentemperatur der DB um 0.5 StdAbw unter dem saisonalen klimatologischen Mittel (*Abbildung 2-23*). Ihre intrasaisonale Entwicklung war konsistent mit der des Meerwassertransports durch den W-Rand der DB (*Abbildung 3-10*).

(AMJ) Die Luftdruckverteilung im April stellte eine Überlagerung zweier Muster dar, die jeweils den positiven Zustand der Nordatlantischen Oszillation im Winter bzw. Sommer charakterisieren (*Abbildung 2-14*). Mit 2.32 ergab sich für den NAO-Index der zweithöchste Aprilwert im Zeitraum 1899–2013 (*HURREL et al. 2013*). Entgegen der landläufigen Vorstellung einer intensiven Zonalströmung über der Nordsee – wie beispielsweise im Dezember 2011 für einen NAOI von 2.65 (*Abbildung 2-14*) – verlief das Sturmband NW-lich der Linie Aberdeen–Bergen infolge der Blockierung durch den weit in den europäischen Kontinent sich erstreckenden Azorenhochkeil. Mit dem Abkalben des Azorenhochs über Skandinavien gegen Ende der 2. Aprildekade drehte die schwache W-liche Anströmung für die Dauer von 3 Wochen auf SSE (*Tabelle 2-8*). Anschließend stellte sich eine lebhafte SW- bis W-liche Anströmung ein, deren Intensität im Juni deutlich nachließ (*Abbildung 2-18*). Die saisonale Luftdruckverteilung entsprach hinsichtlich des Musters (AW) der Klimatologie, wies aber stärkere Druckgegensätze auf (*Abbildung 2-10*). Die starke Übereinstimmung der Druckkonstellation im April mit den Verteilungen im Juli 2006 und 2013, die mit Hitzewellen einhergingen, macht die frühlommerlichen Temperaturverhältnisse begreiflich. Die Lufttemperatur auf Norderney stieg von März auf April um 6.2 K auf den nach 2007 (11.0 °C) höchsten Stand (10.6 °C) und lag damit um 3.3 K (bzw. StdAbw) über dem Klimanormal. Maßgeblichen Anteil an diesem Temperatursprung hatte ein Strahlungsüberschuss von 38 Wm⁻² (1.9 StdAbw, *Abbildung 2-21*). Obwohl der weitere Anstieg flacher als der klimatologische verlief (*Abbildung 2-22*), war auch die saisonale Mitteltemperatur (AMJ) die zweithöchste (13.1 °C) nach 2007 (13.5 °C). Die Meeresoberflächentemperatur der DB vollzog von März auf April einen Rekordsprung von 4.1 K (2.2 StdAbw) auf 7.6 °C (*Abbildung 2-23*). Dieses Temperaturniveau lag jedoch wie das des AMJ-Mittels (11.4 °C) lediglich 1.2 StdAbw über dem Normal der Referenzperiode 1971–2000.

(JAS) Die Verbundhäufigkeit von A-Wetterlagen in den Hochsommermonaten Juli und August fiel auf den Rekordtiefststand von 6 Tagen, während C-Wetterlagen an 19 Tagen herrschten und damit das erstmals 2002 erzielte Maximum des Zeitraums 1971–2013 erreichten (*Tabelle 2-17*). Den Luftdruckanomalieverteilungen beider Monate ist nicht nur deren wechselhaft zyklonaler Witterungscharakter zu entnehmen (*Abbildung 2-14*). Sie zeigen darüber hinaus die Dipolstruktur des negativen Phasenzustands der Nordatlantischen Oszillation im Sommer, die aus anomalen Luftdruckgegensätzen über Nordseeraum (–) und Nordmeer (+) resultiert (*FOLLAND et al. 2009*). Der NAO-Index lag im JJA-Quartal mit –2.06 auf dem viertiefsten Niveau des Zeitraums 1899–2013 (*HURREL et al. 2013*). Die starke Tiefdruckanomalie, die sich im September polwärts der Linie Kap Race – Lands End – Petersburg erstreckte, verursachte im Nordseeraum eine sehr kräftige, richtungsstabile WSW-Anströmung (*Tabelle 2-22; Abbildung 2-18*), in der Dieter (6.) und der Ex-Tropensturm Katia (12./13.) eingebettet waren (*Tabelle 2-8*). Für die Globalstrahlung auf Norderney (*Abbildung 2-22*) ergab sich im Juli bei 175 Wm⁻² das zweithöchste Defizit (–41 Wm⁻²), im September das vierthöchste Surplus (20 Wm⁻²). Die saisonale Lufttemperatur (JAS) entsprach hier dem Klimamittel (16.2 °C), während die Meeresoberflächentemperatur der DB (16.7 °C) dieses um nur 0.2 K übertraf (*Abbildung 2-23*).

(OND) Zu den Extremen im Herbstquartal zählten das saisonale Rekordminimum (3) von C-Wetterlagen (*Abbildung 2-4*), der trockenste November auf Helgoland (und in Deutschland) seit Beginn der Messungen (1893), das im Kontrast zum Negativrekord (–3.56) im Vorjahresdezember stehende Rekordmaximum (2.65) des NAO-Zustands (*HURREL et al. 2013*) sowie die damit verbundene beispiellose Häufung (6) schwerer Dezemberstürme (*Tabelle 2-23*). Die infolge hohen Drucks über Kontinentaleuropa antizyklonale Prägung der ersten Oktoberwochen (*Tabelle 2-8*) wuchs sich zu einer langlebigen (22.10.–23.11.) und massiven Blockierung aus, die sich im vereinfachten Kalender (*Tabelle 2-16*) als von SE- (14) und A-Lagen (11) dominierte Sequenz und in der Trajektorie des Nordseewindes (*Abbildung 2-18*) als von markanten Windsprüngen begrenzte, richtungsstabile (82%) S-Anströmung abbildete. Ebenso stabil (79%) und kräftig (≈ 10 m/s) war die vorausgehende W-Phase, die sich – wie die

nachfolgende – fast ausschließlich aus wechselnden SW- und NW-Lagen zusammengesetzte (Tabelle 2-16). Letztere setzte unvermittelt mit der Ballung aller Novemberstürme (6) ein (Tabelle 2-8) und bewahrte diesen Sturmcharakter (89 %, ≈ 15 m/s) bis über das Jahresende hinaus. Offensichtlich können die monatlichen Luftdruckverteilungen die räumlichen Muster der 3 Anströmungsphasen nur verschmiert wiedergeben (Abbildung 2-14). Die Meeresoberflächentemperatur der DB lag mit 10.7 °C um 1.8 StdAbw über dem OND-Mittel und war damit die fünfthöchste im Zeitraum 1971–2013. Die saisonale Abkühlung vollzog sich auf einem gegenüber der Klimatologie gleichmäßig um 1.2 K erhöhten Niveau (Abbildung 2-23). Die saisonale Lufttemperatur auf Norderney (7.8 °C, 0.9 K) war im gleichen Zeitraum die 8-höchste, wobei die monatlichen Abweichungen von der Klimatologie starken Schwankungen (0.8 , -0.2 , 2.2 K) unterlagen. Der für Norderney drittwärmste Dezember (5.9 °C) war Konsequenz auf Novemberebene stagnierender Temperaturen. Während der Temperaturrückgang von Juli auf Dezember im Vorjahr die Rekordhöhe von -21 K erreichte, ergab sich hierfür im Jahr 2011 mit -10 K die zweitkleinste Amplitude (Abbildung 2-22).

2.2.6 Zusammenschau

Die vom Weltklimarat bereits 1990 im 1. Sachstandsbericht angekündigte Zunahme extremer Anomalien in der sich erwärmenden Welt (WMO 2011) zeichnet sich seit der Jahrtausendwende weltweit immer deutlicher ab (IPCC 2012, WMO 2013). Nicht nur die Häufigkeit solcher Anomalien, auch deren Stärke, Ausdehnung und Andauer nehmen bislang ungekannte Ausmaße an. Sie ereignen sich zwar vor dem Hintergrund intrinsischer Schwankungen (etwa im Rahmen dekadischer und multidekadischer Oszillationen) und externer Antriebsänderungen (z. B. Sonnenaktivität: FEULNER und RAHMSTORF 2010, INESON et al. 2011), sind aber ohne den anthropogenen Treibhauseffekt in dieser Qualität kaum mehr zu erklären.

Der beschleunigte Rückgang der arktischen Meereisbedeckung in der vergangenen Dekade hat die Debatte zur „Arctic Amplification“ (AA: verstärkte Erwärmung gegenüber gemäßigten Breiten) als möglicher Ursache extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in mittleren Breiten befeuert (FRANCIS und VAVRUS 2012, BARNES 2013, SCREEN und SIMMONDS 2013, KINTISCH 2014). Aufgrund der Rossby-Haurwitz Theorie bedingt nämlich ein reduziertes meridionales Temperaturgefälle einen schwächeren zonalen Grundstrom, ein verstärktes Mäandrieren und eine verlangsamte Ostwanderung der planetaren Wellen, was zusammengenommen langlebige Stagnationsperioden mit festsitzenden Wellenzügen und folglich persistente Hitze- und Kältewellen, Dürre- und Überschwemmungsepisoden begünstigen würde.

Stationäre atmosphärische Zirkulationszustände wurden in der Nordseeregion im Zeitraum 2008–2011 immer wieder und in allen Jahreszeiten beobachtet. So kam es im Frühjahr jedes dieser Jahre zu dauerhaften Blockierungsphasen mit rekordbrechenden oder rekordnahen Globalstrahlungsüberschüssen und Temperaturen. Kennzeichnend für die Sommer waren hingegen über Wochen andauernde Troglagen, die sich in extremen Häufungen zyklonaler Wetterlagen, einer unbeständigen Witterung und Einbrüchen im jahreszeitlichen Gang von Luft- und Meerestemperaturen zeigten.

Winter 2008 und Herbst 2011 ausgenommen, herrschte eine deutlich abgeschwächte Zonalzirkulation in diesen Jahreszeiten. In den Herbst/Winter-Halbjahren des Berichtszeitraums war der für die Region repräsentative Nordseewind – sowohl vektoruell, als auch skalar – erheblich schwächer als in den Randquartalen. Im Einklang damit war das Sturmaufkommen von Oktober bis März in den Saisons 2009/10 sowie 2010/11 äußerst gering. Gleichzeitig erreichte und brach der Index der Nordatlantischen Oszillation in diesen Zeiten negative Rekordstände.

Interessanterweise fiel der Winter 2010 in die Endphase des ungewöhnlich dauerhaften und extremen solaren Aktivitätsminimums des Zyklus 23/24 (BARRIOPEDRO *et al.* 2008, RUSSEL 2010). Der letzte, sehr kalte Winter trat 1996 ebenfalls in einer Phase minimaler Aktivität ein (LOEWE und KOSLOWSKI 1998). Meerwasser- und Lufttemperaturen waren zwar seit 1996 niemals kälter, fielen jedoch 2010 lediglich auf das klimatologische Niveau zurück. Zwar lag in beiden Wintern (hier u. i. F.: DJF) eine mittlere Anströmung aus SE vor (SCHMELZER *et al.* 2015). Eine Auswertung der täglichen Wetterlagen ergab jedoch, dass Kälte begünstigende antizyklonale Rotationslagen (29) und östliche Richtungslagen (44) jeweils und zusammengenommen im Winter 1996 4-mal so häufig auftraten wie die komplementären C- (7) und W-Wetterlagen (11). Demgegenüber herrschten im Winter 2010 weit ungünstigere (A:C=13:23 \approx 4/7, E:W=34:20 \approx 7/4), insgesamt ausgewogene Verhältnisse (47:43 \approx 1). Die relativ niedrigen Wintertemperaturen waren nicht auf die Nordseeregion beschränkt, sondern erstreckten sich insbesondere über weite Teile der nordhemisphärischen Landmasse in mittleren Breiten. Dennoch erwies sich 2010 für die nördliche Hemisphäre als das bis dahin wärmste Jahr (LOEWE 2013).

2.3 Materialsammlung

2.3.1 Aufbau und Umfang

Aufbau und Umfang der Materialsammlung orientieren sich an *LOEWE (2013)* und sind der nachstehenden tabellarischen Übersicht zu entnehmen. Diese ist gleichzeitig als Wegweiser zu den verschiedenen Produkten für einzelne Jahre des Berichtszeitraums von Nutzen. Alle Graphik- und Tabellenverweise sind in der PDF-Datei als klickbare Sprungmarken angelegt.

Variable	Product	T scale	2008	2009	2010	2011
Weather Types (27 regional cats)	example	dd			Fig. 2-1, p. 42	
	calend & gales		Tab. 2-2, p. 43	Tab. 2-4, p. 44	Tab. 2-6, p. 45	Tab. 2-8, p. 46
	freq of occ	yy	Tab. 2-3, p. 43	Tab. 2-5, p. 44	Tab. 2-7, p. 45	Tab. 2-9, p. 46
Reduced W. T. (6 regional categories)	calendar	dd	Tab. 2-10, p. 47	Tab. 2-12, p. 48	Table 2-14, p. 49	Tab. 2-16, p. 50
	freq of occ	mm	Tab. 2-11, p. 47	Tab. 2-13, p. 48	Tab. 2-15, p. 49	Tab. 2-17, p. 50
			Fig. 2-3, p. 53		Fig. 2-5, p. 55	
	transition freq	qqyy	Tab. 2-18, p. 51			
			Fig. 2-2, p. 52		Fig. 2-4, p. 54	
		clim	Tab. 2-19, p. 56			
	Fig. 2-6, p. 57					
yy	Tab. 2-20, p. 58					
	Fig. 2-7, p. 59		Fig. 2-8, p. 60			
Sea Level Press & SLP Anomalies	geogr distrib	qq	Fig. 2-9, p. 61		Fig. 2-10, p. 62	
		mm	Fig. 2-11, p. 63	Fig. 2-12, p. 64	Fig. 2-13, p. 65	Fig. 2-14, p. 66
North Sea Wind (regional)	uv distrib	qq	Fig. 2-15, p. 67		Fig. 2-16, p. 68	
	statistics	qqyy	Tab. 2-21, p. 69			
		mm	Tab. 2-22, p. 70			
	d2d trajectory	dd	Tab. 2-17, p. 50		Tab. 2-18, p. 51	
Gales (3 categorical types)	freq sev gales	mmqyy	Tab. 2-23, p. 73			
	freq all types		Tab. 2-24, p. 74			
			Fig. 2-19, p. 75		Fig. 2-20, p. 75	
Global Radiation	time series @Norderney	mm	Fig. 2-21, p. 76			
Surf Air Temp			Fig. 2-22, p. 77			
Sea Surf Temp	ts Germ Bight		Fig. 2-23, p. 78			

Tabelle 2-1: Produktübersicht. Die meisten Graphiken enthalten zur Einschätzung rezenter Zustände und Entwicklungen klimatologische Informationen des Referenzzeitraums 1971–2000 zur Veränderlichkeit der Variablen auf der jeweiligen Zeitskala (dd, mm, ...). Die Graphik- und Tabellenverweise sind in der PDF-Version des Dokuments als Sprungziele angelegt.

Table 2-1: Product survey. As to support assessments of recent states and evolutions, most figures include climatological information (from the base period 1971–2000) on the variables' changeability on individual time scales (dd, mm, ...). References to figures and tables are clickable targets in the pdf-version of this document.

Nahezu das gesamte hier präsentierte Material dient der Charakterisierung der bodennahen atmosphärischen Zirkulation im Nordseeraum auf täglichen (dd), monatlichen (mm), saisonalen (qq) und jährlichen (yy) Zeitskalen. Die Auswirkungen der Zirkulation auf andere atmosphärische Zustandsgrößen werden exemplarisch anhand der Entwicklungen von Lufttemperatur und Globalstrahlung auf Norderney aufgezeigt. Die Früchte der Analysen werden insbesondere bei der Interpretation der ozeanographischen Zustände, Ereignisse und Entwicklungen geerntet (vgl. *Kapitel 3*).

2.3.2 Datenquellen

Allen Analysen der atmosphärischen Zirkulation liegen die Luftdruckfelder im Meeresniveau der „NCEP/NCAR Reanalysis I (1948-present)“ (*KALNAY et al. 1996*) zugrunde. Diese wurden als 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.

Die Rohdaten für die Auswertungen von Lufttemperatur und Globalstrahlung auf Norderney wurden vom Deutschen Wetterdienst zu Verfügung gestellt.

2.3.3 Methoden

Eine zentrale Rolle bei der Auswertung der Luftdruckfelder nimmt das Wetterlagenklassifizierungsverfahren von *JENKINSON* und *COLLISON (1977)* ein. Eine gegenüber dem handschriftlichen Original leichter zugängliche und ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens findet man bei *LOEWE et al. (2005)*.

Für tägliche geographische Luftdruckverteilungen werden auf Basis eines Kollektivs von Gitterpunkten (*Abbildung 2-1*) mittels räumlicher Differenzierungen der Druckwerte numerische Indizes für den geostrophischen Wind (V^*) und die Wirbelstärke (Vorticity, ζ^*) in der Nordseeregion abgeleitet. Anhand einfacher Relationen zwischen diesen beiden Indizes werden dem Druckfeld kategoriale Eigenschaften aus den Mengen von 27 verschiedenen Wetterlagen und 3 Sturmklassen zugeschrieben (z. B. *Tabelle 2-2*). Erstere setzt sich zusammen aus 10 reinen Wetterlagen, nämlich den Rotationstypen A (antizyklonal) und C (zyklonal) sowie den Richtungstypen eines 8-Punkte-Kompasses (N, NE, E, ...), 2×8 hybriden Typen (AN, ANE, ..., CN, ...) und dem nicht klassifizierbaren Typ UNC; letztere beinhaltet die Klassen Sturm (G), schwerer Sturm (SG) und sehr schwerer Sturm (VSG). Die Sturmidentifizierung beruht auf einem POT-Verfahren (Peaks over Threshold), bei dem die Schwellwerte anhand der oberen Quantile (0.1, 0.02 und 1/365) der Verteilung des täglichen Sturmindex ($G^*(V^*, \zeta^*)$) im Zeitraum 1971–2000 für den NCEP/NCAR Datensatz neu festgelegt wurden (*LOEWE 2013*).

Das Wetterlagenklassifizierungsverfahren wurde nicht nur auf tägliche Luftdruckfelder, sondern – abgesehen von der Unterdrückung des UNC-Typs – in gleicher Weise zur Charakterisierung monatlicher und saisonaler Luftdruck- und Luftdruckanomaliefelder herangezogen (Witterungslagen). Die Zuordnung von Sturmklassen macht auf diesen Zeitskalen ohne Einführung neuer Begrifflichkeiten (und Schwellwerte) keinen Sinn und unterblieb deshalb.

Für statistische Zwecke wurde eine Reklassifizierung vorgenommen (*LOEWE et al. 2006*), welche die Anzahl der möglichen täglichen Wetterlagen auf die überschaubare Menge von 6 Typen, nämlich A, C, NE, SE, SW und NW, reduziert (*Tabelle 2-1, reduced W. T.*).

Der für die Region repräsentative Nordseewind (vgl. *Tabelle 2-1*) ist ein Beiprodukt der Wetterlagenklassifizierung und geht aus dem in physikalische Einheiten (m/s) umgerechneten Windindex V^* hervor. Eine vollständige Beschreibung des Verfahrens zur Bestimmung der statistischen Windellipsen (*Abbildung 2-15*) findet man bei *LOEWE et al. (2005)*.

2.3.4 Interpretation

Die in den jeweiligen Abbildungs- und Tabellenlegenden bereitgestellten Informationen sollten gemeinsam mit moderaten Fachkenntnissen zur Interpretation des hier versammelten Materials i. d. R. hinreichen. Andernfalls können ausführliche analytische Interpretationsmuster früherer Berichtsausgaben zu Rate gezogen werden. Am ehesten will dies bei den Produkten zum Themenkreis Wetterlagenübergänge erforderlich erscheinen (LOEWE 2013).

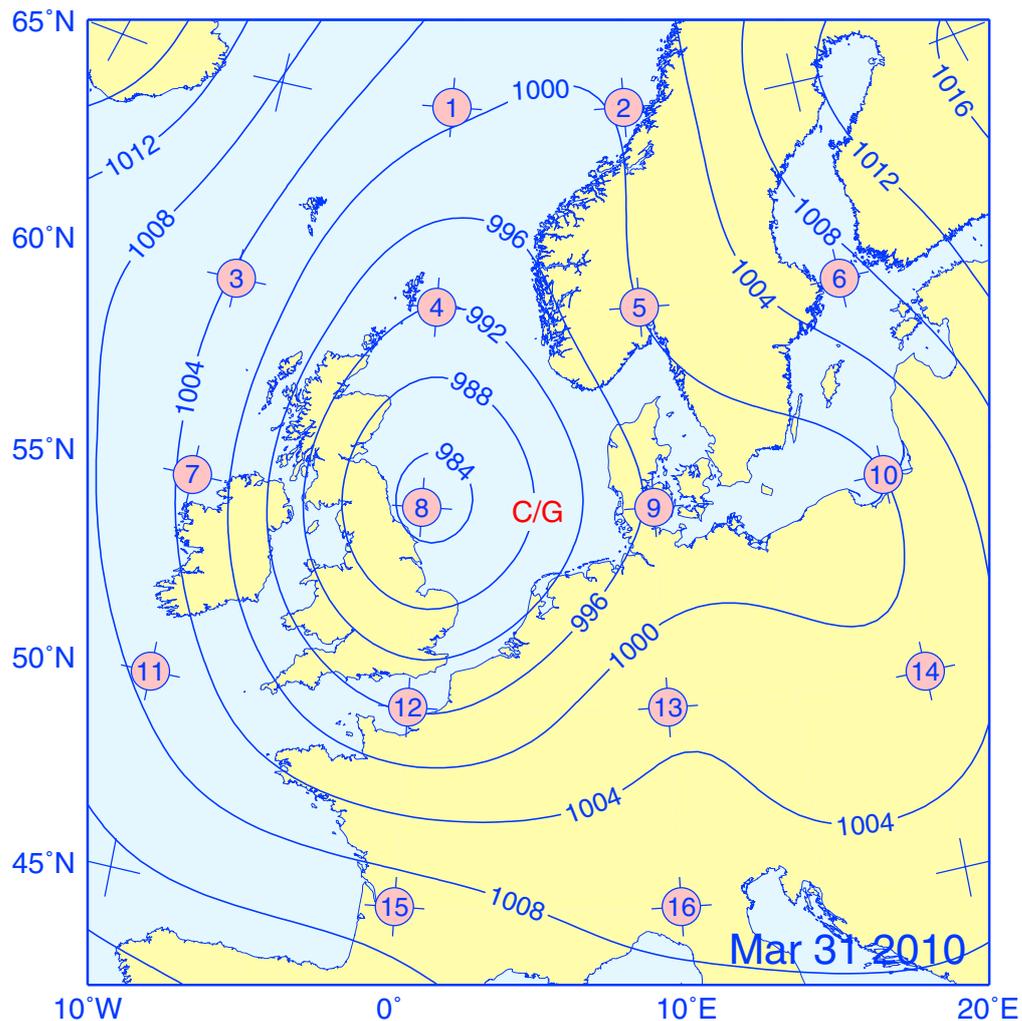


Abbildung 2-1: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 31. März 2010 (Sturmtief „Kerstin“) mit Gitterpositionen zur Wetterlagenklassifizierung und Klassifizierung (zyklonal/Sturm).

Figure 2-1: Sea level pressure (hPa) for the gale “Kerstin“ of March, 31 2010 together with grid positions of weather-typing scheme and classification (Cyclonic/Gale).

2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1	ASE	C++	NW+	SW	CS	CE	A	CS	CSW	C	AE	C	
2	SE	W	NW	CNW	A	C	S	SW	SW		ASE		
3	SE	SW		N		CSE	C	CW	CSW	CS	CNW	AE	CS
4	S	S	N	W		UNC	A	C			AW	W	
5	CS+	SW	AW	CNW		C	C	C	S	C	CW	SE	CN
6	SW	NW	W	C		A			CNW		CSW	S	SW
7	CSW	A	SW	S		ASE	A	W	AW	S	A	S	CNW
8	SW	ASW	SW	UNC									
9	SW+		S	S		A	N	C	SW	SE	AW	C	SE
10	SW		C	CS		E	N	NW	CS		CSW	A	CW
11	CSW		A	W		CSW	ANE	CW	AW	W	A	SW	W
12	CW			ASW	N	CN	NE	CNW	W	A		SW	W
13	SW		ANW	N	AE	E	ASW	SW		S	ASE	NW	NW
14	SW				ANW		NE		NE			ASW	W
15	CSW		A	W	E	AN	CSW	C	C	A	W	NW	W
16	C		ASW			W	A	CSW	W		CNW	CW	AW
17	SW		W	C++	E	A	A	NW	W	ANE	W	N	NW
18	CSW	W+		CNE			ASE	AE	NW		A	NW	
19	W	W	CNW	SW	E	A	SE	W	A	W	CNE	ASE	
20	W	AW	NW	AW		UNC				UNC	W		SW
21		W	SW	UNC	ASW	W	SE	W	A	A	W	W	A
22	ANW	NW	S	S	SE						SE	W	
23	SW	AW	S	C	SE	W	SE	W	A	CW	SW	A	
24	W	W		C						CS	CE		AW
25	W+	AW	S	CSE	CE	AW	A	A	CW	E	C	A	
26	W	SW	SW	CSE	C	AW	SE	S	W	W			W
27	ANW	NW	S	CSE	C	AW	SE	S	W	W	W	A	
28	A	AW	S	CSE	C	AW	SE	S	W	W	W		A
29	W	SW	SW	CSE	C	AW	SE	S	W	W	W	A	
30	SW++	/.	SW	/.	C	/.	SE	S	/.	E	/.		A
31												SW++	

Tabelle 2-2: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2008. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-2: Calendar of daily weather types in 2008. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2008	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	0.3	0.5	1.6	2.5	0.3	2.7	3.6	1.6	16.1	29.2
C	0.5	0.8	0.5	0.8	2.5	4.1	2.2	2.5	9.0	23.0
U	3.0	1.1	3.8	3.8	5.7	9.8	13.1	5.5	1.9	47.8
Σ	3.8	2.5	6.0	7.1	8.5	16.7	18.9	9.6	27.0	100

Tabelle 2-3: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2008 (%).

Table 2-3: Contingency table of weather types in 2008 (%).

2009	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	A	ASE	S		A	NE	A	S	SW	NW	S	A
2	A	SE	W	A	A		A	C	SW	NW	CSW	S
3	ANW	CSE	SW		NW	N		A	C	CW+	S	CS
4	N	CS	S	SW	AW		UNC			NW	C	CS
5	A		CE	A	W			AS	NW	A	C	S
6		C	NE			CE	C		AW	SW	CS	S
7	ANW		SW	S	SW				SW	W		SW
8	A	NW	SW	SW				UNC		NW	CSE	S
9	A	SW	W	ASW	ASW	C	CNW			A	ANE	SW
10	A	C		S	A			C		A	CSE	UNC
11		N	A			CNW	NW	NW			C	ASE
12	SW+	AN	W	A	AE	NW	SW	W			N	S
13	W		AW	UNC		A		NW	N			
14	AW	A	CSW		E	ANW	S	A	NE	A	CS+	UNC
15	AS	W	NW	E	CSE	N	CSW	SW	E		SW	
16						A	SW	W	ANE	N	S	C
17	S	A		NE	S	SW		NW	A	AN	CSW	E
18	SW		A			W	C	A		A	W	
19	S	W					CSW	AS	AS	ASW		CSW
20	CSW	ANW			SW	NW	W	SW		S	SW	C
21	SW	W	ANW	A	CSW	N	ASW	W	A		A	CS
22	S	NW	NW		W		SW	A	W	SE	SW	C
23		N	CNW			A	CSW	AS			CW+	
24	C	A	N	AS	A		W	S	AW	S	W	S
25		W	C	S			NW			CSW	SW+	C
26	S		CSW	CS	C	E	A	SW	A	CNW	SW	W
27	A	NW	C		W		SW		AW	A	CSW	C
28	AS	ASW	C	C	NW	AE	ASW	CSW		S		NW
29	A		A	CSE		A	S	W	NW		C	SE
30	A	./.	AW	AS	A		CW	AW	W	A		
31	ASE		A	./.		./.	A	SW	./.	S	./.	E

Tabelle 2-4: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2009. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-4: Calendar of daily weather types in 2009. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2009	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	0.8	0.5	0.8	0.8	2.5	1.6	2.5	1.4	22.7	33.7
C	0.0	0.0	0.8	1.4	2.2	3.6	0.8	1.6	9.3	19.7
U	3.6	1.4	3.3	1.4	9.3	10.7	7.7	6.3	3.0	46.6
Σ	4.4	1.9	4.9	3.6	14.0	15.9	11.0	9.3	35.1	100

Tabelle 2-5: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2009 (%).

Table 2-5: Contingency table of weather types in 2009 (%).

2010	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1	E	CNW	NW	CSW	NW	A	A	C	A	S	A	E	
2	A	C	ANW	SW	NE		S	UNC		S	SW		
3	NW	S	A	CS	N	A	AW	W	A	S	W	SW	
4	C	SE	ANW	C	ASW		ANE	UNC		W		C	S
5	CE	A	A	S	E	C	A	SW	ASE	SW	NW	UNC	
6	AE	AE		NW	NE	CNW	ASW	S	SE	A	A	N	
7	E	NE	ANW	A	N	E	UNC	CSW	C	SW	E	N	W
8	AE	ANE											
9	ASE	NE	NW	NE	A	NW	UNC	C	W	ANE	C+	AN	
10	SE	A		ANE	A	NE	CSE			UNC	W	A	A
11	AS	S	A	ANE	NW	AN	CSW	NE	CW	N	NW	AN	
12	S	SE		W	AW	ANW	A	S	C	NW	NE	A	CNW
13	CS	C	ASW	NW	A	AW	SW	A			C	NW	ASE
14	SW	C	SW	A	AN	N	A	W	W	C	SE	CSE	
15	A		CW	C			AN	S	SW	CW	N	E	C
16	SE	S	NW	NW	A	A	C	SW	A	W	E	UNC	
17	ASE	C	SW	AW			ANW						AW
18	S	UNC	AW	A	ANW	A	N	C	C	C	NE	E	
19	SE	SE	S	S	N		AW	A		CW	CN	N	CNE
20	E	C	CS	W	UNC	A	UNC	NW	UNC	NE	C	A	
21	A			CSW	A		C	ASW	ASW	W		CN	E
22	NW	C	CW	ASW	CW	ASW	NW	NW	A	W	CSE	S	
23	C			SW	SW	UNC		NW	C	AS	SW	E	AS
24	CN	./.	C	CW	C	A	SW	N	S	SW	E	A	
25	C	./.	C	./.	N	./.		A	./.	AS	./.	./.	ANW

Tabelle 2-6: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2010. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-6: Calendar of daily weather types in 2010. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2010	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	1.6	1.4	0.8	1.1	1.4	2.2	1.1	1.9	18.1	29.6
C	0.8	0.3	0.5	1.1	0.8	1.6	2.5	1.4	12.3	21.4
U	4.9	3.8	5.5	4.4	6.0	6.3	5.5	8.5	4.1	49.0
Σ	7.4	5.5	6.8	6.6	8.2	10.1	9.0	11.8	34.5	100

Tabelle 2-7: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2010 (%).

Table 2-7: Contingency table of weather types in 2010 (%).

2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec								
1	NW	AW	A	ASW	AE	A	NW	AS	A	AS	SW	SW								
2	N	AW		SW			W	N	S	ASW	AW	AS	W							
3	AW	W		AN	AW	A	NE	A	C	CS	SW	S	W+							
4	SW	W+	AW	SW	CSW					W	SE	NW								
5	SW	W	A	AW	S	C	CS	CSW	SW	W	NE	W								
6	C	W	ANW	ANW			S	C	S	C	W	NW	A	C						
7	SW	ANW	SW	ANW	AS	W	CS	C	W	NW	SE	SW								
8	CSW	A	W	A			AS				W	CSW	NW	AW	SW	AS	CW+			
9	W	CW	W	W	UNC	UNC	UNC	C	SW	W	SE	SW								
10	ASW	UNC	SW										NW	W	ASW	NE	UNC	SW	ANW	S
11	C	S	C	A	CW	W	CN	CS	W	A	A	SW+								
12	W	AS	SW										W	ASW	NW	W	ANW	AS	C	W
13	CSW	S	E										NW	ASW	NW	W	ANW	AS	C	W
14	SW	SE	SE	W	CSW	S	SW	A	SW	ASW	ASW	NW								
15	SW												E	ANW	SE	AW	CNW	C	NW	W
16	W	ASE	A	SE	ASW	W	N	SW	SW	ANW	AS	W								
17	NW												ASE	SE	SW	C	UNC	C	NW	W
18	ANW	AS	A	SE	SW	C	CNW	SE	A	S	ASW	W								
19	A												ASE	SE	SW	SW	CW	CNW	SE	A
20	AN	S	A	ASE	W	NW	C	C	ASW	SE	W	W+								
21	N	SE											ASE	W	UNC	ASW	UNC	ASW	SW	ANW
22	NW	C	ANW	E	C	S	ANE	C	A	S	ASW	W								
23	ANW												ANE	NE	W	N	N	CW	ANW	ASW
24	E	ANE	ANW	E	C	S	ANE	C	ASW	S	W	W+								
25	ANW												ANE	NE	W	N	N	CW	ANW	ASW
26	A	.	ANW	E	C	S	ANE	C	ASW	S	W	W+								
27	ANW												ANE	NE	W	N	N	CW	ANW	ASW
28	ANW	.	ANW	E	C	S	ANE	C	ASW	S	W	W+								
29	ANW												ANE	NE	W	N	N	CW	ANW	ASW
30	ANW	.	ANW	E	C	S	ANE	C	ASW	S	W	W+								
31	ANW												ANE	NE	W	N	N	CW	ANW	ASW

Tabelle 2-8: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2011. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).

Table 2-8: Calendar of daily weather types in 2011. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).

2011	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	U	Σ
A	0.5	0.8	0.5	1.6	3.0	5.8	3.6	2.5	16.4	34.8
C	0.3	0.0	0.0	0.0	1.1	2.5	1.9	1.4	7.4	14.5
U	3.0	1.9	1.4	3.8	6.8	10.4	14.5	5.8	3.0	50.7
Σ	3.8	2.7	1.9	5.5	11.0	18.6	20.0	9.6	26.8	100

Tabelle 2-9: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2011 (%).

Table 2-9: Contingency table of weather types in 2011 (%).

2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	A	C	NW	SW	C	SE	A	C	SW	C	SE	C
2	SE	NW	NW	C	A	C	SE	SW	SW	C	A	C
3	SE	SW	NW	NW	A	C	C	SW	SW	C	SE	C
4	SE	SW	NW	NW	A	SE	A	C	SW	SW	NE	SW
5	C	SW	A	C	A	SE	A	A	SE	C	NE	C
6	SW	NW	NW	C	A	NE	C	SW	C	A	SE	NE
7	C	A	SW	C	A	NE	C	C	C	SW	SE	A
8	SW	SW	SW	SW	A	A	C	NW	C	SW	SW	SW
9	SW	A	SW	SW	A	A	NW	SW	SE	A	SW	NW
10	SW	A	SW	SW	SE	NW	C	SW	SW	SW	SW	C
11	SW	A	C	SE	A	NW	C	SW	SE	SW	C	SE
12	C	A	C	C	NE	NW	C	C	SE	A	C	SW
13	SW	A	NW	C	NE	NW	NW	C	SE	SW	SW	SE
14	SW	A	NW	NW	NE	NW	NW	NW	A	A	SW	SE
15	SW	A	A	NW	NE	C	SW	A	A	SW	NW	SE
16	C	A	NE	A	NW	NW	NW	A	A	NW	NW	SW
17	SW	A	NW	NE	NE	A	NW	SE	A	NW	A	SW
18	SW	A	NW	SE	NE	SW	SW	SW	A	SW	NW	SW
19	NW	A	NW	SE	A	SW	C	C	A	SW	NW	SW
20	SW	SW	SW	SE	A	SW	C	NW	A	SW	NW	NW
21	NW	SW	C	SE	A	A	NW	SW	A	SW	NW	SW
22	A	NW	NE	SE	A	C	NW	C	A	A	NW	NW
23	SW	SW	C	A	SE	NW	A	NW	NE	SW	C	A
24	NW	SW	C	SW	SE	A	A	SW	NE	SW	NE	A
25	SW	A	NW	SW	SE	A	SE	SW	A	SW	NW	A
26	NW	SW	NW	SW	NE	SW	SE	SW	A	SW	NW	A
27	NW	NW	SW	SW	SE	SW	SE	SW	A	NW	SW	A
28	A	SW	SW	C	SE	SW	SE	NW	A	NW	SW	A
29	SW	SW	SW	C	SE	SW	SE	A	NW	SW	C	A
30	NW	./.	SW	C	C	A	A	A	C	NE	C	A
31	SW	./.	SW	./.	C	./.	SE	SE	./.	NE	./.	A

Tabelle 2-10: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2008.

Table 2-10: Calendar of reduced weather types in 2008.

2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
A	3	13	2	2	13	7	6	5	13	5	2	10
C	4	1	5	9	3	4	9	7	4	4	5	5
NE	./.	./.	2	1	7	2	./.	./.	2	2	3	1
SE	3	./.	./.	6	7	3	7	2	5	./.	4	4
SW	15	11	10	8	./.	7	2	12	5	16	7	8
NW	6	4	12	4	1	7	7	5	1	4	9	3

Tabelle 2-11: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2008.

Table 2-11: Monthly frequencies of reduced weather types in 2008.

2009	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	A	SE	SW	A	A	NE	A	SW	SW	NW	SW	A
2	A	SE	SW	A	A	NE	A	C	SW	NW	C	SE
3	NW	SE	SW	A	NW	NW	A	A	C	SW	SW	C
4	NW	SE	SW	SW	NW	NW	NW	A	C	NW	C	SW
5	A	C	C	A	NW	NW	SW	A	NW	A	C	SW
6	A	C	NE	A	NW	NE	C	A	A	SW	C	SW
7	A	C	SW	SW	SW	C	C	SE	SW	NW	C	SW
8	A	NW	SW	SW	SW	C	C	NE	SW	NW	SE	SW
9	A	SW	SW	A	SW	C	NW	A	A	A	NE	SW
10	A	C	NW	SE	A	C	NW	C	A	C	NE	NW
11	SW	NW	A	SE	A	C	NW	NW	A	C	SE	A
12	SW	A	SW	A	A	NW	SW	NW	A	NE	SE	A
13	SW	A	A	NE	SE	A	SW	NW	NE	A	SW	A
14	A	A	SW	NE	SE	A	SW	A	NE	A	SW	SE
15	A	SW	NW	SE	SE	NW	SW	SW	NE	A	SW	C
16	SW	NW	A	SE	SE	A	SW	SW	A	NE	SW	C
17	SW	A	A	NE	SE	SW	C	NW	A	NE	SW	SE
18	SW	A	A	NE	SW	SW	C	A	A	A	SW	NE
19	SW	NW	A	A	SW	NW	SW	SW	SE	A	SW	SW
20	SW	NW	A	A	SW	NW	SW	SW	A	SE	SW	C
21	SW	SW	NW	A	C	NW	SW	SW	A	SE	A	SW
22	SW	NW	NW	A	NW	A	SW	A	SW	SE	SW	C
23	C	NW	NW	A	A	A	SW	A	NW	SE	C	SW
24	C	A	NW	SE	A	A	SW	SE	NW	SE	SW	SE
25	SW	NW	C	SE	A	NE	NW	SW	A	C	SW	C
26	SE	NW	C	SW	C	SE	A	SW	A	C	SW	SW
27	A	NW	C	C	SW	SE	SW	SW	A	A	SW	C
28	A	SW	C	C	NW	SE	A	C	NW	SW	C	NW
29	A	./.	A	C	A	A	SW	NW	NW	A	C	SE
30	A	./.	A	A	A	A	C	SW	NW	A	C	SE
31	A	./.	A	./.	A	./.	A	SW	./.	SW	./.	NE

Tabelle 2-12: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2009.

Table 2-12: Calendar of reduced weather types in 2009.

2009	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
A	15	6	10	13	11	8	6	9	13	10	1	4
C	2	4	5	3	2	5	6	3	2	4	9	7
NE	./.	./.	1	4	./.	4	./.	1	3	3	2	2
SE	1	4	./.	6	5	3	./.	2	1	5	3	6
SW	11	4	9	4	7	2	14	11	5	4	15	10
NW	2	10	6	./.	6	8	5	5	6	5	./.	2

Tabelle 2-13: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2009.

Table 2-13: Monthly frequencies of reduced weather types in 2009.

2010	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	NE	C	NW	SW	NW	A	A	C	A	SE	A	SE
2	SE	C	NW	SW	NE	A	SW	NW	A	SE	SW	SE
3	A	C	A	SE	NE	A	A	NW	A	SW	SW	SW
4	NW	SW	A	C	NW	A	SW	C	A	SW	SW	SW
5	C	SE	NW	A	A	SW	NW	C	A	SW	NW	C
6	C	SE	A	SW	NE	C	A	SW	SE	SW	NW	NW
7	SE	A	A	SW	NE	NW	A	SW	SE	A	A	A
8	A	A	A	NW	NE	C	A	NW	SE	SE	SE	NE
9	NE	NE	A	A	NE	C	SW	SW	C	SE	SE	NW
10	NE	NE	A	A	NW	NE	SW	SW	SW	SE	NE	NW
11	NE	A	A	A	NE	C	SW	C	SW	A	SW	NW
12	SE	NE	NW	A	NE	NW	NE	C	NW	A	C	A
13	SE	NE	NW	NE	A	NW	NW	C	SW	A	SW	A
14	SE	A	NW	NE	A	NE	SE	NE	SW	NW	C	A
15	A	SW	NW	A	NW	NE	SW	NE	NW	NW	NW	A
16	SE	SE	A	A	NW	A	SW	C	NW	NE	A	C
17	C	SE	SW	NW	NW	A	SW	C	NW	A	A	C
18	SW	C	SW	NW	A	NW	A	C	NW	SW	SE	C
19	A	C	SW	A	A	NW	A	SW	NW	C	SE	SE
20	SE	C	SW	C	A	NW	SW	SW	SW	NW	SE	C
21	SE	SW	NW	NW	A	A	C	SW	A	NW	SE	SE
22	SE	C	SW	A	A	A	C	SW	SW	NW	NE	SE
23	SE	SE	SW	A	A	A	NE	C	C	C	NE	NE
24	SE	SE	SW	A	NW	A	A	NW	C	NW	C	NE
25	SE	C	SE	SE	NW	A	NW	NW	NE	A	C	A
26	A	C	SW	SW	NW	A	NW	NW	NE	A	C	A
27	NW	C	C	A	C	A	SW	NE	NE	SW	C	SW
28	NW	C	C	SW	NW	A	NW	NW	A	SW	SE	SE
29	C	./.	SW	SW	SW	SW	NW	C	SE	SW	SE	A
30	NW	./.	C	NW	C	A	NW	NE	SE	SW	SE	A
31	C	./.	C	./.	NE	./.	SW	A	./.	A	./.	NW

Tabelle 2-14: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2010.

Table 2-14: Calendar of reduced weather types in 2010.

2010	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
A	5	4	9	12	9	15	8	1	7	8	4	9
C	5	11	4	2	2	4	2	11	3	2	6	5
NE	4	4	./.	2	9	3	2	4	3	1	3	3
SE	12	6	1	2	./.	./.	1	./.	5	5	9	6
SW	1	3	9	7	1	2	11	8	6	9	5	3
NW	4	./.	8	5	10	6	7	7	6	6	3	5

Tabelle 2-15: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2010.

Table 2-15: Monthly frequencies of reduced weather types in 2010.

2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	NW	SW	A	SW	SE	A	NW	A	A	A	SW	SW
2	NW	SW	A	SW	SE	A	NW	SE	SW	SW	A	SW
3	A	SW	A	SW	A	A	NW	SE	SW	SW	SE	SW
4	SW	SW	A	A	A	NE	A	C	C	NW	SE	NW
5	SW	NW	A	SW	A	NE	A	C	SW	SW	SE	NW
6	C	SW	A	SW	SW	C	SE	C	SW	NW	NE	NW
7	SW	SW	A	NW	SE	C	SW	C	NW	NW	A	C
8	C	A	SW	A	SE	C	SW	C	NW	NW	SE	SW
9	SW	A	SW	A	SE	SW	C	NW	SW	SW	SE	NW
10	SW	SW	SW	A	A	A	SW	NW	SW	NW	SE	NW
11	C	NW	SW	NW	SW	SW	NW	C	SW	NW	SE	SW
12	SW	SE	SW	NW	SW	A	NE	C	SW	NW	SE	SW
13	SW	SE	C	A	SW	SW	NE	SW	SW	A	A	SW
14	SW	SE	NE	A	C	NW	NW	C	NW	A	A	SW
15	SW	SE	SE	A	NW	SW	NW	NW	A	A	A	SW
16	SW	SE	SE	A	NW	C	SW	SW	A	SW	SE	C
17	SW	SE	SE	A	NW	SW	C	NW	C	SW	SW	NW
18	NW	A	A	A	SW	C	C	NE	C	SW	A	NW
19	A	SE	A	SE	A	C	C	NW	SW	NW	A	NW
20	A	A	A	SE	A	NW	C	A	SW	NW	A	C
21	A	SE	A	A	A	SW	NE	SW	SW	SW	SW	NW
22	A	SE	A	SE	SW	C	NW	NW	NW	SW	SE	SW
23	NW	SW	A	SE	SW	NW	C	SE	A	SW	SW	SW
24	NW	SW	A	A	SW	NW	C	C	A	SE	SW	NW
25	C	SW	NW	A	A	SW	C	SW	SW	SE	SW	SW
26	NE	SW	A	A	C	A	NE	C	SW	SE	SW	SW
27	A	C	A	NE	NW	SW	A	C	A	SE	NW	A
28	A	NE	A	NE	SW	SE	NE	SW	A	A	A	SW
29	A	./.	NW	SE	SW	NW	NW	NW	A	A	SW	NW
30	A	./.	SW	SE	SW	NW	NW	NW	A	SW	SW	NW
31	A	./.	SW	./.	NW	./.	A	NW	./.	A	./.	SW

Tabelle 2-16: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2011.

Table 2-16: Calendar of reduced weather types in 2011.

2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
A	10	4	17	14	8	6	4	2	9	7	9	1
C	4	1	1	./.	2	7	8	11	3	./.	./.	3
NE	1	1	1	2	./.	2	5	1	./.	./.	1	./.
SE	./.	9	3	6	5	1	1	3	./.	4	10	./.
SW	11	11	7	5	11	8	4	5	14	11	9	15
NW	5	2	2	3	5	6	9	9	4	9	1	12

Tabelle 2-17: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2011.

Table 2-17: Monthly frequencies of reduced weather types in 2011.

2008	JFM	AMJ	JAS	OND	Yr
A	.20	.24	.26	.18	.22
C	.11	.18	.22	.15	.16
NE	.02	.11	.02	.07	.05
SE	.03	.18	.15	.09	.11
SW	.40	.16	.21	.34	.28
NW	.24	.13	.14	.17	.17

2009	JFM	AMJ	JAS	OND	Yr
A	.34	.35	.30	.16	.29
C	.12	.11	.12	.22	.14
NE	.01	.09	.04	.08	.05
SE	.06	.15	.03	.15	.10
SW	.27	.14	.33	.32	.26
NW	.20	.15	.17	.08	.15

2010	JFM	AMJ	JAS	OND	Yr
A	.20	.40	.17	.23	.25
C	.22	.09	.17	.14	.16
NE	.09	.15	.10	.08	.10
SE	.21	.02	.07	.22	.13
SW	.14	.11	.27	.18	.18
NW	.13	.23	.22	.15	.18

2011	JFM	AMJ	JAS	OND	Yr
A	.34	.31	.16	.18	.25
C	.07	.10	.24	.03	.11
NE	.03	.04	.07	.01	.04
SE	.13	.13	.04	.15	.12
SW	.32	.26	.25	.38	.30
NW	.10	.15	.24	.24	.18

Tabelle 2-18: Saisonale und jährliche relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen in den Jahren 2008 bis 2011.

Table 2-18: Seasonal and annual relative frequencies of reduced weather types from 2008 through 2011.

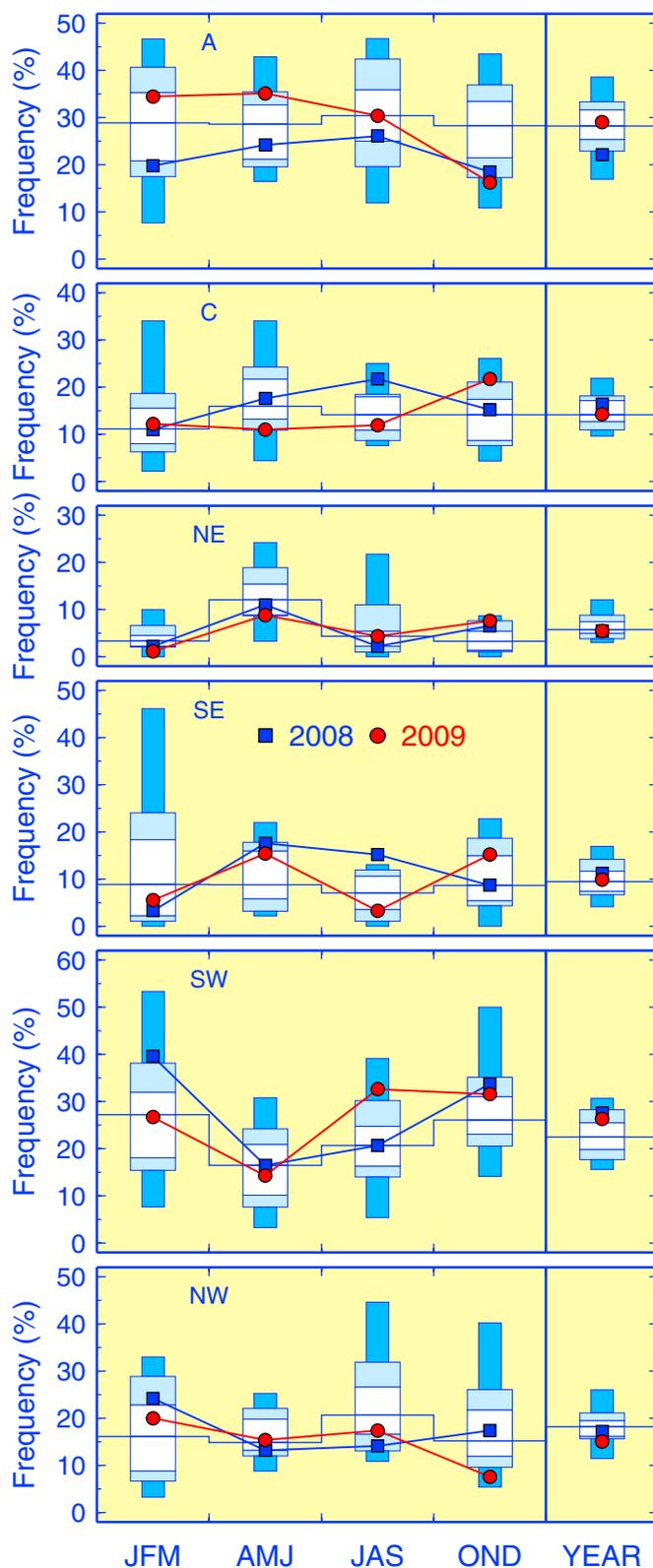


Abbildung 2-2: Relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen für 2008 (blau) und 2009 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971–2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppelinie), 75 und 90 %.

Figure 2-2: Percent frequencies of reduced weather types for 2008 (blue) and 2009 (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 %.

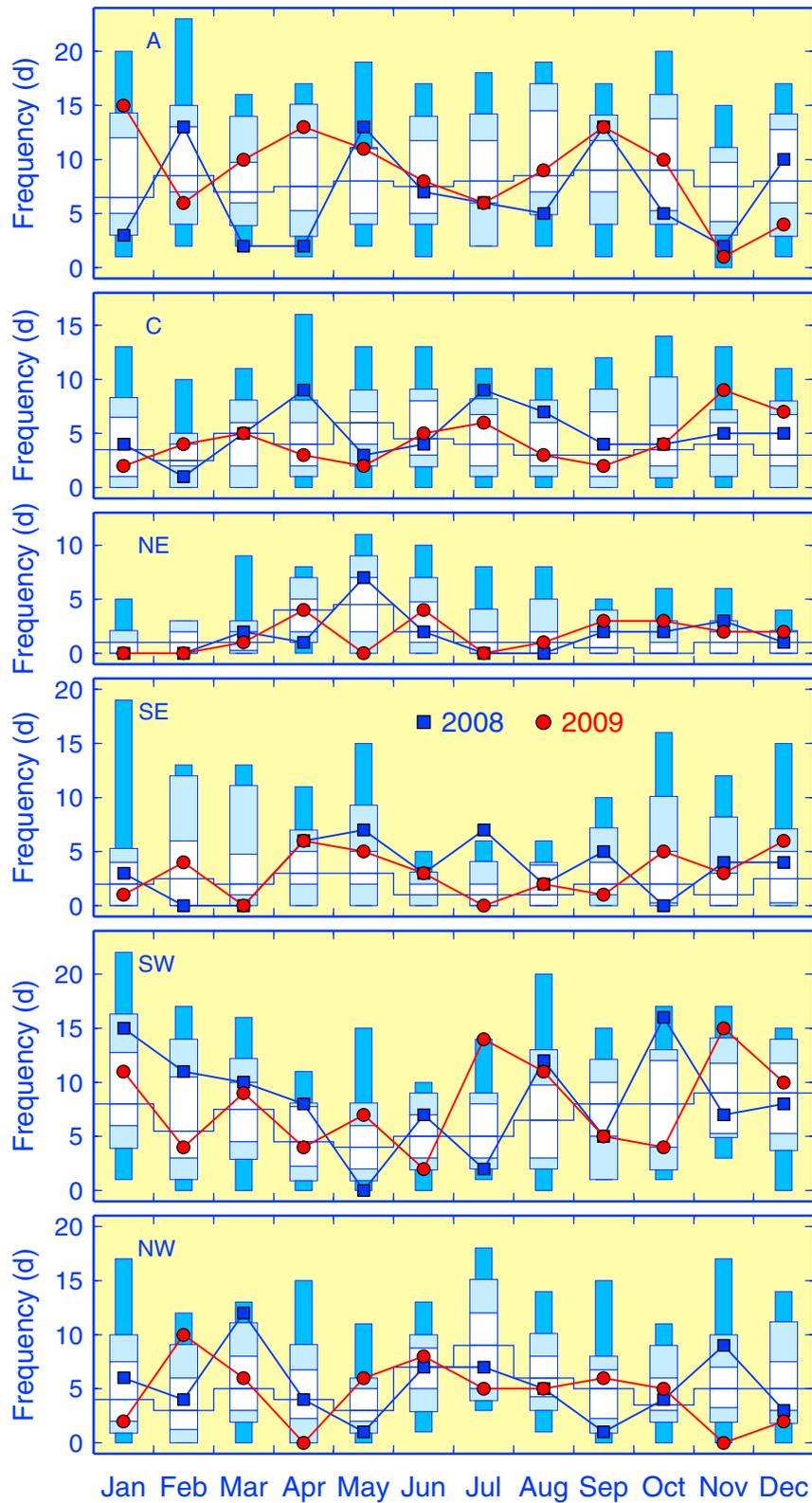


Abbildung 2-3: Wie Abbildung 2-2, jedoch für monatliche absolute Häufigkeiten (Tage).
Figure 2-3: As Figure 2-2, except for monthly absolute frequencies (days).

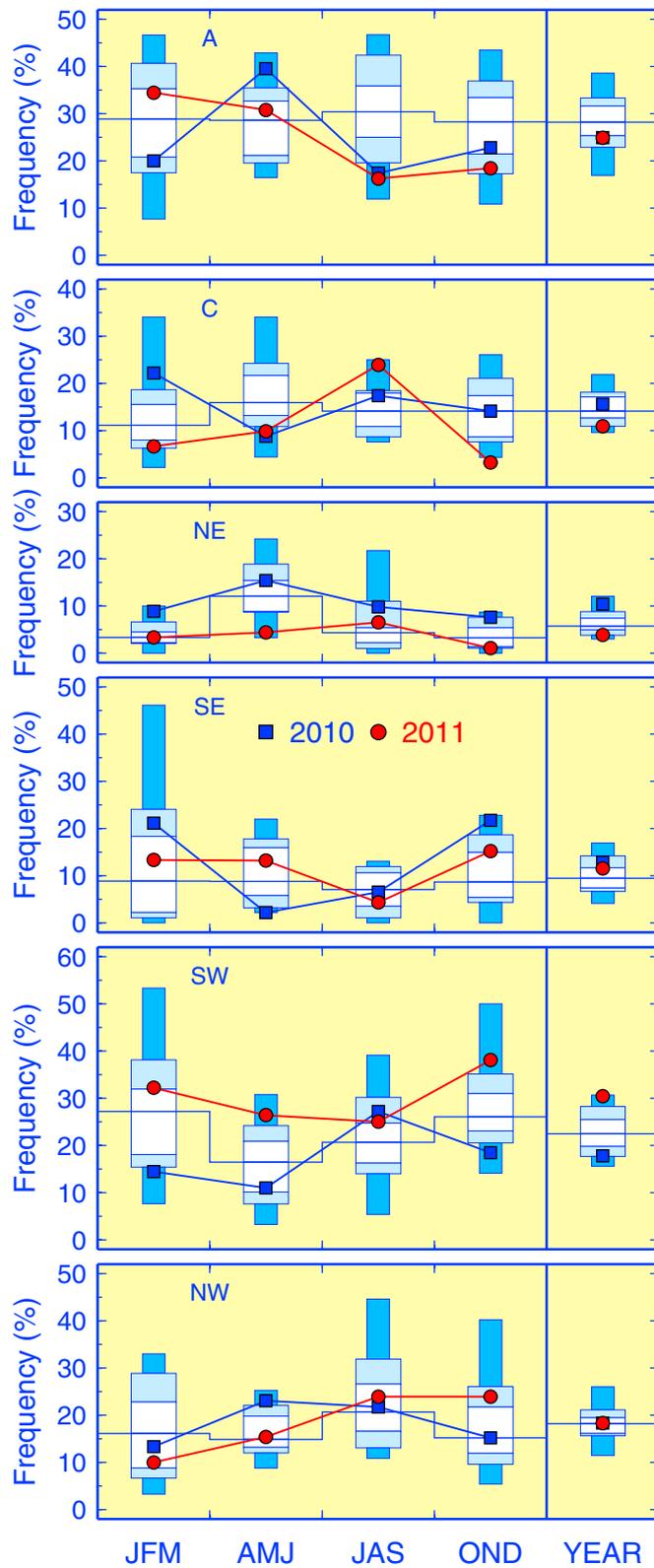


Abbildung 2-4: Wie *Abbildung 2-2*, jedoch für die Jahre 2010 und 2011.

Figure 2-4: As Figure 2-2, except for 2010 and 2011.

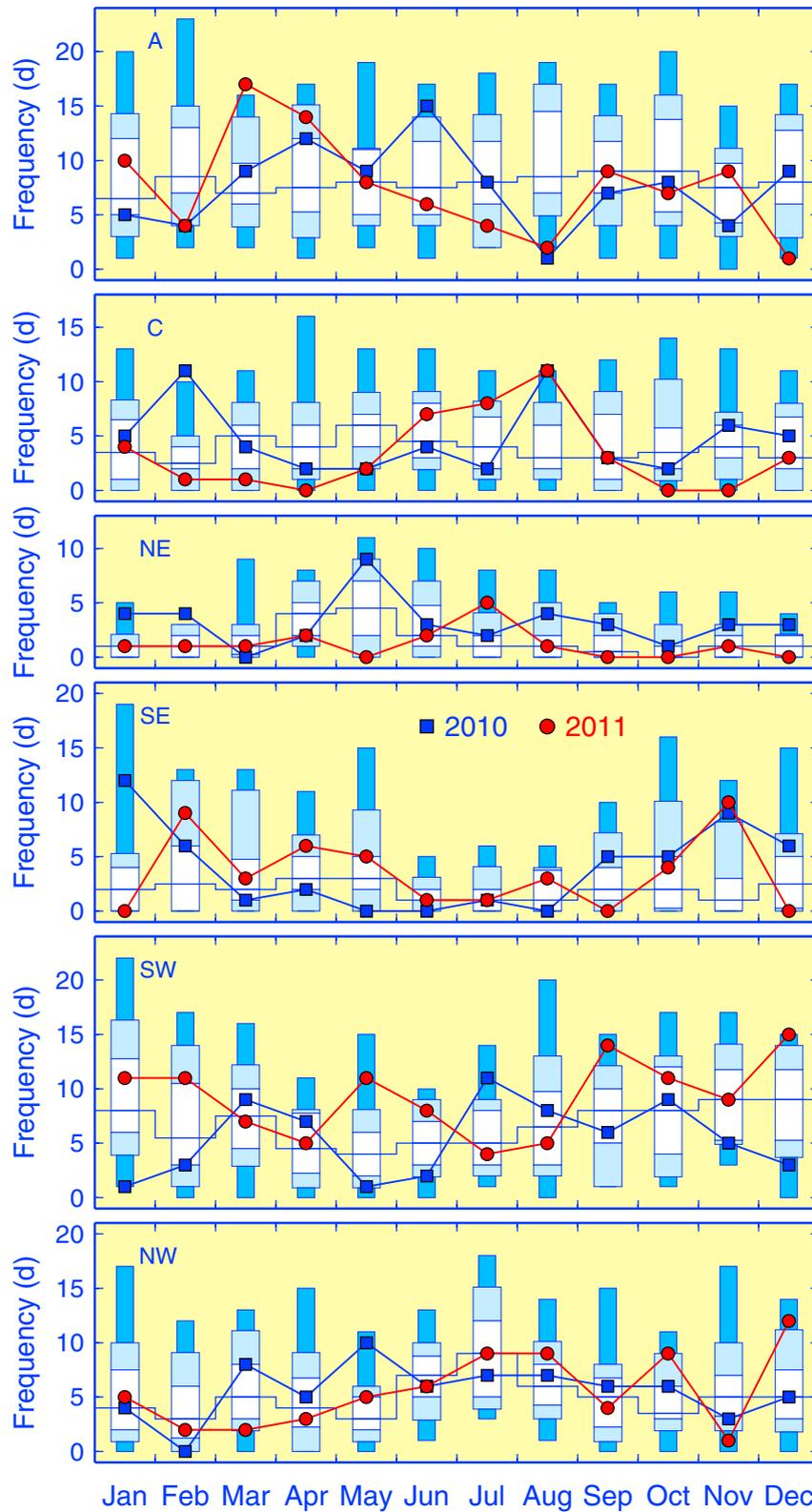


Abbildung 2-5: Wie Abbildung 2-2, jedoch für monatliche absolute Häufigkeiten (Tage) in den Jahren 2010 und 2011.

Figure 2-5: As Figure 2-2, except for monthly absolute frequencies (days) in 2010 and 2011.

Φ	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

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
ϵ	.24	.17	.08	.09	.23	.20	1

Tabelle 2-19: Wetterlagenübergänge für Basisperiode 1971–2000 (NCEP). Φ : Übergangshäufigkeiten (gerundet) für das klimatologische Jahr. P: Übergangswahrscheinlichkeiten für Markovkette 1. O. (aus Φ via ϕ_{ij}/RS_i); π : Eigenvektor ($\pi = \pi P$), stationäre (unbedingte, klimatologische) Grenzverteilung. E: ÜW für eingebettete Markovkette ohne Verweilzeiten (aus Φ wie P für $\phi_{ii} = 0$).

Table 2-19: Weather-type transitions for base period 1971–2000 (NCEP). Φ : Count matrix of rounded transition frequencies for the climatological year. P: Transition matrix of 1. order Markov chain, obtained from Φ via ϕ_{ij}/RS_i ; π : Eigenvector ($\pi = \pi P$), stationary (unconditional climatological) distribution. E: Embedded transition matrix (without sojourn times, from Φ as P for $\phi_{ii} = 0$).

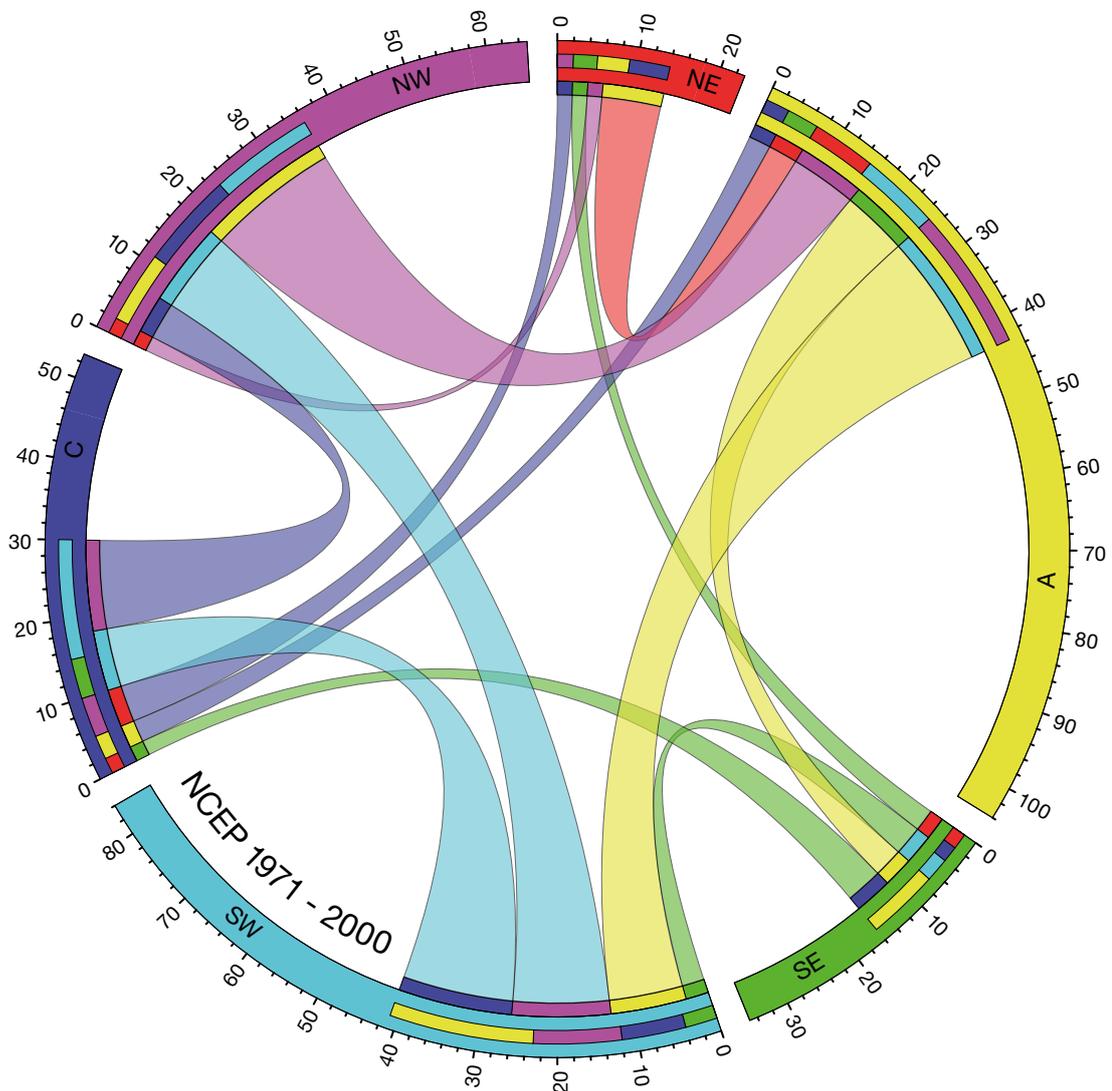


Abbildung 2-6: Wetterlagenübergänge, Jahresklimatologie. Die Bogenlänge eines Ringsektors entspricht der Häufigkeit f in Tagen von Wetterlage X , d. h. der jeweiligen Randsumme der Countmatrix Φ in *Tabelle 2-19*. Häufigkeiten der Übergänge $Y \neq X \rightarrow X$ (Spalteneinträge) sind als nach Y eingefärbte 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 . Die Graphik wurde mit dem Softwarepaket Circos erstellt (KRZYWINSKI et al. 2009).

*Figure 2-6: 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 Φ in *Table 2-19*). 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 . The figure was created with the software package Circos (KRZYWINSKI et al. 2009).*

☉	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	46	2	4	9	15	4	80
C	4	26	3	4	9	14	60
NE	4	1	8	4	0	3	20
SE	5	7	3	20	6	0	41
SW	8	18	1	4	53	17	101
NW	13	6	1	0	18	25	63
CS	80	60	20	41	101	63	365

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.58	.03	.05	.11	.19	.05	1
C	.07	.43	.05	.07	.15	.23	1
NE	.20	.05	.40	.20	0	.15	1
SE	.12	.17	.07	.49	.15	0	1
SW	.08	.18	.01	.04	.52	.17	1
NW	.21	.10	.02	0	.29	.40	1
π	.22	.16	.05	.11	.28	.17	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.06	.12	.26	.44	.12	1
C	.12	0	.09	.12	.26	.41	1
NE	.33	.08	0	.33	0	.25	1
SE	.24	.33	.14	0	.29	0	1
SW	.17	.38	.02	.08	0	.35	1
NW	.34	.16	.03	0	.47	0	1
ε	.18	.18	.06	.11	.26	.20	1

☉	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	62	3	4	10	19	8	106
C	6	24	2	2	9	9	52
NE	5	1	7	3	2	1	19
SE	4	5	5	18	4	0	36
SW	10	18	0	2	54	12	96
NW	19	1	1	1	8	25	55
CS	106	52	19	36	96	55	364

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.58	.03	.04	.09	.18	.08	1
C	.12	.46	.04	.04	.17	.17	1
NE	.26	.05	.37	.16	.11	.05	1
SE	.11	.14	.14	.50	.11	0	1
SW	.10	.19	0	.02	.56	.13	1
NW	.35	.02	.02	.02	.15	.45	1
π	.29	.14	.05	.10	.26	.15	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.07	.09	.23	.43	.18	1
C	.21	0	.07	.07	.32	.32	1
NE	.42	.08	0	.25	.17	.08	1
SE	.22	.28	.28	0	.22	0	1
SW	.24	.43	0	.05	0	.29	1
NW	.63	.03	.03	.03	.27	0	1
ε	.25	.16	.07	.10	.24	.17	1

☉	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	49	2	6	8	15	11	91
C	1	24	6	5	9	12	57
NE	11	3	17	2	1	4	38
SE	7	6	3	26	5	0	47
SW	8	14	1	5	28	9	65
NW	15	8	5	1	7	30	66
CS	91	57	38	47	65	66	364

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.54	.02	.07	.09	.16	.12	1
C	.02	.42	.11	.09	.16	.21	1
NE	.29	.08	.45	.05	.03	.11	1
SE	.15	.13	.06	.55	.11	0	1
SW	.12	.22	.02	.08	.43	.14	1
NW	.23	.12	.08	.02	.11	.45	1
π	.25	.16	.10	.13	.18	.18	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.05	.14	.19	.36	.26	1
C	.03	0	.18	.15	.27	.36	1
NE	.52	.14	0	.10	.05	.19	1
SE	.33	.29	.14	0	.24	0	1
SW	.22	.38	.03	.14	0	.24	1
NW	.42	.22	.14	.03	.19	0	1
ε	.22	.17	.11	.11	.19	.19	1

☉	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	52	2	3	9	21	4	91
C	0	15	5	0	12	8	40
NE	4	1	3	2	0	4	14
SE	9	2	1	25	4	1	42
SW	12	15	0	4	57	22	110
NW	14	5	2	2	16	28	67
CS	91	40	14	42	110	67	364

P	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	.57	.02	.03	.10	.23	.04	1
C	0	.38	.13	0	.30	.20	1
NE	.29	.07	.21	.14	0	.29	1
SE	.21	.05	.02	.60	.10	.02	1
SW	.11	.14	0	.04	.52	.20	1
NW	.21	.07	.03	.03	.24	.42	1
π	.25	.11	.04	.12	.30	.18	1

E	A	C	NE	SE	SW	NW	RS
A	0	.05	.08	.23	.54	.10	1
C	0	0	.20	0	.48	.32	1
NE	.36	.09	0	.18	0	.36	1
SE	.53	.12	.06	0	.24	.06	1
SW	.23	.28	0	.08	0	.42	1
NW	.36	.13	.05	.05	.41	0	1
ε	.21	.14	.06	.09	.29	.21	1

Tabelle 2-20: Wie Tabelle 2-19, jedoch für die Jahre 2008 (oben) bis 2011 (unten).

Table 2-20: As Table 2-19, except for the years 2008 (top) through 2011 (bottom).

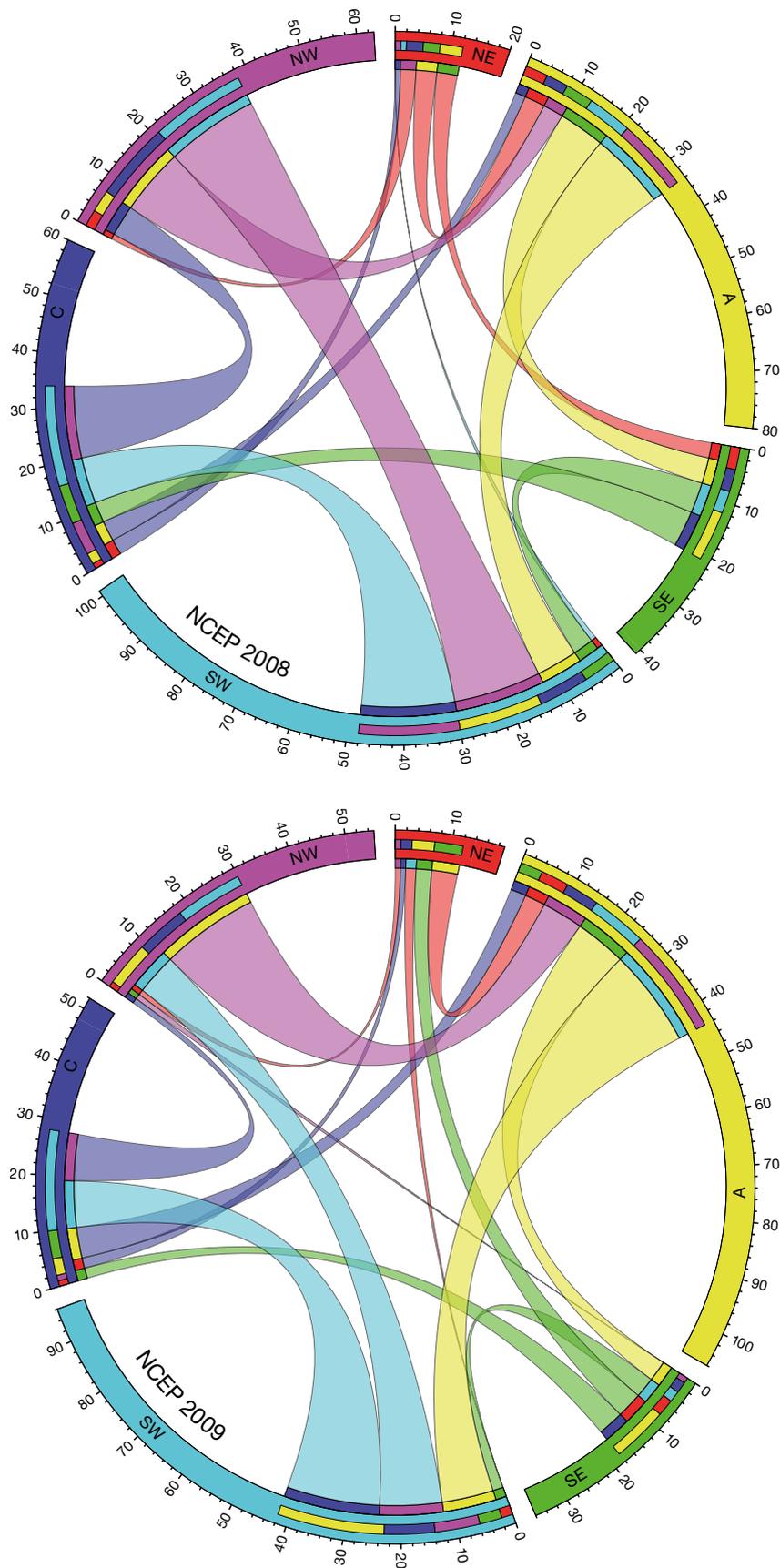


Abbildung 2-7: Wie Abbildung 2-6, jedoch für die Jahre 2008 und 2009.
Figure 2-7: Same as Figure 2-6, except for 2008 and 2009.

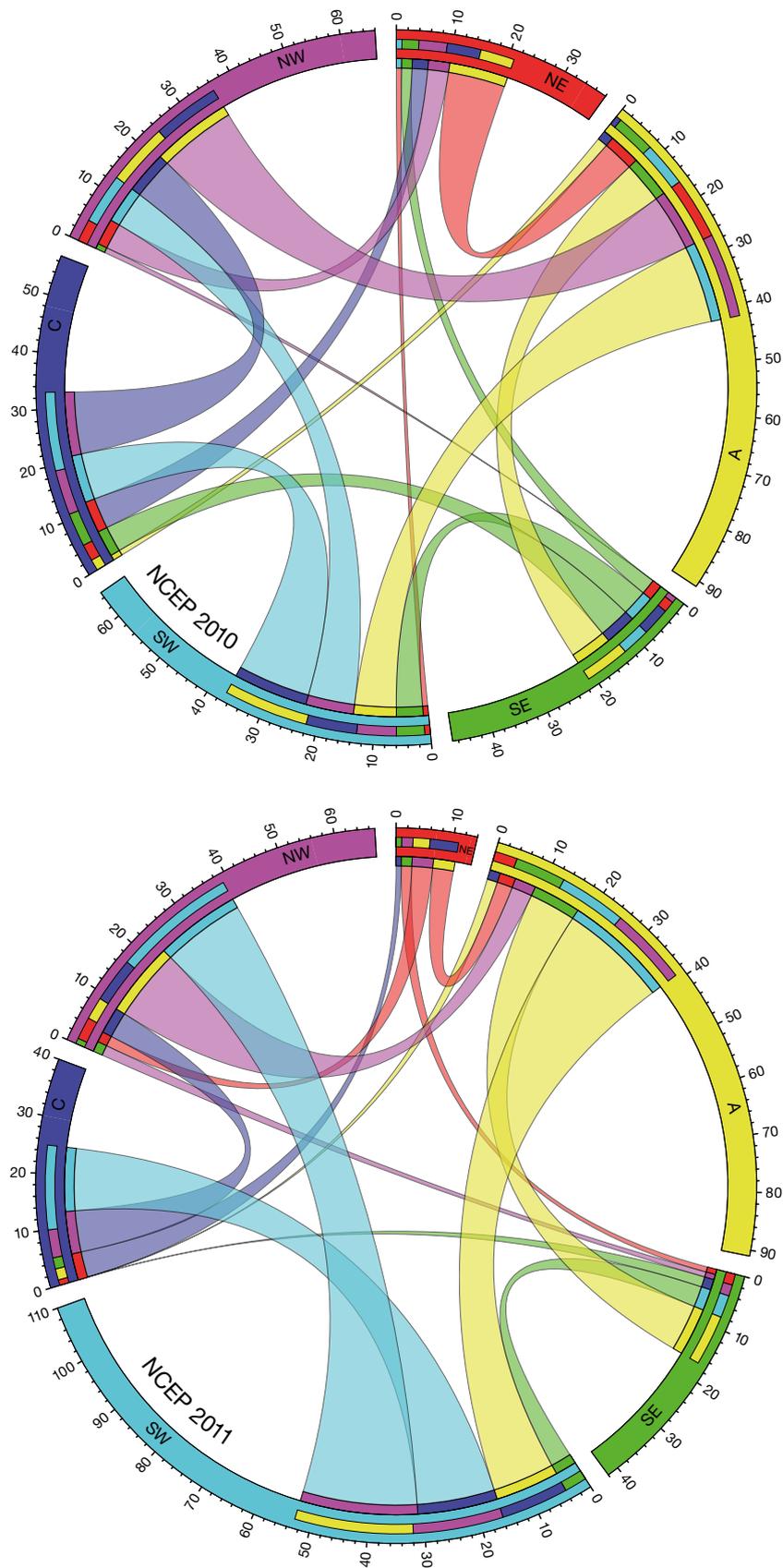


Abbildung 2-8: Wie Abbildung 2-6, jedoch für 2010 und 2011.
Figure 2-8: As Figure 2-6, except for 2010 and 2011.

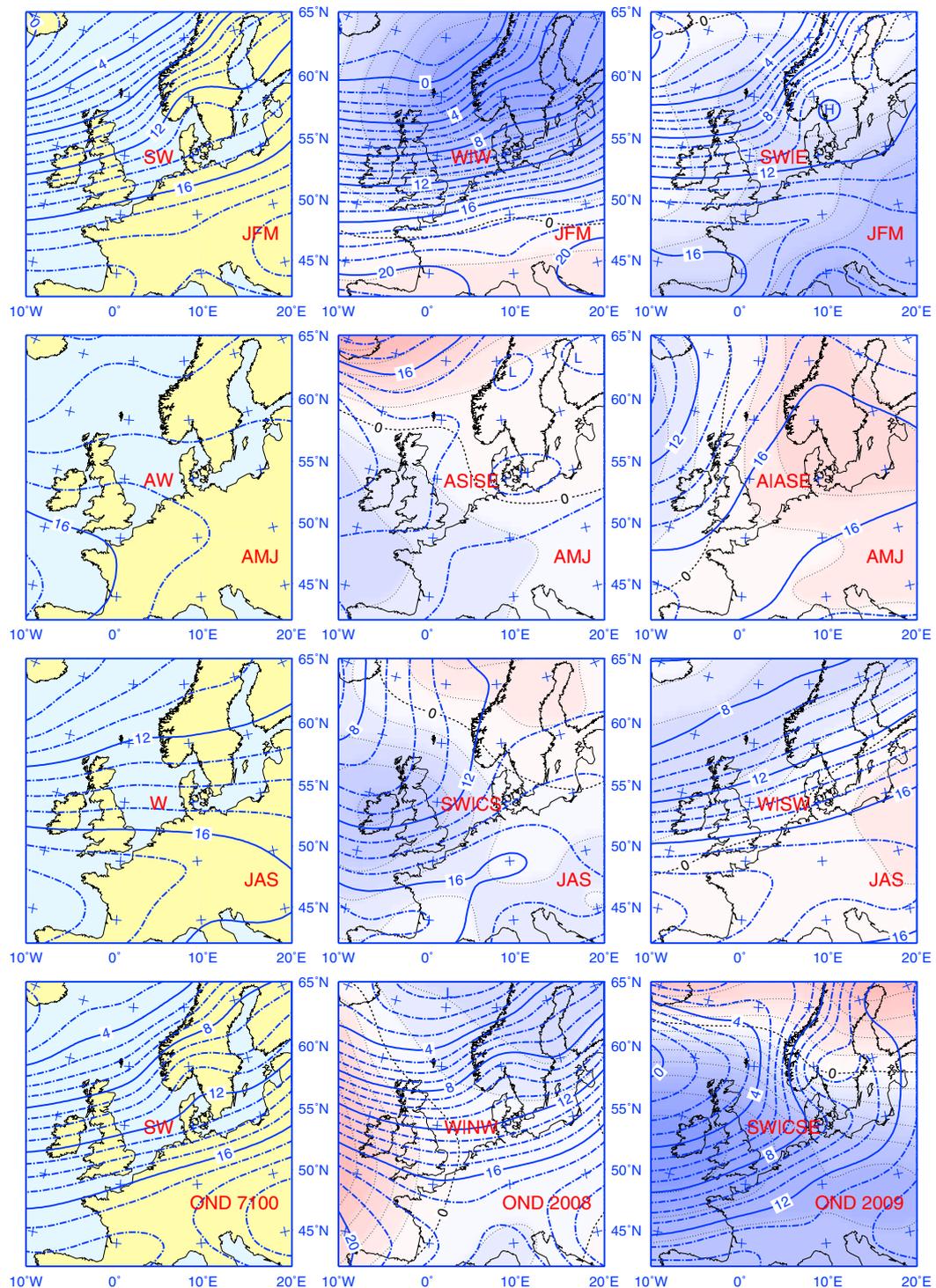


Abbildung 2-9: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (SLP, hPa). Links: NCEP/NCAR Klimatologie (1971–2000). Mitte: 2008, SLP & SLP Anomalien (farbig, Konturintervall 1 hPa). Rechts: 2009, ... Rot: Verteilungstyp (SLP bzw. SLP/SLPA) sowie Jahreszeit (JFM, AMJ, ... = Winter, Frühling ...).

Figure 2-9: Seasonal sea level pressure distributions (SLP, hPa). Left: NCEP/NCAR climatology (1971–2000). Middle: 2008, SLP & SLP anomalies (colored, contour spacing 1 hPa). Right: 2009, ... Red: Distribution type (SLP or SLP/SLPA) and season (JFM, AMJ, ... = winter, spring ...).

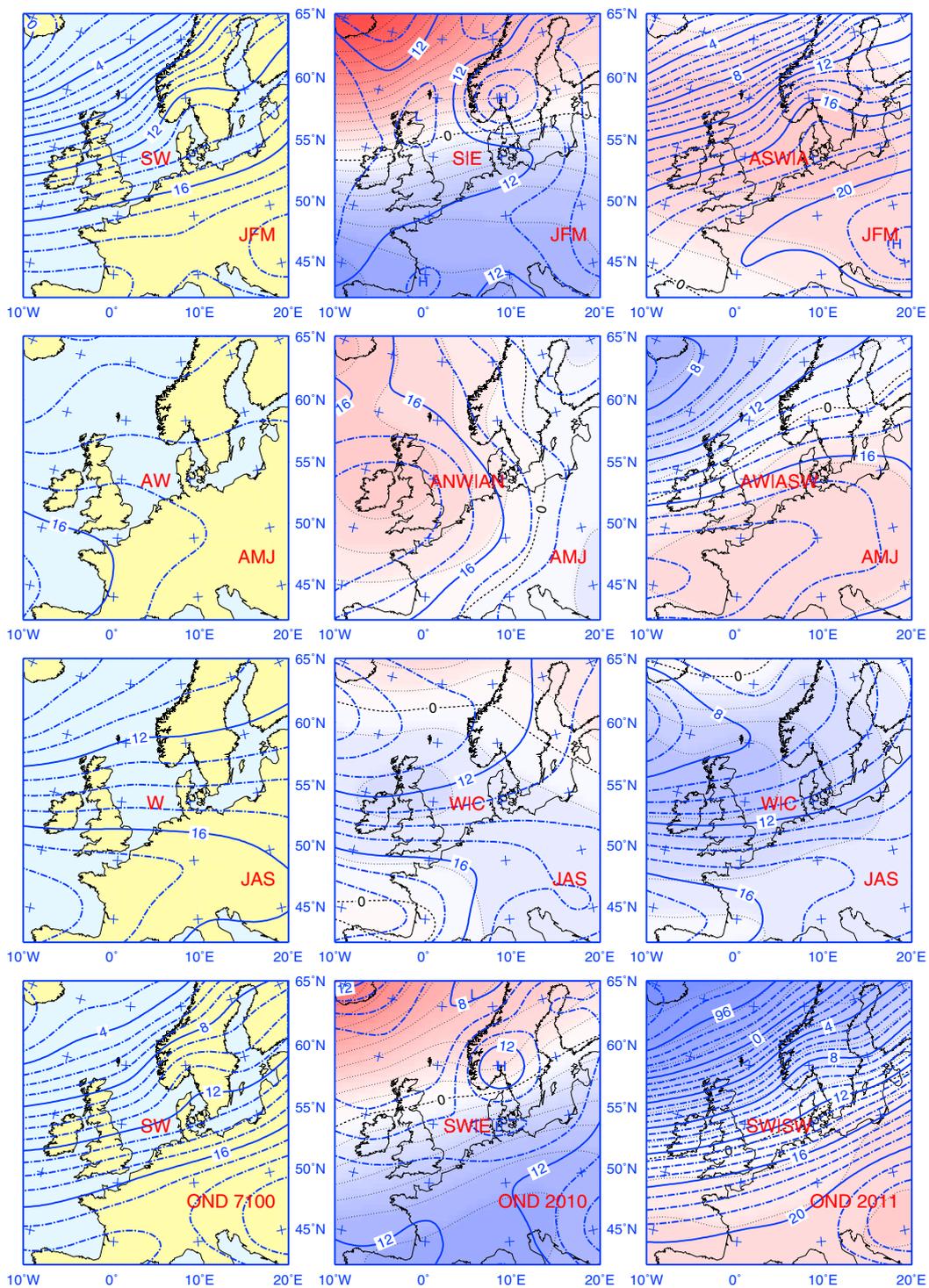


Abbildung 2-10: Abbildung 2-9, jedoch für 2010 und 2011.

Figure 2-10: As Figure 2-9, except for 2010 and 2011.

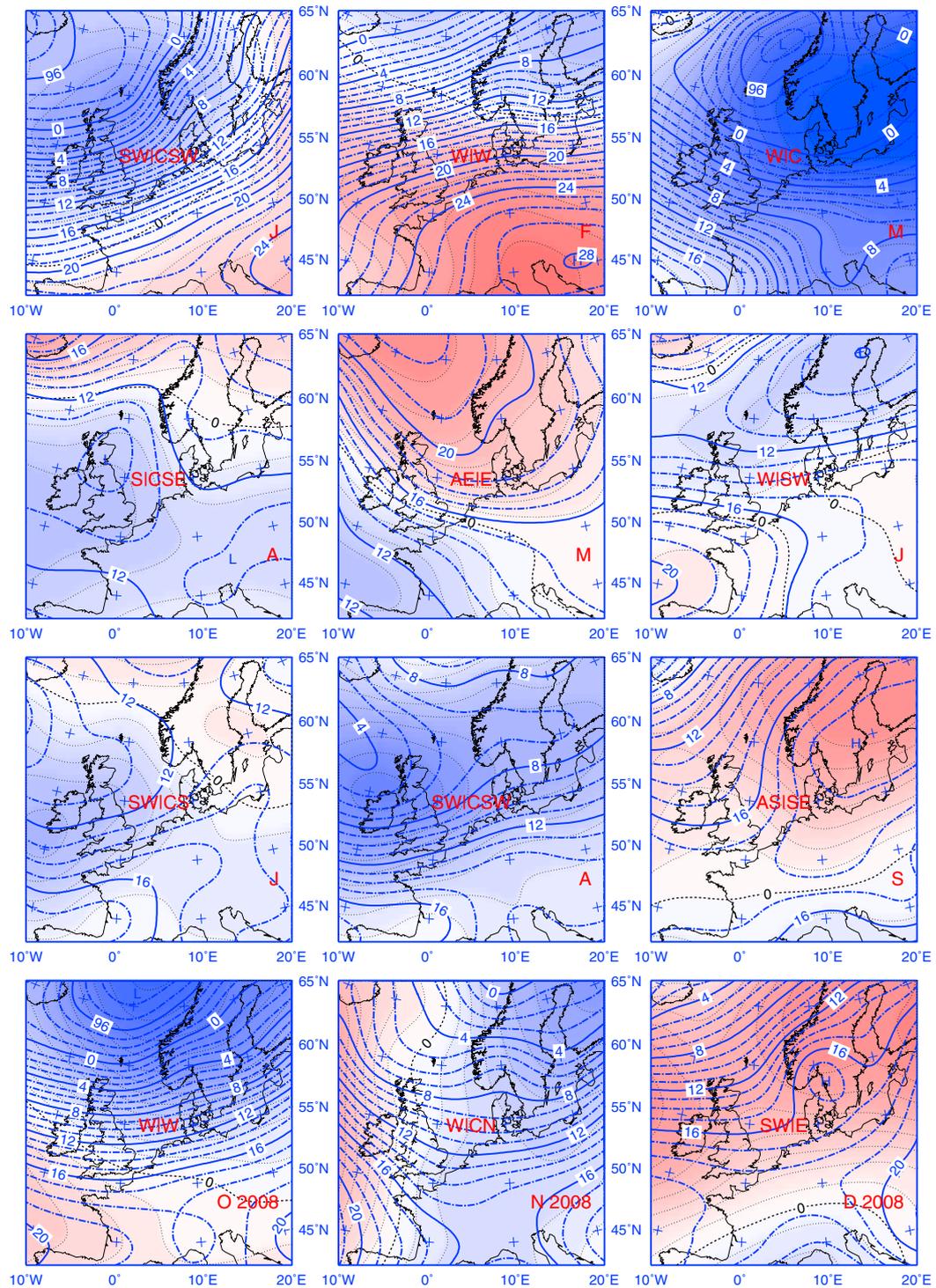


Abbildung 2-11: Monatliche Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (SLP, hPa) für das Jahr 2008 mit Abweichungen von der NCEP/NCAR Klimatologie des Zeitraums 1971–2000 (SLPA, farbig, Konturabstand 1 hPa). Rot: Verteilungstyp (SLP/SLPA) und Monat (J, F, ... = Jan., Feb., ...).

Figure 2-11: Monthly sea level pressure distributions (SLP, hPa) in 2008 together with departures from the NCEP/NCAR climatology for 1971–2000 (SLPA, colored, contour spacing 1 hPa). Red: Distribution type (SLP/SLPA) and month (J, F, ... = January, February ...).

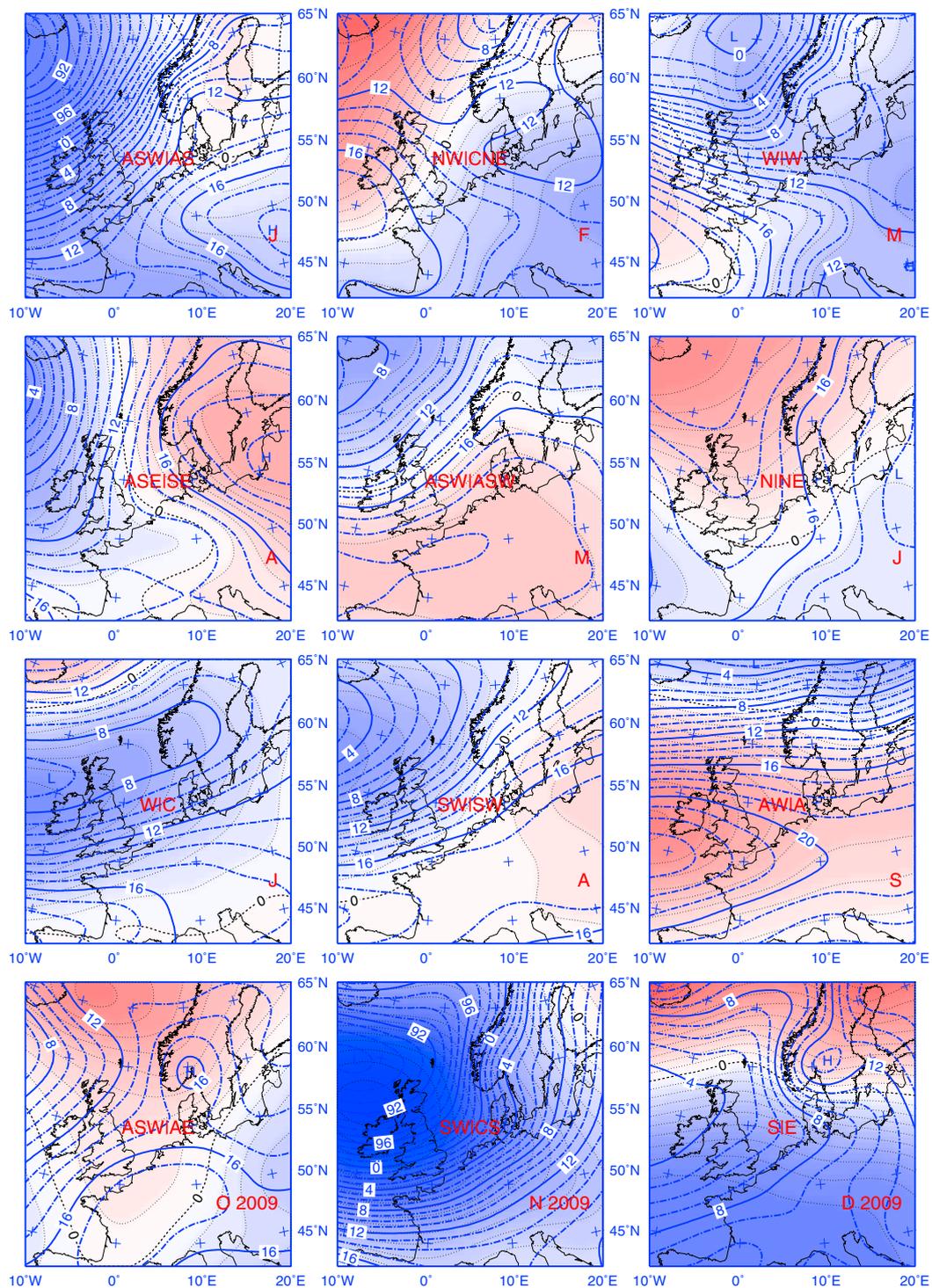


Abbildung 2-12: Wie Abbildung 2-11, jedoch für das Jahr 2009.

Figure 2-12: As Figure 2-11, except for 2009

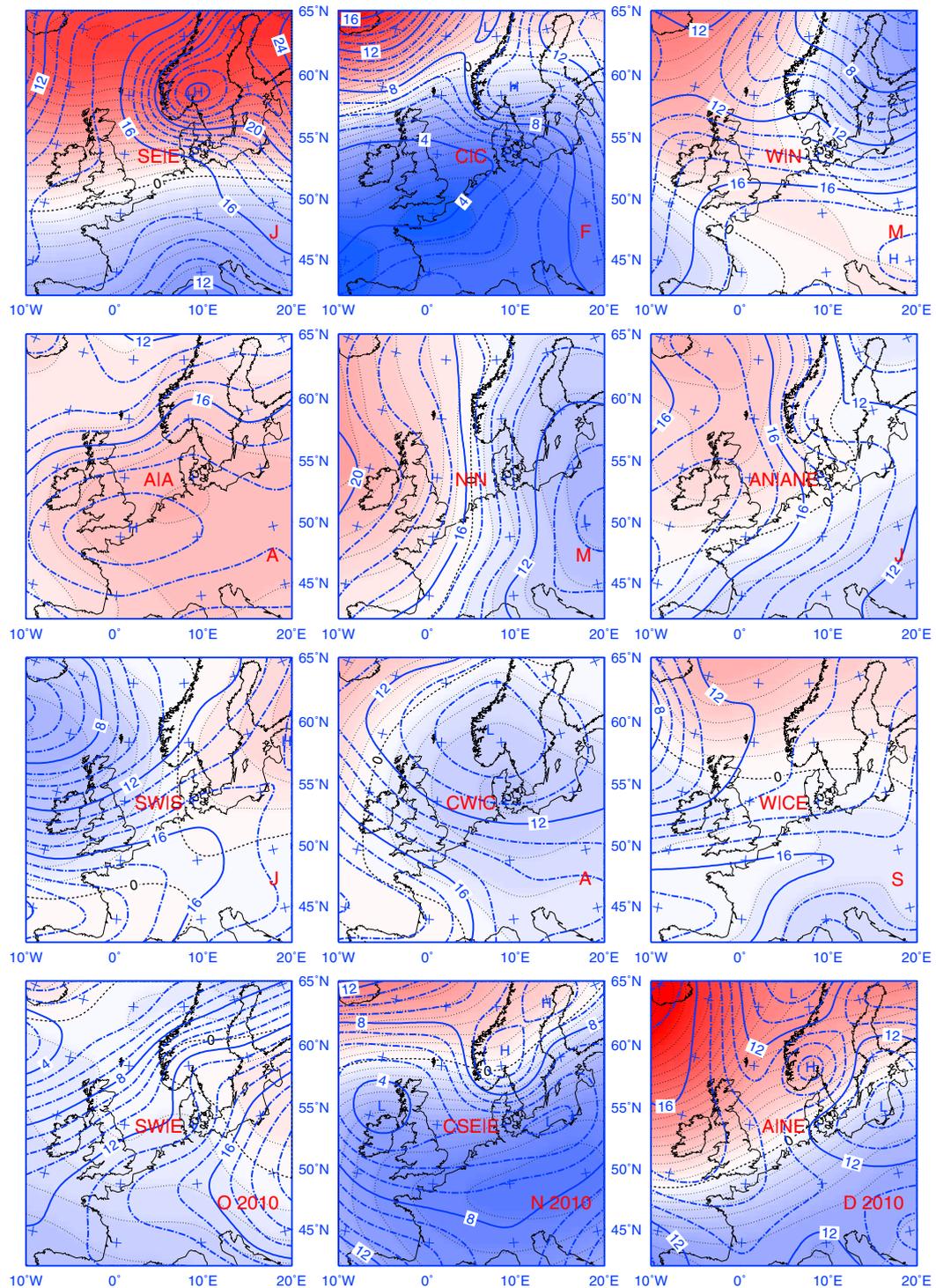


Abbildung 2-13: Wie Abbildung 2-11, jedoch für das Jahr 2010.

Figure 2-13: As Figure 2-11, except for 2010.

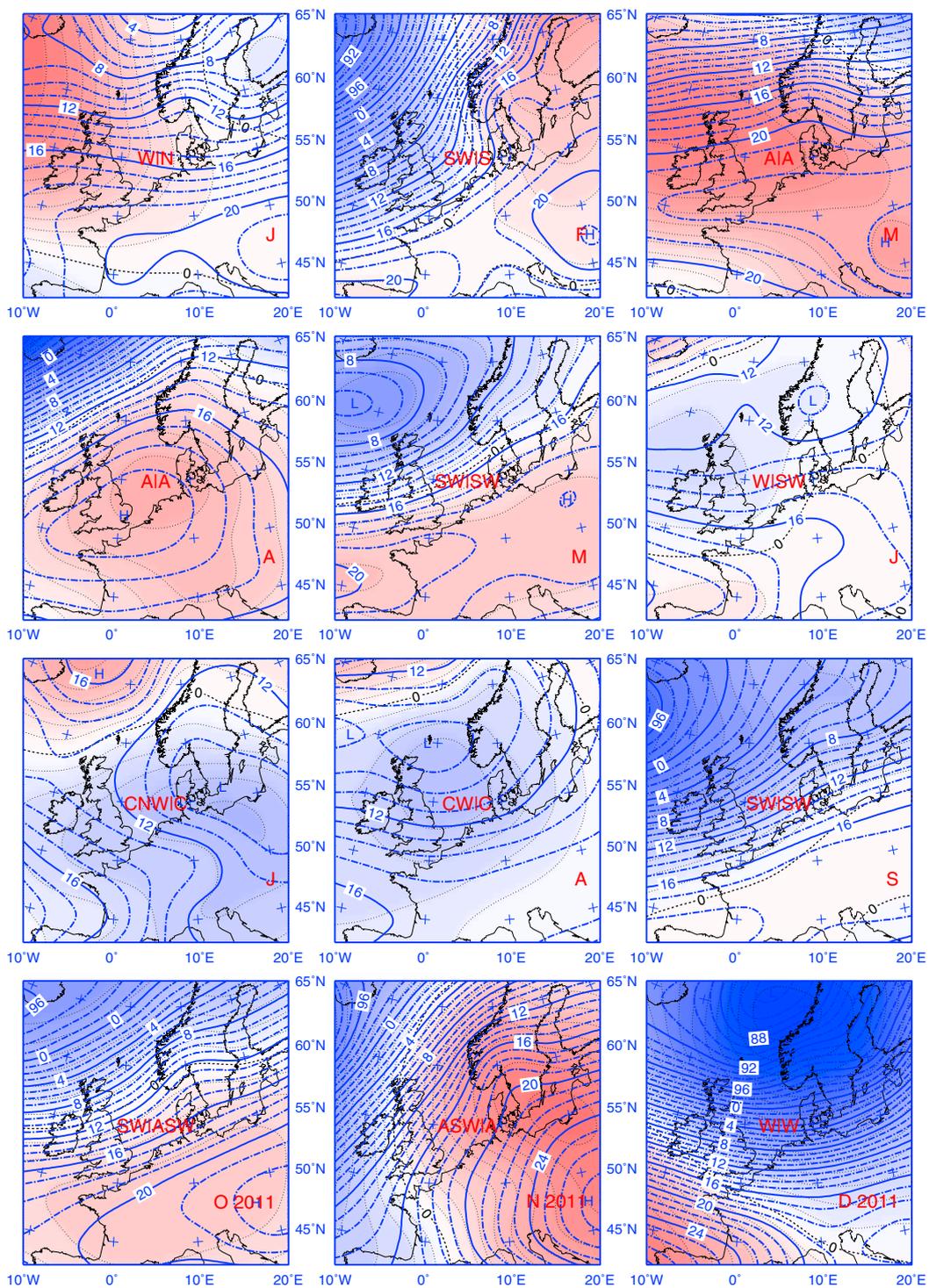


Abbildung 2-14: Wie Abbildung 2-11, jedoch für das Jahr 2011.
 Figure 2-14: As Figure 2-11, except for 2011.

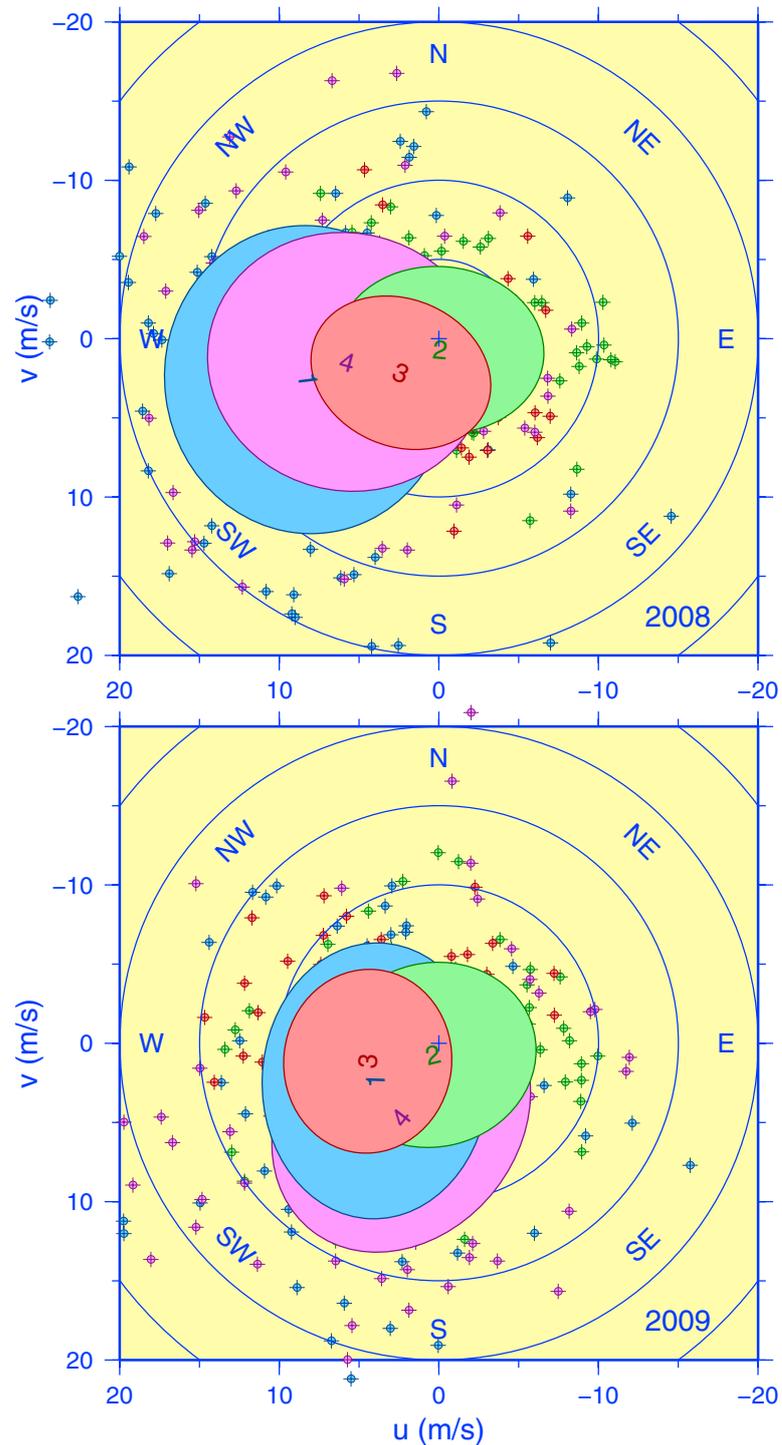


Abbildung 2-15: Saisonale 50 %-Wahrscheinlichkeitsellipsen des „Nordseewindes“ (1 = Winter = JFM, 2 = Frühling, etc.); oben: 2008, unten: 2009.

Figure 2-15: Seasonal 50% probability ellipses for the „North Sea Wind“ (1 = winter = JFM, 2 = spring, etc.); top: 2008, bottom: 2009.

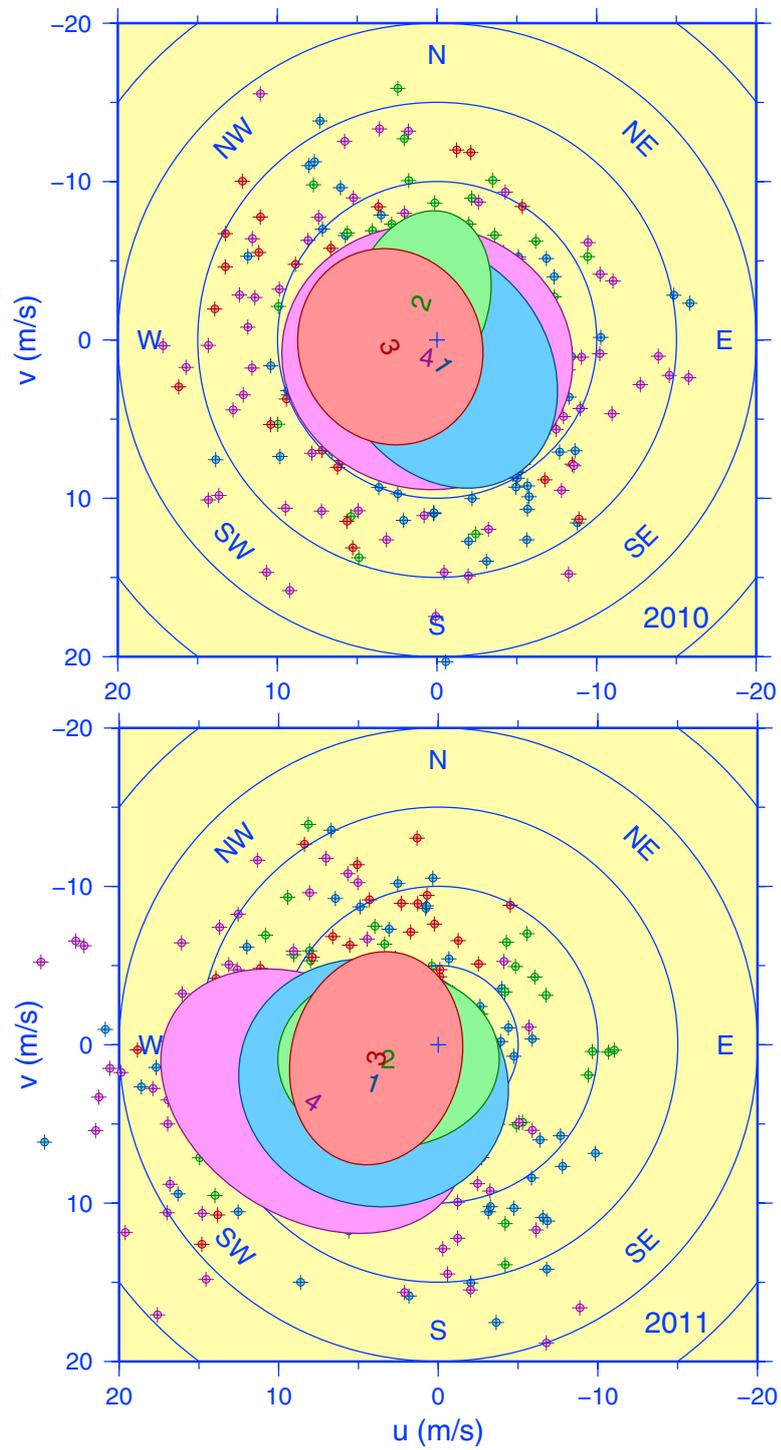


Abbildung 2-16: *Abbildung 2-15*, jedoch für die Jahre 2010 und 2011.
Figure 2-16: As Figure 2-15, except for 2010 and 2011.

Wind	u	s _u	v	s _v	V	Vdir	Vel	Pers	FE ₅₀
2008	4.1	7.2	1.7	6.2	4.4	247 WSW	9.1	49	193
JFM	8.2	7.6	2.6	8.3	8.6	253 WSW	12.9	67	273
AMJ	-0.1	5.5	0.7	4.5	0.7	173 S	6.5	11	108
JAS	2.4	4.8	2.2	4.1	3.2	228 SW	6.5	50	85
OND	5.7	7.4	1.5	6.9	5.9	256 WSW	10.5	56	224
2009	2.8	6.0	2.2	6.4	3.6	231 SW	8.3	43	166
JFM	4.0	6.0	2.4	7.4	4.6	239 WSW	9.3	50	194
AMJ	0.4	5.5	0.7	5.0	0.8	207 SSW	6.6	12	119
JAS	4.5	4.5	1.1	4.9	4.6	256 WSW	7.4	62	96
OND	2.4	6.9	4.7	7.3	5.2	207 SSW	9.9	53	214
2010	1.0	5.9	0.2	6.2	1.1	260 W	7.6	14	159
JFM	-0.4	6.1	1.6	6.6	1.6	166 SSE	8.2	20	170
AMJ	1.0	3.7	-2.4	4.9	2.6	337 NNW	5.9	43	79
JAS	2.9	4.9	0.4	5.3	3.0	262 W	6.9	43	113
OND	0.6	7.7	1.1	7.1	1.3	208 SSW	9.4	13	238
2011	4.7	6.8	1.9	6.2	5.1	248 WSW	9.2	55	183
JFM	4.1	7.2	2.4	6.7	4.7	239 WSW	9.6	49	208
AMJ	3.1	5.9	0.9	4.8	3.3	254 WSW	7.3	45	122
JAS	3.9	4.6	0.9	5.7	4.0	258 WSW	7.3	54	114
OND	7.8	8.1	3.6	7.1	8.6	245 WSW	12.7	68	239

Tabelle 2-21: Nordseewind. Saisonal- und Jahresstatistiken: Mittelwerte und Standardabweichungen (m/s) für zonale (u , s_u) und meridionale (v , s_v) Windkomponenten, Vektorwind und -richtung (V , $Vdir$), skalarer Wind (Vel), Persistenz (V/Vel in %) und „Fläche“ der 50 %-Wahrscheinlichkeitsellipse ($FE_{50} = 1.3863 \pi s_a s_b$ in J/kg). Den Richtungsbezeichnungen liegen ein 16-Punkt Kompass bzw. Intervalle von 22.5° zugrunde; die Richtungsklassifizierung der saisonalen Luftdruckfelder (z. B. *Abbildung 2-9*) beruht zwar auf numerisch identischen Daten, aber einem 8-Punkte-Kompass.

*Table 2-21: North Sea Wind. Seasonal and annual statistics: Means and standard deviations (m/s) for zonal (u , s_u) and meridional wind components (v , s_v), vector wind and direction (V , $Vdir$), velocity (Vel), persistence (V/Vel in %), and „area“ of 50 %-probability ellipse ($FE_{50} = 1.3863 \pi s_a s_b$ in J/kg). Directional terms are based on a 16 point compass; directional classification of seasonal SLP fields (e. g. *Figure 2-9*) employs identical numerical data, but an 8 point compass, only.*

Wind	2008: Vdir	V	Vel	Pers	2009: Vdir	V	Vel	Pers
Jan	237 WSW	11.0	14.9	74	215 SW	8.1	11.6	70
Feb	254 WSW	9.3	11.9	79	296 WNW	2.1	7.5	28
Mar	276 W	6.5	11.8	55	258 WSW	5.3	8.5	63
Apr	170 S	2.0	7.3	28	156 SSE	3.1	5.9	52
May	96 E	3.8	5.7	67	232 SW	3.2	7.7	42
Jun	275 W	4.0	6.5	61	5 N	2.7	6.0	45
Jul	237 WSW	2.6	6.0	43	255 WSW	4.7	6.5	72
Aug	244 WSW	4.8	6.8	70	234 SW	5.4	7.4	73
Sep	192 SSW	3.0	6.6	46	283 WNW	4.6	8.4	55
Oct	257 WSW	9.5	11.3	84	227 SW	2.6	8.8	29
Nov	270 W	5.2	11.5	45	216 SW	10.0	12.7	79
Dec	231 SW	3.5	8.8	40	173 S	4.3	8.3	51
Wind	2010: Vdir	V	Vel	Pers	2011: Vdir	V	Vel	Pers
Jan	129 SE	4.1	9.1	45	267 W	5.3	9.3	57
Feb	137 SE	3.3	7.0	47	209 SSW	7.5	12.5	60
Mar	272 W	4.1	8.4	48	255 WSW	3.3	7.3	45
Apr	256 WSW	2.3	6.9	33	272 W	1.9	7.6	25
May	0 N	4.3	5.8	75	241 WSW	5.1	8.7	58
Jun	346 NNW	3.3	5.0	67	265 W	3.0	5.5	55
Jul	242 WSW	3.9	6.1	64	325 NW	2.6	6.8	39
Aug	291 WNW	3.4	6.1	56	255 WSW	3.5	6.1	58
Sep	254 WSW	2.2	8.4	26	241 WSW	7.9	9.3	85
Oct	226 SW	3.9	10.4	37	239 WSW	7.7	12.0	65
Nov	152 SSE	1.9	10.0	19	210 SSW	7.0	10.9	64
Dec	11 N	1.0	7.9	12	267 W	13.2	15.1	88

Tabelle 2-22: Nordseewind. Monatsstatistik: Windrichtung, vektorielle (V) und skalare (Vel) Windgeschwindigkeit (m/s) und Persistenz (V/Vel in %). Die Ausführungen zur Richtungsbezeichnung in der Legende zu *Tabelle 2-21* gelten sinngemäß.

Table 2-22: North Sea Wind. Monthly statistics: Wind direction, vector (V) and scalar (Vel) wind speed (m/s) and persistence (V/Vel in %). The comment on directional terms given in the caption of Table 2-21 applies mutatis mutandis.

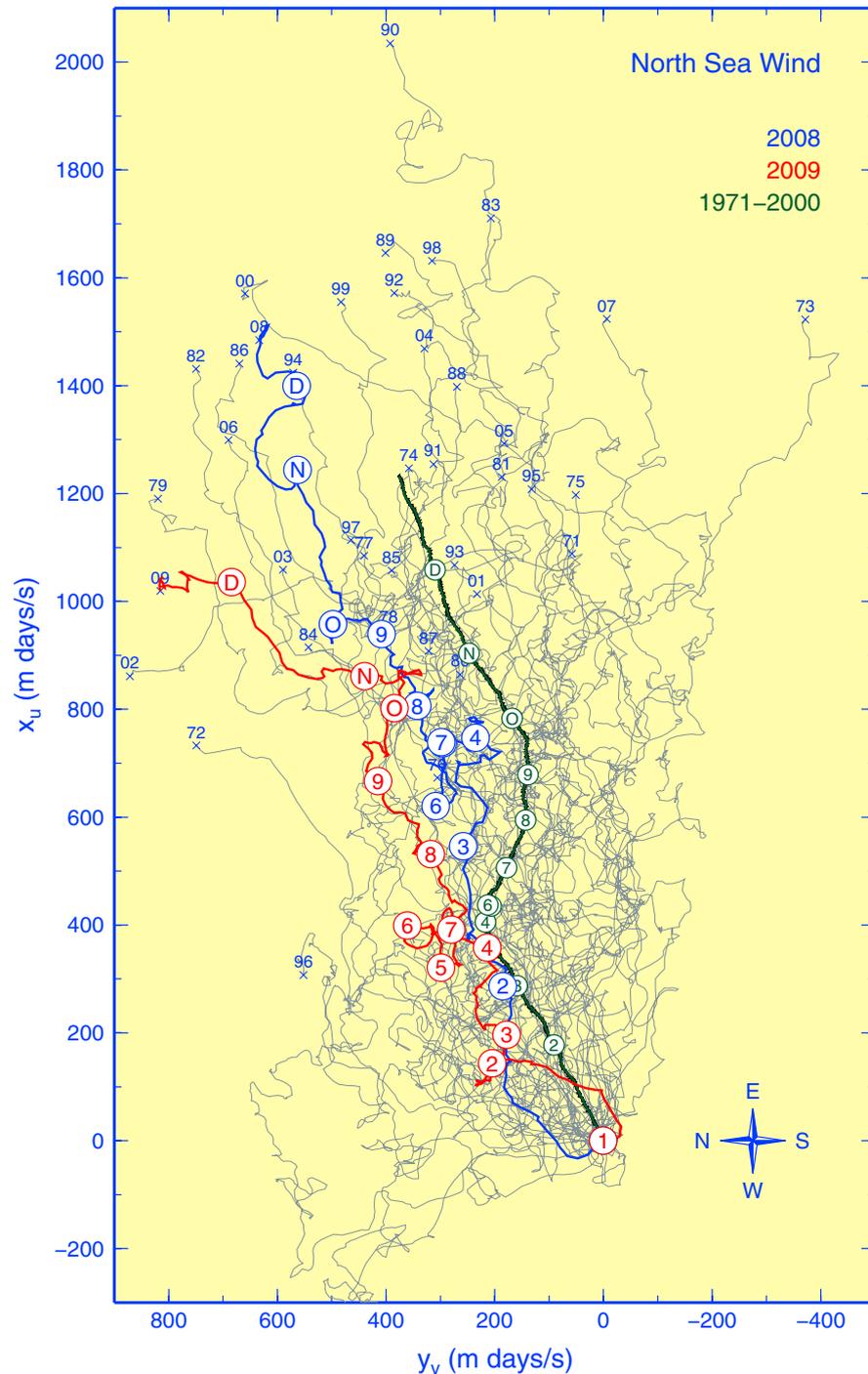


Abbildung 2-17: Virtuelle Trajektorien des „Nordseewindes“ mit Ensemble und Klimatologie. Zeitmarken kennzeichnen Monatsanfänge, Jahreszahlen die Endpunkte der Ensemblemitglieder. Alle Trajektorien starten bei $1=(0,0)$, ihr Verlauf ergibt sich durch Addition täglicher Windvektoren. Division der Trajektorienlänge und der geradlinigen Distanz zwischen 2 beliebigen Marken durch das zugehörige Zeitintervall in Tagen liefert die mittlere skalare bzw. vektorielle Windgeschwindigkeit für diesen Zeitraum in m/s.

Figure 2-17: 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. All trajectories start at $1=(0,0)$, and proceed by adding consecutive, daily wind vectors. Dividing the along-path length of a trajectory and the linear distance between any two markers by the associated time interval in days yields the scalar wind velocity and the vectorial wind speed in m/s for that period.

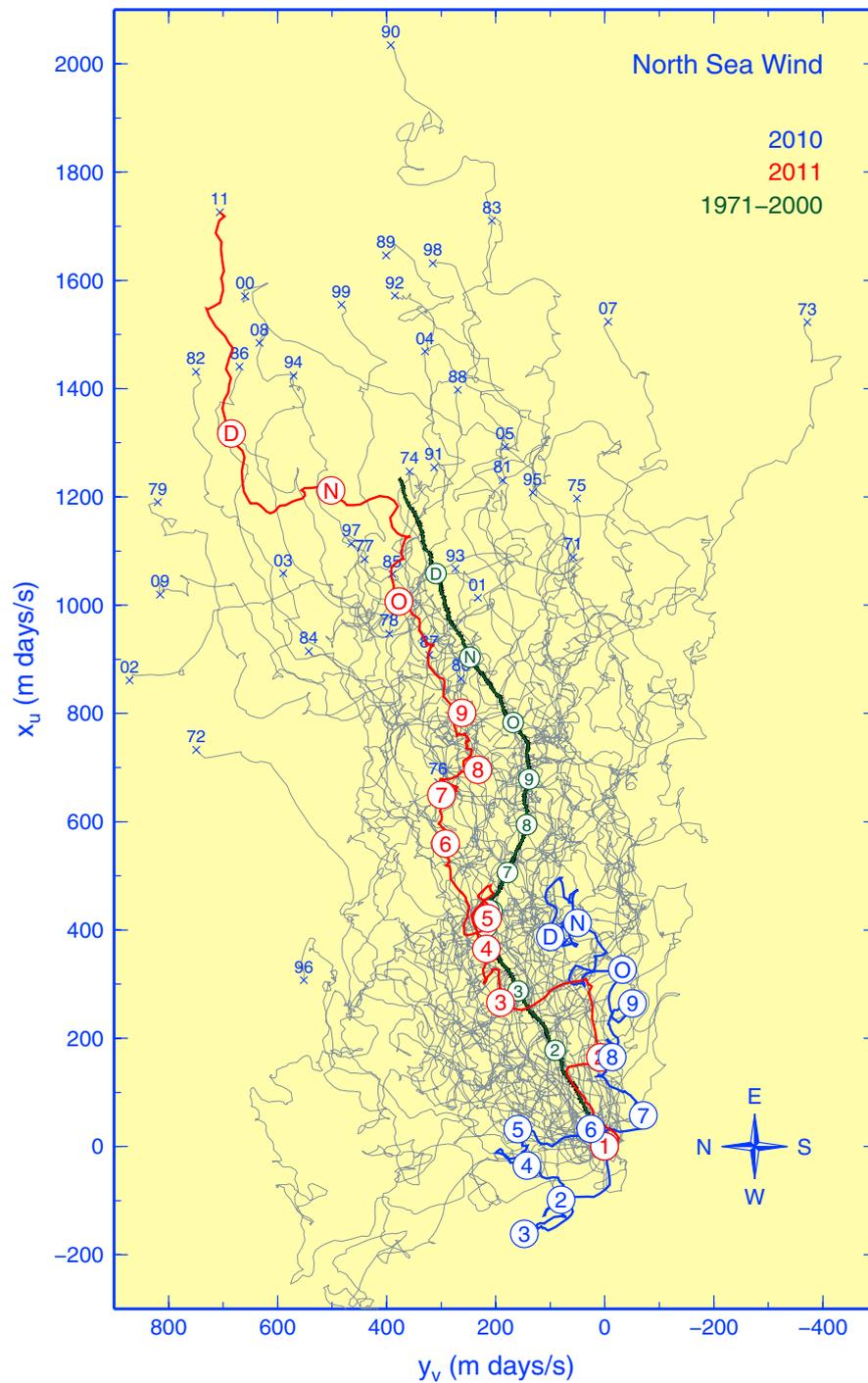


Abbildung 2-18: Wie Abbildung 2-17, jedoch für die Jahre 2010 und 2011.

Figure 2-18: As Figure 2-17, except for 2010 and 2011.

Year	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	OND	JFM	O2M	Sum
47/48	./.	./.	./.	./.	./.	./.	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	2	2 1	5
82/83				1	1	4 1	4	2 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
10/11					1			1					1	1	2	2
11/12					1	6	3						7	3	10	10
12/13			1			1	1						1	1	2	3

Tabelle 2-23: Anzahl der Tage mit starkem bzw. sehr starkem Sturm (SG|VSG).

Table 2-23: 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
10/11				2	2	2	3	5	1	2	1		6	9	15	18
11/12	1		3	4	6	10	8	4		2			20	12	32	38
12/13			2	1	1	9	5	3	5	2			11	13	24	28

Tabelle 2-24: Anzahl Sturmtage (G+SG+VSG).

Table 2-24: Total number of gale days (G+SG+VSG).

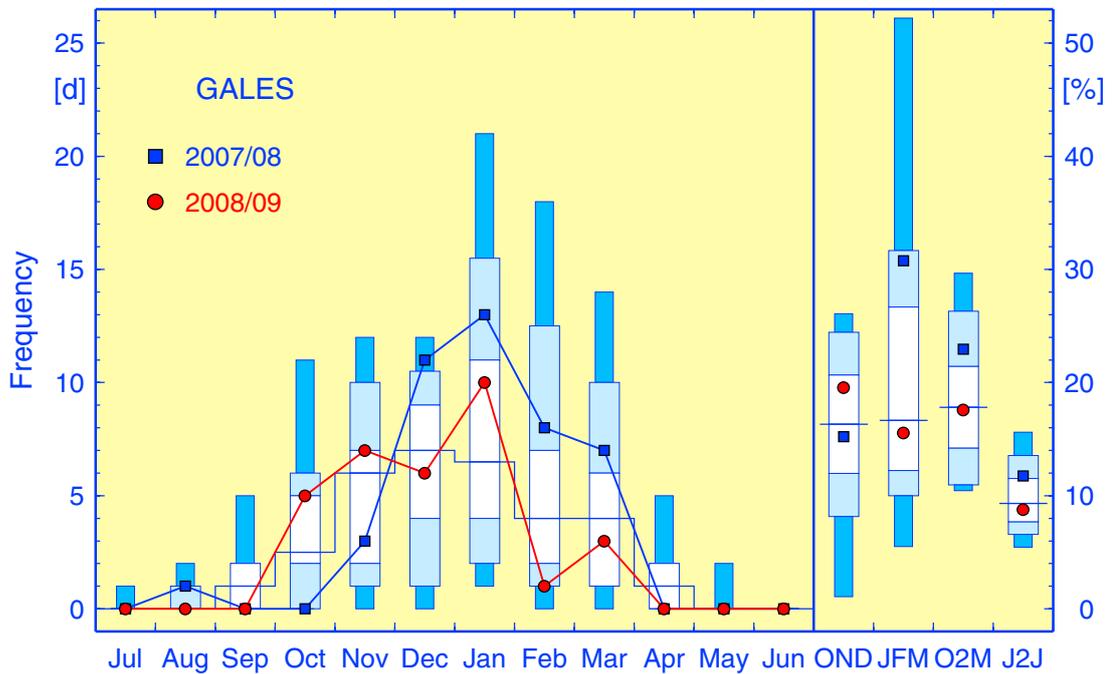


Abbildung 2-19: Sturmhäufigkeiten für 2007/08 (blau) und 2008/09 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971–2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppenlinie), 75 und 90 %.

Figure 2-19: Gale frequencies for 2007/08 (blue) and 2008/09 (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 %.

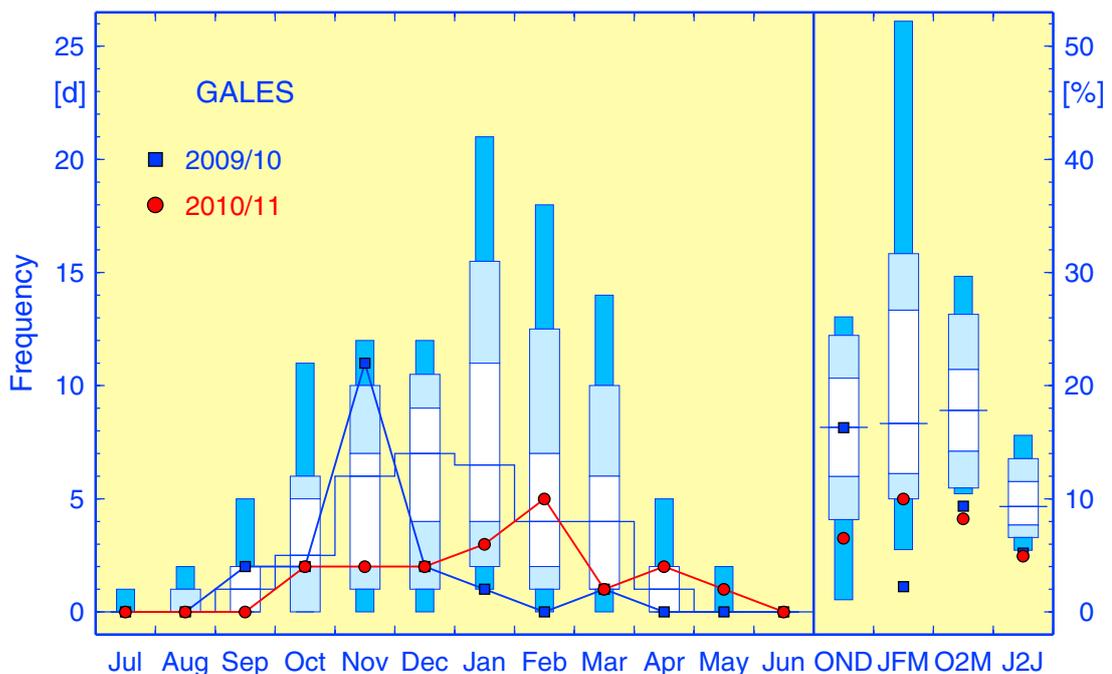


Abbildung 2-20: Wie Abbildung 2-19, jedoch für 2009/10 und 2010/11.

Figure 2-20: As Figure 2-19, except for 2009/10 and 2010/11.

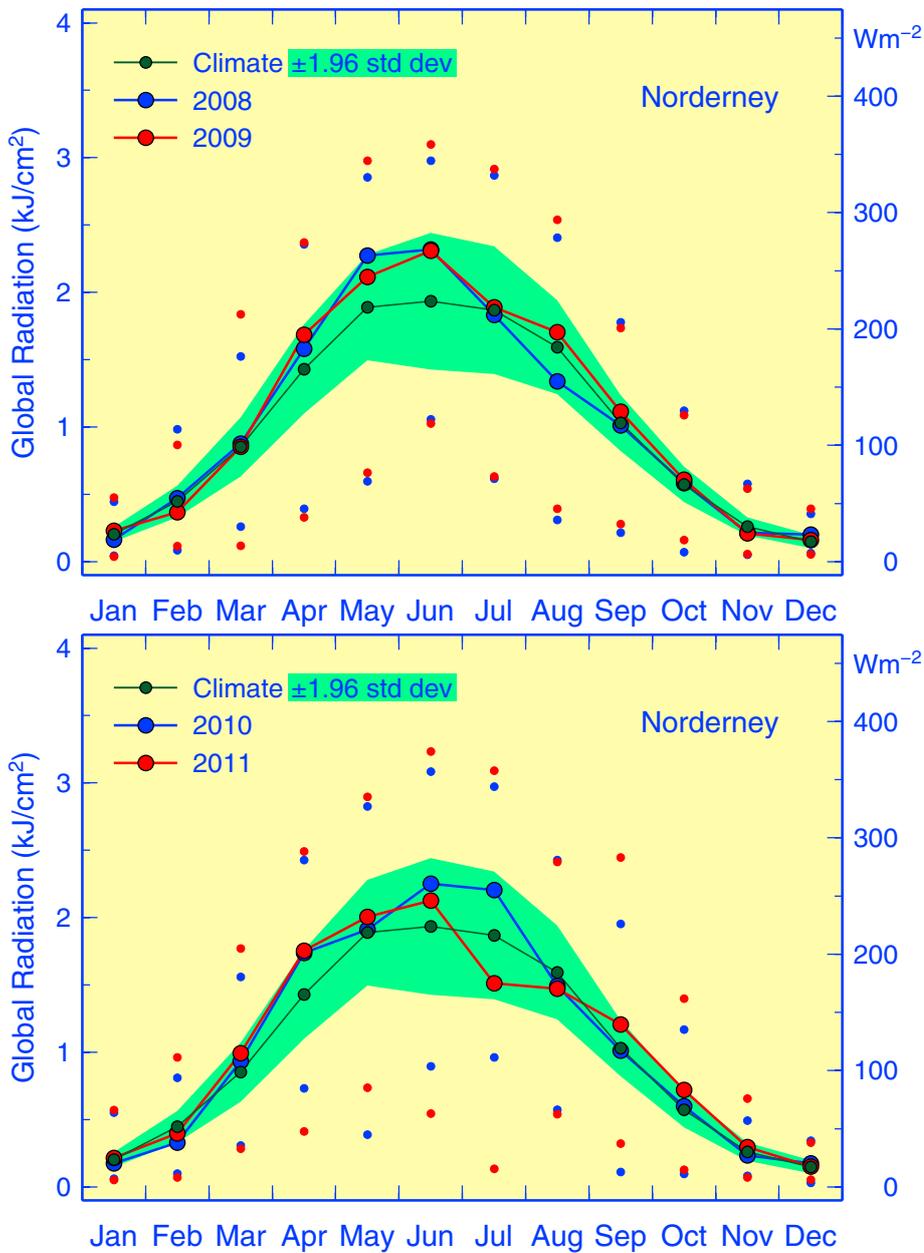


Abbildung 2-21: Jahresgänge der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971–2000) mit 95 %-Band (± 1.96 zwischenjährliche Standardabweichungen). 1 kJcm⁻² entspricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm⁻². Rohdaten: Deutscher Wetterdienst.

Figure 2-21: 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.

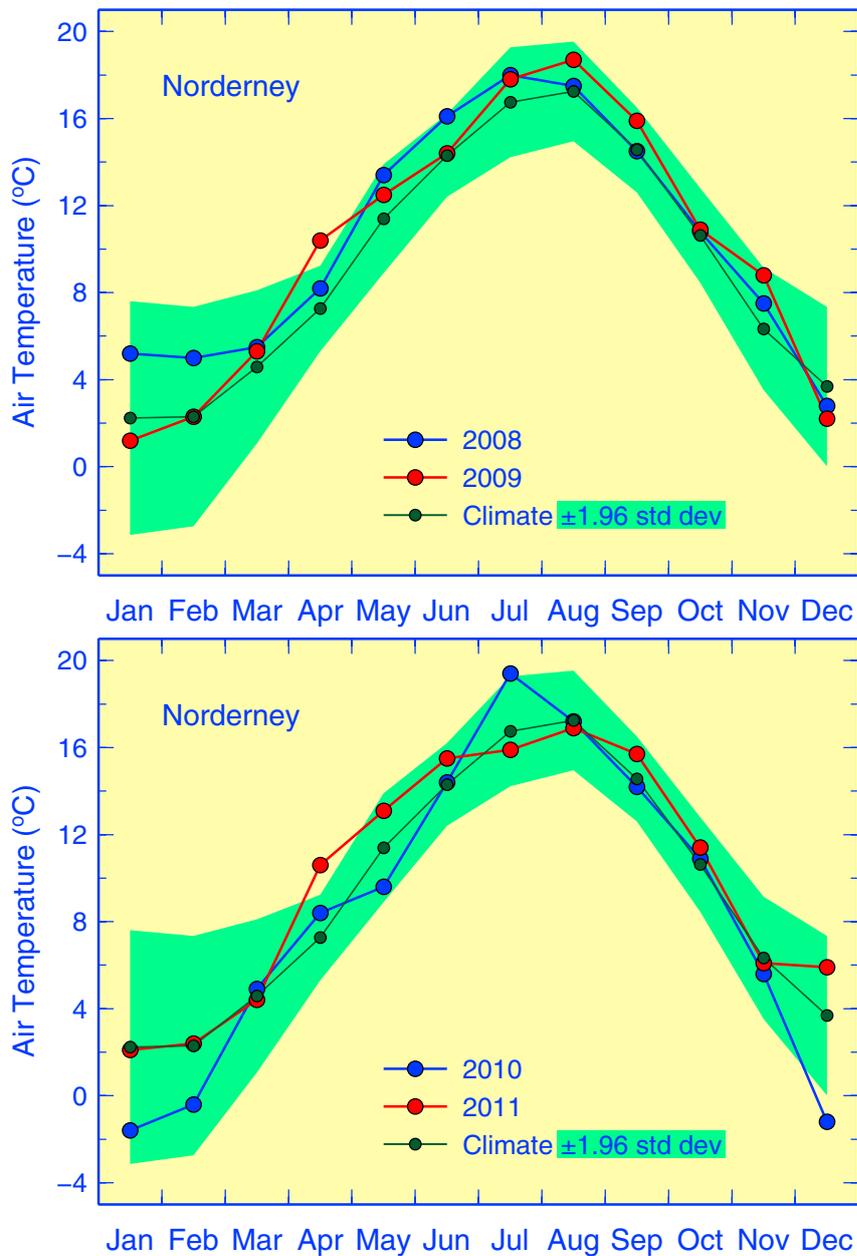


Abbildung 2-22: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney mit Klimatologie (1971–2000) und 95 %-Band (Klima ± 1.96 zwischenjährliche Standardabweichungen). Rohdaten: DWD.
Figure 2-22: Monthly near-surface air temperatures at Norderney with 1971–2000 base period means, and 95 %-band (climatology ± 1.96 std. deviations). Raw Data: Deutscher Wetterdienst.

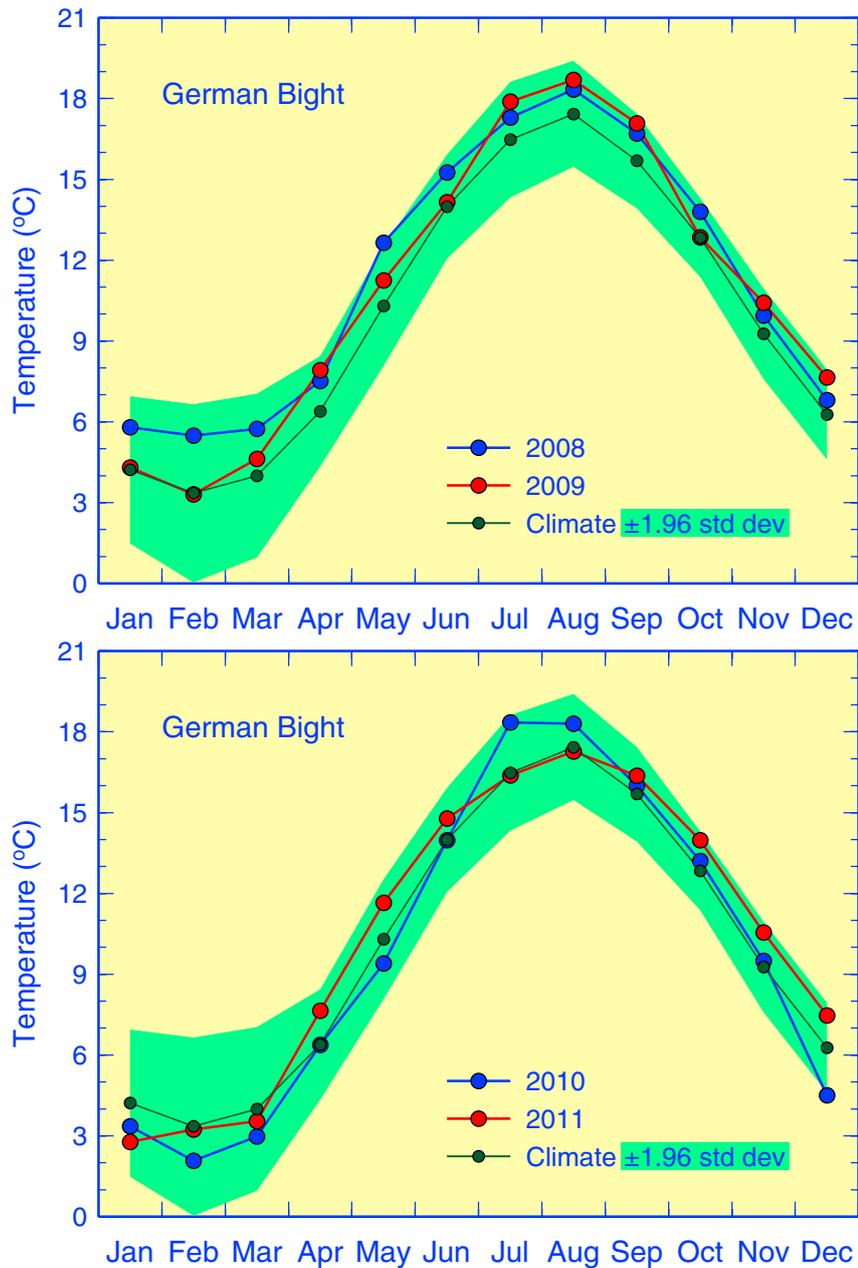


Abbildung 2-23: Jahresgänge für 2008 bis 2011 der über die Deutsche Bucht (Seegebiet S-lich 55.5° N und E-lich 6.5° E) gemittelten monatlichen Oberflächentemperaturen mit Klimatologie (1971–2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).

Figure 2-23: Seasonal cycles for 2008 through 2011 of areal mean monthly SST of the German Bight (area south of 55.5° N and east of 6.5° E) together with 1971–2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs.).

2.4 Literatur

Barnes, E. A., Revisiting the evidence linking Arctic Amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4734–4739, 2013.

Barriopedro, D., E. M. Fischer, J. Luterbacher, R. M. Trigo, R. García-Herrera, The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, 332, 220–224, 2011.

Barriopedro, D., R. García-Herrera, R. Huth, Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking, *JGR*, 113, D14118, 2008.

Cattiaux, J., R. Vautard, C. Cassou, P. Yiou, V. Masson-Delmotte, F. Codron, Winter 2010 in Europe: A cold extrem in a warming climate, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20704, 2010.

Feulner, G. und S. Rahmstorf, On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L05707, 2010.

Folland, C. K., J. Knight, H. W. Linderholm, D. Fereday, S. Ineson, J. W. Hurrell, The summer North Atlantic Oscillation: Past, present, and future, *J. Clim.*, 22, 1082–1103, 2009.

Francis, J. A. und S. J. Vavrus, Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06801, 2012.

Hurrell, J. & NCAR Staff (Eds.), The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-based), last modified 8 Oct 2013. Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based>.

Ineson, S., A. A. Scaife, J. R. Knight, J. C. Manners, N. J. Dunstone, L. J. Gray, J. D. Haigh, Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere, *Nature Geosci.*, 4, 753–757, 2011.

IPCC, Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, P. M. Midgley (Eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582pp, 2012.

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.

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.

Kintisch, E., Into the Maelstrom, *Science*, 344, 250–253, 2014.

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.

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

Loewe, P., 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 und Rostock, 2005.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht38/index.jsp

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., Atmosphärenphysik, 37–114 in: Loewe, P., H. Klein, S. Weigelt (Eds.), System Nordsee – 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen, *Berichte des BSH*, Nr. 49, 308pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2013.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht49/index.jsp

Russell, C. T., J. G. Luhmann, L. K. Jian, How unprecedented a solar minimum?, *Rev. Geophys.*, 48, 2010.

Screen, J. A. und I. Simmonds, Exploring links between Arctic Amplification and mid-latitude weather, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 959–964, 2013.

Schmelzer, N., J. Holfort, P. Loewe, Climatological ice atlas for the German Bight and Limfjord (1961–2010), *BSH-Nr. 2339*, ISBN 978-3-86987-660-3, 292pp, BSH, Hamburg und Rostock, 2015.

WMO, Weather extremes in a changing climate: Hindsight on foresight, WMO-No. 1075, 20pp., Genf, 2011.

http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1075_en.pdf

WMO, The global climate 2001–2010: A decade of climate extremes, WMO-No. 1103, 119pp, Genf, 2013.

http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1103_en.pdf

3 Meeresphysik



Salinity Sample Bottles (PL 2012)

3.1 Einführung	83
3.2 Strömung	84
3.2.1 Monatliche geographische Verteilungen	84
3.2.2 Wassertransporte	93
3.2.3 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht	95
3.3 Seegang	101
3.3.1 Saisonale Seegangsverteilungen in der Nordsee	101
3.3.2 Langzeitstatistik von einzelnen Positionen	106
3.4 Wasserstand	108
3.4.1 Einführung	108
3.4.2 Schwankungen des Meeresspiegels	108
3.4.3 Gezeiten	108
3.4.4 Mittlerer Meeresspiegel	109
3.4.5 Windstau statistiken und Häufigkeit von Sturmfluten	110

3.5	Temperatur	112
3.5.1	Einführung	112
3.5.2	Oberflächentemperatur	112
3.5.3	Temperaturschichtung	121
3.5.4	Meereis	130
3.6	Salzgehalt	134
3.6.1	Einführung	134
3.6.2	Salzgehaltsverteilungen	134
3.6.3	Abfluss Elbe und Salzgehalt bei Helgoland Reede	145
3.7	Literatur	148

3.1 Einführung

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 Vermessung und 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 2008 bis 2011 werden die Besonderheiten der wesentlichen ozeanographischen Zustandsvariablen wie Strömung, Temperatur und Salzgehalt dokumentiert und bewertet. Ferner werden Seegangs- und Meereisverhältnisse, aber auch integrale Zustandsgrößen wie Volumentransporte durch ausgewählte Querschnitte in der Nordsee und Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht behandelt, ebenso wie Wasserstandsschwankungen, Gezeiten, Windstau und Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste.

3.2 Strömung

F. Janssen, H. Klein und P. Loewe

3.2.1 Monatliche geographische Verteilungen

Die Oberflächenzirkulation der Nordsee in den Jahren 2008–2011 ist in den *Abbildungen 3-1* bis 3-8 monatsweise dargestellt. Durch die monatliche vektorielle Mittelung der mit dem BSH-cmod simulierten Strömungsfelder wurden periodische Gezeitenströme weitgehend eliminiert, so dass die Verteilungsmuster die durch Windantrieb und Dichteverhältnisse generierten Restströme zeigen. Der generelle Überblick über die Strömungssituation ist den *Abbildungen* zu entnehmen. In der folgenden Interpretation wird der Schwerpunkt auf einige wenige extreme Situationen gelegt.

Im Mai 2008 stellte sich – entgegen den üblichen Verhältnissen – eine ausgeprägte Nordsee-weite antizyklonale Zirkulation ein, die durch eine langanhaltende östliche atmosphärische Zirkulation hervorgerufen wurden.

Eine außergewöhnlich starke zyklonale Zirkulation im November, insbesondere in der südlichen Nordsee, verbunden mit einem starken Einstrom durch den Englischen Kanal, war das herausragende Ereignis in 2009. Dieses Ereignis spiegelt die extreme negative Luftdruck-anomalie mit einem Zentrum nordwestlich Irlands wieder, die für äußerst starke südwestliche Winde über der südlichen Nordsee sorgte.

Bereits im Dezember 2009 setzte eine deutliche Anomalie des Nordseeausstroms in der nördlichen Nordsee ein, die sich im Januar und Februar 2010 noch intensivierte und somit für eine besonders lange Ausstromphase sorgte.

In 2011 sind vor allem die dominante zyklonale Zirkulation im September und Dezember als Besonderheiten zu nennen.

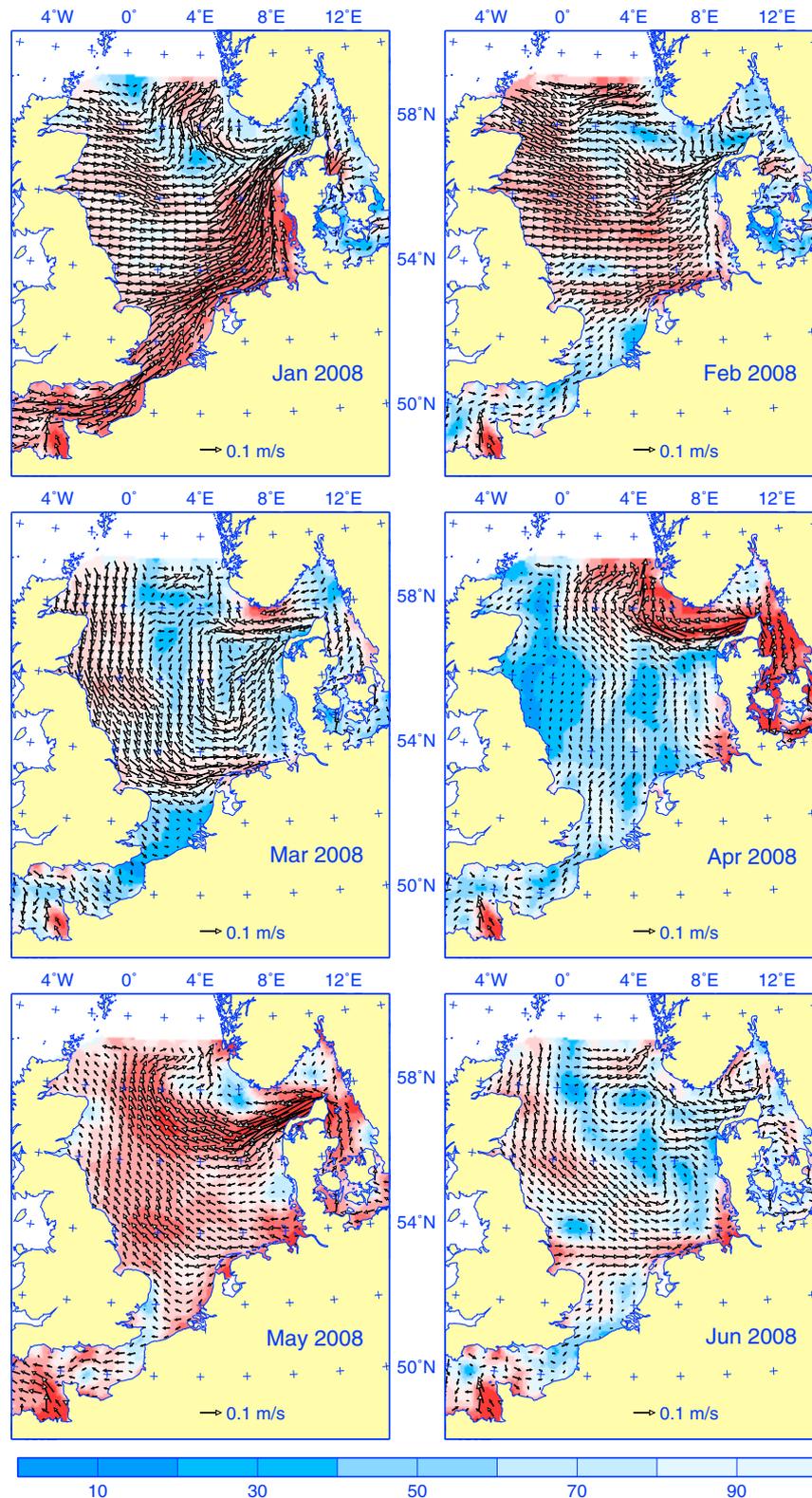


Abbildung 3-1: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2008. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-1: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1st half-year 2008. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

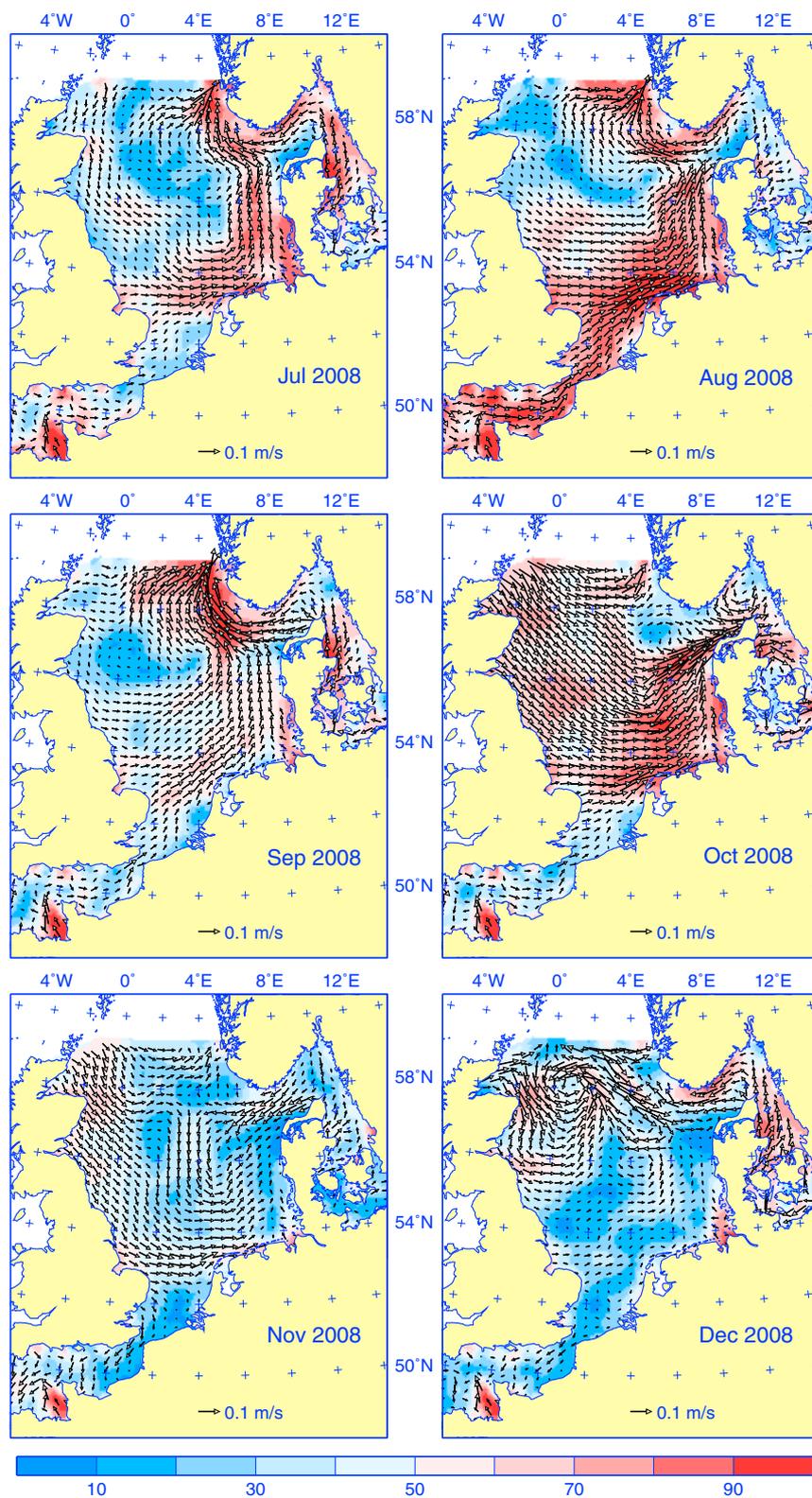


Abbildung 3-2: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2008. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-2: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2nd half-year 2008. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

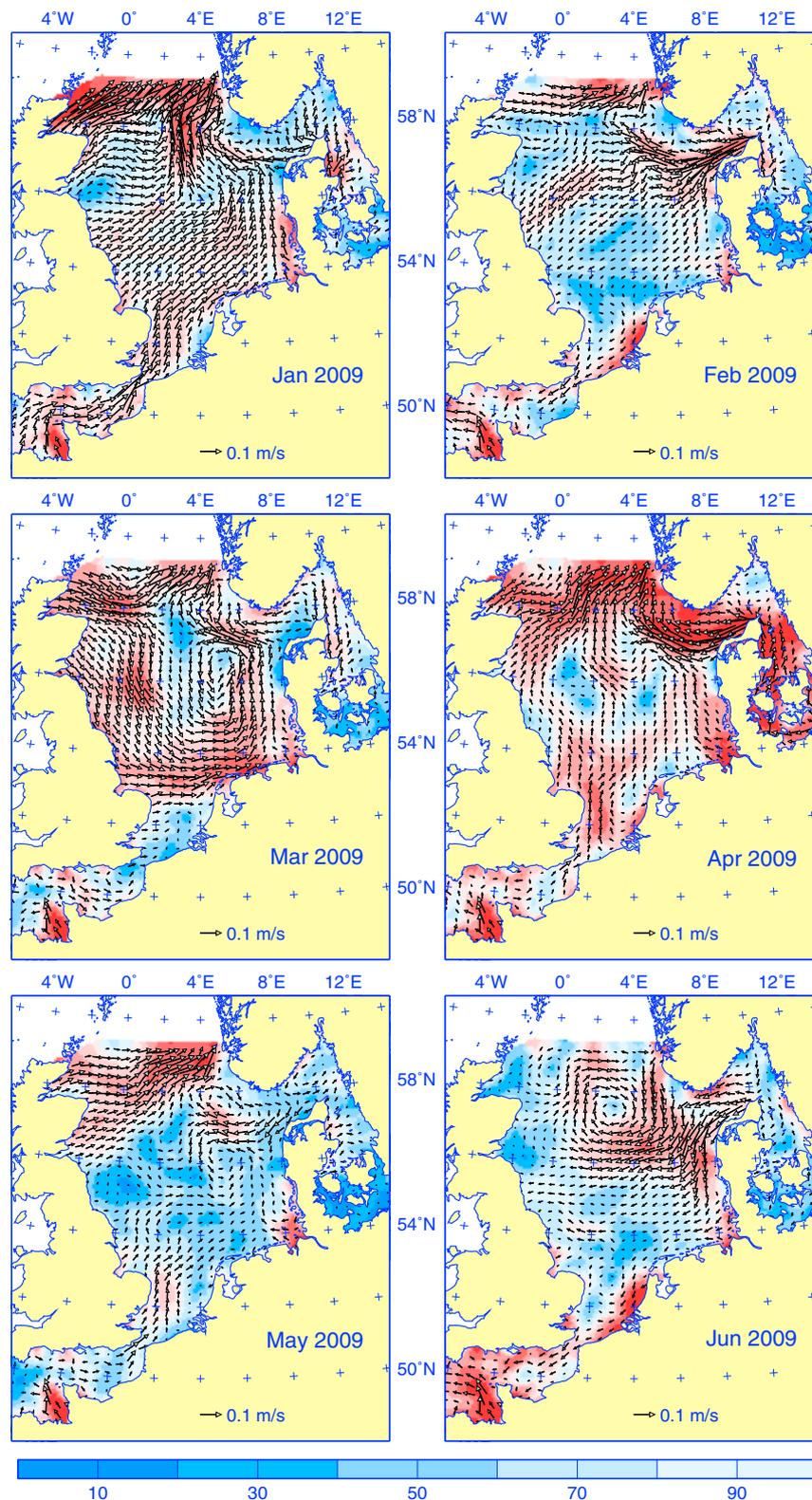


Abbildung 3-3: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2009. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-3: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1st half-year 2009. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

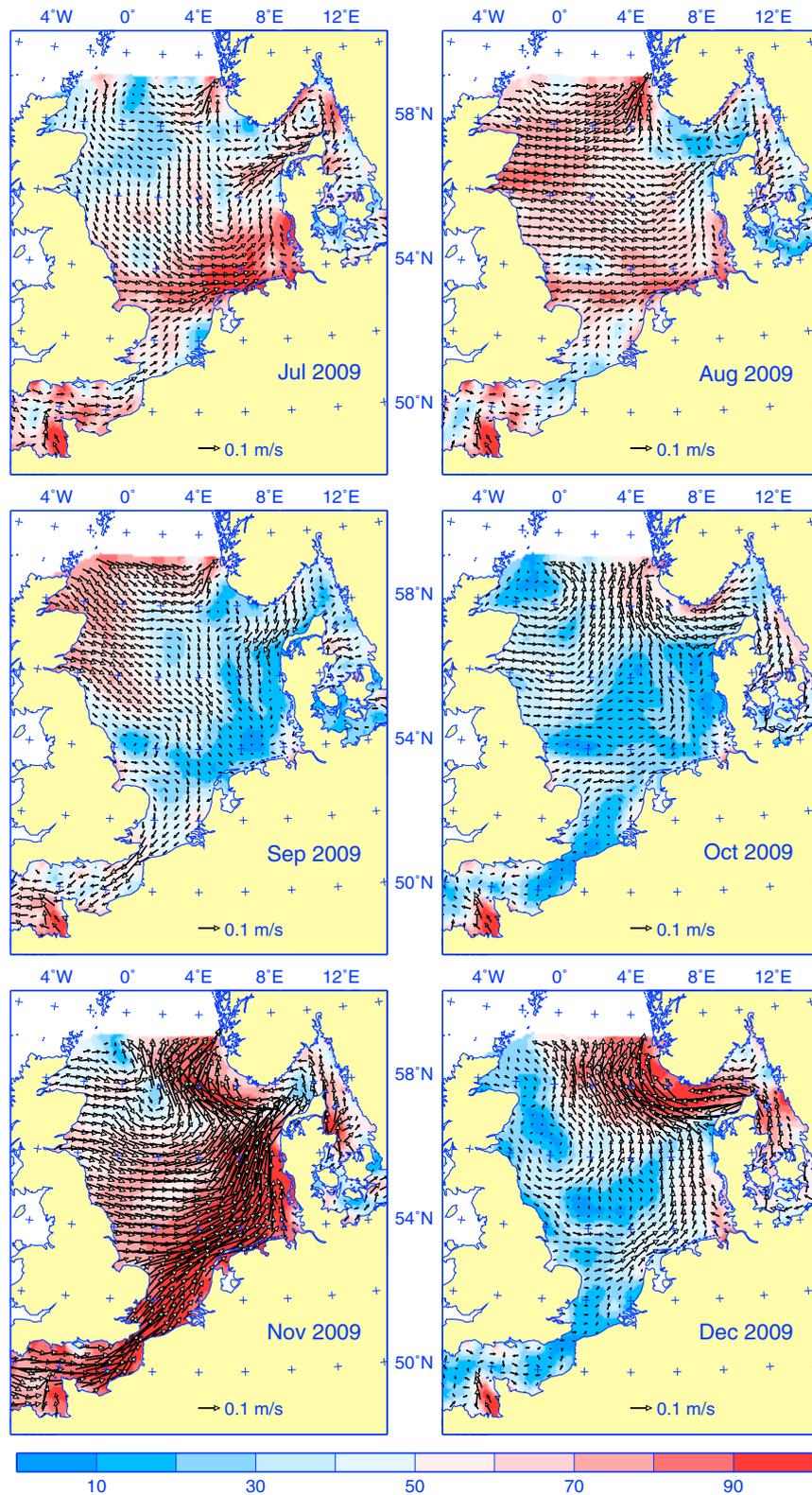


Abbildung 3-4: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2009. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-4: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2nd half-year 2009. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

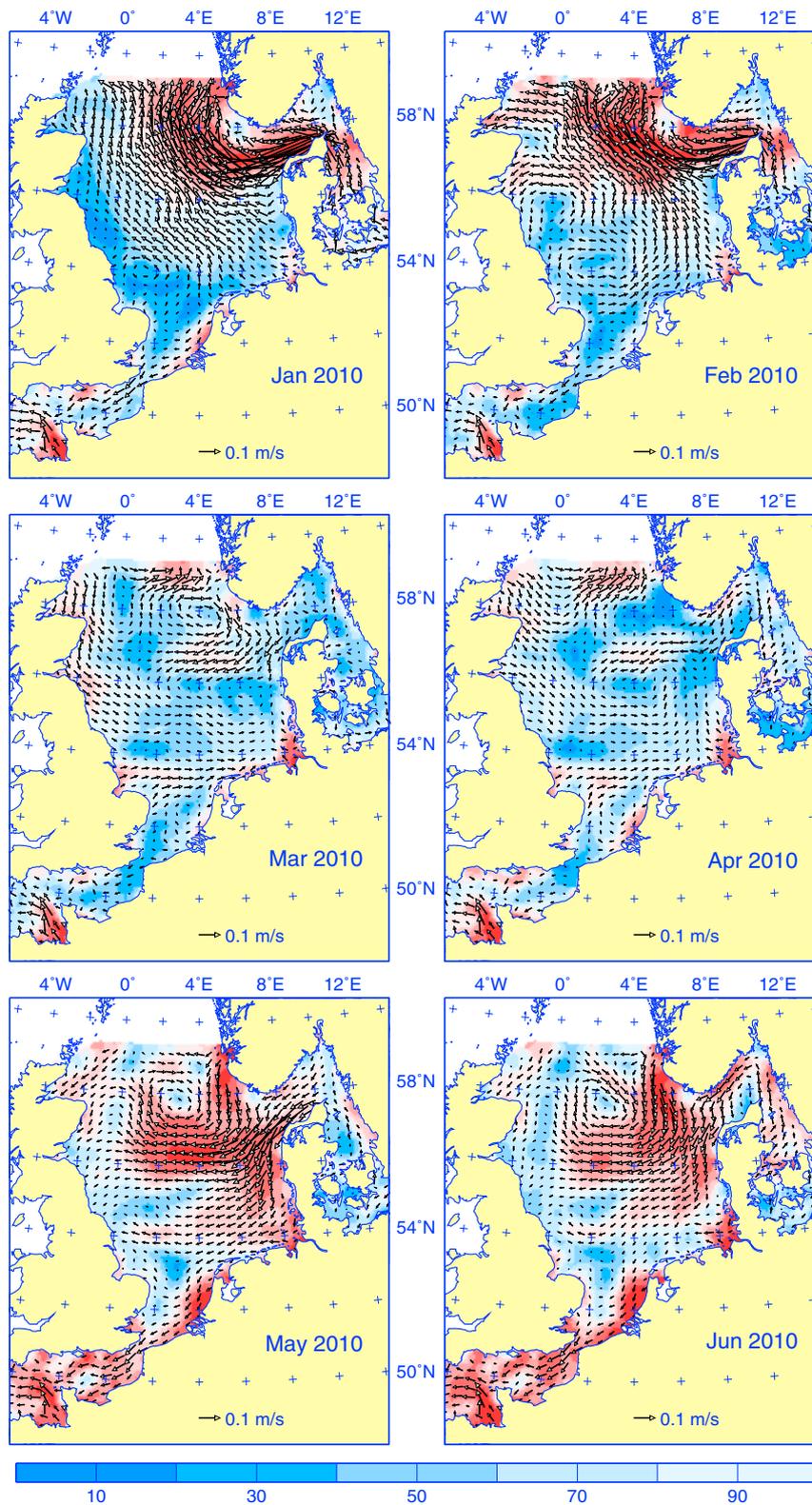


Abbildung 3-5: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2010. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-5: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1st half-year 2010. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

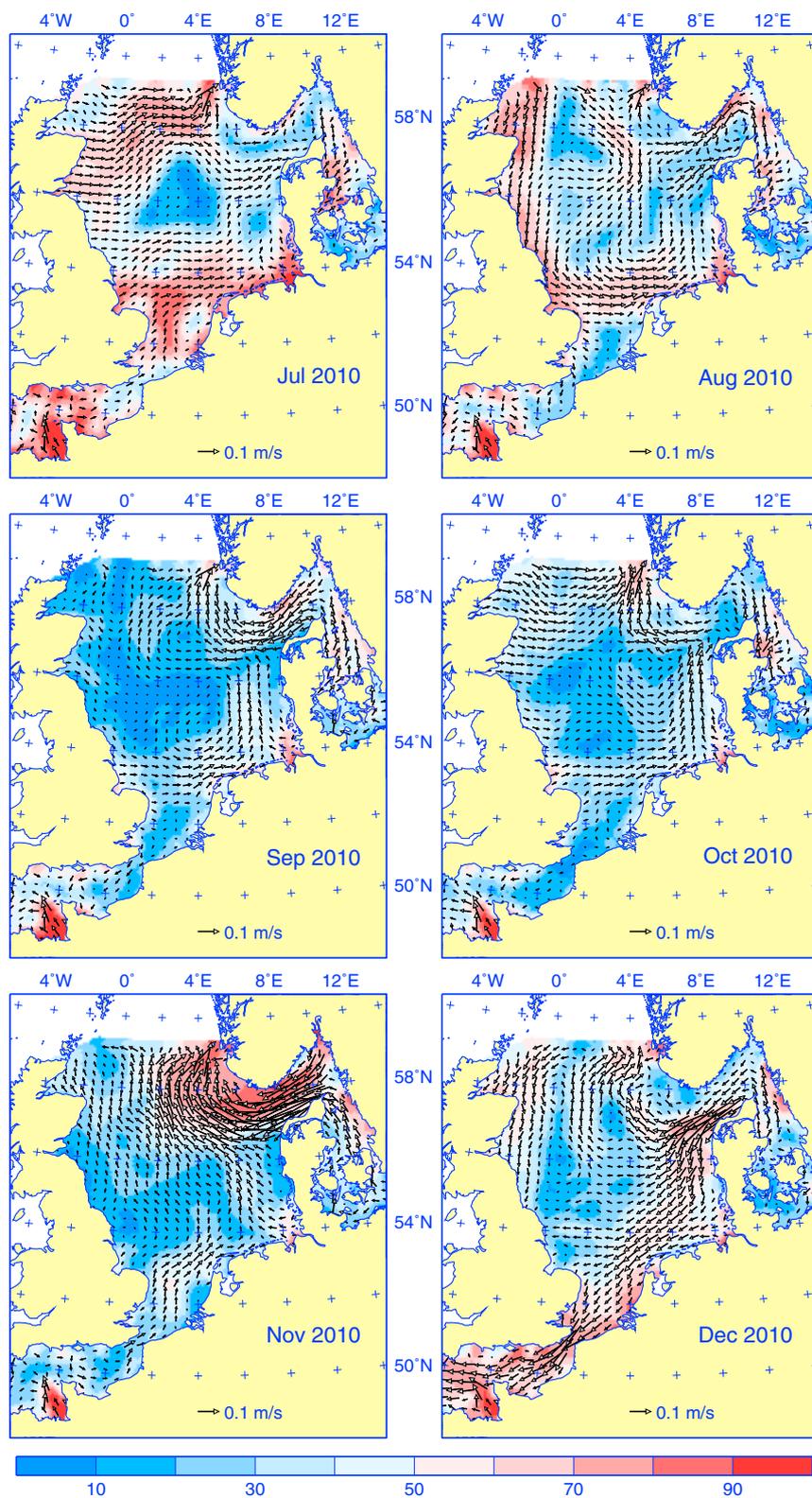


Abbildung 3-6: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2010. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-6: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2nd half-year 2010. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

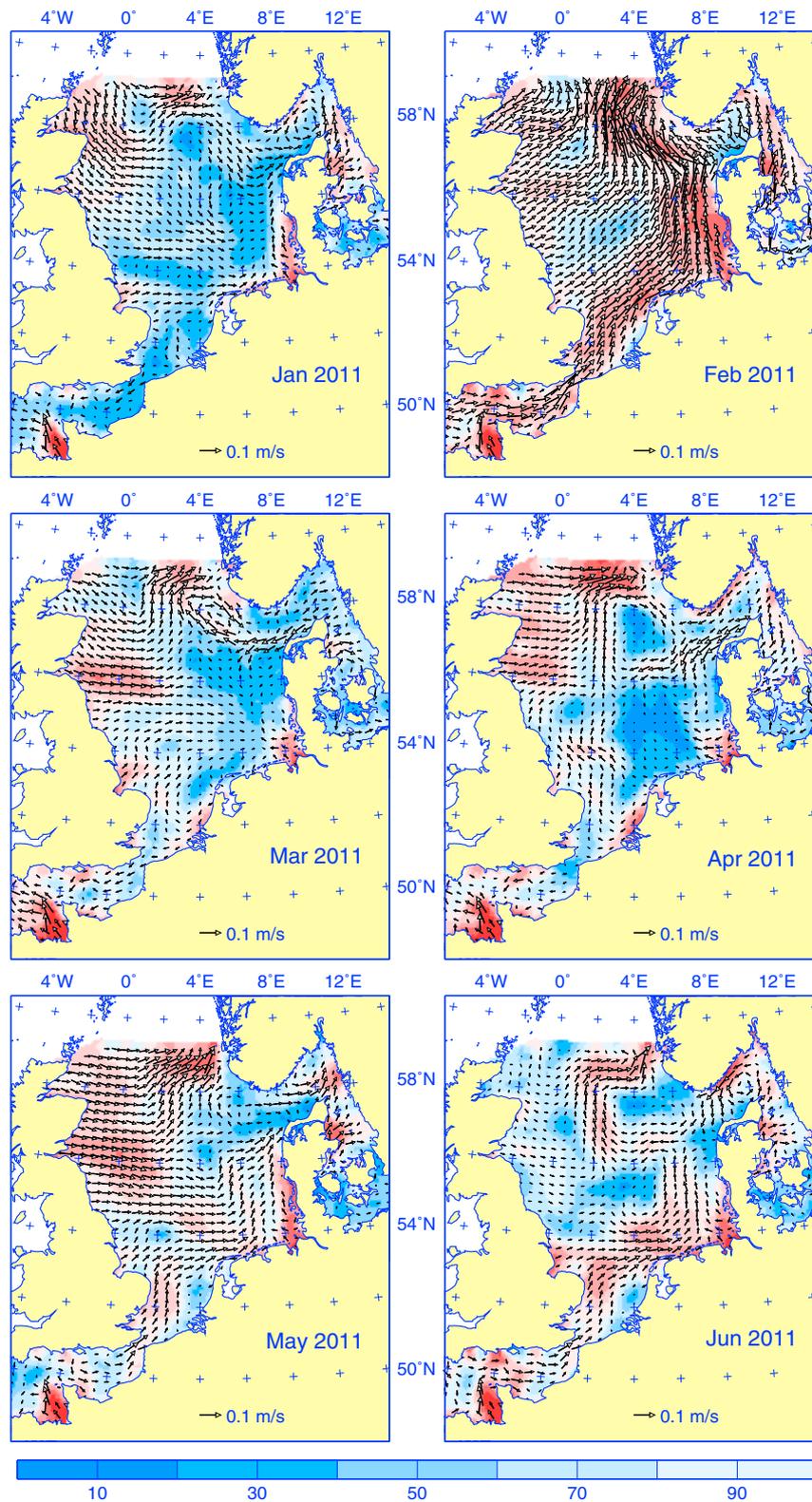


Abbildung 3-7: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2011. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-7: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1st half-year 2011. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

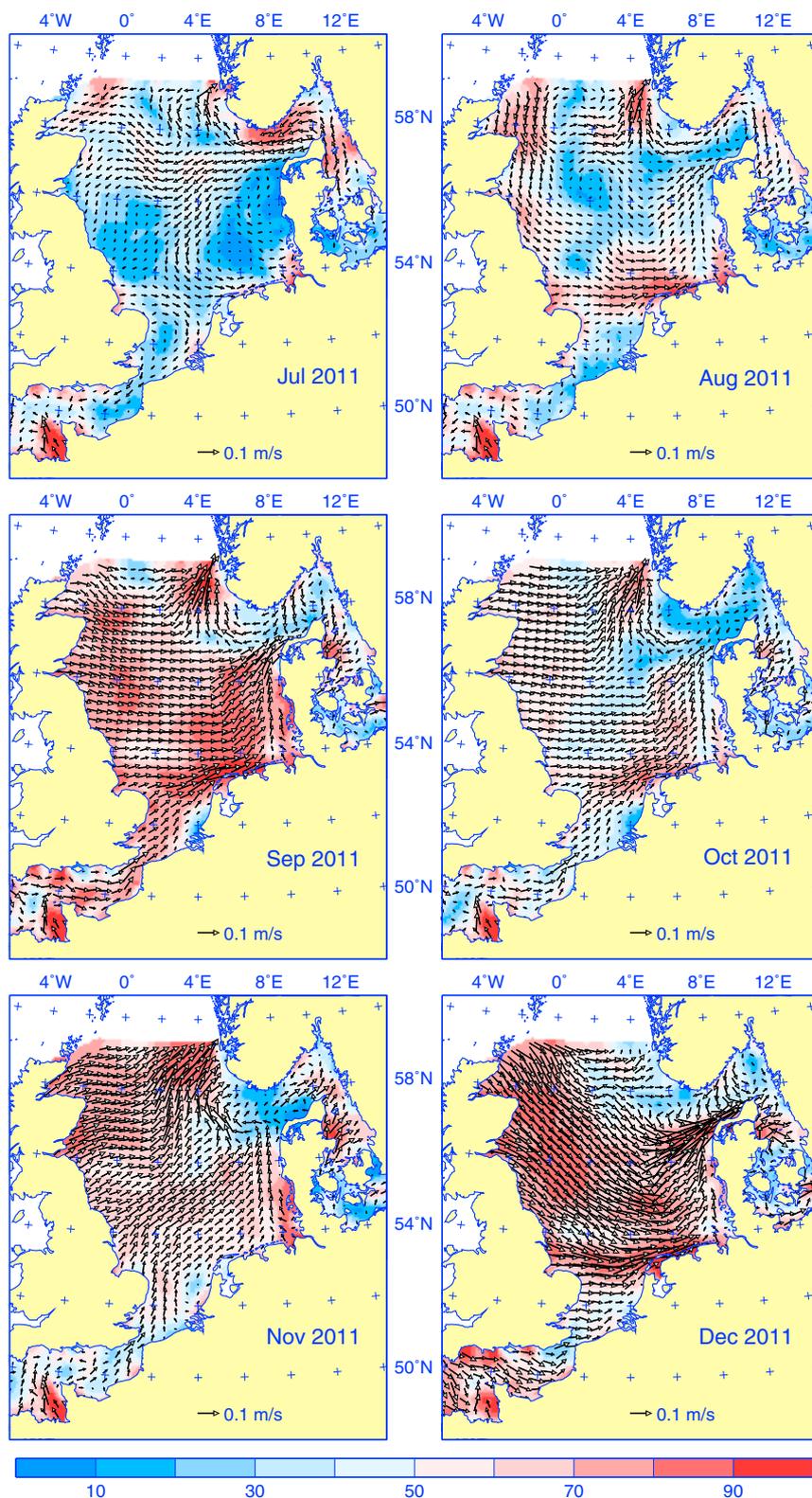


Abbildung 3-8: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2011. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.

Figure 3-8: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2nd half-year 2011. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.

3.2.2 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 2008–2011 in *Abbildung 3-9* bis *Abbildung 3-11* dargestellt, 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 dem Wetterlagenkalender entnommen werden können (vgl. *Tabellen 2-2, 2-4, 2-6, 2-8*).

Auch hier soll nur auf einige wenige herausragende Ereignisse hingewiesen werden: Die in *Kapitel 3.2.1* genannte Zirkulationsanomalie im Mai 2008 ist besonders deutlich in den negativen Transporten zum gleichen Zeitpunkt im Transekt in der westlichen Deutschen Bucht (*Abbildung 3-11*) zu erkennen.

Im Herbst 2009, insbesondere im November, zeigen sich sowohl im Transekt durch den Englischen Kanal als auch in der westlichen Deutschen Bucht starke positive Transporte, die mit einem intensiven Einstrom atlantischen Wassers durch den englischen Kanal in die südliche Nordsee einhergehen. Diese Transportanomalien wurden offensichtlich durch eine Häufung von Starkwindereignissen aus südwestlicher Richtung hervorgerufen.

Eine besonders intensive Durchströmung der südlichen Nordsee ist auch an den hohen positiven Transporten in der westlichen Deutschen Bucht im Dezember 2011 zu erkennen, die auch hier mit einer Häufung von Starkwindereignissen einhergeht.

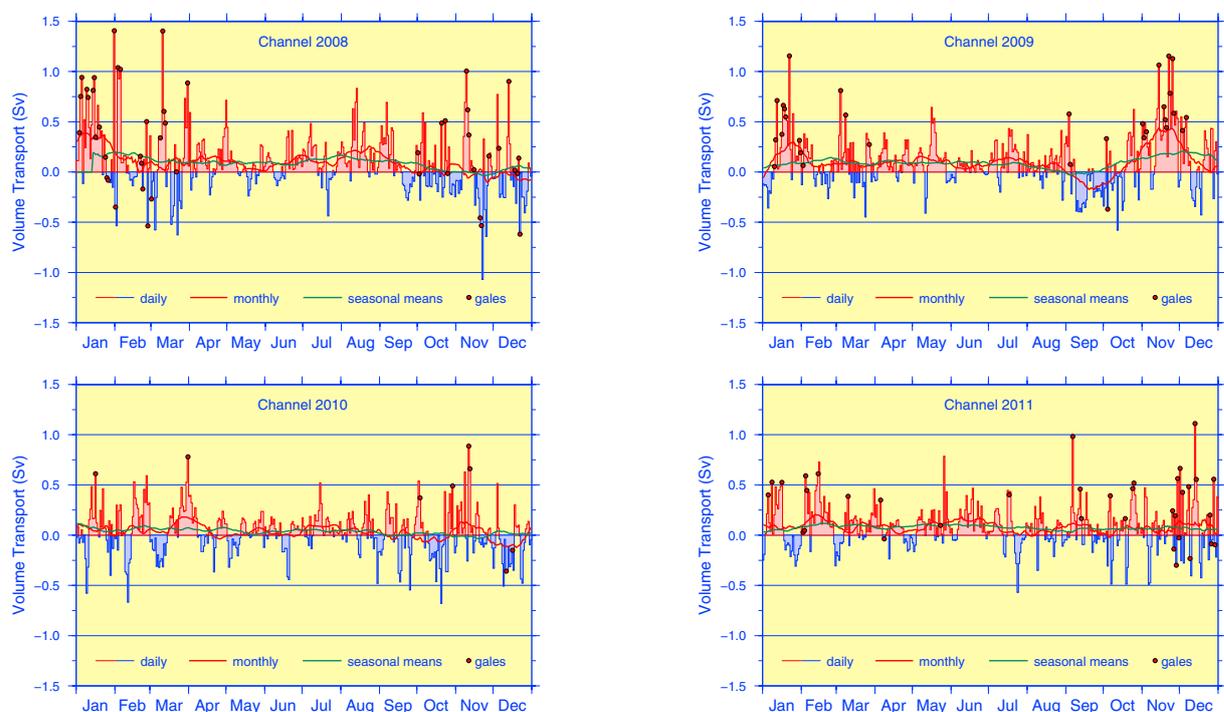


Abbildung 3-9: Wassertransport in den Jahren 2008 bis 2011 (BSHcmod) durch die Straße von Dover; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 3-9: Volume transport in 2008 through 2011 (BSHcmod) through Dover Strait; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

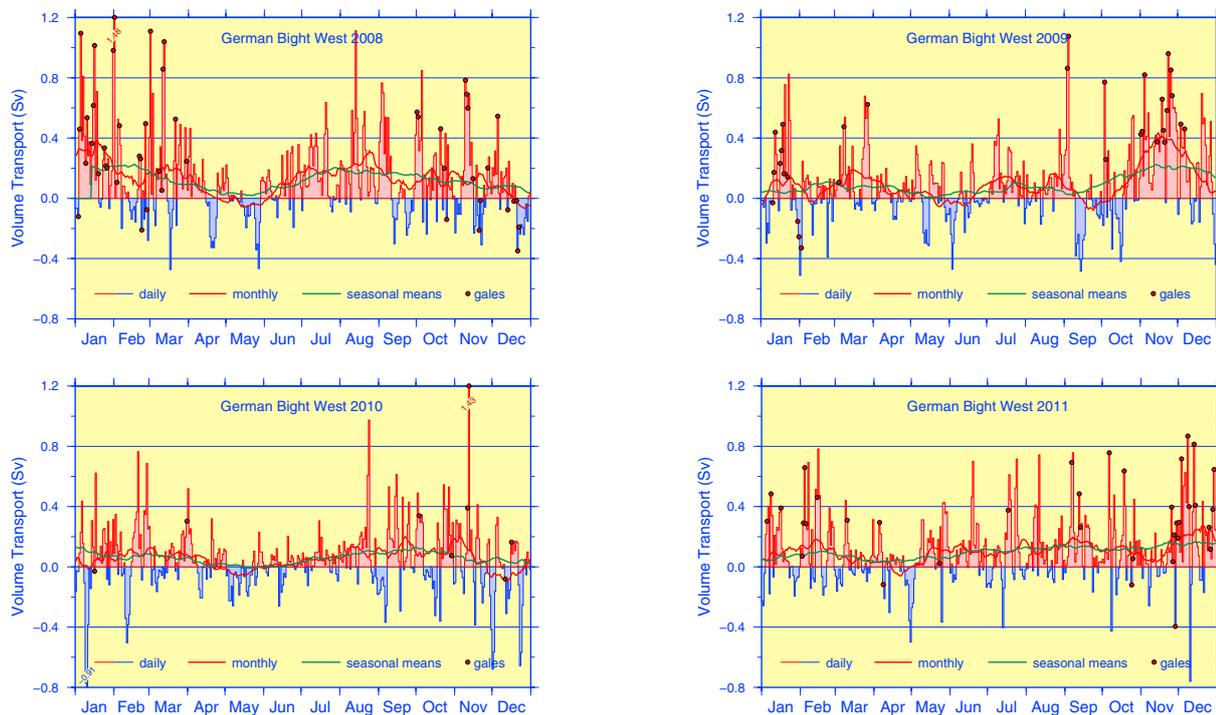


Abbildung 3-10: Wassertransport in den Jahren 2008 bis 2011 (BSHcmod) durch den Westrand der Deutschen Bucht von $53^{\circ} 15'$ bis $55^{\circ} N$ entlang $6^{\circ} 20' E$; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 3-10: Volume transport in 2008 through 2011 (BSHcmod) through a western boundary transect of the German Bight extending from $53^{\circ} 15'$ to $55^{\circ} N$ along $6^{\circ} 20' E$; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

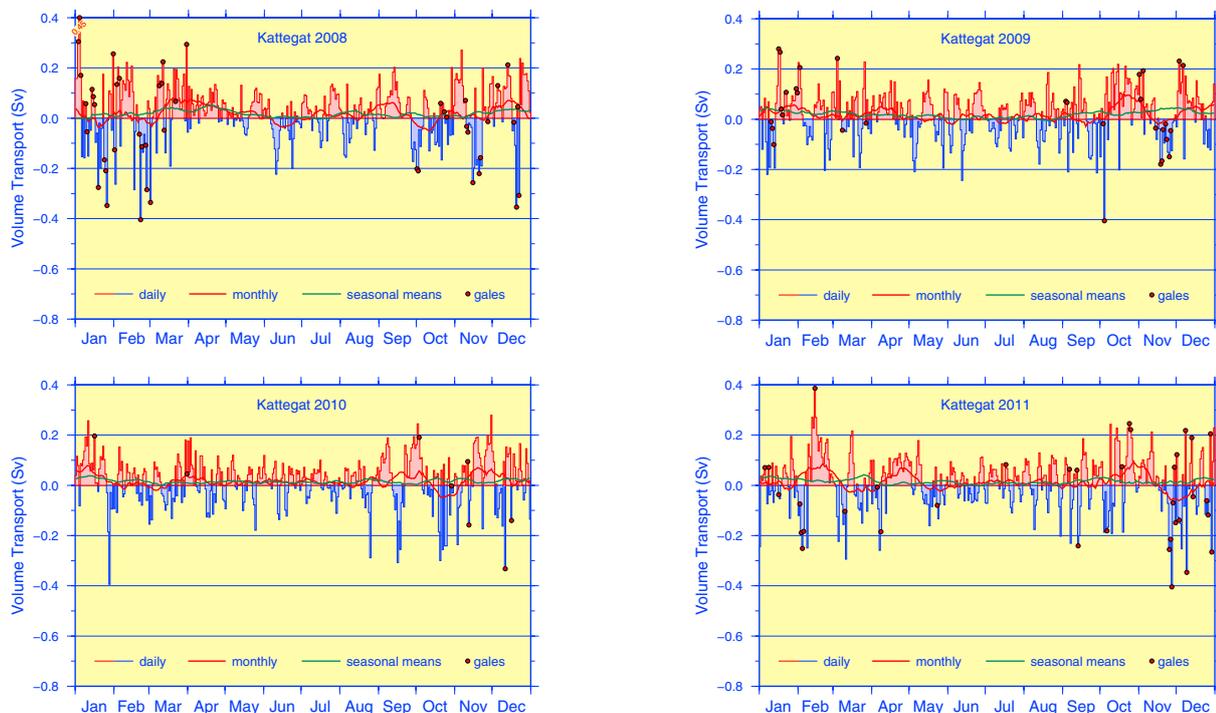


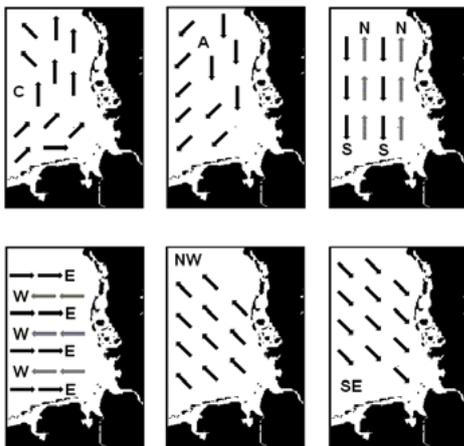
Abbildung 3-11: Wassertransport in den Jahren 2008 bis 2011 (BSHcmod) durch das Kattegat; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 3-11: Volume transport in 2008 through 2011 (BSHcmod) through the Kattegat; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2.3 Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Klassifizierung der Oberflächenzirkulation in der Deutschen Bucht für die Jahre 2008–2011 präsentiert. Die Klassifizierung der Strömungsverhältnisse dokumentiert in kompakter Form die täglichen Strömungszustände und deren zeitliche Entwicklung und ist ähnlich motiviert wie diejenige der Wetterlagen über der Nordsee (vgl. *Abbildungen 2-2 bis 2-8*). Der Zusammenhang zwischen Wetterlagen und Strömungen wurde in *LOEWE (2009)* erörtert. Gemeinsam können Wetterlagen- und Strömungskalender bei der Interpretation besonderer Ereignisse in der Meeresumwelt von Nutzen sein.

3.2.3.1 Daten, Methodik und Überblick



Die Klassifizierung der täglichen Reststrommuster basiert auf den simulierten Strömungsfeldern des operationellen Strömungsmodell BSHcmod Version 4 für die oberste Modellschicht (0–8 m) im Gebiet zwischen 53°15'–55°30' N und 6°30'–9°00' E. Die häufigsten Muster sind der zyklonale Typ (C, ~45%) mit deutlichem Einstrom am südwestlichen Rand und Ausstrom am nördlichen und nordwestlichem Rand, der entgegengesetzt gerichtete antizyklonale Typ (A, ~13%) und ein variables Muster (V, ~24%), das keinem definierten Muster zugeordnet werden kann. Die sechs direktionale Muster mit nach N, S, W, E, NW oder SE gerichteter Strömung sind von untergeordneter Bedeutung und werden für die saisonale Statistik im Richtungstyp DIR zusammengefasst (DIR = E+W+N+S+NW+SE). Aufgrund der geographischen Orientierung der Küstenlinie treten keine nach SW oder NE gerichteten Strömungen auf.

Die zeitlichen Abfolgen der Zirkulationsmuster sind in der *Tabelle 3-1* in Kalenderform wiedergegeben, *Tabelle 3-2* zeigt die Häufigkeiten der wichtigsten Zirkulationsmuster für die Jahre 2000–2011. Saisonale und jährliche Häufigkeiten der Zirkulationsmuster für die hier diskutierten Jahre sind zusammen mit den empirischen Verteilungen für den Zeitraum 2000–2009 in *Abbildung 3-15* wiedergegeben. Diese Darstellungen geben nicht nur Aufschluss über die zwischenjährliche Variabilität eines Musters innerhalb einer Jahreszeit, sondern auch über die Umverteilung der Zirkulationsmuster von Saison zu Saison innerhalb eines bestimmten Jahres.

3.2.3.2 Tägliche Zirkulationskalender für die Deutsche Bucht

2008	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	W	C	C	C	C	V	NW	C	C	C	A	C
2	NW	V	V	C	NW	C	C	C	C	V	V	C
3	N	C	A	C	V	NW	C	SE	C	C	W	C
4	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
5	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
6	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
7	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
8	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
9	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
10	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
11	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
12	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
13	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
14	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
15	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
16	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
17	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
18	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
19	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
20	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
21	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
22	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
23	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
24	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
25	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
26	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
27	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
28	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
29	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
30	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V
31	C	C	N	N	NW	V	C	C	C	A	C	V

2009	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	W	A	V	V	NW	A	V	V	C	S	C	A
2	V	V	C	V	C	S	V	C	C	C	N	NW
3	S	V	C	V	C	S	V	C	C	C	N	NW
4	NW	C	N	C	E	S	C	V	V	V	C	C
5	A	C	V	V	C	A	V	V	V	V	C	C
6	V	C	V	V	C	A	V	V	V	V	C	C
7	A	V	C	C	C	A	V	NW	C	C	N	N
8	V	C	C	C	C	A	V	A	V	N	N	N
9	V	C	C	C	C	A	V	A	V	N	N	N
10	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
11	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
12	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
13	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
14	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
15	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
16	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
17	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
18	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
19	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
20	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
21	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
22	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
23	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
24	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
25	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
26	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
27	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
28	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
29	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
30	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V
31	C	A	V	V	V	C	A	V	V	V	V	V

2010	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	A	V	V	C	C	V	NW	C	C	N	V	A
2	W	C	V	C	W	V	C	C	C	C	C	A
3	A	V	V	C	W	V	C	C	C	C	C	A
4	V	V	V	C	W	V	C	C	C	C	C	A
5	C	NW	C	N	A	V	A	V	V	V	V	C
6	C	NW	C	N	A	V	A	V	V	V	V	C
7	V	V	V	C	V	C	C	C	V	V	A	V
8	A	V	V	V	V	V	C	C	NW	W	W	S
9	A	V	V	V	V	V	C	C	NW	W	W	S
10	A	V	V	V	V	V	C	C	NW	W	W	S
11	V	A	SE	A	A	SE	C	C	C	A	C	S
12	V	A	SE	A	A	SE	C	C	C	A	C	S
13	V	A	SE	A	A	SE	C	C	C	A	C	S
14	C	V	V	W	V	V	N	V	C	A	C	A
15	C	V	V	W	V	V	N	V	C	A	C	A
16	NW	C	C	A	V	V	C	C	SE	A	A	NW
17	C	C	C	A	V	V	C	C	SE	A	A	NW
18	C	C	C	A	V	V	C	C	SE	A	A	NW
19	C	C	C	A	V	V	C	C	SE	A	A	NW
20	NW	C	C	A	V	V	C	C	SE	A	A	NW
21	NW	C	C	A	V	V	C	C	SE	A	A	NW
22	C	A	C	V	V	C	C	C	V	SE	NW	W
23	C	A	C	V	V	C	C	C	V	SE	NW	W
24	NW	V	V	C	A	V	C	C	A	A	W	V
25	NW	V	V	C	A	V	C	C	A	A	W	V
26	V	C	C	C	V	NW	C	A	A	C	W	V
27	E	C	C	C	V	NW	C	A	A	C	W	V
28	V	V	V	C	C	C	V	C	C	N	NW	V
29	V	V	V	C	C	C	V	C	C	N	NW	V
30	C	C	C	C	V	V	C	C	C	A	V	V
31	C	C	C	C	V	V	C	C	C	A	V	V

2011	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	A	V	V	C	C	V	NW	C	C	N	V	A
2	A	V	V	C	C	V	NW	C	C	N	V	A
3	V	V	V	C	C	V	NW	C	C	N	V	A
4	V	V	V	C	C	V	NW	C	C	N	V	A
5	C	C	C	V	V	C	C	C	C	C	C	V
6	C	C	C	V	V	C	C	C	C	C	C	V
7	W	C	V	V	E	NW	V	V	V	V	A	C
8	C	V	C	V	SE	C	C	C	V	V	A	C
9	C	V	C	V	SE	C	C	C	V	V	A	C
10	N	C	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
11	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
12	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
13	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
14	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
15	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
16	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
17	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
18	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
19	C	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
20	V	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
21	V	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
22	V	V	C	V	V	C	V	V	N	C	C	V
23	A	C	V	NW	V	C	C	C	A	C	C	V
24	V	C	V	V	E	V	C	C	V	NW	E	V
25	V	C	V	V	E	V	C	C	V	NW	E	V
26	W	C	A	V	A	V	C	C	V	N	E	V
27	A	C	V	V	V	C	V	V	N	E	V	V
28	V	V	V	C	C	V	C	C	V	N	E	V
29	V	V	V	C	C	V	C	C	V	N	E	V
30	V	V	V	C	C	V	C	C	V	N	E	V
31	V	V	V	C	C	V	C	C	V	N	E	V

Tabelle 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht für die Jahre 2008–2011.
 Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight for 2008–2011.

year	number of days \pm difference from 2000–2009-mean in standard deviations							
	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
2010	121	-1.6	80	+2.2	115	+0.8	49	-0.7
2011	160	+0.4	41	-1.2	129	+1.6	35	-2.1
2012	153	+0.0	55	0.0	113	+0.7	45	-1.1
2000–2009 mean \pm sd	152.4 \pm 20.1		55.0 \pm 11.2		101.3 \pm 16.8		56.4 \pm 10.2	

Tabelle 3-2: Jahreshäufigkeiten der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht mit standardisierten Abweichungen vom 10-Jahresmittel (2000–2009). Abweichungen von mehr als einer Standardabweichung sind fett gedruckt.

Table 3-2: Annual frequencies of daily circulation patterns in the German Bight with standardised differences from the 10-year average (2000–2009). Anomalies of more than one standard deviation are given in bold print.

2008:

Die Häufigkeit des zyklonalen Musters (C) hat gegenüber dem Vorjahr wieder zugenommen liegt damit im Bereich des 10-Jahresmittel 2000–2009. Bemerkenswert ist – wie schon in 2007 – das Fehlen längerer Phasen konstanter zyklonaler Zirkulation, die in den Vorjahren z. T. eine Dauer von bis zu 28 Tagen aufwiesen. In 2008 wurde nur eine 11-tägige zyklonale Phase Anfang September beobachtet. Antizyklonale Zirkulation (A) wurde an nur 57 Tagen beobachtet, das entspricht einer Abnahme von 14 Tagen gegenüber dem Vorjahr. Das variable Strömungsmuster (V) verzeichnete eine geringe Abnahme von 113 auf 100 Tage und liegt im Bereich des 10-Jahresmittel.

2009:

Die Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster entspricht weitgehend dem Vorjahr mit Werten, die dicht am 10-Jahresmittel liegen. Sieht man vom November ab, wo eine 20-tägige zyklonale Phase nur von einem Tag mit Nordströmung unterbrochen wurde, bleibt die erhöhte Tag-zu-Tag-Variabilität gegenüber den Vorjahren erhalten und setzt sich auch in den folgenden Jahren fort. Die maximale Abweichung vom Langzeitmittel beträgt +0.4 Standardabweichungen für das direktionale Muster (DIR).

2010:

In 2010 kommt es zu signifikanten Abweichungen vom 10-Jahresmittel: Das generell dominante zyklonale Muster weist mit einer Differenz von -1.6 Standardabweichungen die geringste Häufigkeit seit 2000 auf. Dieses Defizit wird durch einen Zuwachs des antizyklonalen Musters kompensiert, das mit 80 Tagen die größte Häufigkeit seit 2000 aufweist ($+2.2$ Standardabweichungen). Die längste Phase eines konstanten Strömungsmusters bildeten 8 Tage antizyklonale Zirkulation von Ende August bis Anfang September. Auch das ist ungewöhnlich, da bisher die langen Phasen vom zyklonalen Typ gebildet wurden.

2011:

Der zyklonale Typ nahm in 2011 wieder zu und lag leicht über dem 10-Jahresmittel. Die Häufigkeiten des antizyklonalen und direktionalen Typ nahmen deutlich ab und lagen -1.2 , bzw. -2.1 Standardabweichungen unter dem 10-Jahresmittel. Einen starken Anstieg verzeichnete hingegen der variable Typ, der mit einer Standardabweichung von $+1.6$ in seiner Häufigkeit 2 Tage unter dem Maximum von 2002 lag. Die längste Phase eines „konstanten“ Strömungstyps dauerte 11 Tage, diesmal aber 11 Tage mit variabler Zirkulation, d. h. ohne Richtungspräferenz.

3.2.3.3 Saisonale Zirkulationsstatistik Deutsche Bucht

Abbildung 3-12 zeigt die saisonalen Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationstypen für die Jahre 2008 bis 2011 zusammen mit dem 10-jährigen Mittel 2000–2009. Die Abbildung zeigt zum einen die zwischenjährliche Variabilität eines Musters innerhalb einer Jahreszeit, als auch die Umverteilung der Zirkulationsmuster von Saison zu Saison innerhalb eines bestimmten Jahres. Die Verteilung der Strömungsmuster folgt weitgehend dem atmosphärischen Antrieb, wird aber durch den Küstenverlauf in der Deutschen Bucht modifiziert.

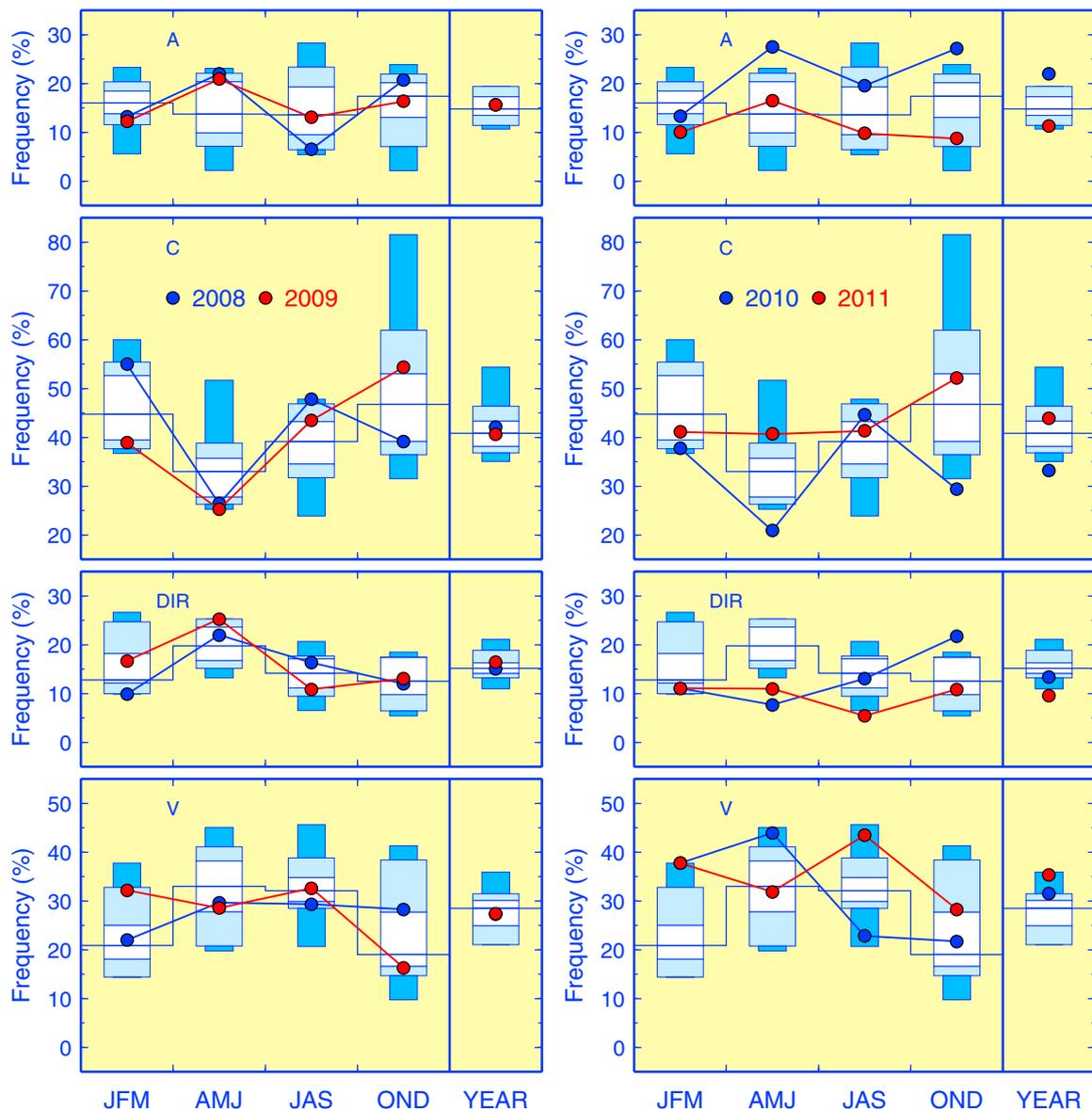


Abbildung 3-12: Saisonale und jährliche Häufigkeiten der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für die Jahre 2008/2009 (links) und 2010/2011 (rechts) mit Perzentilen der empirischen Verteilungen für 2000–2009 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Minimum bis Maximum, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, Treppenlinie), 75 und 90%.

Figure 3-12: Seasonal and annual frequencies of daily circulation patterns in the German Bight for 2008/2009 (left) and 2009/2010 (right) along with percentiles of empirical distributions for 2000–2009 (stacked columns). Percentile range minimum to maximum, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, step-line), 75 and 90 %.

2008:

Im Winter 2008 fand im Vergleich zum 10-Jahres-Mittel (2000–2009) eine starke Umverteilung vom antizyklonalen und direktionalen Muster zum zyklonalen Muster statt, während im Frühjahr die Häufigkeit des antizyklonalen und direktionalen Musters deutlich zunahm und der zyklonale Typ signifikant gegenüber dem 10-Jahres-Mittel abnahm. Die Sommerverteilung zeigte einen extremen Wechsel bzgl. des zyklonalen und antizyklonalen Typs, die jetzt ein relatives Maximum, bzw. Minimum in der Verteilung zeigten. Beide Zirkulationstypen wechselten ihre relativen Häufigkeiten wiederum im Herbst. Der variable Typ zeigte ganzjährig keine signifikanten Abweichungen vom 10-Jahres-Mittel und auch die Jahresverteilung liegt dicht an der Klimatologie.

2009:

Der Winter 2009 zeichnet sich durch einen Rückgang des zyklonalen Musters gegenüber dem 10-Jahres-Mittel und insbesondere gegenüber dem Vorjahr aus. Im Frühjahr fand eine leichte Umverteilung vom zyklonalen und variablen zum antizyklonalen und direktionalen Muster statt, im Sommer vom direktionalen zum zyklonalen Typ, während die Häufigkeiten des variablen und antizyklonalen Musters dicht am 10-Jahres-Mittel lagen. Im Herbst dominiert das zyklonale Muster verbunden mit einem deutlichen Rückgang des variablen Typs. Die Jahresverteilung liegt – wie schon im Vorjahr – dicht an der 10-Jahres-Verteilung.

2010:

2010 war ein Jahr der Extreme in dem sechs Rekorde in der saisonalen und zwei Rekorde in der ganzjährigen Verteilung aufgestellt wurden. Im Vergleich zum 10-Jahres-Mittel zeigte das zyklonale Muster mit Ausnahme des Sommers ganzjährig eine extrem geringe Häufigkeit. Dieses Defizit wurde durch extreme Häufungen des variablen (Winter), antizyklonalen und variablen (Frühjahr) sowie antizyklonalen und direktionalen (Herbst) Zirkulationsmuster kompensiert.

2011:

Im Vergleich zum 10-Jahres-Mittel (2000–2009) zeigte das variable Muster in 2011 eine große Häufigkeit, während das antizyklonale Muster und insbesondere das direktionale Muster eine deutlich verringerte Häufigkeit aufwies. Diese Verteilung beruht auf der ungewöhnlichen Häufigkeit des variablen Musters während des Winters und Sommers. Dieser Überschuss wurde in beiden Jahreszeiten durch geringere Häufigkeiten des antizyklonalen und direktionalen Musters ausgeglichen.

3.3 Seegang

D. Schrader

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

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

Die Datenbasis für die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse bilden Seegangsdaten, die mit dem operationellen Wellenvorhersagemodell „WAM“ (*WAMDI Group 1988*) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) generiert wurden. Die Güte dieser Daten wurde im Zustandsbericht des Jahres 2005 (*LOEWE et al. 2005*) durch einen statistischen Vergleich mit Messungen belegt. Es ist danach gerechtfertigt, klimatologische Aussagen über den Seegang aus Modellberechnungen abzuleiten, die im Gegensatz zu Messungen lückenlos und flächendeckend verfügbar sind.

3.3.1 Saisonale Seegangsverteilungen in der Nordsee

Das saisonale Seegangsklima der Jahre 2008–2011 wird durch die mittlere signifikante Wellenhöhe und die Hauptrichtung von Windsee und Dünung charakterisiert (*Abbildung 3-13 bis 3-16*).

Die prinzipiellen saisonalen Unterschiede mit maximalen Wellenhöhen im Winterhalbjahr und geringsten Wellenhöhen im Frühjahr und Sommer erklären sich aus entsprechenden Intensitätsänderungen im Windantrieb (vgl. *Kap. 2.3: Abbildung 2-9, Abbildung 2-10, Tabelle 2-21*). Die in allen Jahreszeiten ähnlichen Verteilungsmuster zeigen dabei von Norden nach Süden und zu den Küsten hin abnehmende Wellenhöhen. In dieser typischen Struktur des Wellenhöhenfeldes prägt sich die geographisch-bathymetrische Konfiguration der Nordsee aus, die nach Norden hin durch zunehmende Wassertiefen und eine weite Öffnung zum Nordatlantik wesentlich bestimmt ist.

Die Dünung hatte in allen Jahreszeiten NW-liche Richtung, denn sie läuft zumeist aus dem Nordostatlantik heran. Im flacheren Wasser schwenkt sie infolge Refraktion auf die britische und dänische Küste zu. Die Richtung der Windsee stimmt generell mit der Windrichtung überein. Sie kommt überwiegend aus dem Westsektor (SW – NW), im Sommerhalbjahr (April–Sep.) dominieren die west- bis nordwestlichen Richtungen, im Winterhalbjahr dagegen Südwest bis West.

Davon abweichende Windseerichtungen zeichnen den Winter 2009/2010 aus (*Abbildung 3-14 bis 3-15*). Im nördlichen Teil war der Seegang im Mittel nordwestlich gerichtet, im Süden kam er im Herbst 2009 noch aus der meist vorherrschenden Richtung SW, im folgenden Quartal JFM 2010 jedoch entgegengesetzt aus Nordost. Auch im Herbst 2010 (*Abbildung 3-15*) überwog im südlichen Teil der Nordsee Seegang aus nördlichen bis nordöstlichen Richtungen bei insgesamt niedriger mittlerer Wellenhöhe. Grund waren jeweils ungewöhnlich häufige Winde aus östlichen Richtungen (vgl. *Kap. 2.3: Abbildung 2-16, Abbildung 2-18*).

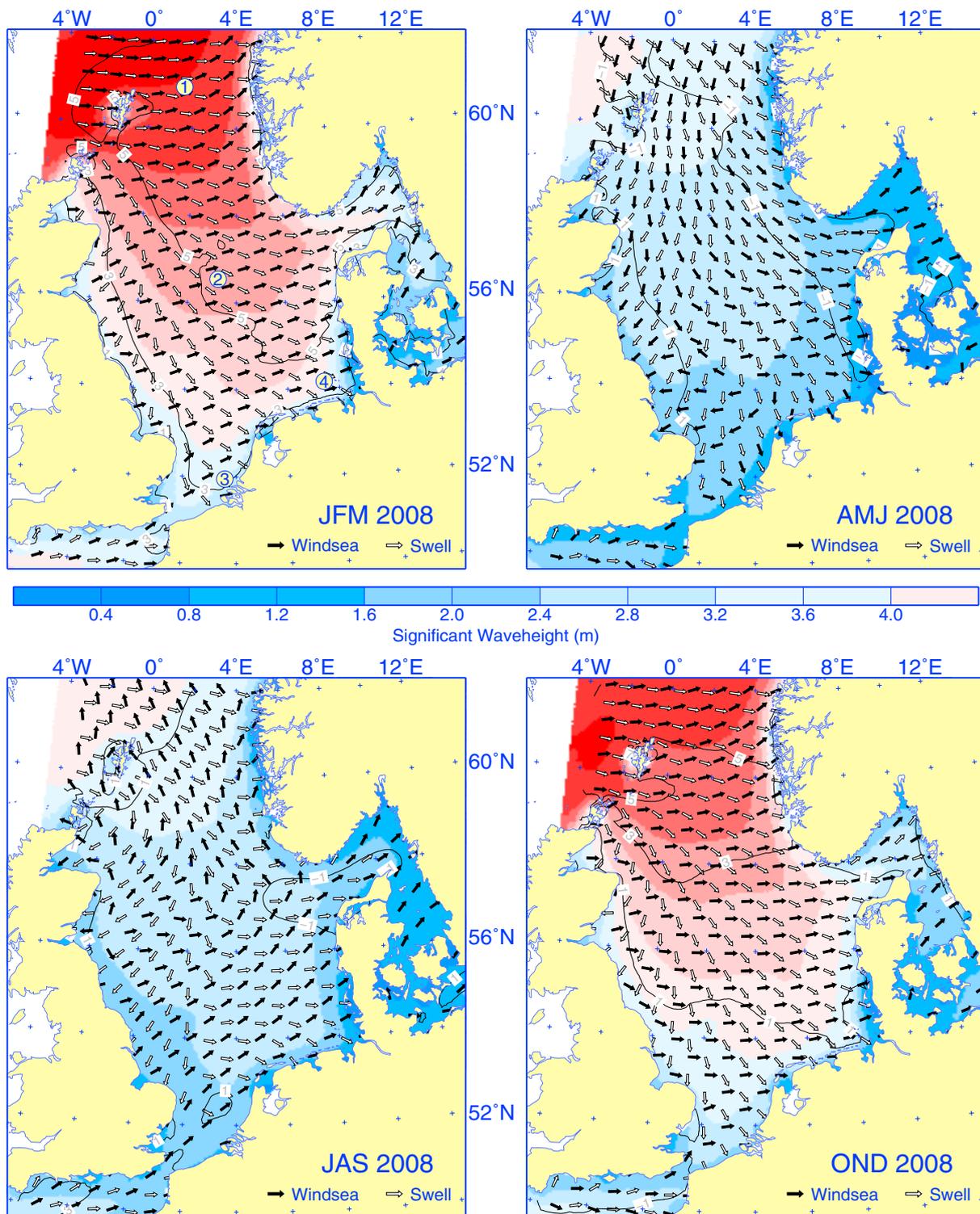


Abbildung 3-13: Saisonale geographische Verteilung von Wellenhöhe, Windsee und Dünung des Jahres 2008; JFM = Januar, Februar, März etc. Abweichungen der Wellenhöhen vom saisonalen Mittel des Zeitraums 2000–2011 als Isohypsen in dm. Gelb unterlegte Zahlen in der Winterdarstellung (JFM) kennzeichnen die Positionen der Stationen „Brent“ (1), „Ekofisk“ (2), „Euro-Plattform“ (3) und „Deutsche_Bucht“ (4). *Figure 3-13: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2008; JFM = January, February, March etc. Departures in wave height from seasonal means of the period 2000–2011 are depicted as isohyps (dm units). Numerals appearing on yellow background in the JFM frame identify the stations “Brent” (1), “Ekofisk” (2), “Euro-Plattform” (3) and “Deutsche_Bucht” (4).*

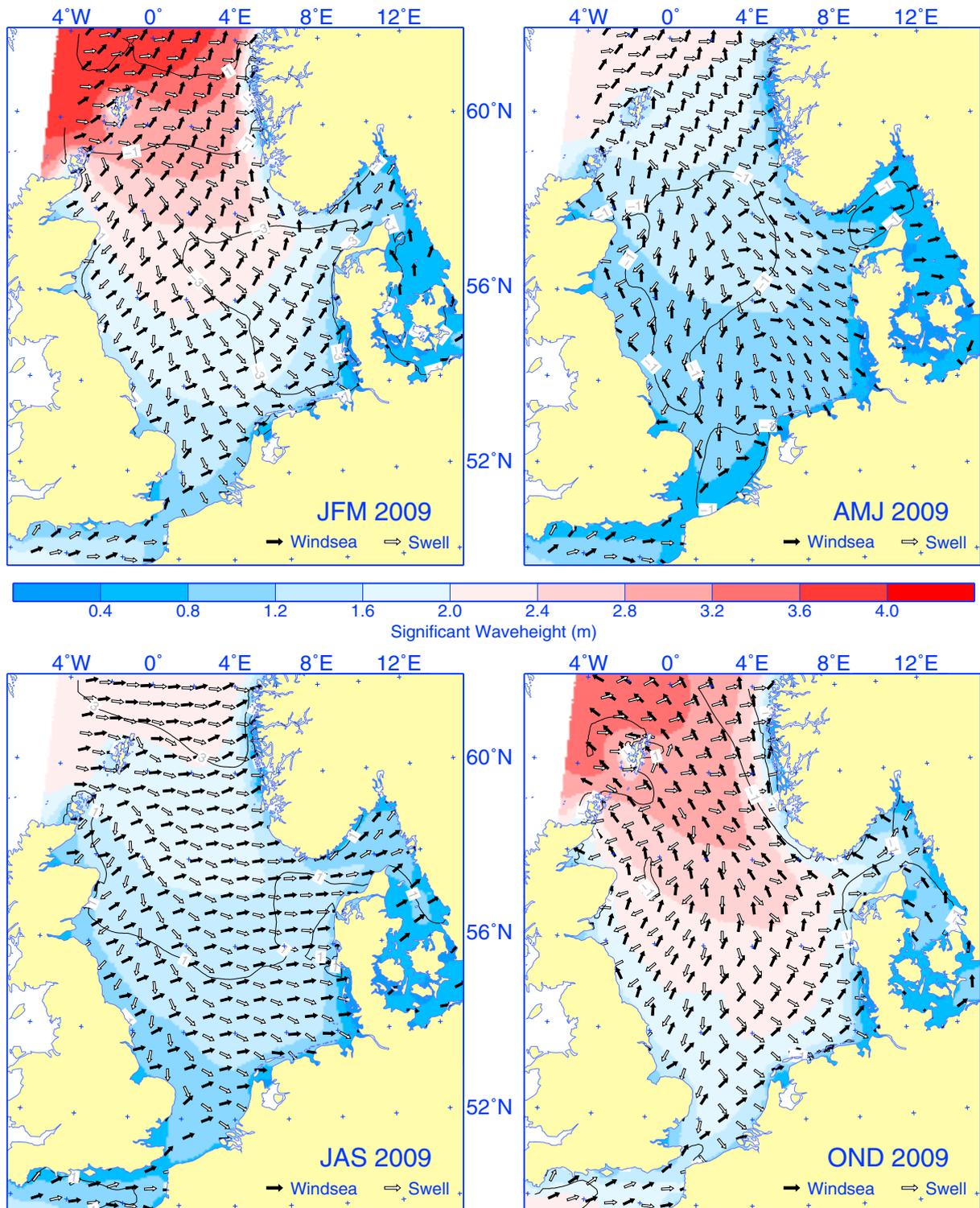


Abbildung 3-14: Wie Abbildung 3-13, jedoch für das Jahr 2009.
Figure 3-14: As Figure 3-13, except for 2009.

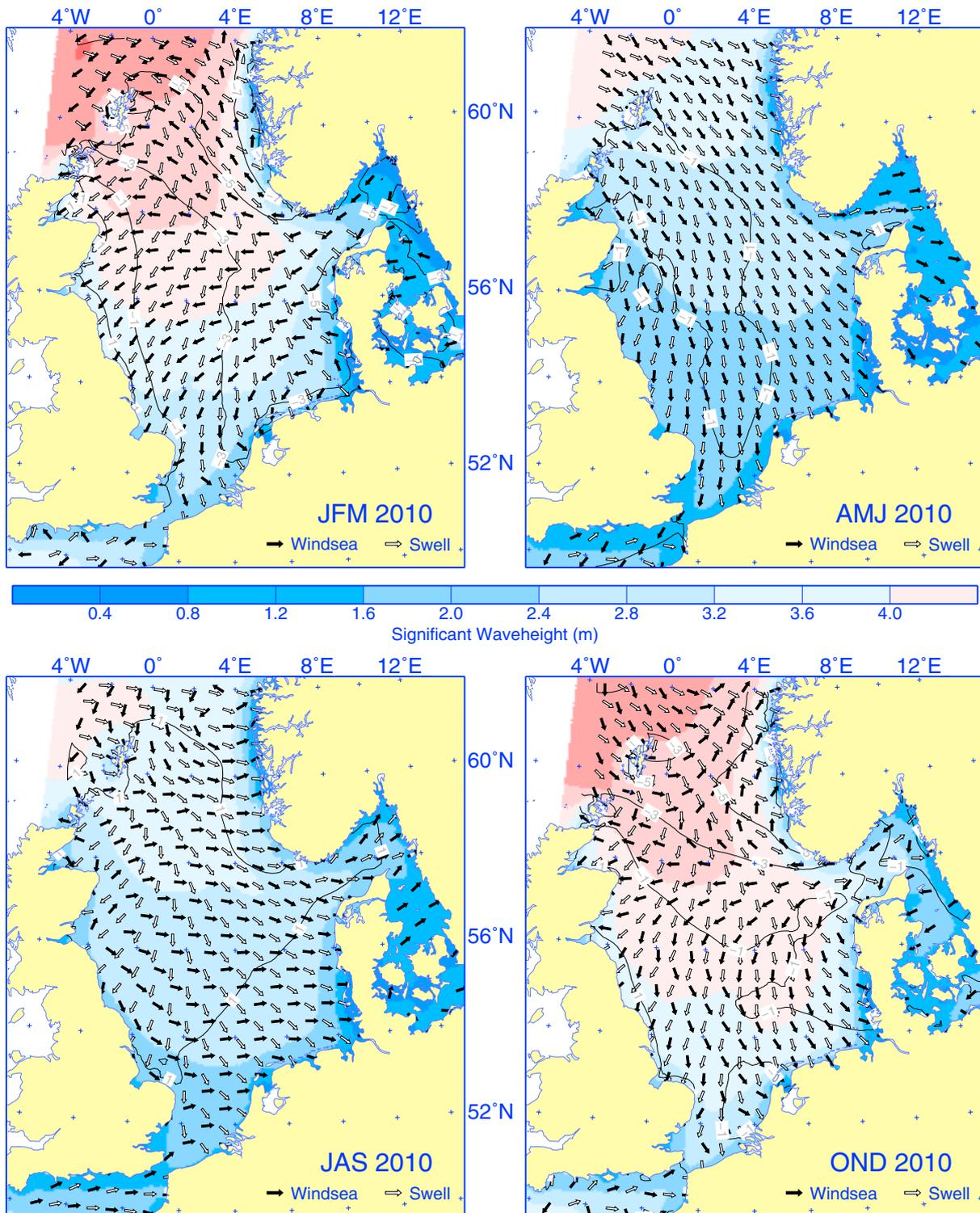


Abbildung 3-15: Wie Abbildung 3-13, jedoch für das Jahr 2010.
 Figure 3-15: As Figure 3-13, except for 2010.

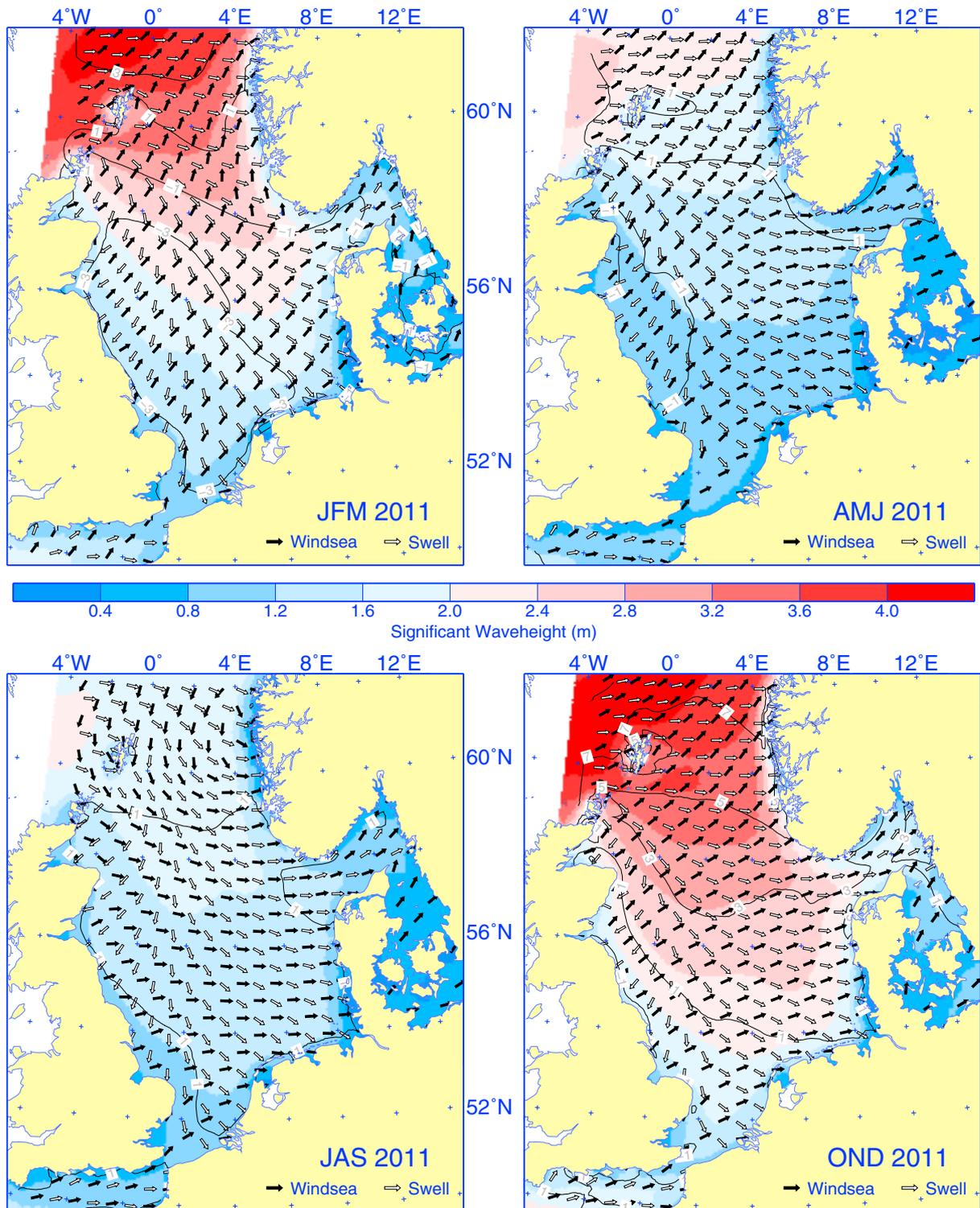


Abbildung 3-16: Wie Abbildung 3-13, jedoch für das Jahr 2011.
Figure 3-16: As Figure 3-13, except for 2011.

Im Sommerhalbjahr kommt es bei allgemein schwächerem Wind und Seegang häufiger zu variablen, regional unterschiedlichen Richtungsmustern, wie z. B. in Sommer 2008 (*Abbildung 3-13*) und Frühjahr 2009 (*Abbildung 3-14*) mit verbreitet südöstlichen Komponenten.

Die mittlere Wellenhöhe betreffend ist das Jahr 2009 als durchschnittlich und 2010 als besonders ruhig zu bezeichnen. Ein Grund dafür ist sicher die im Mittel meist geringere Intensität der südlichen bis östlichen Windlagen. Außerdem wächst dadurch die Seegangsenergie ausgehend von den südöstlichen Küsten von Null an, es „fehlt“ die im Norden vom Atlantik einlaufende Energie. Im Winter 2008 und im Herbst 2008 und 2011 dagegen war der Seegang deutlich höher als gewöhnlich. In den *Abbildungen 3-13 bis 3-16* sind zum Vergleich die Abweichungen der mittleren Wellenhöhe von langjährigen Mittelwerten des entsprechenden Quartals durch Isohypsen verdeutlicht (Beschriftung in dm). Der Mittelungszeitraum beträgt 12 Jahre von 2000–2011, die hier betrachteten Jahre eingeschlossen. Die Abweichungen betragen +3 bis +5 dm in der nördlichen Nordsee, nördlich und westlich der Shetland Inseln im Atlantik sogar bis +7 dm (OND 2011). Im Gegensatz dazu war die mittlere Wellenhöhe im Winter 2010 etwa 3 bis 5 dm niedriger als im Mittel. In den Sommerhalbjahren sind die Abweichungen vom Mittelwert wesentlich geringer, meist nur zwischen –1 und +1 dm, wegen generell niedrigerer Windintensität und Seegangshöhen.

3.3.2 Langzeitstatistik von einzelnen Positionen

Die statistische Variabilität, langfristige Veränderungen und Trends werden erst in möglichst langen, homogenen Zeitreihen deutlich.

Der mit dem Seegangsmodell des DWD erzeugte Datensatz beginnt mit dem Jahr 2000 und ist lückenlos und homogen, d. h. es gab keine gravierenden Modelländerungen und damit keine künstlichen, unphysikalischen Einflüsse auf die Ergebnisse. Für den zwölfjährigen Zeitraum von 2000 bis 2011 wurden für vier Positionen in der Nordsee die jährlichen Mittelwerte, P_{90} -Zentile und die Maxima der signifikanten Wellenhöhe zusammen gestellt (*Abbildung 3-17*). Zur geographischen Lage der ausgewählten Stationen in der südlichen, zentralen und nördlichen Nordsee vgl. *Abbildung 3-13*.

Die Jahre 2009 und besonders 2010 weisen in dieser Zeitreihe relativ niedrige statistische Maßzahlen auf. An der Station Brent in der nördlichen Nordsee, die stärker als die südlicher gelegenen vom Seegang des Atlantik beeinflusst ist, sind die Werte nur für 2010 deutlich vermindert. An allen Positionen zeigen die zwischenjährigen Änderungen der Mittelwerte und P_{90} -Zentile einen ähnlichen zeitlichen Verlauf, während das Niveau dieser Parameter bei den nördlichen Stationen fast doppelt so hoch liegt wie bei den südlichen. Dies entspricht dem charakteristischen Muster der Seegangsverteilung in der Nordsee bei gleichzeitig hoher zwischenjähriger Variabilität. Diese ist im P_{90} -Zentil naturgemäß größer als im Mittelwert, da es ein Maß für hohen Seegang darstellt und damit die Sturmintensität widerspiegelt.

Die statistischen Kennzahlen Mittelwert und P_{90} -Zentil zeigen keinen signifikanten Trend. Der Zeitraum von 2000–2011 ist jedoch zu kurz, um auf mögliche langfristige Änderungen des Seegangsklimas zu schließen. Bei den jährlichen Maxima, die Einzelereignisse sind, treten von Jahr zu Jahr besonders große Schwankungen auf. Die Werte sind naturgemäß wieder in der nördlichen Nordsee höher, eine Ähnlichkeit der zeitlichen Abfolge ist aber nicht erkennbar. Stürme, die extreme Wellenhöhen erzeugen, erfassen meist nicht die ganze Nordsee und wirken sich regional unterschiedlich aus. In dem betrachteten Zeitraum scheint eine Tendenz zu abnehmenden Extremwerten zu bestehen, mit Ausnahme für die Station Brent, die repräsentativ für die nördliche Nordsee ist. Dort traten die größten signifikanten Wellenhöhen der letzten vier Jahre auf in einem SE-Sturm vom 04.–05.01.2008 mit Windstärken von 25 m/s

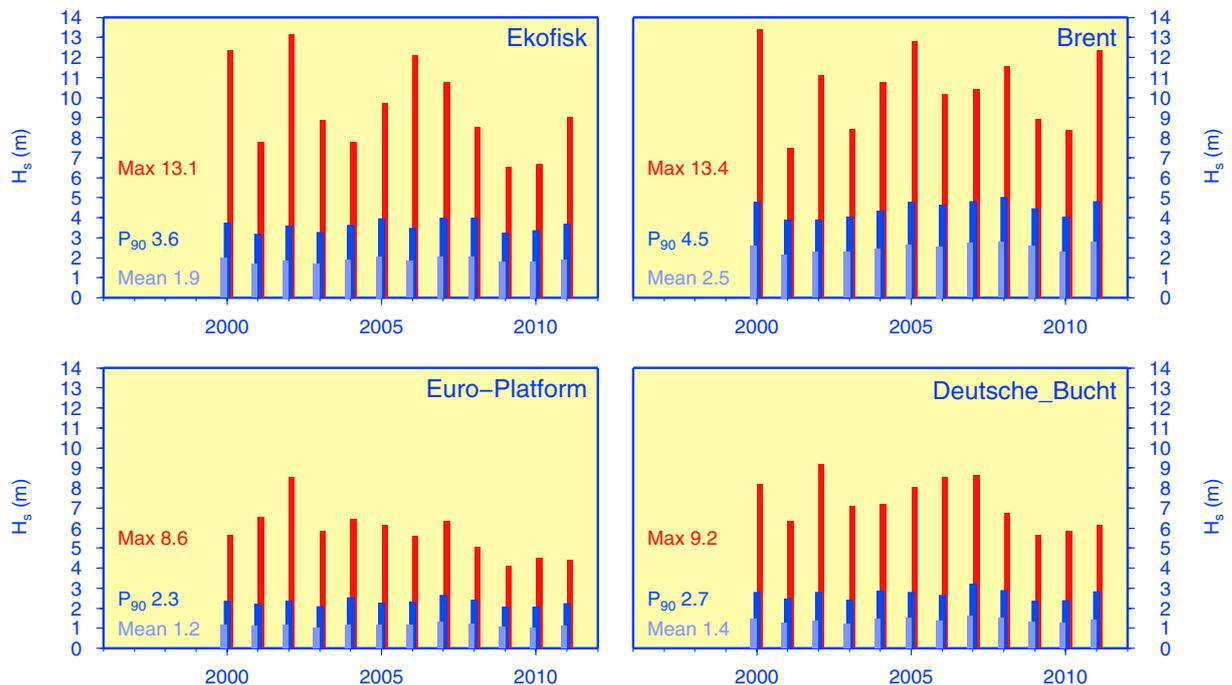


Abbildung 3-17: Zeitreihen der jährlichen Mittelwerte, P90-Zentile und Maxima bei den Stationen Euro, DB, Ekofisk und Brent. Zur Lage der Stationen vgl. *Abbildung 3-13*. Gedruckte Werte für Mean und P90 sind Mittelwerte über alle Jahre. Gedruckter Max-Wert ist der Maximalwert aller Jahre. Das Zentil P90 unterteilt die Menge der nach aufsteigendem Wert sortierten Wellenhöhen im Verhältnis 9:1.

Figure 3-17: Time series of annual means, 90th percentile and maxima at stations Euro, GB, Ekofisk and Brent. As to location, cf. Figure 3-13. Printed values of Mean and P90 are averages over all years. Printed Max-value is the maximum value of all years. The 90th percentile divides the waveheight distribution 9:1.

und einem Sturm aus SW-W am 25. 12. 2011 mit bis zu 30 m/s Windgeschwindigkeit. Die berechneten Wellenhöhen betragen etwa 12 m. Die Messungen bei der Plattform Brent ergaben jedoch nur Wellenhöhen um 10 m. Dies zeigt die erhebliche Unsicherheit von maximalen Einzelwerten aus Modellrechnungen, die nur als Richtwerte für extreme Seegangereignisse anzusehen sind.

3.4 Wasserstand

S. Müller-Navarra

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 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 (Differenz von eingetretenen Hoch-/Niedrigwasserhöhen und denen der vorausberechneten Gezeiten).

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, kilometertiefen Ozeanen können die Gezeitenbeschleunigungen Wasserstandsschwankungen von wenigen Dezimetern hervorrufen. Diese im offenen Ozean erzeugten langen Gezeitenwellen dringen in die Nordsee ein und werden dort durch Erdrotation, Bodentopographie und Küstenverlauf modifiziert. Der Gezeitenhub an der deutschen Nordseeküste erreicht bis zu 4 m gegenüber 2,7 m bei Aberdeen.

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 2010; MÜLLER-NAVARRA 2013a*). 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, *Tabelle 3-4*) und das mittlere astronomische Niedrigwasser (MNW) mit dem relativen mittleren Meeresspiegel anstiegen. Die langjährigen Veränderungen dieser Art haben z. B. *JENSEN et al. (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. Es ist außerdem zu beachten, dass amtlich festgelegte Gezeitengrundwerte Vorausberechnungen darstellen und nicht auf Beobachtungen aus dem angegebenen Jahr basieren. Zum Beispiel resultieren das MHW und das MNW für Cuxhaven für 2011 aus Beobachtungen der Jahre 2004–2008.

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 4 aufeinanderfolgenden Jahren (2008–2011) 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 2008 bis 2011 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 klimatistischen 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.

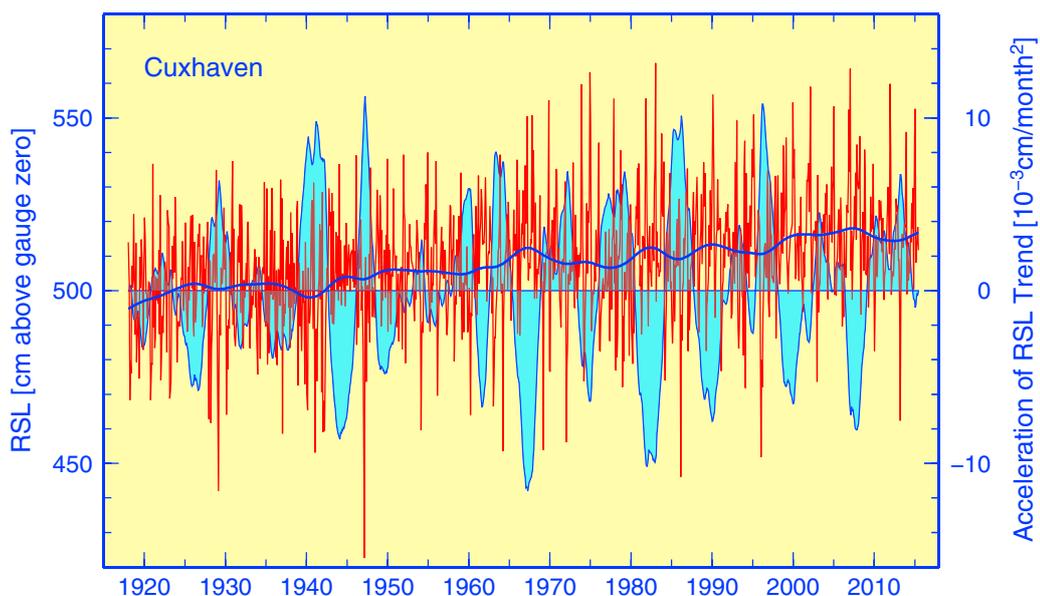


Abbildung 3-18: Monatliche Wasserstandsmittelwerte (rote Kurve) am Pegel Cuxhaven 1918–2013 und geglättete Kurve (dunkelblau) sowie Beschleunigung des Anstiegs (hellblau), abgeleitet aus der geglätteten Kurve.

Figure 3-18: Monthly water levels at tide gauge Cuxhaven (red curve) 1918–2013 and smoothed curve (dark blue) as well as acceleration of the increase (light blue) calculated from smoothed curve.

Aus stündlichen Pegelständen lassen sich aussagekräftige Monatsmittelwerte berechnen. Sie enthalten nur noch sehr kleine Gezeitenanteile und die Variabilität des Wetters tritt deutlich hervor (*Abbildung 3-18*). Monate mit ausgeprägter Westwindlage sind ebenso auszumachen wie langanhaltende 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 Pegelraten im Rahmen der Wasserstandsvorhersage angewendet wird (*MÜLLER-NAVARRA 2009b*). Danach ist der relative mittlere Meeresspiegel in Cuxhaven von Anfang 1918 bis Ende 2013 um ca. 20 cm angestiegen (0,017 cm/Monat). Fünf Jahre weitergerechnet, um ein ganzes Jahrhundert zu bekommen, wären es dann 20,4 cm. Davon entfallen etwa 40% auf lokale isostatische Effekte (*BUNGENSTOCK & SCHÄFER 2009*). Betrachtet man willkürlich kürzere Zeiträume – z. B. von 1961 bis 1990 – so ergeben sich zeitweise größere Anstiegsraten. Wie die hellblaue Kurve der finiten zweiten Differenzen der Monatsmittelwerte in *Abbildung 3-18* deutlich zeigt, wechseln kurze Zeiten eines beschleunigten Anstiegs mit Zeiten eines gebremsten Anstiegs ab. Insgesamt ergeben sich keine Anzeichen eines länger anhaltenden beschleunigten Meeresspiegelanstiegs am Pegel Cuxhaven, auch nicht in den letzten Dekaden.

3.4.5 Windstau statistiken und Häufigkeit von Sturmfluten

Durch Windeinfluss können Wasserstandsänderungen von der gleichen Größenordnung wie des Gezeitenhubes erzeugt werden (*MÜLLER-NAVARRA & GIESE 1999*). Als Windstau wird die Differenz zwischen der astronomisch vorausberechneten Hoch- bzw. Niedrigwasserhöhe und den zugehörigen Scheitelwerten der gemessenen Wasserstandskurve definiert.

Windstau statistiken bieten die Möglichkeit, einen Zusammenhang zu den vorherrschenden Wetterverhältnissen der einzelnen Jahre herzustellen. Ruhige oder windreiche Jahre bilden sich ohne weiteres auch in den Windstau mittelwerten ab (*MÜLLER-NAVARRA et al. 2013b*). Überwiegend weichen die Wasserstände im Betrage um weniger als 50 cm von den astronomisch vorausberechneten HW- und NW-Höhen ab (*Tabelle 3-3*). Nur sehr selten tritt ein Windstaubetrag von mehr als 1,5 m auf.

Frequency distribution of wind set-up for 2008 to 2011 at tide gauge Cuxhaven								
Cuxhaven Wind Set-up [cm]	2008		2009		2010		2011	
	HW	LW	HW	LW	HW	LW	HW	LW
$\Delta H \leq -200$	0	0	0	0	0	0	0	0
$-200 < \Delta H \leq -150$	0	0	0	0	0	0	0	0
$-150 < \Delta H \leq -100$	7	5	6	0	8	4	3	2
$-100 < \Delta H \leq -50$	19	17	26	18	39	43	27	29
$-50 < \Delta H \leq 50$	622	594	643	626	622	608	615	591
$50 < \Delta H \leq 100$	45	66	26	49	32	45	46	69
$100 < \Delta H \leq 150$	13	20	2	11	4	3	8	8
$150 < \Delta H \leq 200$	0	4	2	0	0	1	6	6
$200 < \Delta H$	1	2	0	1	1	1	0	0
Total	707	708	705	705	706	705	705	705

Tabelle 3-3: Häufigkeitsverteilungen des Windstaus 2008 bis 2011 am Pegel Cuxhaven.

Table 3-3: Frequency distribution of wind set-up for 2008 to 2011 at tide gauge Cuxhaven.

In *Tabelle 3-4* finden sich Zahlen zur Häufigkeit von Sturmfluten im Zeitraum 1951–2011 bzw. im Berichtszeitraum 2008–2011. Von einer Sturmflut in der Deutschen Bucht spricht man, wenn die Sturmfluthöhe das mittlere Hochwasser des jeweiligen Kalenderjahres um mehr als 150 cm überschreitet. Im Vergleich ist festzustellen, dass die Häufigkeit von Sturmfluten im Berichtszeitraum niedrig war.

Es hat immer längere Zeiträume gegeben, während derer in der Deutschen Bucht Sturmfluten selten oder auch besonders häufig waren. Diese Tatsache lässt sich zum Teil der natürlichen dekadenischen 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. Zum Beispiel war das Orkantief Emma (01.03.2008) begleitet von der höchsten Sturmflut in Cuxhaven im betrachteten Zeitraum (218 cm über MHW). Der bekannte Orkansturm Xynthia (27./28.02.2010) überquerte zwar am 01.03.2010 die Deutsche Bucht, die Zugbahn war aber ungünstig (Scheitelwasserstand: 115 m über MHW). Die zweithöchste Sturmflut des Berichtszeitraums mit 189 cm über MHW in Cuxhaven am 04. 10. 2009 ist dem Sturmtief Sören zuzuordnen. Im betrachteten Zeitraum 2008 bis 2011 gab es keine schwere Sturmflut.

Storm surge frequencies 1951–2011 and 2008–2011 with MHW trend (above tide gauge zero)						
Storm surge frequencies: 1951–2011						2008–2011
Location	MHW Trend	storm surge	severe storm surge	very severe storm surge	total, mean	total, mean
Borkum ¹	589–618	95	2	0	97/1.6	2/0.5
Bremen	706–754	257	9	0	266/4.4	13/3.3
Cuxhaven	631–655	216	19	2	237/3.9	9/2.3
Hamburg	659–711	317	49	13	379/6.2	19/4.8
Husum	645–669	332	38	4	374/6.1	20/5.0

Def.: $150 \leq \text{Storm surge} < 250 \leq \text{severe storm surge} < 350 \leq \text{very severe storm surge}$ [cm above MHW]

Tabelle 3-4: Sturmfluten (Wasserstand höher als 150 cm über MHW) in den Jahren 1951–2011.

Table 3-4: Storm surges (water level more than 150 cm above MHW) between 1951–2011.

¹ Borkum: bis 1962 Pegel Borkum-Südstrand, danach Borkum-Fischerbalje

3.5 Temperatur

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

3.5.1 Einführung

Die wichtigste Datenbasis zur Analyse des thermischen Zustands der Nordsee und dessen dynamischer Entwicklung sind die Oberflächentemperaturen der Nordsee, die im BSH seit September 1968 wöchentlich veröffentlicht werden. 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 für die Jahre 2008 bis 2011 dokumentiert und statistisch eingeordnet. Im Anschluss wird die Temperaturschichtung anhand von Beobachtungen analysiert, die während der Gesamtaufnahme der Nordsee mit FS Celtic Explorer bzw. FS Pelagia jeweils im August durchgeführt 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

3.5.2.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt bedeutet Temperatur stets Meeresoberflächentemperatur.

Die Entwicklung der Temperaturen im Zeitraum 2008–2011 wird zum einen durch Zeitserien räumlicher Mittel für Nordsee (*Abbildung 3-19*) und Deutsche Bucht, zum anderen durch geographische Verteilungen monatlicher Anomalien dokumentiert (*Abbildung 3-20* bis *3-23*). Letztere beziehen sich nicht auf den ansonsten bevorzugten klimatologischen Zeitraum (1971–2000), sondern auf mittlere monatliche Zustände der operationellen Basisperiode 1971–1993 (Klimanormal). Dem für unterschiedlichste Temperaturangaben mitgeteilten Rang liegt stets eine in fallender Reihenfolge sortierte Zeitreihe zu Grunde, so dass Rang 1 (–1) dem höchsten (tiefsten) Wert des Analysezeitraums 1969–2013 zugeordnet ist.

Die Jahrgänge der Nordseetemperatur sind zur Veranschaulichung der zwischenjährlichen Variabilität in das Ensemble entsprechender Jahreszyklen seit 1969 eingebettet (*Abbildung 3-19*). Die Darstellung der Zeitserien orientiert sich dabei nicht mehr an meteorologischen Jahreszeiten. Die Eintrittszeiten der saisonalen Extrema im Februar und August oder die Tatsache, dass die 3 kältesten und wärmsten Monate auf das 1. bzw. 3. Quartal entfallen, legen eine um einen Monat verschobene jahreszeitliche Einteilung nahe, die zudem offensichtliche praktische Vorteile bietet und deshalb auch den schriftlichen Ausführungen zu Grunde liegt. Hingegen beziehen sich Jahresmitteltemperaturen – und deren langzeitliche Entwicklung (*Abbildung 3-24*) – aus historischen Gründen weiterhin auf die Zeitspanne Dez. des Vorjahres bis Nov. des aktuellen Jahres.

Die Jahrgänge räumlicher Mitteltemperaturen für die Deutsche Bucht (*Abbildung 2-23*) wurden im Vorgriff an anderer Stelle diskutiert (*Kap. 2.2.2 ff.*), um die Auswirkungen der atmosphärischen Zirkulation auf Luft- und Meerwassertemperaturen zu illustrieren. Die starke Korrelation (0.94 ± 0.02) zwischen den Monatsmitteltemperaturen von Nordsee und Deutscher

Bucht belegt deren parallele Entwicklung (LOEWE et al. 2013), so dass die in (Kap. 2.2.2ff.) ausgeführten Kausalzusammenhänge mit den atmosphärischen Rahmenbedingungen sinngemäß weiter gelten.

Für die nachfolgende chronologische Darstellung besonderer Zustände und Entwicklungen wird auf eine Wiederholung dieser Zusammenhänge weitgehend verzichtet.

3.5.2.2 2008

In den sturmreichen und milden Wintermonaten (Kap. 2.2.2ff.) lag die Nordseetemperatur mit 7.0 °C um 1.0 K über dem Klimanormal des 1. Quartals (Abbildung 3-19). Die stärksten Abweichungen von oft über 2 K traten in den SE-lichen Seegebieten ein (Abbildung 3-20). Nicht nur für die Nordsee, sondern auch für die Deutsche Bucht waren die Winter 2008 und 2002 die fünftwärmsten seit 1969; die deutsche Nordseeküste blieb dabei nahezu eisfrei (vgl. Kap. 3.5.4).

Die sonnige, zeitweise sommerliche Maiwitterung beschleunigte die jahreszeitliche Erwärmung der Gewässer. Die Temperatur der Nordsee stieg auf 10.8 °C an, lag damit um 1.7 K über dem klimatologischen Monatsmittel und verfehlte die Rekordtemperatur vom Mai 1990 (10.8 °C) nur knapp. In der zentralen Nordsee überstiegen die Anomalien 2 K, W-lich der nordfriesischen Küste sogar 3 K (Abbildung 3-20).

Infolge des gehäufteten Auftretens zyklonaler Wetterlagen und der damit einhergehenden unbeständigen Witterung schwächte sich die nordseeweite Warmanomalie zunächst bis Juli auf 0.6 K ab, verstärkte sich jedoch anschließend, insbesondere unter dem Einfluss eines persistenten Skandinavienhochs, auf 1.3 K. Die höchsten Abweichungen traten in NE-lichen Seegebieten ein; über der Norwegischen Rinne übertrafen sie im August 2.5 K (Abbildung 3-20). Die Nordseetemperatur fiel im Sommerquartal nach Rang 4 im Frühjahr auf Rang 9 zurück. In den Herbstmonaten wurde der Wärmeüberschuss schrittweise abgebaut, so dass die Nordseetemperatur im Dezember bei 8.0 °C fast mit dem Klimamittel (7.9 °C) übereinstimmte. Entsprechend belegte die Temperatur für das 4. Quartal mit 10.2 °C (0.4 K) einen mittleren Rang (19) im 45-jährigen Zeitraum 1969–2013.

Das Jahr 2008 (Dez. bis Nov.) war gemeinsam mit 2004 für die Nordsee das fünftwärmste. Mit 10.8 °C (0.9 K) wurde das Mittel der Basisperiode 1971–1993 um 2 StdAbw übertroffen, das bereits 3mal (2002, 2006 & 2007) erreichte Rekordniveau von 11.0 °C nur wenig unterschritten (Abbildung 3-24).

3.5.2.3 2009

Nach der bereits im Dezember 2008 abgeschlossenen Normalisierung verharrten die Wintertemperaturen bei einer hinsichtlich Muster und Intensität normalen SW-lichen Anströmung auf ungewohnt normalem Niveau (Abbildung 3-21). Das Quartalsmittel von 6.1 °C (0.1 K) entsprach fast dem Klimanormal und belegte Rang 23 im 45-jährigen Analysezeitraum.

Als Folge einer persistenten Omegablockierung mit Zentrum über dem Baltikum (Kapitel 2.2.3) kam es im April zu einer drastischen Erwärmung der Nordsee um 1.5 K. Dieser zweitstärkste Anstieg von März auf April war in gleicher Höhe bereits 1987 aufgetreten, sollte sich 2010 wiederholen und 2011 (2.0 K) sogar übertroffen werden. Die weitere Temperaturentwicklung im Frühjahr vollzog sich auf einem gegenüber der Klimatologie um 0.9 K erhöhten Niveau (Abbildung 3-19; Abbildung 3-21). Mit 10.1 °C belegte das Quartalsmittel den 8. Rang.

Die seit April andauernde Warmanomalie verstärkte sich in den wechselhaften Sommermonaten nur geringfügig und fluktuierte ebenso wenig um ein mittleres Niveau von 1.1 K (*Abbildung 3-19*). Mittlere Höhe (15.4 °C) und Rang (9) der Nordseetemperatur stimmten im Sommer mit denen des Vorjahres überein.

Im Oktober kam es unter Hochdruckeinfluss zu einer Abschwächung der Warmanomalie, die jedoch bereits im November durch unterdurchschnittliche Abkühlungsraten bei massiver SW-Anströmung rückgängig gemacht wurde (*Abbildung 3-21*). Wie 1999 und 2003 belegte die Nordseetemperatur im Herbst mit 10.8 °C (1.0 K) den 5. Rang.

Mit 10.6 °C (0.7 K) lag die Jahresmitteltemperatur auf Rang 9, gleichauf mit denen von 1989 und 1995 (*Abbildung 3-24*).

3.5.2.4 2010

Die Nordatlantische Oszillation befand sich im DJFM-Tertial im negativsten Zustand seit 1899, welcher sich über der Nordsee in einer beispiellos geringen Sturmfrequenz (4) und einem schwachen SE-lichen Zustrom kontinentaler Kaltluft manifestierte (*Kapitel 2.2.4*). Im Einklang damit traten die stärksten Temperaturanomalien von -1 K bis -1.5 K in der südlichen und östlichen Nordsee auf; entlang der dänischen Küste und im Skagerrak war das Oberflächenwasser sogar um mehr als -2 K zu kalt (*Abbildung 3-22*). Die Wintertemperatur (JFM) der Nordsee war zwar mit 5.5 °C die kälteste seit 1996 (5.1 °C), lag jedoch deutlich über dem Rekordminimum von 1979 (4.5 °C) und lediglich -0.5 K (-0.6 StdAbw, Rang 36 resp. -8) unter dem Klimamittel.

Das WE-Gefälle des geographischen Anomalieverteilungsmusters schwächte sich im April unter Hochdruckeinfluss ab, verschärfte sich jedoch anschließend in einem nördlichen Anströmungsfeld, das auch im Juni noch fortbestand (*Abbildung 3-22*). Diese räumlichen Gegensätze kompensierten sich im Mittel in jedem der Frühjahrsmonate (*Abbildung 3-19*). Die Nordseetemperatur des AMJ-Quartals betrug 9.3 °C (0.1 K, Rang 22) und entsprach damit (fast) dem Klimanormal.

Im Juli stand die SE-liche Nordseeperipherie unter dem Einfluss eines russischen Omega-blocks, der hier eine Inversion der Temperaturanomalien herbeiführte (*Abbildung 3-22*). Der nachrückende Höhentrog und die an die starke Tiefdruckaktivität gekoppelte unbeständige Witterung führten im weiteren Verlauf des Sommers gleichzeitig zu einer Abschwächung der Temperaturanomalien im Süden und zu einer verstärkten Erwärmung der nördlichen Seegebiete. Die Nordseetemperatur lag im JAS-Quartal mit 15.2 °C (Rang 15) um 0.8 K über dem Klimamittel. Die entsprechenden Monatsanomalien schwankten nur geringfügig um dieses Niveau.

Das im Oktober noch schwach ausgeprägte E-Muster des Luftdruckanomaliefeldes verstärkte sich bis Dezember drastisch, als die Nordatlantische Oszillation mit -3.56 ihren Negativrekord vom Vorjahresdezember unterbot. Parallel dazu beschleunigte sich der Abbau des Wärmeüberschusses der Nordsee so weit, dass die mittlere Abkühlungsrate von November auf Dezember einen neuen Rekordstand von -2.9 K erreichte und zur Ausbildung einer großräumigen Kaltanomalie führte (*Abbildung 3-22*). Die Nordseetemperatur fiel dabei auf den zweittiefsten Stand vom Dez. 1973 (7.0 °C, -0.9 K, Rang 43 (-2)), der nur 1981 (6.5 °C) unterschritten wurde. Für das Herbstquartal ergibt sich die Normaltemperatur 9.8 °C und Rang 31 (-12).

Komplementäre Anomalien im Winter und Sommer führten zu einer erheblichen Verstärkung des Jahresgangs (*Abbildung 3-19*); die Amplitude der Nordseetemperatur (Aug. minus Feb.) war mit 10.9 K die dritthöchste nach 1997 (11.8 K) und 2003 (11.4 K). Mit 10.1 °C (0.3 K, 0.6 StdDev, Rang 24) war 2010 das kälteste Jahr seit 1996 (9.4 °C). Der Temperatursturz gegenüber dem extremen Temperaturplateau der 1. Dekade des neuen Jahrtausends stellt sich als Rücksprung auf das moderate Warmregime der 1990er Jahre dar (*Abbildung 3-24*), welches 2013 noch andauerte.

3.5.2.5 2011

Die Nordseetemperatur hatte bereits zum Jahreswechsel ihren saisonalen Tiefststand erreicht (*Abbildung 3-19*), auf dem sie im Winter (5.6 °C, -0.4 K, Rang 31 (-11)) stagnierte. Auf diesem Niveau war der Januar (-0.9 K) der viertkälteste, während Februar und März dem Klimanormal entsprachen. Die Seitwärtsentwicklung der Temperatur ging mit einer insgesamt gewöhnlichen WSW-Anströmung einher, die allerdings nur selten Sturmstärke erreichte (*Kapitel 2.2.5*).

Die Luftdruckverteilung im April reflektierte das Sommermuster eines stark positiven NAO-Zustands (2.32). Bei anomal hohem Druck über der Nordsee und saisonal fortgeschrittenem Sonnenstand bildete sich eine beckenweite, kräftige Warmanomalie aus (*Abbildung 3-23*), die den April mit 7.6 °C (1.0 K) zum viertwärmsten machte. Der Anstieg der Nordseetemperatur gegenüber der des Vormonats fiel mit 2.0 K nicht nur doppelt so hoch wie normal aus, sondern überbot den Rekordsprung (1.5 K) von 2009 und 2010 nochmals deutlich. Nach moderater Verstärkung im Mai kam es in wechselhafter Juniwitterung zu einem spürbaren Rückbau der Warmanomalie (*Abbildung 3-23*), so dass das Klimanormal nur noch um 0.5 K überschritten wurde. Insgesamt war das Frühjahr erheblich zu warm (10.2 °C, 0.9 K, Rang 7).

Die NAO befand sich im JJA-Quartal in einem äußerst negativen Phasenzustand (-2.06). Der damit verbundene zyklonale Witterungscharakter, der im Juni eingesetzt hatte, dauerte in den Hochsommermonaten weiter an. Die saisonale Entwicklung der Nordseetemperatur vollzog sich dabei auf einem gegenüber der Klimatologie um etwa 0.5 K höheren Niveau (*Abbildung 3-19*). Die gleiche Abweichung ergibt sich für die Sommertemperatur (JAS), die mit 14.9 °C einen unauffälligen 18. Rang belegte.

Die kräftige WSW-Anströmung im Herbst gliederte sich in drei sehr richtungsstabile Phasen, die etwa 3 (W), 4 (S) und 5 (W) Wochen andauerten und deren Übergänge sich durch markante Windsprünge von W auf S und zurück auf W auszeichneten. Das W-Windregime, das Ende November mit einer Sturmballung einsetzte, behielt seinen stürmischen Charakter im Dezember bei, als der positive Mode der NAO die Rekordhöhe von 2.65 erreichte. Bereits im Oktober erfasste die Warmanomalie wieder das gesamte Nordseebecken (*Abbildung 3-23*). In der anschließenden S-Anströmung fielen die Abkühlungsraten weiter zu gering aus, so dass sich die Anomalie im November nochmals verstärkte und die Nordseetemperatur um 1.4 K (2.8 StdAbw, Rang 3) über dem Mittel zu liegen kam (*Abbildung 3-19*). Obgleich sich dieses hohe Niveau im Dezember nicht halten ließ, erwies sich das Herbstquartal mit 10.9 °C (1.1 K, 2.7 StdAbw) als das drittwärmste im Zeitraum 1969–2013.

Die Jahresmitteltemperatur nahm mit 10.2 °C (0.4 K) Rang 21 ein. Sie lag damit gleichauf mit denen von 1973 und 1988 und marginal über der des Vorjahres (*Abbildung 3-24*).

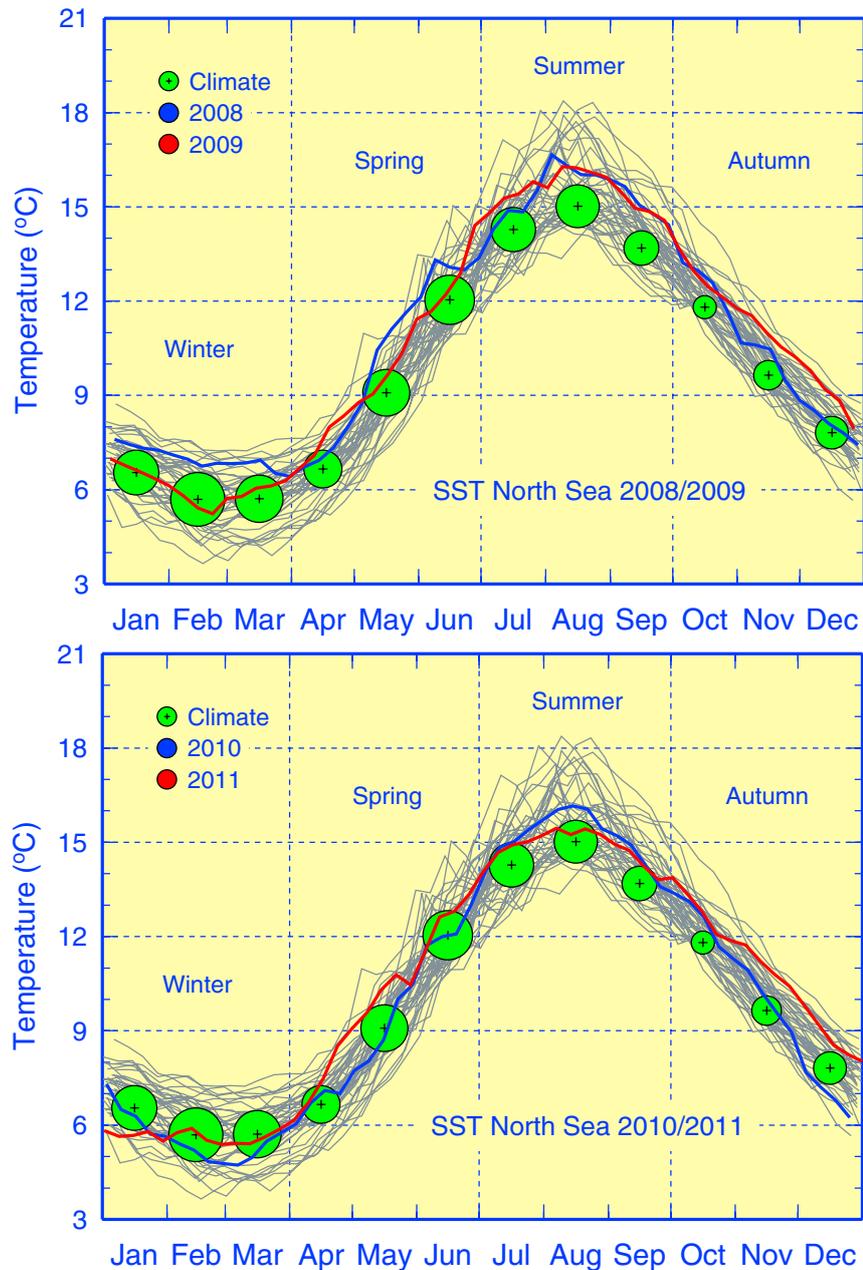


Abbildung 3-19: Jahreszyklen für 2008 bis 2011 der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen mit Ensemble seit 1969 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971–1993) und zwischenjährlichen Standardabweichungen (Kreisradius).

Figure 3-19: Seasonal cycles for 2008 through 2011 of spatial mean weekly SST of the North Sea together with ensemble of corresponding cycles since 1969. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971–1993.

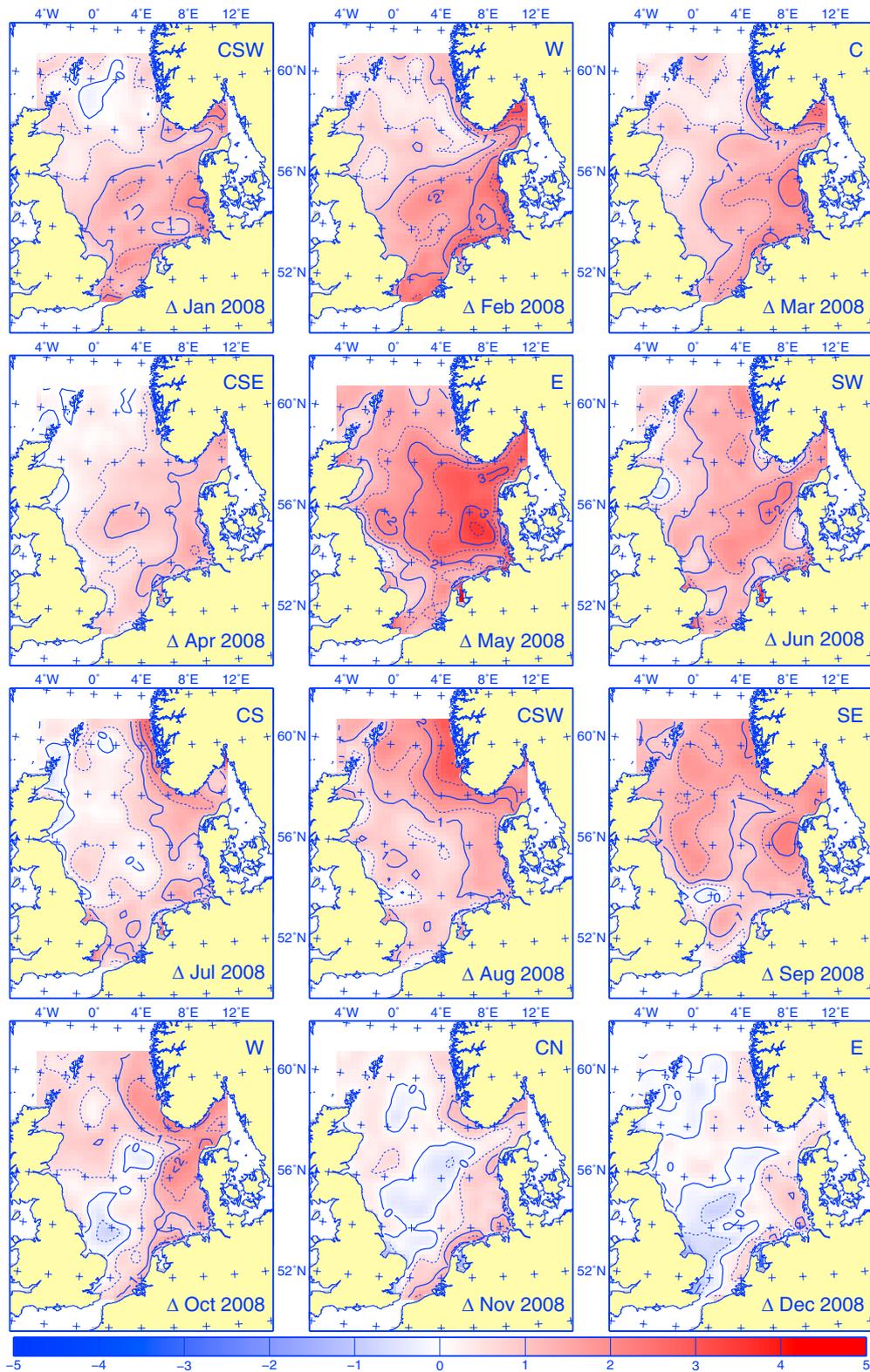


Abbildung 3-20: Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2008 als Abweichungen von der 1971–1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K. Kürzel, oben rechts, bezeichnen atmosphärische Zirkulationsanomalien (Abbildung 2-11).

Figure 3-20: Monthly SST anomalies in 2008 as departures from the 1971–1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. Letter codes (upper right) refer to atmospheric circulation anomalies (Figure 2-11).

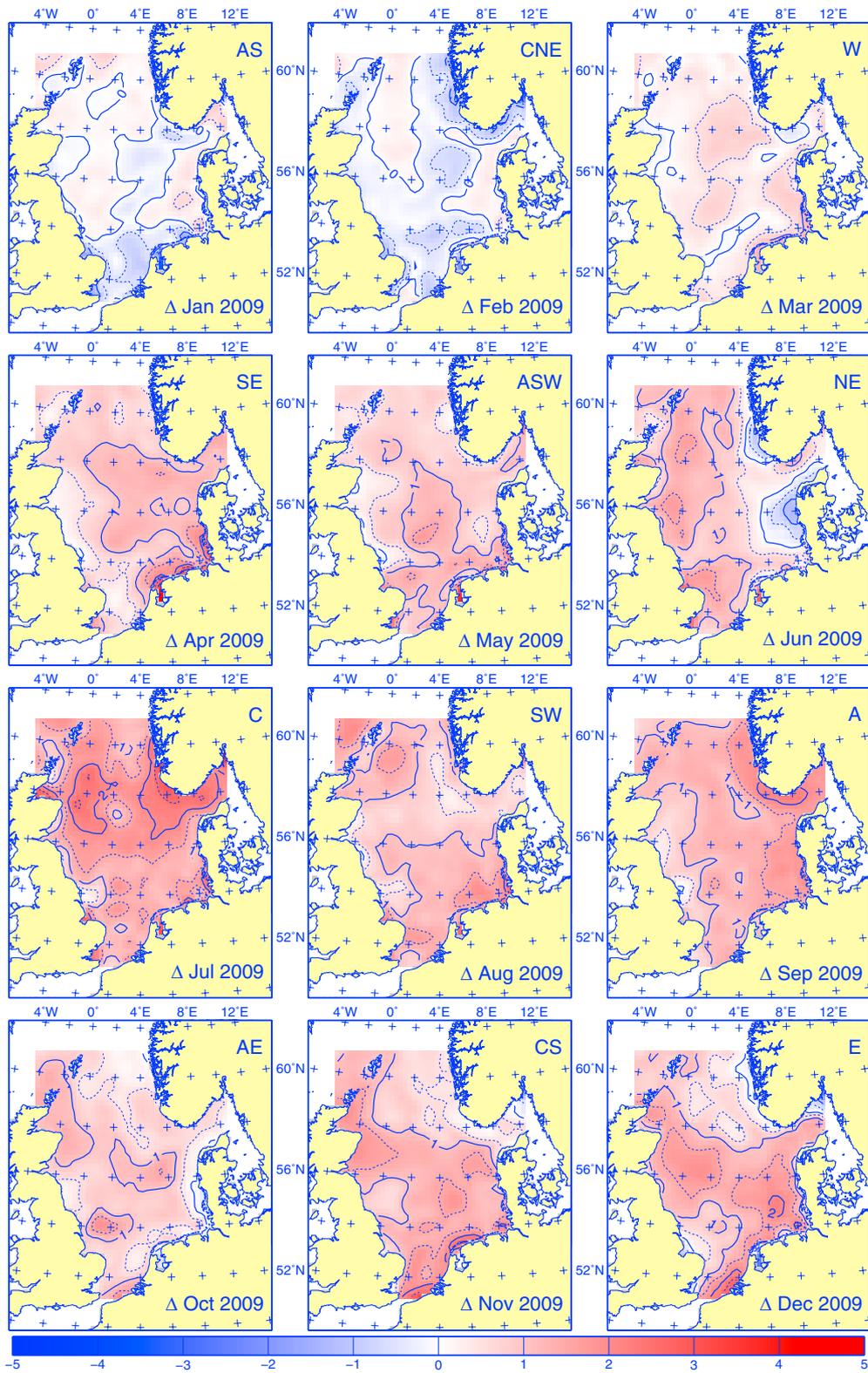


Abbildung 3-21: Wie Abbildung 3-20, jedoch für 2009.

Figure 3-21: As Figure 3-20, except for 2009.

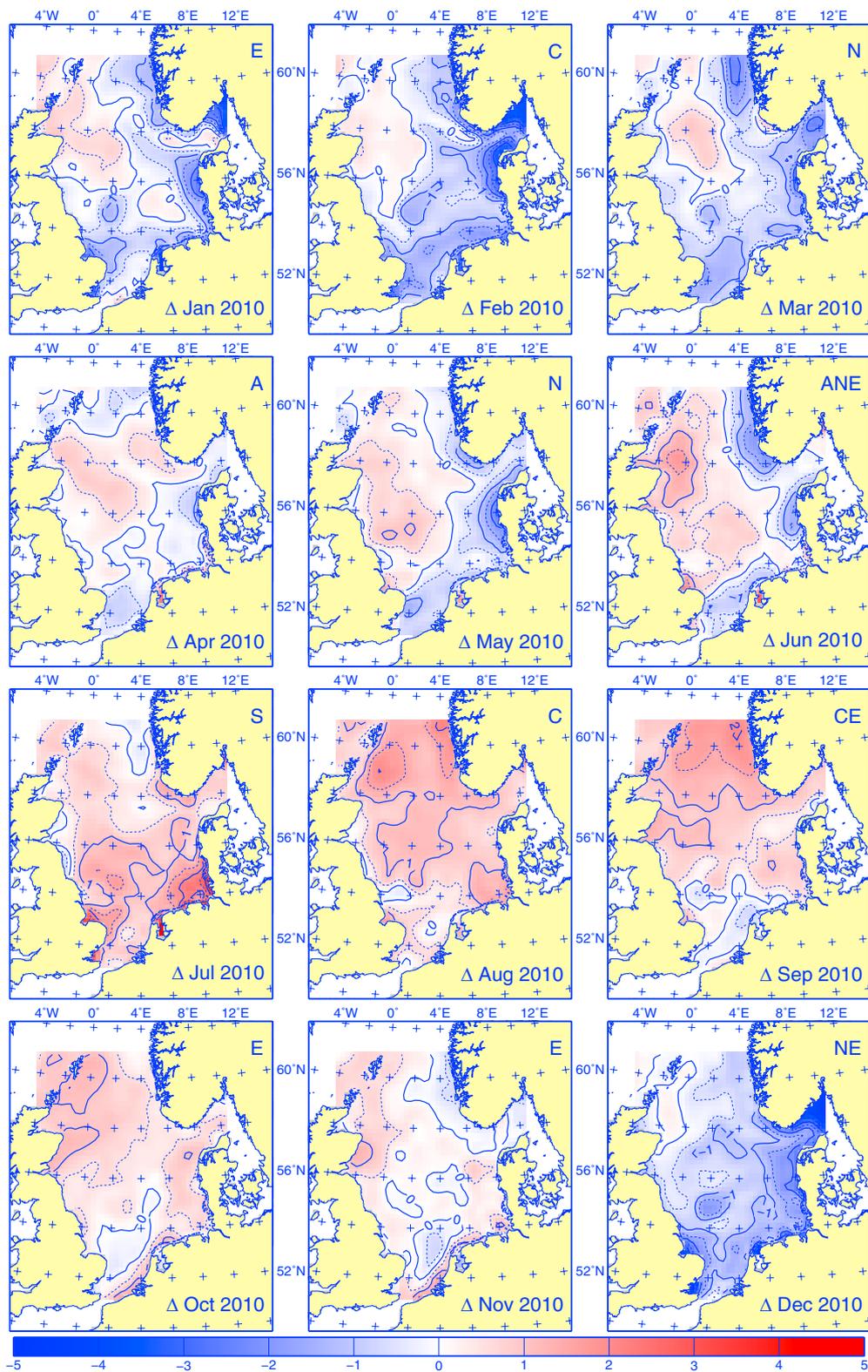


Abbildung 3-22: Wie Abbildung 3-20, jedoch für 2010.
Figure 3-22: As Figure 3-20, except for 2010.

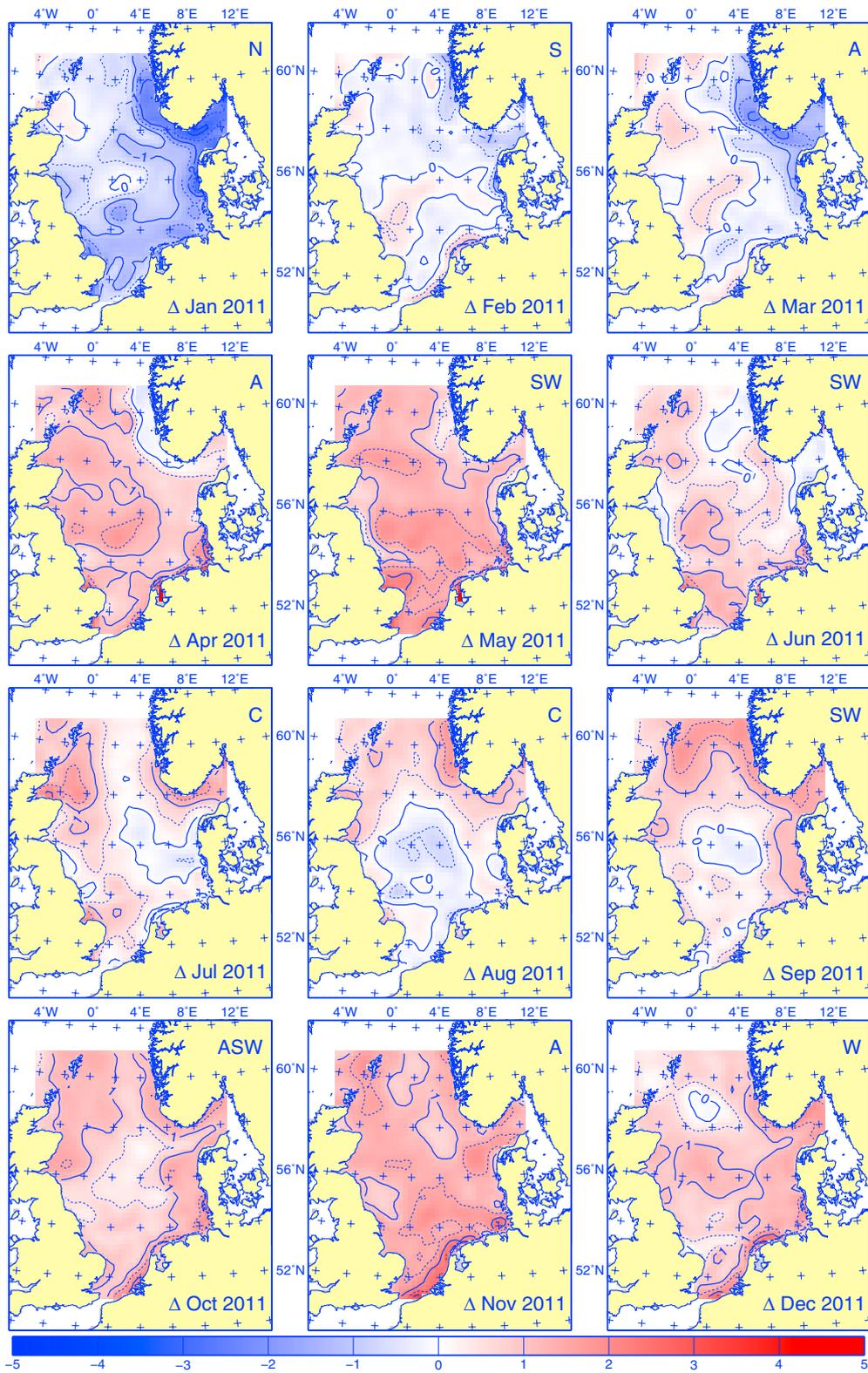


Abbildung 3-23: Wie Abbildung 3-20, jedoch für 2011.

Figure 3-23: As Figure 3-20, except for 2011.

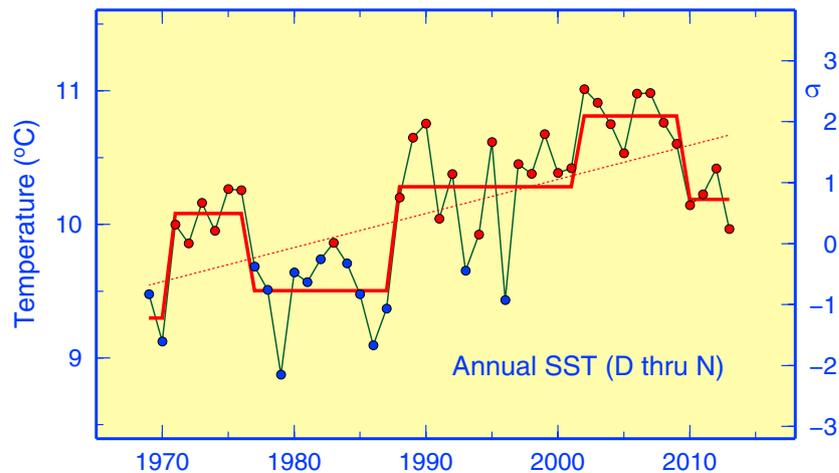


Abbildung 3-24: Zeitserie der jährlichen (Dez. bis Nov.) Nordseeoberflächentemperatur mit linearem Trend sowie Regimes. Jahreswerte in blau, falls < 9.86 °C (Mittelwert der Basisperiode 1971–1993), rot sonst. Rechte Achse: Standardisierte Abweichungen ($\sigma = 0.46$ K).

Figure 3-24: Time series of annual (Dec. through Nov.) North Sea SST together with linear trend and regimes. Annual data blue if < 9.86 °C (base period mean 1971–1993), red otherwise. Right scale: standardized departures ($\sigma = 0.46$ K).

3.5.3 Temperaturschichtung

Weite Gebiete der Nordsee mit Wassertiefen größer als etwa 30 m sind im Sommerhalbjahr thermisch geschichtet. Diese saisonale vertikale Temperaturschichtung bildet sich in jenen Seegebieten aus, in denen sich die am Meeresboden erzeugte Gezeitenstromturbulenz nicht bis in die winddurchmischte Oberflächenschicht auswirkt. In der als Thermokline bezeichneten Temperatursprungschicht zwischen warmer Deckschicht und kälterer Bodenschicht werden bei voll entwickelter Schichtung regional Temperaturgradienten von mehr als drei Kelvin pro Meter gemessen. Da sich mit der Temperatur auch die Dichte ändert, stellt die Thermokline eine Dichte-Barriere dar, die den vertikalen Stoff- und Gasaustausch deutlich behindert. In den flacheren Gebieten, wo sich die Gezeitenstrom- und windinduzierten Turbulenzonen überlappen, tritt allenfalls kurzzeitig ein thermischer Gradient in Oberflächennähe auf, der entweder durch den Seegang, 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 (Solarstrahlung, fühlbarer Wärmestrom) und kinetischer Energiezufuhr (Windsee, Dünung) können sich eine oder auch mehrere thermische Sprungschichten ausbilden, deren Tiefen von Jahr zu Jahr variieren. Die *Abbildung 3-25* zeigt die mittlere Tiefe der sommerlichen Thermokline, basierend auf den Daten der Nordseeaufnahmen 1998–2008 zusammen mit der Standardabweichung.

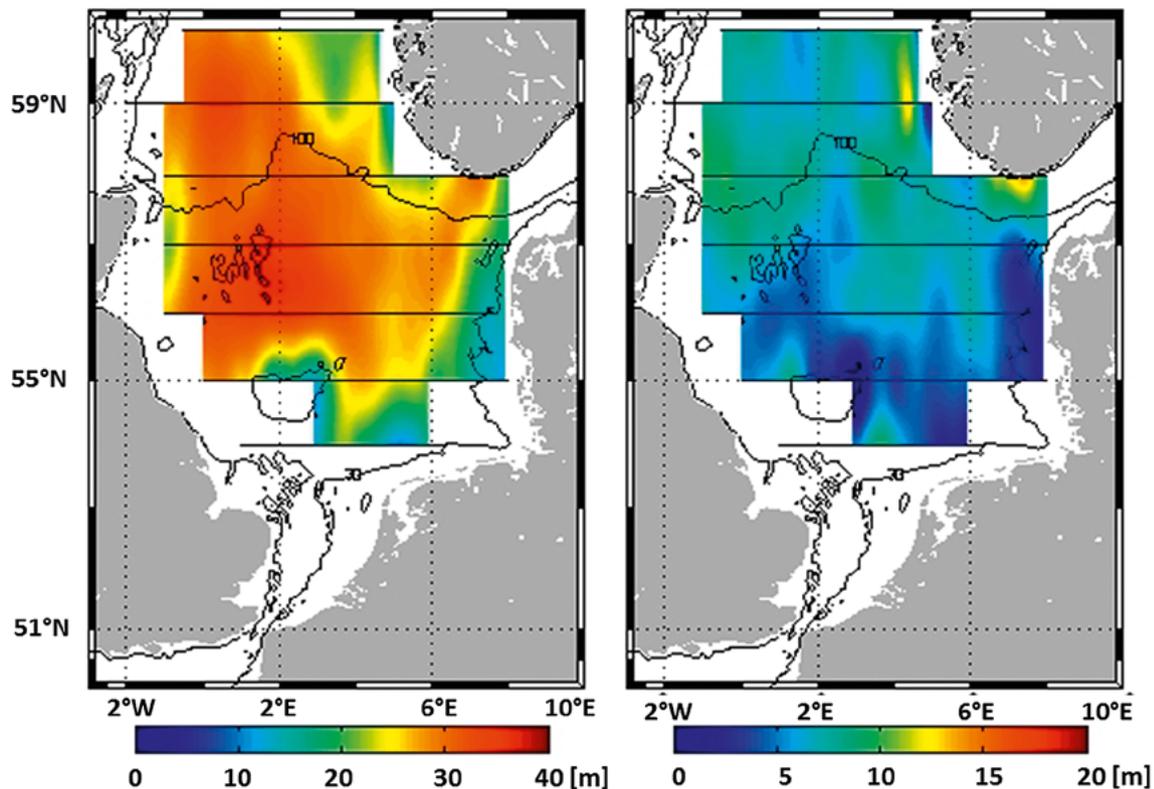


Abbildung 3-25: Dekadisches Mittel der thermischen Sprungschichttiefe 2000–2010, aber ohne 2002 (links) und Standardabweichung (rechts) aus den Daten der BSH Nordsee Sommeraufnahmen.
Figure 3-25: Decadal mean of thermocline depth (left) and standard deviation right) basing on the BSH North Sea Summer Surveys 2000–2010 but without 2002.

Die *Abbildungen 3-27 bis 3-30* mit den Temperaturschichtungen entlang der zonalen Schnitte der Sommeraufnahmen 2008–2011 belegen die große zwischenjährliche Variabilität der thermischen Schichtung. Generell nehmen die Temperaturen der Nordsee von offenen nördlichen Rand in Richtung der Deutschen Bucht zu, wobei die Isothermen in etwa in SW – NE Richtung verlaufen. **2008** hingegen verliefen die Isothermen in der warmen Deckschicht in NNW – SSE Richtung mit einer deutlichen Erwärmung an der norwegischen und jütländischen Küste. Die SST-Monatsanomalien betragen +0.6 und +1.2 K für Juli, bzw. August. In der Bodenschicht hingegen zeigte sich das klassische SW – NE Muster, d. h., die horizontale Verteilung und die Temperaturwerte entsprachen weitgehend dem Vorjahr. Die Vertikalschnitte zeigen in der nordöstlichen Nordsee einen starken vertikalen Gradienten der deutlich nach Westen hin abnimmt, so dass dort teilweise gar keine Thermokline ausgebildet wird. Alle Schnitte wiesen an der Oberfläche ein horizontaler Gradient mit von E nach W abnehmenden Temperaturen auf. Der 54° N-Schnitt ist infolge der Gezeitenreibung und starker Winde weitgehend vertikal durchmischt, ebenso wie das östliche Ende und der Bereich der Doggerbank auf dem 55° N-Schnitt. Der südlichste Schnitt auf 54° N beruht nur auf vertikalen CTD-Profilen, da das geschleppte Messsystem technische Probleme hatte. Der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee betrug $1.583 \times 10^{21} \text{ J}$.

Im Gegensatz zum Vorsommer wies die SST **2009** wieder den klassischen Gradienten mit einem SW – NE Verlauf der Isothermen auf. Die Verteilung der Bodentemperatur entsprach weitgehend dem Vorjahr, die vertikal durchmischten Gebiete vor der südlichen und der

dänischen Küste waren mit fast 20 °C aber deutlich wärmer als 2008. Die Tiefe der Deckschicht betrug in der zentralen Nordsee und im Skagerrak über 40 m mit maximalen vertikalen Gradienten von über 3 K/m. Die Stärke des Gradienten in der Thermokline nahm nördlich von 57° N in Richtung Norden ab. Die in fast allen Jahren beobachtete Depression der Thermokline über der Norwegischen Rinne bei etwa 7° E und 58° N erreichte 2009 ein Maximum von 80 m. Die Bodenschicht war generell dünner und wärmer als 2008, aber 2008 fand die Aufnahme einen Monat früher statt, so dass das Maximum der Bodentemperatur, das etwa einen Monat später erreicht wird als das Maximum in der Deckschicht, eventuell noch nicht erreicht wurde. Deshalb ist auch der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee mit 1.755×10^{21} J höher als im Vorjahr.

2010 war der vertikal durchmischte Streifen wärmeren Wassers parallel zur kontinentalen Küste etwa 1 K kühler als im Vorjahr. In den geschichteten Bereichen stieg die Differenz zwischen der warmen Deckschicht und dem Bodenwasser um etwa 2 K gegenüber 2009 an. Die Mächtigkeit der Deckschicht war mit 20–30 m deutlich geringer als im Vorjahr und auch die maximalen Gradienten in der Thermokline waren mit 1.5 K/m deutlich geringer. Eine scharf ausgebildete Thermokline fand sich nur auf den 55° und 56° N-Schnitten östlich der Doggerbank. Durch die geringere Mächtigkeit der Deckschicht konnte das kühlere Bodenwasser ein größeres Volumen besetzen, so dass der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee auf 1.632×10^{21} J abfiel.

Auch **2011** hat sich der vertikal durchmischte Streifen wärmeren Wassers parallel zur kontinentalen Küste um etwa 1 K gegenüber dem Vorjahr abgekühlt und in den geschichteten Bereichen hat sich die Differenz zwischen der warmen Deckschicht und dem Bodenwasser gegenüber 2010 von 10 auf 8 K verringert. Die Dicke der Deckschicht hat im Mittel gegenüber 2010 um 5 zugenommen, die maximale Deckschichttiefe betrug 40 m. Die Gradienten in der Thermokline lagen zwischen 0.5 und 2.5 K/m. Im Vergleich zu 2010 der der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee an und lag mit 1.669×10^{21} J über dem 10-Jahresmittel (ohne 2002) von 1.631×10^{21} J.

date of cruise	mid-term of survey	THC [$\times 10^{21}$ J]	ΔH [std dev]	VT [$^{\circ}$ C]	SST [$^{\circ}$ C]
7/02–7/22/1999	7/09	1.427	–2.38	9.4	15.2
8/09–8/23/2000	8/16	1.603	–0.33	10.5	15.3
7/11–8/02/2001	7/27	1.438	–2.25	9.4	15.2
7/16–7/31/2002	7/25	1.587	–0.52	10.4	15.4
7/28–8/13/2003	8/04	1.707	0.88	11.2	17.8
8/05–8/20/2004	8/12	1.692	0.71	11.1	17.1
8/10–8/29/2005	8/20	1.624	0.08	10.7	14.9
8/02–8/20/2006	8/11	1.619	–0.14	10.6	17.0
8/03–8/17/2007	8/10	1.659	0.32	10.9	15.3
7/21–8/05/2008	7/29	1.583	–0.56	10.4	16.1
8/20–9/09/2009	8/29	1.755	1.44	11.5	15.7
8/04–8/24/2010	8/13	1.632	0.01	10.7	16.0
8/08–8/28/2011	8/17	1.669	0.44	11.0	15.3
8/07–8/26/2012	8/16	1.695	0.47	11.1	16.1
8/10–8/31/2013	8/21	1.627	–0.05	10.7	15.9
8/02–8/21/2014	8/12	1.740	1.32	11.4	16.7
10 year average 2000–2010 (ex 2002) \pm standard deviation		1.631 ± 0.086	–	10.70 ± 0.57	15.98 ± 0.99

Tabelle 3-5: Gesamt-Wärmeinhalt (THC) und mittlere Volumentemperatur (VT) der Nordsee basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen, sowie Nordsee SST gemittelt über die Dauer der Messreisen. ΔH = Standardisierte Anomalie (Differenz zum Mittelwert der Referenzperiode in Standardabweichungen)².
 Table 3-5: Total heat content (THC) and mean volume temperature (VT) of the North Sea, data from summer cruises and North Sea SST averaged over cruise duration. ΔH = standardised anomaly (difference to reference period mean in standard deviations)².

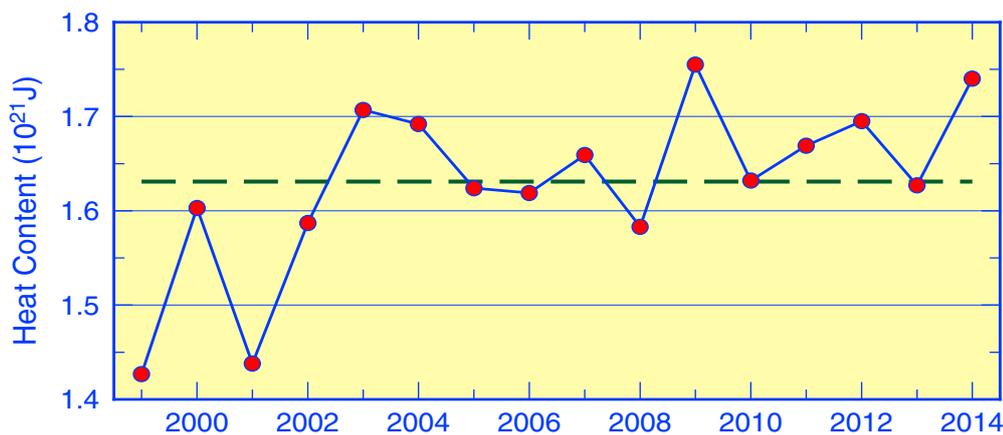


Abbildung 3-26: Gesamter Wärmeinhalt der Nordsee im Sommer in 10^{21} J von 1999 bis 2014. Gestrichelte Linie: Mittelwert der Referenzperiode 2000–2010 ($1.631 \pm 0.086 \times 10^{21}$ J) basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen.

Figure 3-26: Total heat content in 10^{21} J from 1999 to 2014. Broken line: average of reference period 2000 to 2010 ($1.631 \pm 0.086 \times 10^{21}$ J) basing on summer cruise data.

² Der Gesamt-Wärmeinhalt wurde im Januar 2013 unter Einbeziehung zusätzlicher CTD-Stationen in Gebieten ohne ScanFish Daten neu berechnet. Die Werte in dieser Tabelle können deshalb geringfügig von denen in früheren Publikationen abweichen.

The total heat content was re-calculated in January 2013 including additional CTD data for areas where no ScanFish data were available due to technical problems. Therefore, the values in this table differ slightly from previous reports.

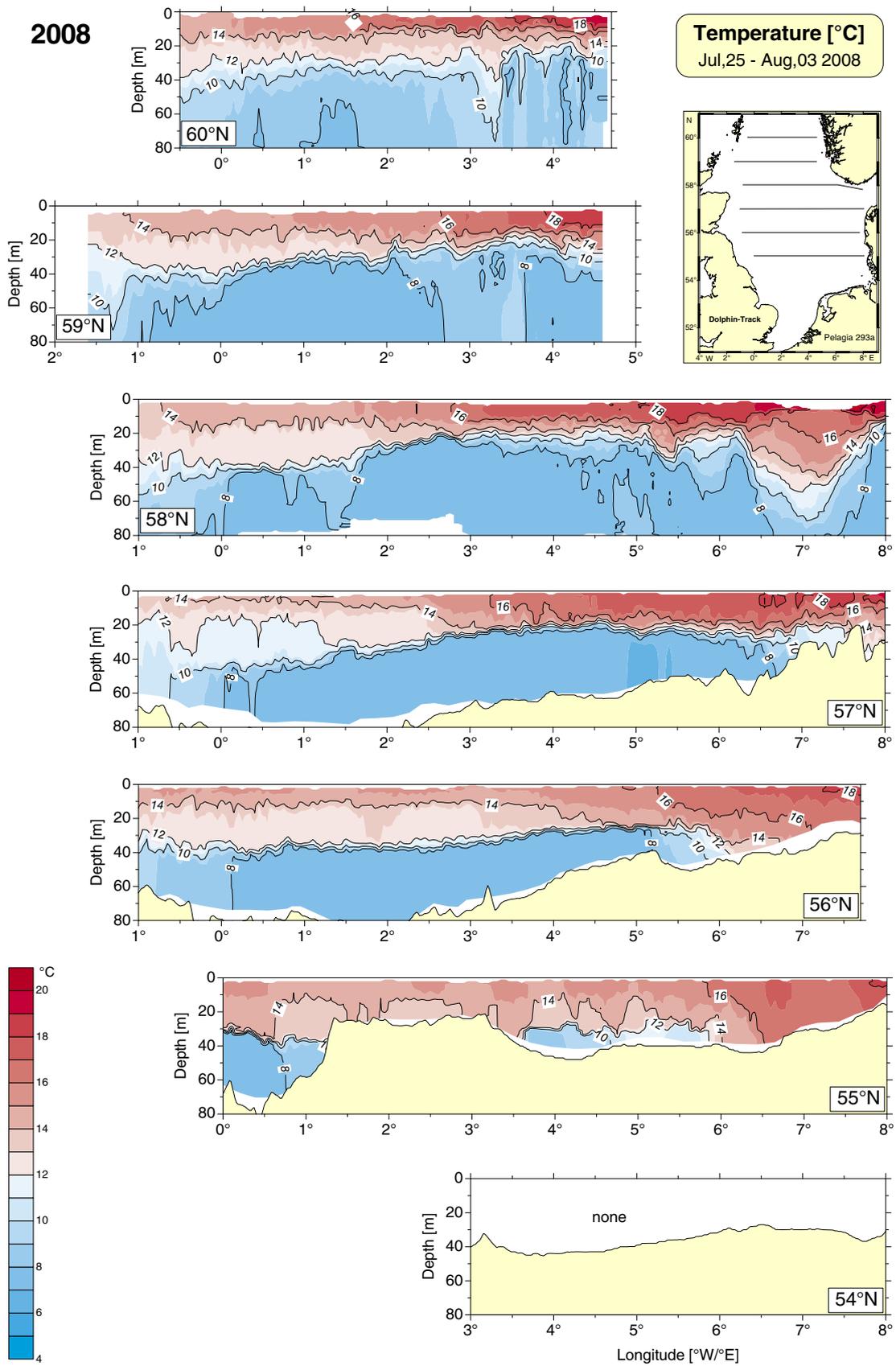


Abbildung 3-27: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2008 (FS Pelagia 293a).
 Figure 3-27: Temperature stratification (°C) during summer 2008 (RV Pelagia 293a).

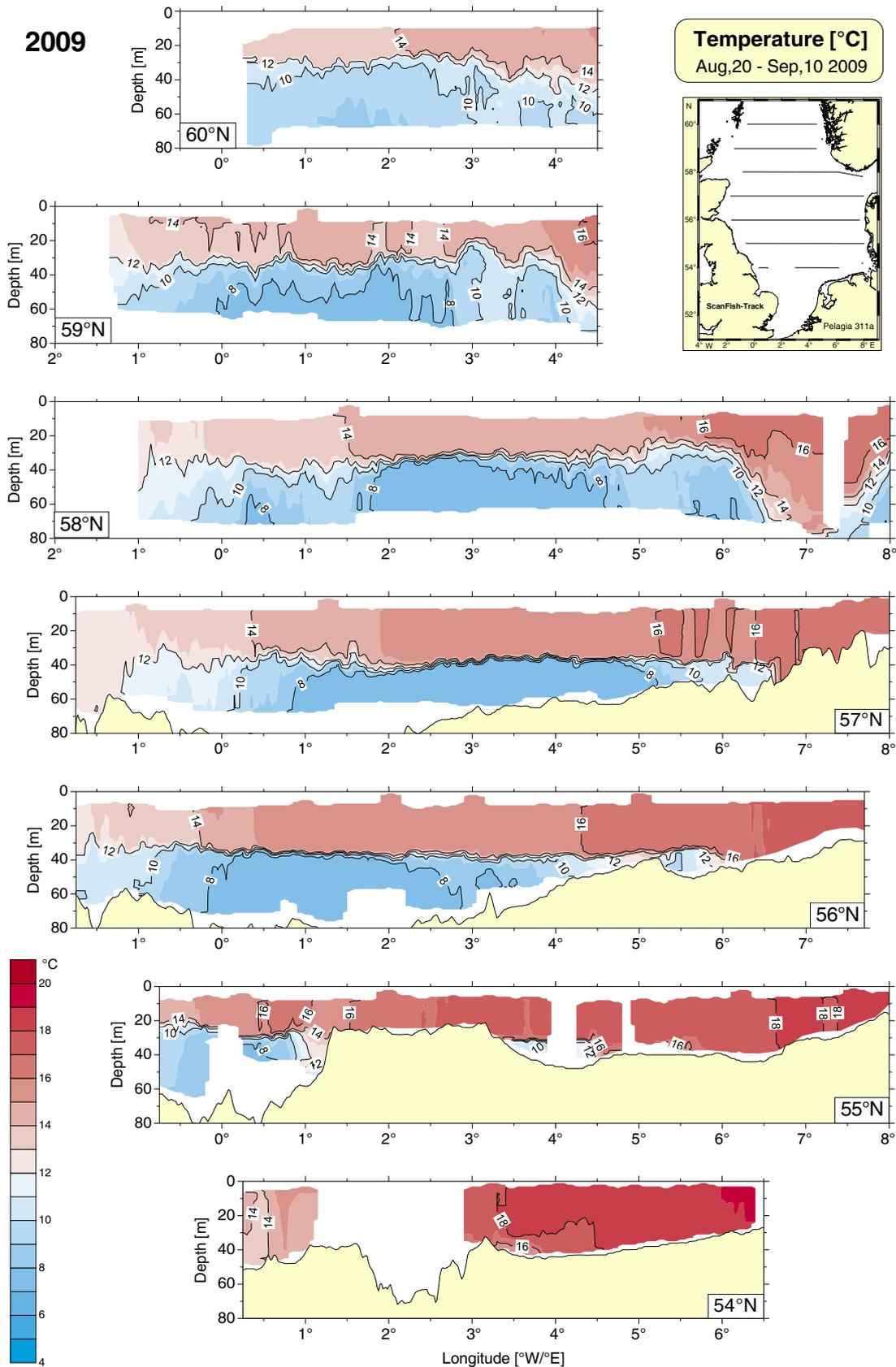


Abbildung 3-28: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2009 (FS Pelagia 311a).

Figure 3-28: Temperature stratification (°C) during summer 2009 (RV Pelagia 311a).

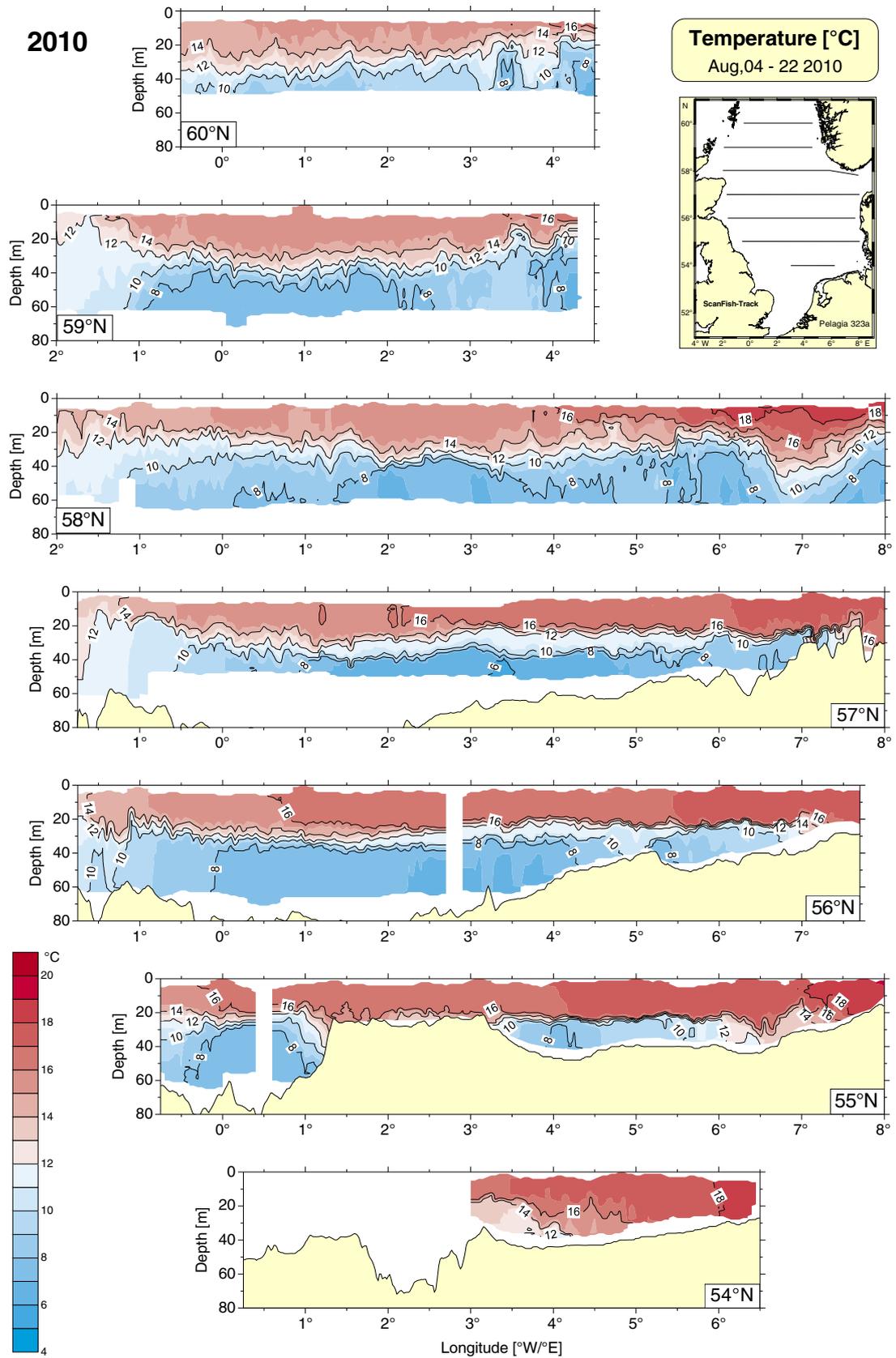


Abbildung 3-29: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2010 (FS Pelagia 323a).
Figure 3-29: Temperature stratification (°C) during summer 2010 (RV Pelagia 323a).

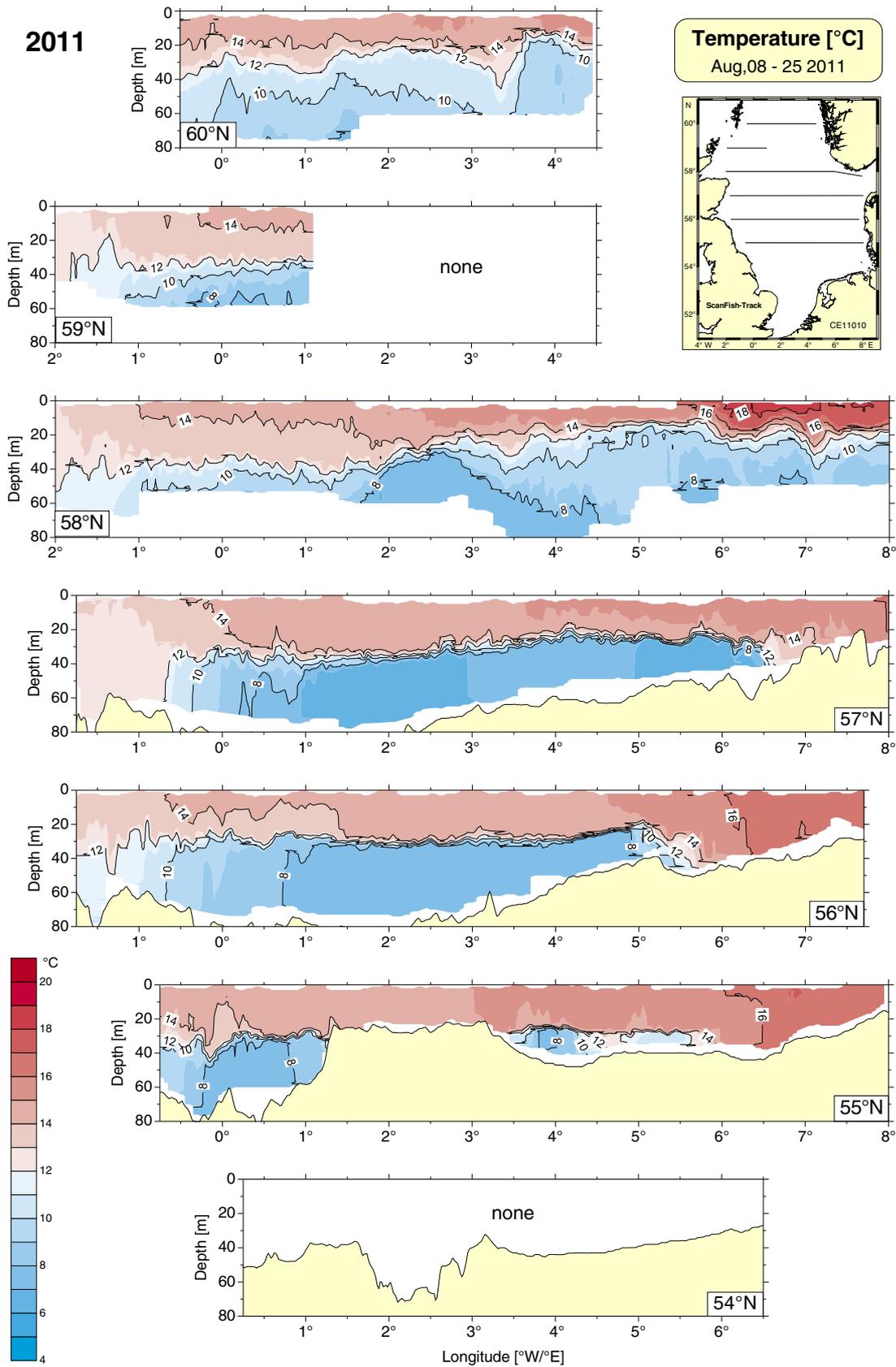


Abbildung 3-30: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2011 (FS Celtic Explorer 11010a).
 Figure 3-30: Temperature stratification (°C) during summer 2011 (RV Celtic Explorer 11010a).

Die Temperaturbedingungen in der Deutschen Bucht werden exemplarisch anhand der Aufzeichnungen an der MARNET-Station „Deutsche Bucht“ (54° 10' N; 7° 27' E, Wassertiefe 38 m) in 3–30 m Messtiefe dokumentiert. Lücken in den Aufzeichnungen entstehen u. a. durch technische Probleme, Biofouling oder Instandhaltungsarbeiten (Wertzeiten). Die horizontalen durchbrochenen Linien markieren das klimatologische saisonale Temperaturmini- und Maximum in der Oberflächenschicht, basierend auf der Klimatologie von Janssen et al. (1999) mit einer Amplitude von etwa 13.5 K. Generell baut sich die thermische Schichtung zwischen Ende März und Anfang April auf und dauert bis Ende August oder Anfang September wenn die Schichtung durch die Herbst- und Winterstürme bis zum nächsten Frühjahr aufgebrochen wird.

Die auf Tagesmittelwerten beruhenden Daten in *Abbildung 3-31* zeigen deutlich den ständigen Auf- und Abbau der sommerlichen thermischen Schichtung, der sowohl vom zeitlichen Verlauf als auch von der Intensität der Schichtung her von Jahr zu Jahr unterschiedlich verläuft. Zu den dominanten Signalen gehört die positive Anomalie der Winterminima im Winter 2007/2008 mit einer Abweichung von etwa 2 K infolge des Wärmeüberschusses aus den vorangegangenen Sommer- und Herbstmonaten. Im Winter 2008/2009 näherten sich die Winterminima wieder den klimatologischen Werten an. Die Sommermaxima der Tagesmittelwerte liegen bis zu 3 K über der Klimatologie. Besonders ausgeprägt war die Schichtung 2010. Die Unterschiede von Oberflächen- und Bodentemperatur betragen bis zu 8 K, wobei das saisonale Maximum in der Oberflächenschicht etwa 6 Wochen vor dem der Bodenschicht erreicht wurde. Ursache für die ausgeprägte Schichtung sind ungewöhnlich hohe Wärmeeinträge aus der Atmosphäre im April und Sommer 2010. 2011 lagen die Strahlungseinträge im Sommer deutlich unter dem langjährigen Mittel. Dies führte was zu einem geringeren Sommermaximum und einer nur schwach ausgeprägten Schichtung.

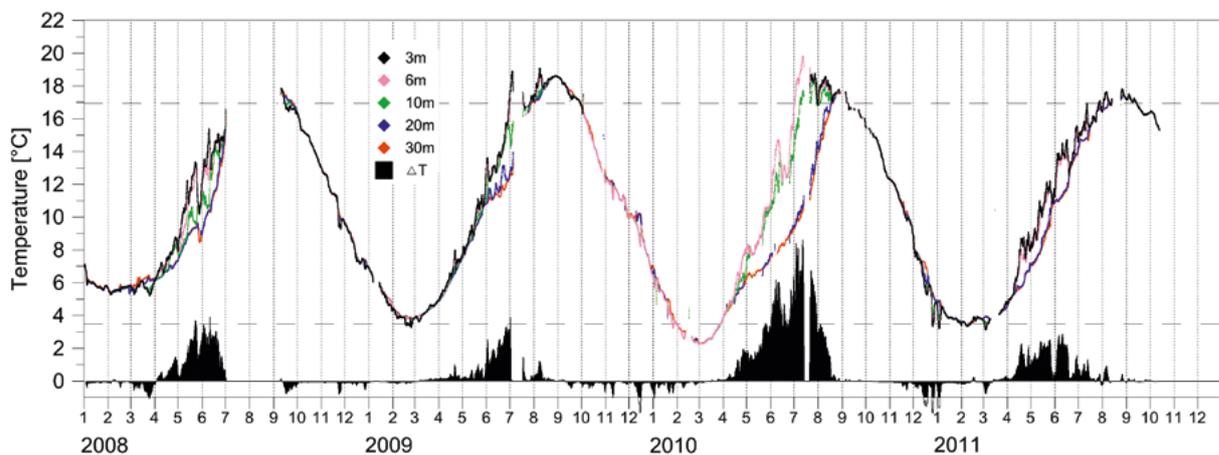


Abbildung 3-31: Temperaturverlauf am an der MARNET-Station Deutsche Bucht in 3, 6, 10, 20 und 30 m Tiefe. Im unteren Bereich ist die Temperaturdifferenz ΔT Oberfläche minus Boden dargestellt. Die gestrichelten Linien geben die Lage des saisonalen klimatologischen Mini- und Maximums in die Oberflächenschicht nach JANSSEN et al. (1999).

Figure 3-31: Temperature time series at MARNET station German Bight in 3, 6, 10, 20 and 30 m depth. The lower part of the diagram shows the temperature difference ΔT surface minus bottom. The broken lines give the climatological seasonal mini- and maximum for the surface layer according to JANSSEN et al. (1999).

3.5.4 Meereis

Die ausführlichen Beschreibungen der Eiswinter 1999/2000 bis 2011/12 sind im Internet unter <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/1975.jsp> zu finden.

Die Stärke eines Eiswinters an den deutschen Küsten wird durch die *flächenbezogene Eisvolumensumme* ($V_{A\Sigma}$) bzw. *durch die reduzierte Eissumme* (R_e) ausgedrückt. Erläuterungen dieser Begriffe sind unter <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Eis/Kuesten.jsp> zu finden.

Der Eiswinter **2007/08** ergab an den deutschen Küsten eine sehr schwache Eissaison. Die Nordseeküste blieb bis auf zwei Tage mit geringem Eisvorkommen im Hafen Tönning eisfrei. Somit ist der Wert der flächenbezogenen Eisvolumensumme für die Nordseeküste gleich Null.

Der Eiswinter **2008/09** an der deutschen Nordseeküste war der dritte schwache Eiswinter in Folge. Die flächenbezogene Eisvolumensumme ist 0.19 m, und die reduzierte Eissumme hat den Wert 3.7.

Der Winter **2009/10** liegt im Hinblick auf die erzeugte Eismenge und die Dauer der Eisbedeckung an der deutschen Nordseeküste im Bereich eines mäßigen Eiswinters. $V_{A\Sigma}$ und R_e betragen 3.11 m und 31.2. In der seit 1896/97 bestehenden Beobachtungsreihe waren an der Nordseeküste nur 27 Eiswinter stärker als die Eissaison 2009/10.

Der Winter 2009/10 wurde bestimmt durch eine von Mitte Dezember bis Ende Februar dauernde Kälteperiode, die kurzzeitig um die Jahreswende unterbrochen wurde. Das erste Eis bildete sich an der nordfriesischen Küste sowie auf der Unterelbe zwischen dem 16. und dem 23. Dezember 2009. Infolge des Weihnachtstauwetters verschwand aber das meist sehr dünne Eis an der Nordseeküste vollständig. Die Eisbildung begann erneut Anfang Januar in den geschützt liegenden inneren Bereichen, breitete sich auf die Wattflächen aus und setzte sich ohne Unterbrechungen bis Mitte Februar fort.

Zum Zeitpunkt der maximalen Eisausdehnung Mitte Februar 2010 waren alle Häfen an der deutschen Nordseeküste, die Nordseezuflüsse und der Nord-Ostsee-Kanal mit Eis bedeckt. Weiter außerhalb trat Eis in den Wattenbereichen auf. Die maximalen Eisdicken des thermisch gewachsenen Eises erreichten zur Zeit der maximalen Eisentwicklung im Nord-Ostsee-Kanal 5 bis 15 cm. Für den Wattenbereich der Nordsee und deren Zuflüsse ist der Begriff der „thermisch gewachsenen Eisdicke“ nicht anwendbar. Durch den Tideeinfluss auf diese Gebiete wird das Eis zusammen- und übereinandergeschoben, sodass es bei kalter Witterung zu dickeren Schollen zusammen frieren kann. So erreichten die Dicken des ebenen Eises im Winter 2009/10 Werte von 15 bis 50 cm an der nordfriesischen Küste, von 5 bis 30 cm auf der Elbe und überwiegend 5 bis 15 cm an der ostfriesischen Küste. Es wurden aber auch Aufschiebungen und Aufpressungen sowie einzelne Eisblöcke mit einer Höhe von 60 cm bis 2 m beobachtet.

In der dritten Februardekade setzte sich mit südwestlichen Winden nach und nach wärmere Luft in den Küstenregionen durch und leitete den Eisrückgang ein. Die Nordseeküste, die Nordseezuflüsse und der Nord-Ostsee-Kanal waren am 7. März vollkommen eisfrei. Die Anzahl der Tage mit Eis variierte von Bereich zu Bereich erheblich: Das Eis trat auf der Weser bei Brake nur 1 Tag auf, aber 57 Tage im Hafen Tönning. Nur die Stationen in den Außenbereichen der inneren Deutschen Bucht blieben im Winter 2009/10 vollkommen eisfrei.

An der deutschen Nordseeküste wurde im Winter **2010/11** um etwa die Hälfte weniger Eis gebildet als im Eiswinter 2009/10, siehe *Abbildung 3-32*. Trotzdem gehören beide Winter in den Bereich der mäßigen Eiswinter ($0.35 \text{ m} < V_{A\Sigma} < 3.5 \text{ m}$), die an der Nordsee im Zeitraum von 1961 bis heute mit einer Häufigkeit von 34 % vorkamen. Die flächenbezogene Eisvolumensumme im Eiswinter 2010/11 beträgt 1.47 m, die reduzierte Eisumme 23.1.

Entsprechend den meteorologischen Bedingungen gab es an der deutschen Nordseeküste im Winter 2010/11 zwei Eisbildungsperioden. Die größten Eismengen wurden in der ersten Eisperiode, die von Ende November bis Anfang Januar dauerte, produziert. In der zweiten Februarhälfte, während der zweiten Kälteperiode, war die Eisbildung an der Nordseeküste gering, die Nordseezuflüsse und die ostfriesische Küste blieben vollständig eisfrei.

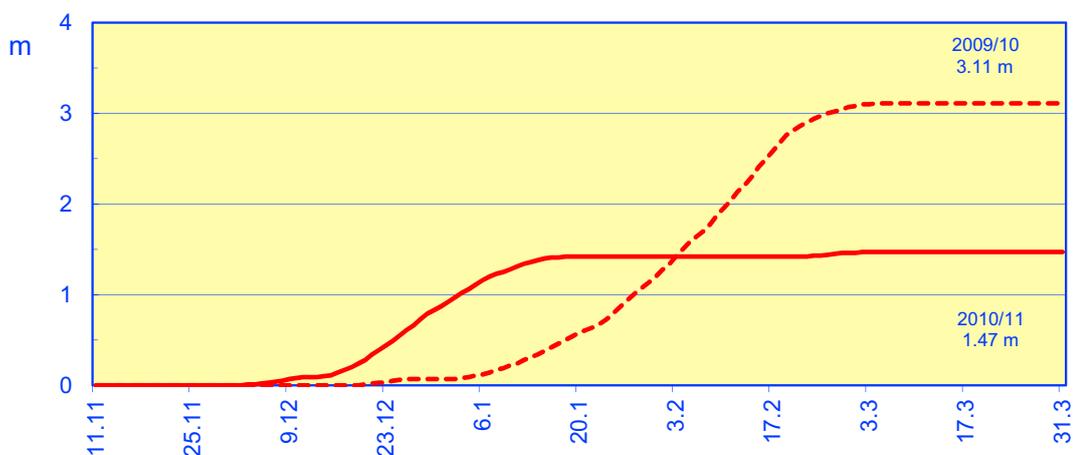


Abbildung 3-32: Akkumuliertes flächenbezogenes Eisvolumen an der deutschen Nordseeküste in den Wintern 2009/10 und 2010/11.

Figure 3-32: Accumulated areal ice volume on the German North Sea coast in the winters of 2009/10 and 2010/11.

Das erste Eis bildete sich in mehreren Häfen und inneren Bereichen der ostfriesischen und nordfriesischen Küsten Anfang Dezember 2010, zwei bis drei Wochen früher als im langjährigen Durchschnitt. Die Eisbildung schritt kontinuierlich voran und erreichte in den letzten Dezembertagen ihren höchsten Stand, siehe die Eiskarte in der *Abbildung 3-33*. Zu diesem Zeitpunkt waren die Wattenbereiche sowie die inneren Bereiche der Ems, Weser und Elbe mit sehr lockerem bis sehr dichtem Eis bedeckt. Das Eis erreichte Dicken von 5 bis 15 cm in südlichen Abschnitten und von 10 bis 30 cm an der nordfriesischen Küste. Durch Tideeinfluss und zeitweise auffrischende auflandige Winde wurde das Eis an einigen Küstenabschnitten bis zu einer Höhe von 50 bis 80 cm zusammengeschoben. Insgesamt dauerte die Vereisung in den Bereichen der ostfriesischen Küste und der Nordseezuflüsse bis zu 4 Wochen, 30 bis 60 Tage lang wurde Eis in Bereichen der nordfriesischen Küste beobachtet.

Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie

EISKARTE
Jahrgang 84

Nr. 12
Rostock, 29.12.2010

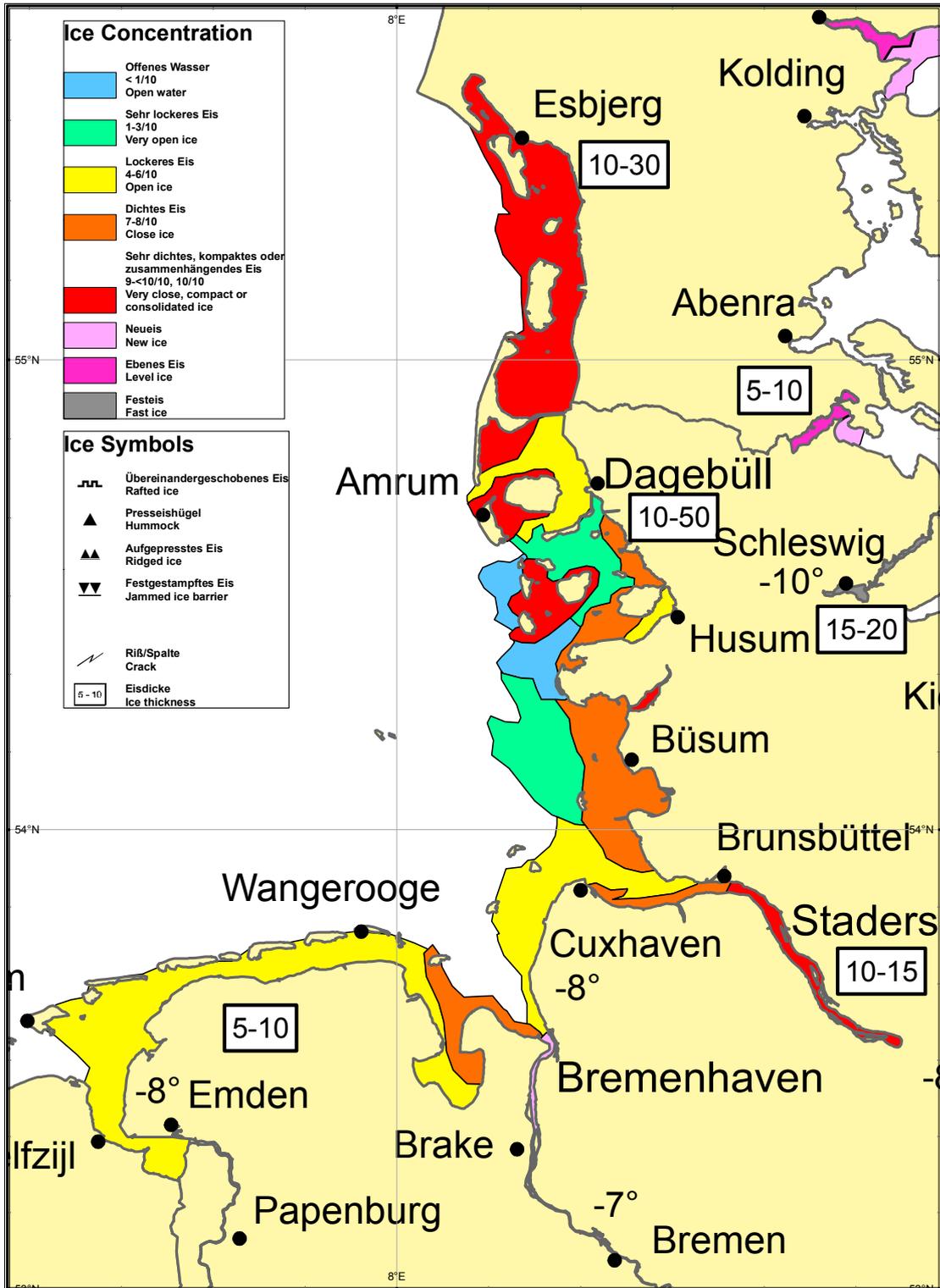


Abbildung 3-33: Eisverhältnisse an der deutschen Nordseeküste im Winter 2010/11 zum Zeitpunkt der maximalen Eisentwicklung.

Figure 3-33: Ice conditions on the German North Sea coast in the winter of 2010/11 at the time of maximum ice development.

Schlussfolgerung

Wenn die Eisbildung früh beginnt, bedeutet das nicht, dass der Eiswinter stark oder sehr stark sein muss. Auch die Eissaison 2010/11 wird trotz sehr frühen Beginns als ein mäßiger Eiswinter klassifiziert.

Die historische Entwicklung der Stärke der Eiswinter an der Nordseeküste ist in der *Abbildung 3-34* dargestellt.

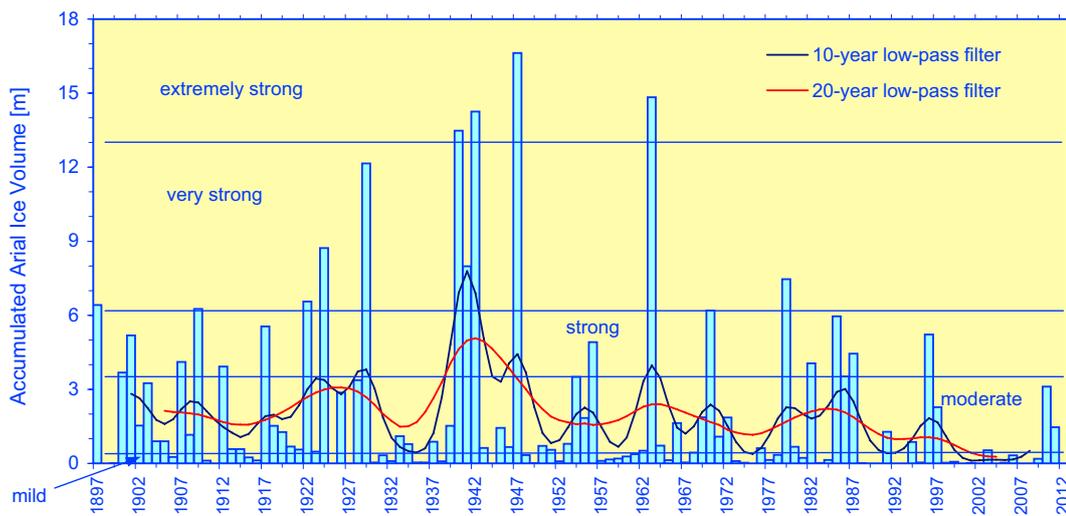


Abbildung 3-34: Verteilung der flächenbezogenen Eisvolumensumme an der deutschen Nordseeküste seit 1897.

Figure 3-34: Distribution of accumulated areal ice volume on the German North Sea coast since 1897.

In den letzten 51 Jahren (Zeitraum von 1961 bis 2011) gab es in der Nordsee 26 (51 %) sehr schwache bis schwache, 17 (33,3 %) mäßige, 4 (8 %) starke und 4 (8 %) sehr starke bis extrem starke Eiswinter. Im Vergleich zu der 115-jährigen, in der *Abbildung 3-34* dargestellten Periode, ist eine Abnahme der extrem starken und sehr starken Eiswinter bei gleichzeitiger Zunahme der eisarmen Winter festzustellen. Ähnlich zeigt sich die Entwicklung der Eisverhältnisse in der westlichen Ostsee (*SCHMELZER et al. 2012*). Aber obwohl gegenwärtig eine Tendenz zu milderen Eiswintern besteht, ist im Bereich der westlichen Ostsee und der Nordsee auch in Zukunft mit dem Auftreten von starken bis extrem starken Eiswintern zu rechnen (*VAVRUS et al. 2006; KODRA et al. 2011*).

3.6 Salzgehalt

H. Klein, A. Frohse & A. Schulz

3.6.1 Einführung

Der Salzgehalt der Nordsee ist abhängig vom Einstrom salzreichen Atlantischen Wassers (AW) mit Salzgehalten über 35 (Practical Salinity Units) aus Nordwest, sowie von salzarmen Wassermassen im Osten. Salzgehalte unter 34 markieren den Einflussbereich des Baltischen Ausstroms über der Norwegischen Rinne und im Skagerrak, sowie den der kontinentalen Festlandsabflüsse, dieses Wasser wird im Folgenden als Küstenwasser (KW) bezeichnet. 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 Bereichen auf. Im Sommer ist die Bodenwasserschicht durch die saisonale Thermokline von der Deckschicht entkoppelt, sodass nicht nur die winterlichen Bodenwassertemperaturen sondern auch die bodennahen Salzgehaltsbedingungen bis in den Sommer nur geringen Änderungen unterworfen sind. Im Winter dokumentieren nahezu identische Verteilungen in der boden- und oberflächennahen Schicht die vertikale Durchmischung der Nordsee.

Diskutiert werden die beobachteten geographischen Salzgehaltsverteilungen für den Sommer und Winter der Jahre 2008–2011 und die Jahresgänge der Süßwasserabflüsse der Elbe und des Salzgehalts bei Helgoland Reede. Zur Beschreibung der Methoden und Datengrundlage siehe *LOEWE et al. (2013)*.

3.6.2 Salzgehaltsverteilungen

2008 (*Abbildung 3-35* und *3-36*): Im Winter 2008 drang das AW ($S > 35$) in der Boden- und Oberflächenschicht bis 56° N nach Süden vor, wobei das Band des salzärmeren KW ($S < 34$) im Vergleich zur Sommerverteilung relativ dicht an der norwegischen Küste lag. Für den Bereich der südwestlichen Nordsee liegen keine Winterdaten vor.

Im Sommer erstreckte sich die 35er-Isohaline am Boden etwa parallel zum $57.$ Breitengrad von der britischen bis zur norwegischen Küste. Wasser mit $S > 35.35$ drang am Boden auf breiter Front bis 58° N vor nahm ein deutlich größeres Volumen ein als im Vorjahr. An der Oberfläche deckte der Bereich mit AW nur das Gebiet nördlich von 57° N und westlich des Nullmeridians ab. Insgesamt stiegen in der nördlichen Nordsee die Salzgehalte in der Oberflächen- und Bodenschicht im Vergleich zum Vorjahr leicht an, während der südliche Teil der Nordsee eine leichte Abnahme des Salzgehaltes verzeichnete. Der Gesamt-Salzinhalt der Nordsee lag mit 1.146×10^{12} t leicht über dem des Vorjahres und 0.6 Standardabweichungen über dem Mittelwert der Referenzperiode 2000–2010 (siehe *Tabelle 3-6* und *Abbildung 3-43*). Die Salzgehaltsschnitte nördlich von 57° N (*Abbildung 3-43*) zeigen eine deutliche Schichtung zwischen dem sich bis nach 2° E nach Westen erstreckenden KW und dem Nordseewasser. Auf dem 57° N-Schnitt liegt das KW sehr dicht an der Dänischen Küste mit einigen kleinen Einschüben von Wassermassen < 34 zwischen 3.5° und 5° E.

2009 (*Abbildung 3-37* und *3-38*): Im Winter 2009 drang das AW in der gesamten Wassersäule bis 55° N nach Süden vor, gleichzeitig lag auch im Einstrombereich des Englischen Kanals eine große Linse atlantischen Wassers.

Im Sommer lag die 35er-Isohaline noch bei etwa 56° N, war aber an der Oberfläche deutlich schmaler als im Winter. Hier reichte sie im Vergleich zu 2008 etwa 2° weiter nach Süden und 4° weiter nach Osten. Auch im Einstrombereich des Englischen Kanals, dessen Einfluss in 2009 generell stärker war als in den vorangehenden Jahren, konnten kleine Linsen mit AW in der Oberflächen- und Bodenschicht nachgewiesen werden. Das küstenparallele Band des KW entlang der norwegischen Küste war schmaler als im Vorjahr. Der Gesamt-Salzinhalt nahm geringfügig auf 1.139×10^{12} t ab und lag 0.3 Standardabweichungen über dem Mittelwert der Referenzperiode. Die Salzgehaltsschnitte zeigen auf 56° N zwischen 3° und 5.5° E einen Block von warmem salzhaltigen Wasser über kaltem salzarmen Wasser. Der 57° N-Schnitt zeigt vertikale Einschübe von salzreichem Wasser zwischen der Oberflächen- und Bodenschicht, die vermutlich durch starken Winde aus häufig wechselnden Richtungen verursacht wurden.

2010 (*Abbildung 3-39 und 3-40*): Die winterliche Salzgehaltsverteilung entsprach weitgehend dem Vorjahr, aber mit geringeren Salzgehalten vor der norwegischen Südküste. Dieses Minimum wurde auch noch im Sommer beobachtet.

Auch die sommerliche Salzgehaltsverteilung in der Oberflächen- und Bodenschicht hat sich gegenüber dem Vorjahr wenig geändert. Der Bodensalzgehalt südlich von 56° N ist generell etwas höher als im Vorjahr und insgesamt räumlich homogener, es wurde im Bereich des östlichen Kanalausgangs aber kein AW beobachtet. Die Salzgehaltsschnitte in *Abbildung 3-40* zeigen einen sehr homogenen Einschub salzreichen Wassers vom Atlantik in die nordwestliche Nordsee. Auch in der südlichen Nordsee ist die Salzgehaltsverteilung homogener als im Vorjahr. Der Gesamt-Salzinhalt der Nordsee entsprach mit 1.140×10^{12} t fast dem des Vorjahres und lag 0.3 Standardabweichungen über dem Mittelwert der Referenzperiode.

2011 (*Abbildung 3-41 und 3-42*): Für den Winter 2011/2011 liegen bisher keine Daten für den Bereich über der Norwegischen Rinne vor, die Verteilung in der nördlichen Nordsee entspricht aber weitgehend den beiden Vorjahren. In der südlichen Nordsee hingegen nahm der Salzgehalt gegenüber den Vorjahren deutlich ab.

Im Sommer lag die 35er-Isohaline deutlich nördlicher als im Winter und den Vorsommern. In der Oberflächenschicht war das Gebiet $S > 35$ deutlich kleiner, während der Streifen des KW parallel zur norwegischen Küste deutlich breiter war und sich auf 60° N bis zum 1° E-Meridian erstreckte. Die Vertikalschnitte zeigen, dass das salzärmere Wasser ein deutlich größeres Volumen im Vergleich zu den Vorjahren einnahm, was zu lokalen Anomalien von bis zu -2 relativ zur Referenzperiode führte. Südlich von 56° N lag die 34er-Isohaline an der Oberfläche auf einer Position, die dem langfristigen Mittel entspricht. In der Bodenschicht entsprach die Verteilung in der südlichen Nordsee der des Vorjahres, nur der Bereich des KW vor der jüt-ländischen Küste war geringfügig schmaler. Auf dem 58° N-Schnitt kam es über der Norwegischen Rinne bei Tiefen unter 30 m lokal zu erhöhten Salzgehalten, da der frischere Baltische Ausstrom hier in der Regel größere Tiefen von bis zu 60 m erreicht. Der Gesamt-Salzinhalt ist mit 1.114×10^{12} t der niedrigste seit 2001 und lag 1.1 Standardabweichungen unter dem Mittelwert der Referenzperiode. Dies ist primär der westliche Ausdehnung des Baltischen Ausstroms und den geringeren Salzgehalten in der südlichen Nordsee geschuldet.

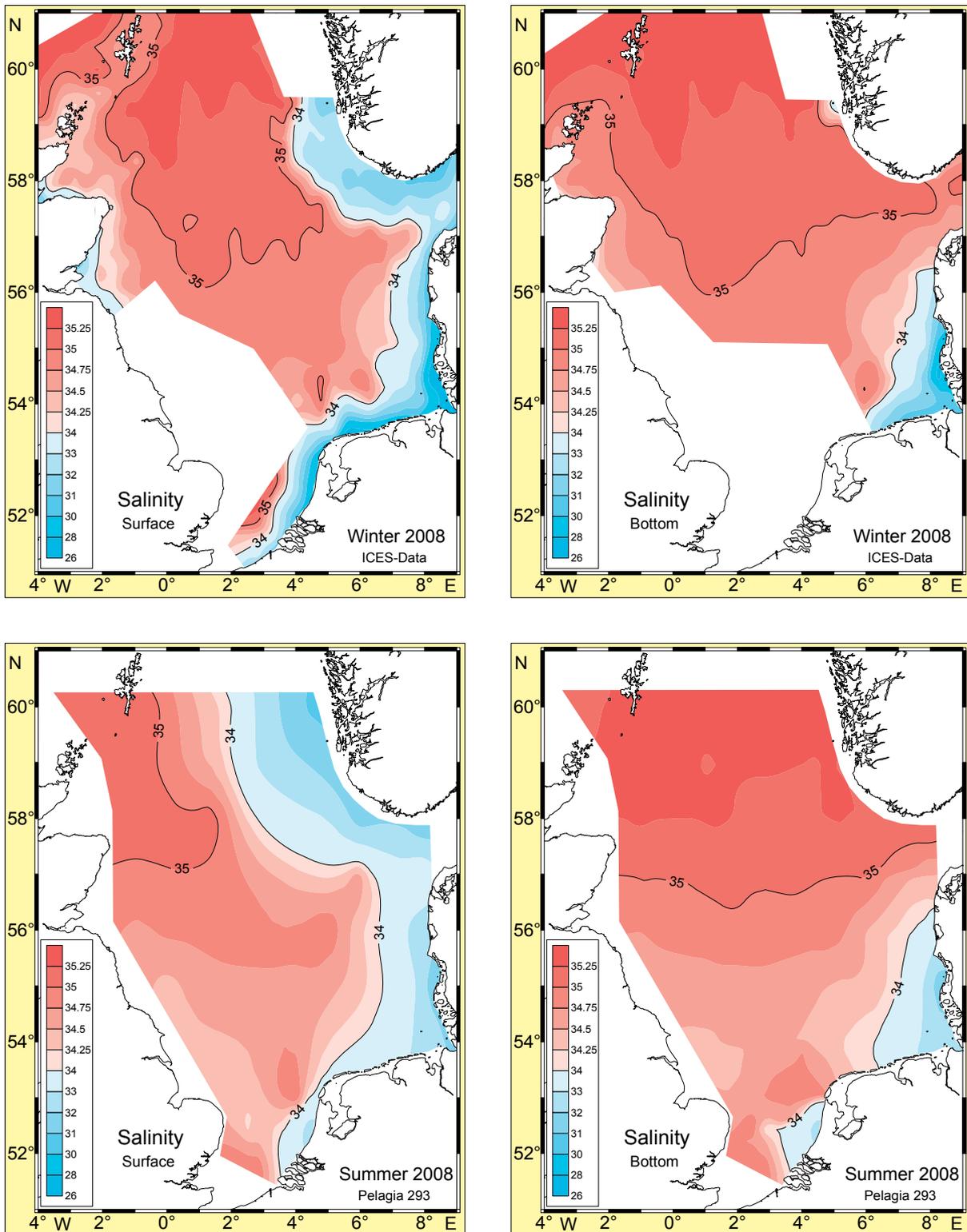


Abbildung 3-35: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2008. Oben: Winter (JFM), unten: Nordsee Sommeraufnahme.

Figure 3-35: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2008.

Top: winter (JFM), bottom: North Sea summer survey.

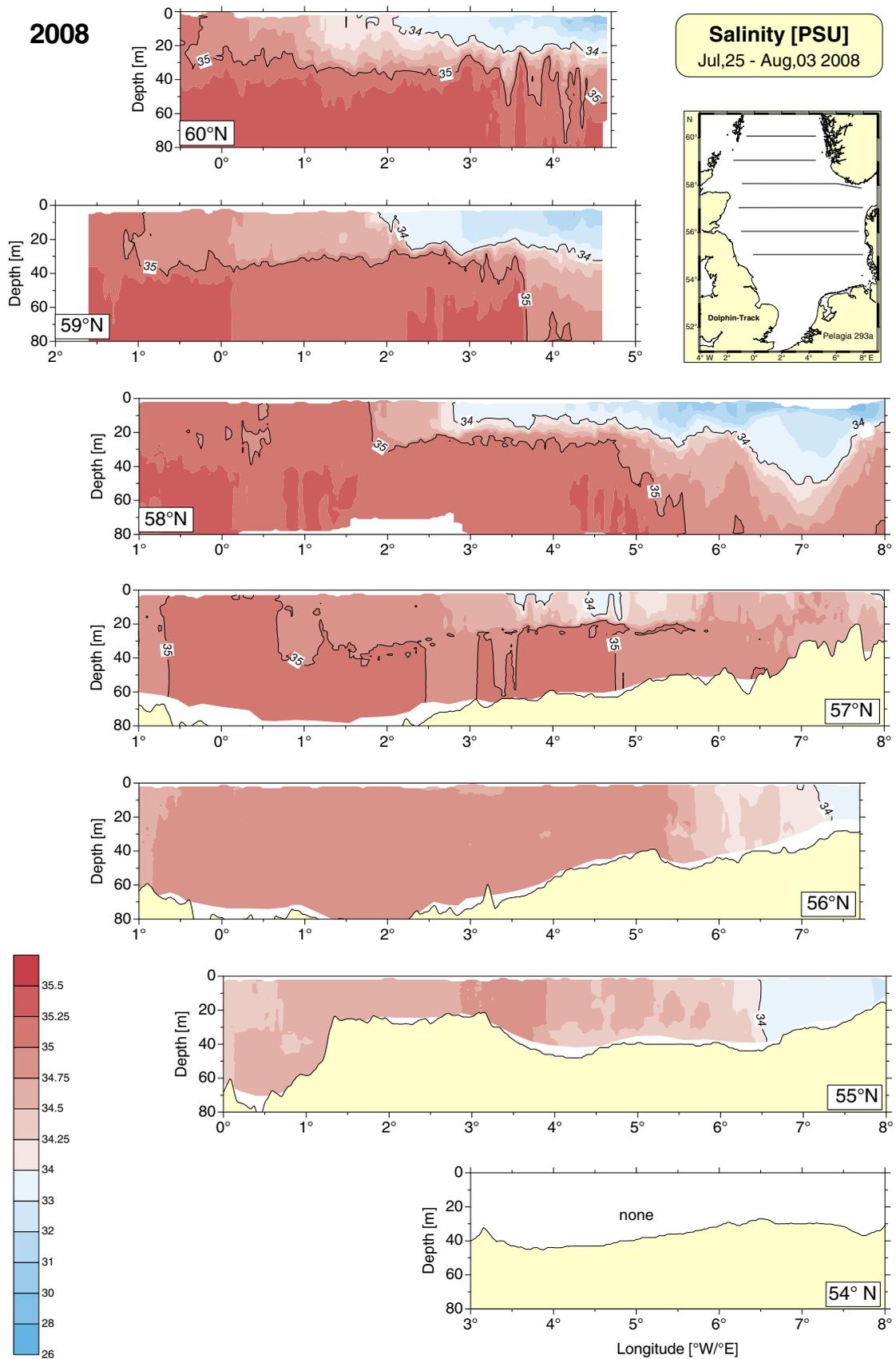


Abbildung 3-36: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2008 (FS Pelagia 293a).

Figure 3-36: Salinity stratification in summer 2008 (RV Pelagia 293a).

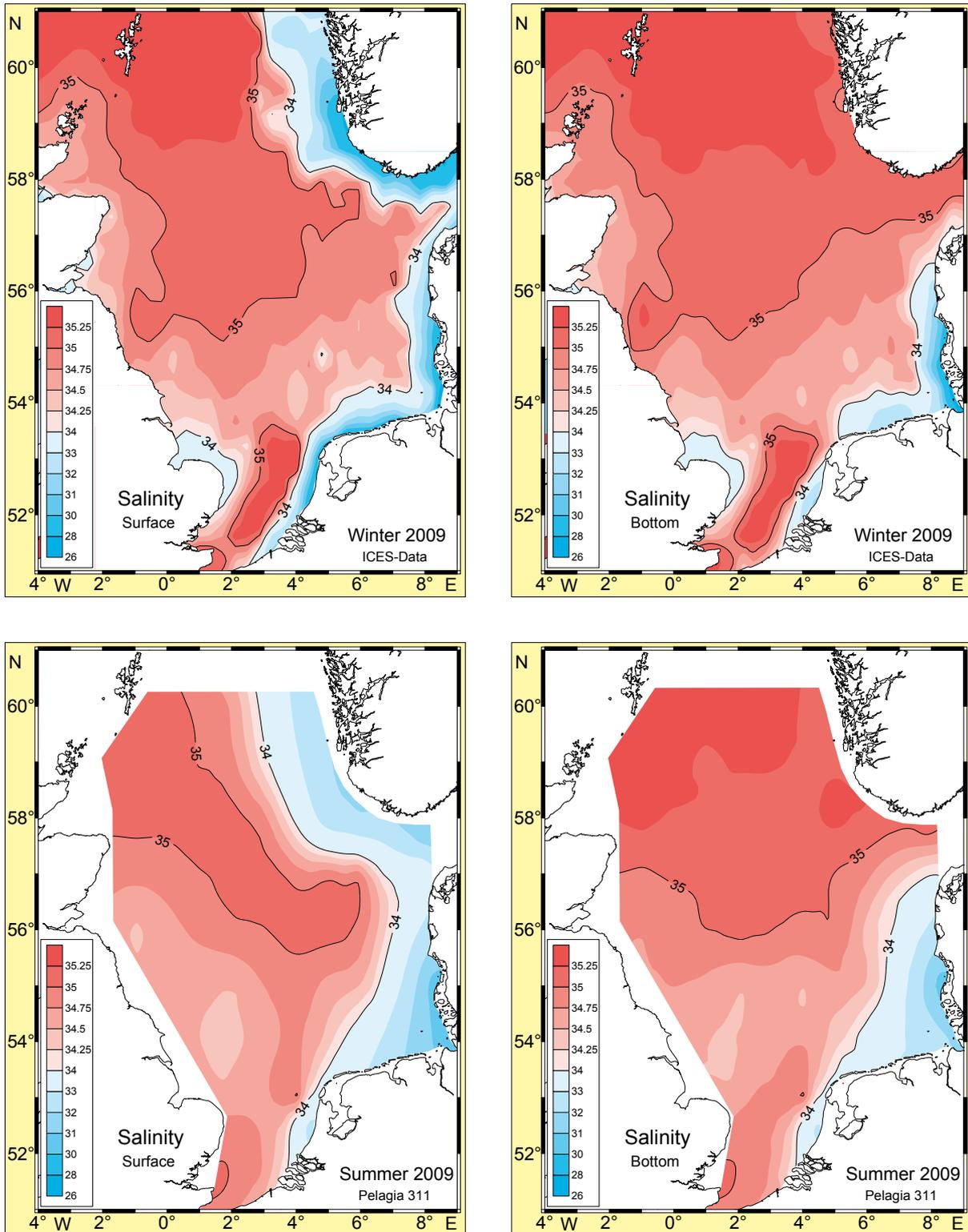


Abbildung 3-37: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2009.

Oben: Winter (JFM), unten: Nordsee Sommeraufnahme.

Figure 3-37: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2009.

Top: winter (JFM), bottom: North Sea summer survey.

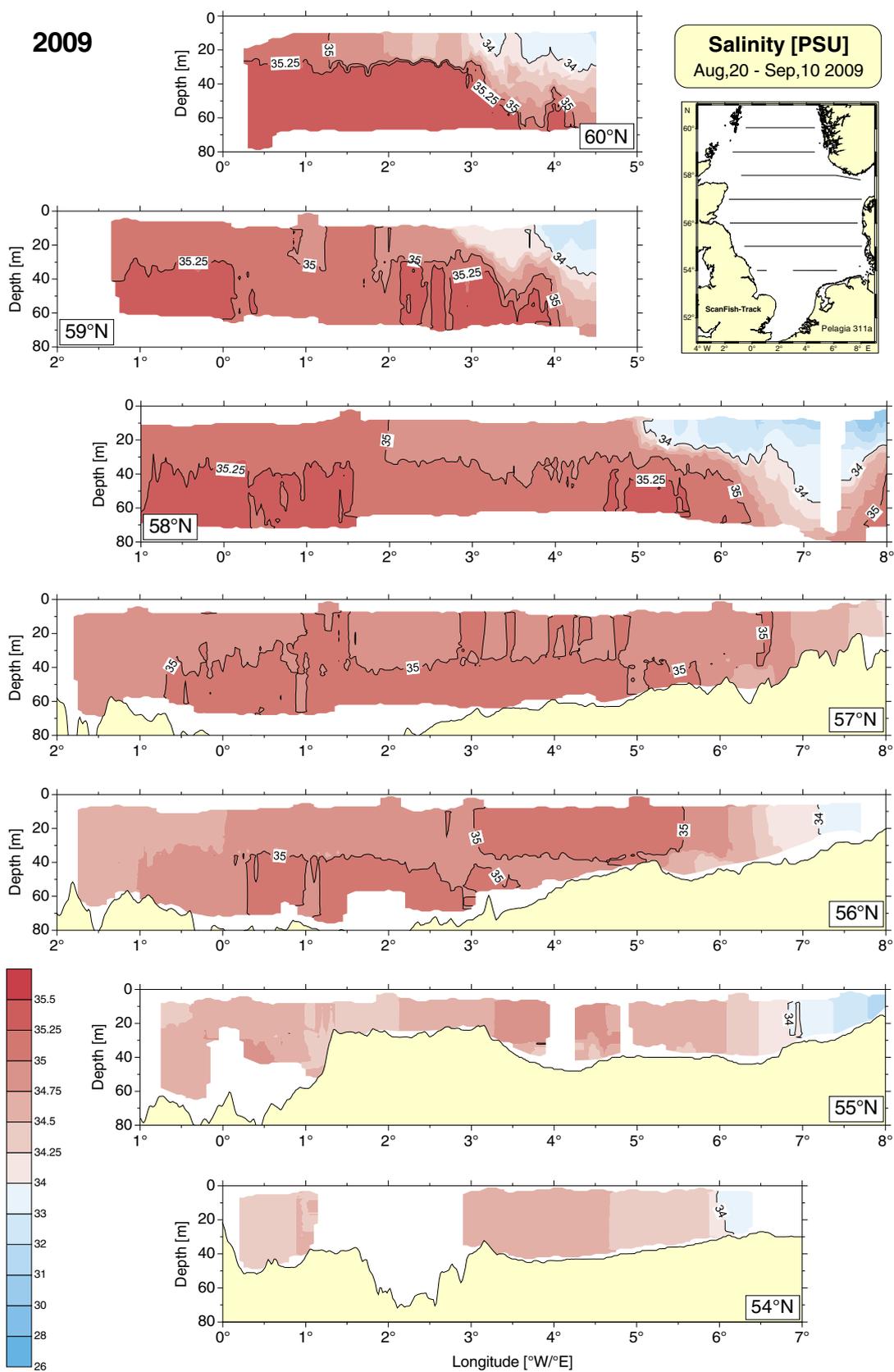


Abbildung 3-38: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2009 (FS Pelagia 311a).

Figure 3-38: Salinity stratification in summer 2009 (RV Pelagia 311a).

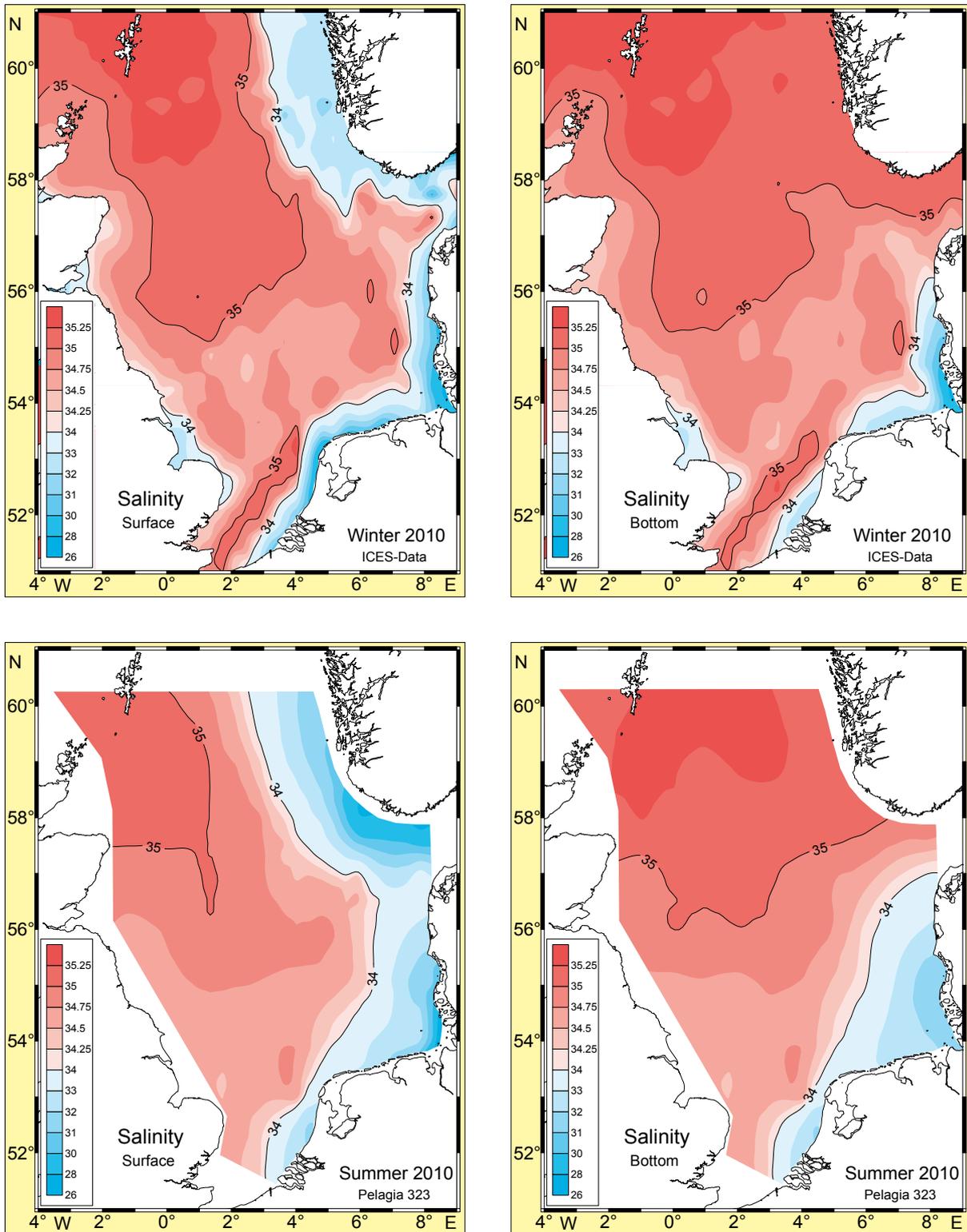


Abbildung 3-39: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2010.

Oben: Winter (JFM), unten: Nordsee Sommeraufnahme.

Figure 3-39: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2010.

Top: winter (JFM), bottom: North Sea summer survey.

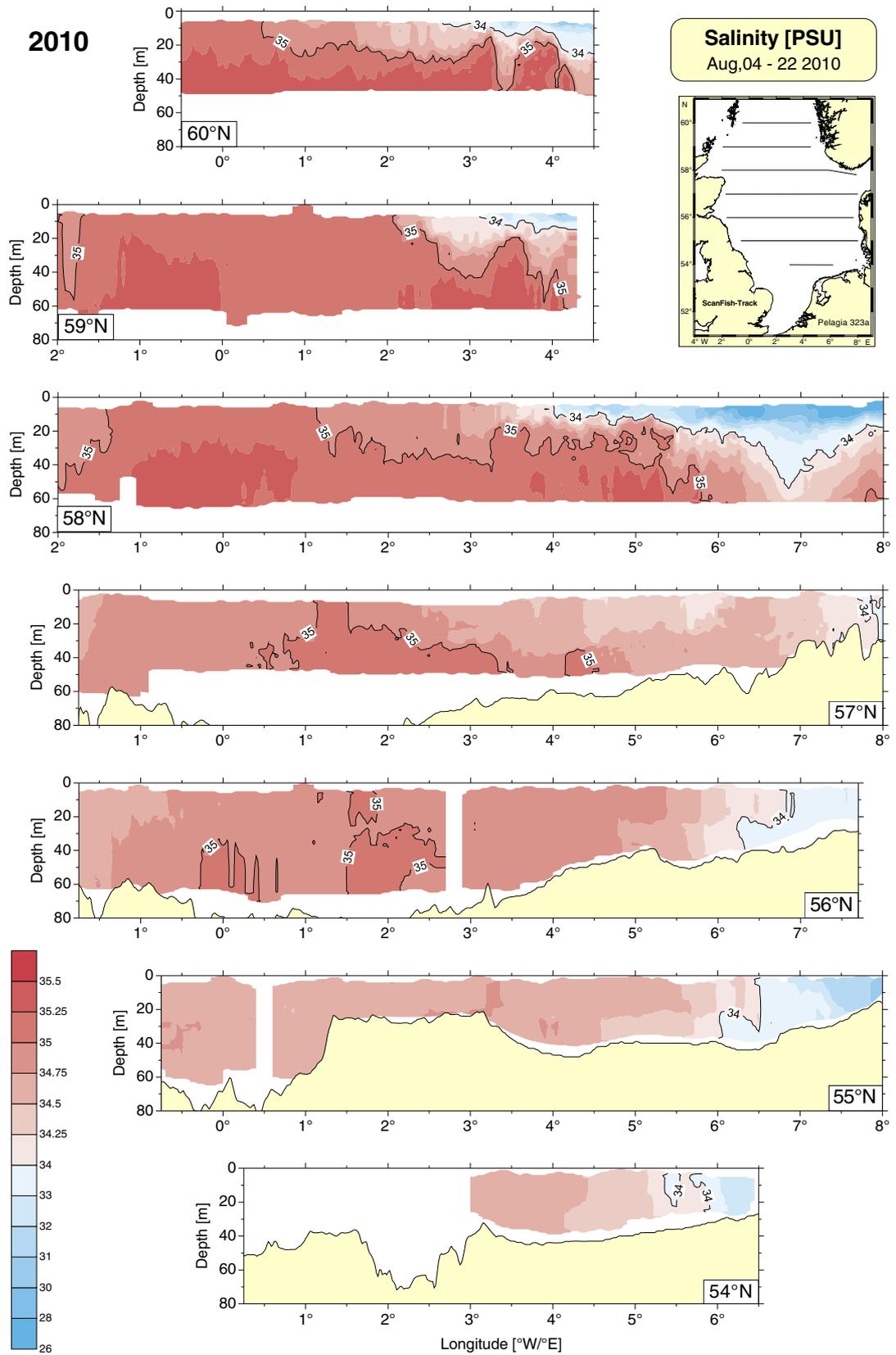


Abbildung 3-40: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2010 (FS Pelagia 323a).

Figure 3-40: Salinity stratification in summer 2010 (RV Pelagia 323a).

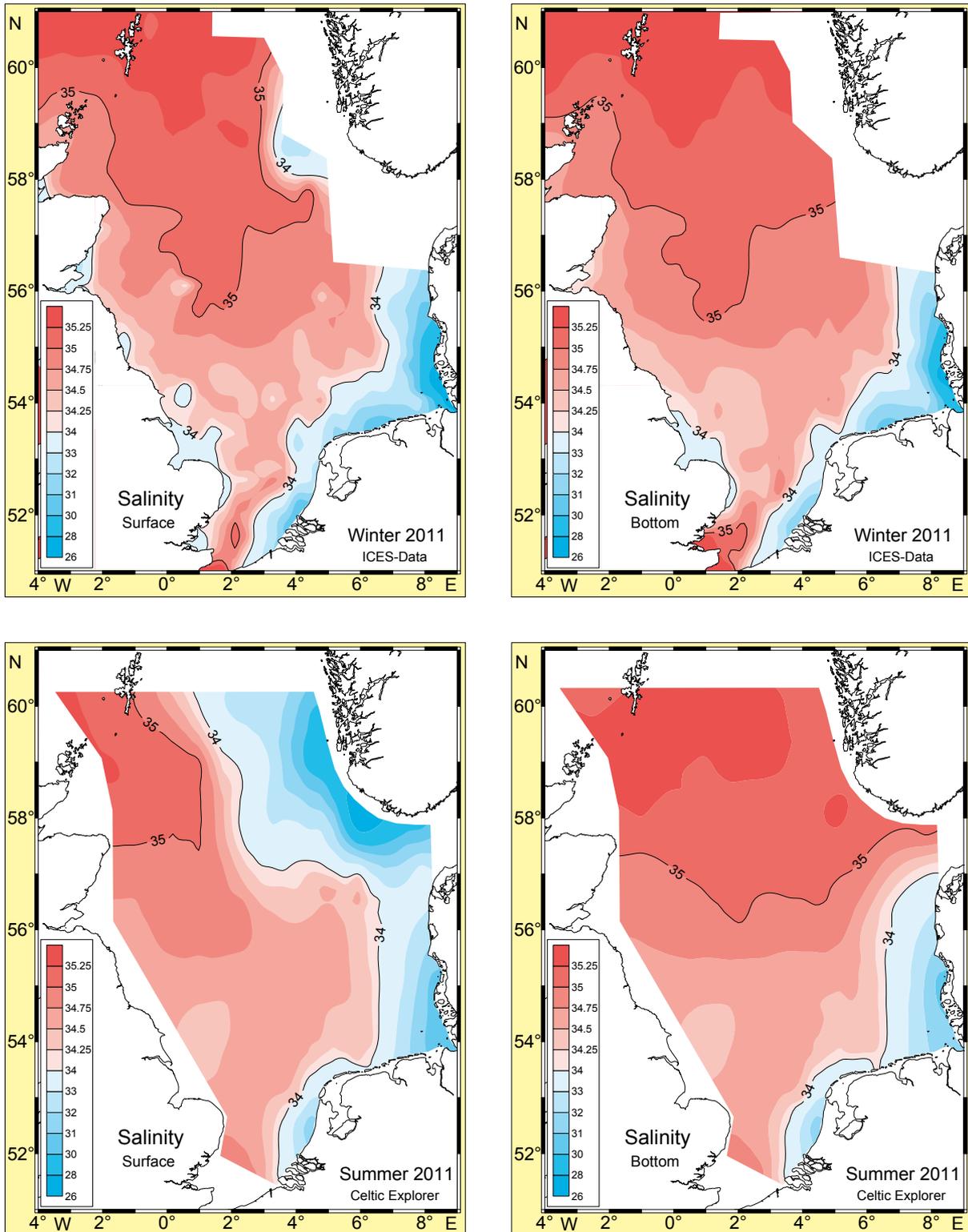


Abbildung 3-41: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2011. Oben: Winter (JFM), unten: Nordsee Sommeraufnahme.

Figure 3-41: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2011.

Top: winter (JFM), bottom: North Sea summer survey.

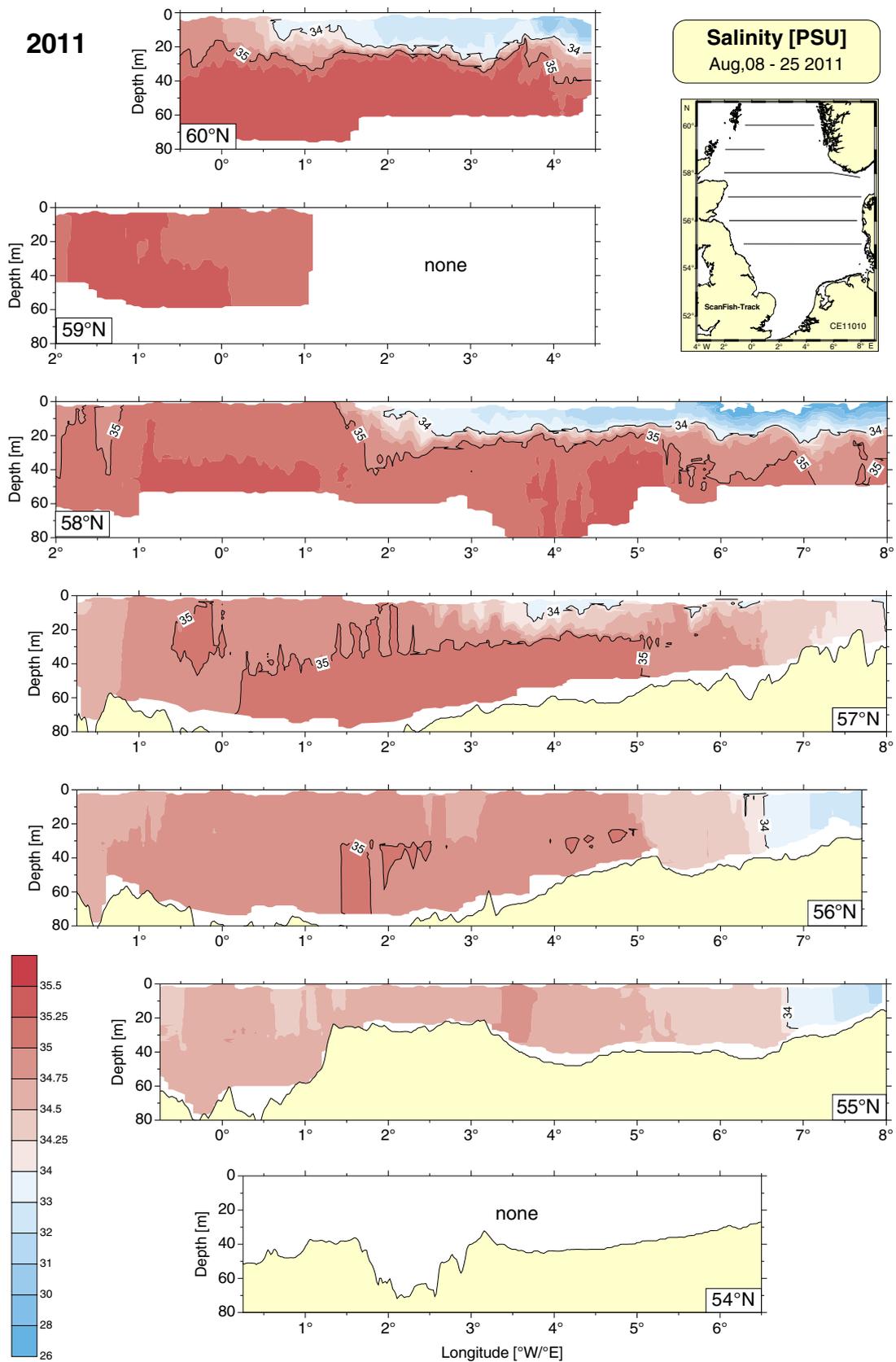


Abbildung 3-42: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2011 (FS Celtic Explorer 11010a).
Figure 3-42: Salinity stratification in summer 2011 (RV Celtic Explorer 11010a).

date of cruise	mid-term of survey	TSC [$\times 10^{12}$ t]	ΔS [std dev]
7/02–7/22/1999	7/09	1.122	-0.66
8/09–8/23/2000	8/16	1.134	-0.01
7/11–8/02/2001	7/27	1.083	-2.77
7/16–7/31/2002	7/25	1.131	-0.17
7/28–8/13/2003	8/04	1.135	0.04
8/05–8/20/2004	8/12	1.147	0.69
8/10–8/29/2005	8/20	1.141	0.37
8/02–8/20/2006	8/11	1.135	0.04
8/03–8/17/2007	8/10	1.142	0.42
7/21–8/05/2008	7/29	1.146	0.64
8/20–9/09/2009	8/29	1.139	0.26
8/04–8/24/2010	8/13	1.140	0.31
8/08–8/28/2011	8/17	1.114	-1.09
8/07–8/26/2012	8/16	1.132	-0.12
8/10–8/31/2013	8/21	1.118	-0.88
8/02–8/21/2014	8/12	1.137	0.15
10 year average 2000–2010 (ex 2002) ± standard deviation		1.134 ±0.018	–

Tabelle 3-6: Gesamter Salzinhalt der Nordsee TSC, basierend auf den Daten der Nordsee-Sommernaufnahmen des BSH. ΔS = Normierte Anomalie (Differenz zum Mittelwert der Referenzperiode in Standardabweichungen).

Table 3-6: Total North Sea salt content TSC, data from BSH North Sea summer surveys. ΔS = normalised anomaly (difference to reference period mean in standard deviations).

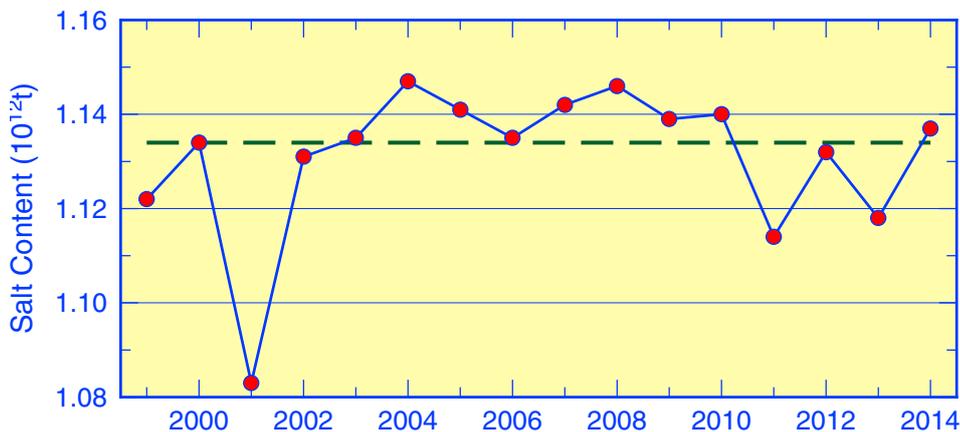


Abbildung 3-43: Gesamter Salzinhalt der Nordsee im Sommer in 10^{12} t 1999 bis 2014. Gestrichelte Linie: Mittelwert der Referenzperiode 2000–2010 ($1.134 \pm 0.018 \times 10^{12}$ t) basierend auf den Daten der Sommernaufnahmen.

Figure 3-43: Total salt content in 10^{12} t from 1999 to 2014. Broken line: Mean of reference period 2000–2010 ($1.134 \pm 0.018 \times 10^{12}$ t) basing on summer cruise data.

3.6.3 Abfluss Elbe und Salzgehalt bei Helgoland Reede

Der Abfluss der Elbe wird vom WSA Lauenburg weit oberhalb der Flussmündung am Wehr Neu-Darchau gemessen. Im langjährigen Jahresmittel (1971–2000) fließen dort $22 \text{ km}^3/\text{a}$ oder $685 \text{ m}^3/\text{s}$ Elbewasser in Richtung Nordsee. Auf dem Weg von Neu-Darchau bis zur Mündung bei Cuxhaven erhöht sich die Abflussrate durch kleinere Nebenflüsse um ca. $100 \text{ m}^3/\text{s}$. In *Abbildung 3-44* sind die jährlichen Gesamtabflussmengen dargestellt, in *Abbildung 3-45* die Monatsmittel zusammen mit den innermonatlichen Maxima. Die Abweichungen der Elbeabflussraten von den klimatologischen Mittelwerten werden als repräsentativ für andere in die Nordsee entwässernde kontinentale Flüsse angesehen.

Die Gesamtabflussmengen der Jahre 2008 und 2009 lagen mit $20 \text{ km}^3/\text{a}$ etwas unterhalb des langjährigen Mittels. Bedingt durch die stark erhöhten Abflussmengen in der zweiten Jahreshälfte aufgrund der starken Niederschläge im Einzugsgebiet der Elbe stieg der Gesamtabfluss in 2010 auf $32 \text{ km}^3/\text{a}$. Dieser Wert liegt aber noch im Bereich der natürlichen Schwankungen (95 %-Band, $\text{Klima} \pm 1.96 \sigma$). Im Januar und Februar 2011 lagen die monatlichen Abflussmengen signifikant über dem langjährigen Mittel, so dass der Gesamtabfluss 2011 mit $27 \text{ km}^3/\text{a}$ noch immer deutlich über dem langjährigen Mittel lag.

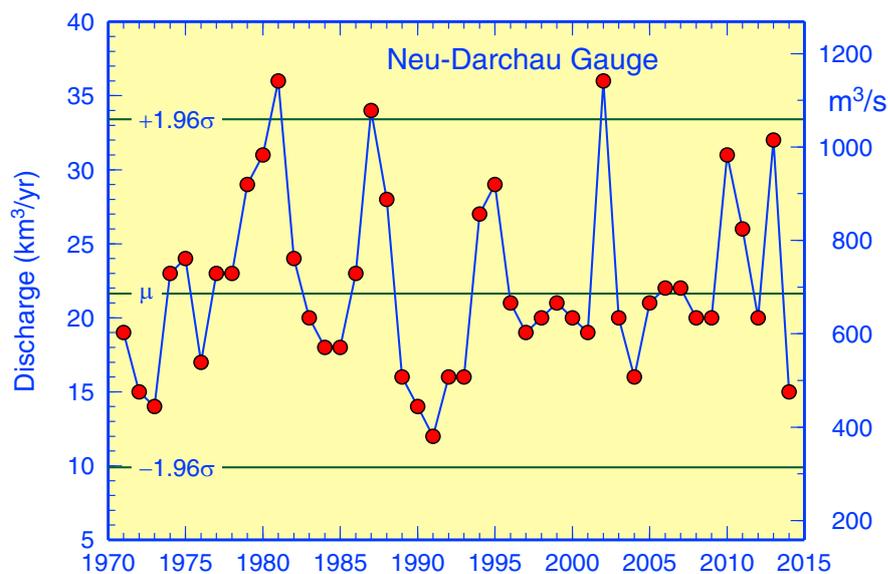


Abbildung 3-44: Jahresabflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Langzeitmittel (1971–2000) und 95 %-Grenzen. $1 \text{ km}^3/\text{a}$ entspricht $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$. (Rohdaten: WSA Lauenburg.)

Figure 3-44: 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 WSA Lauenburg.)

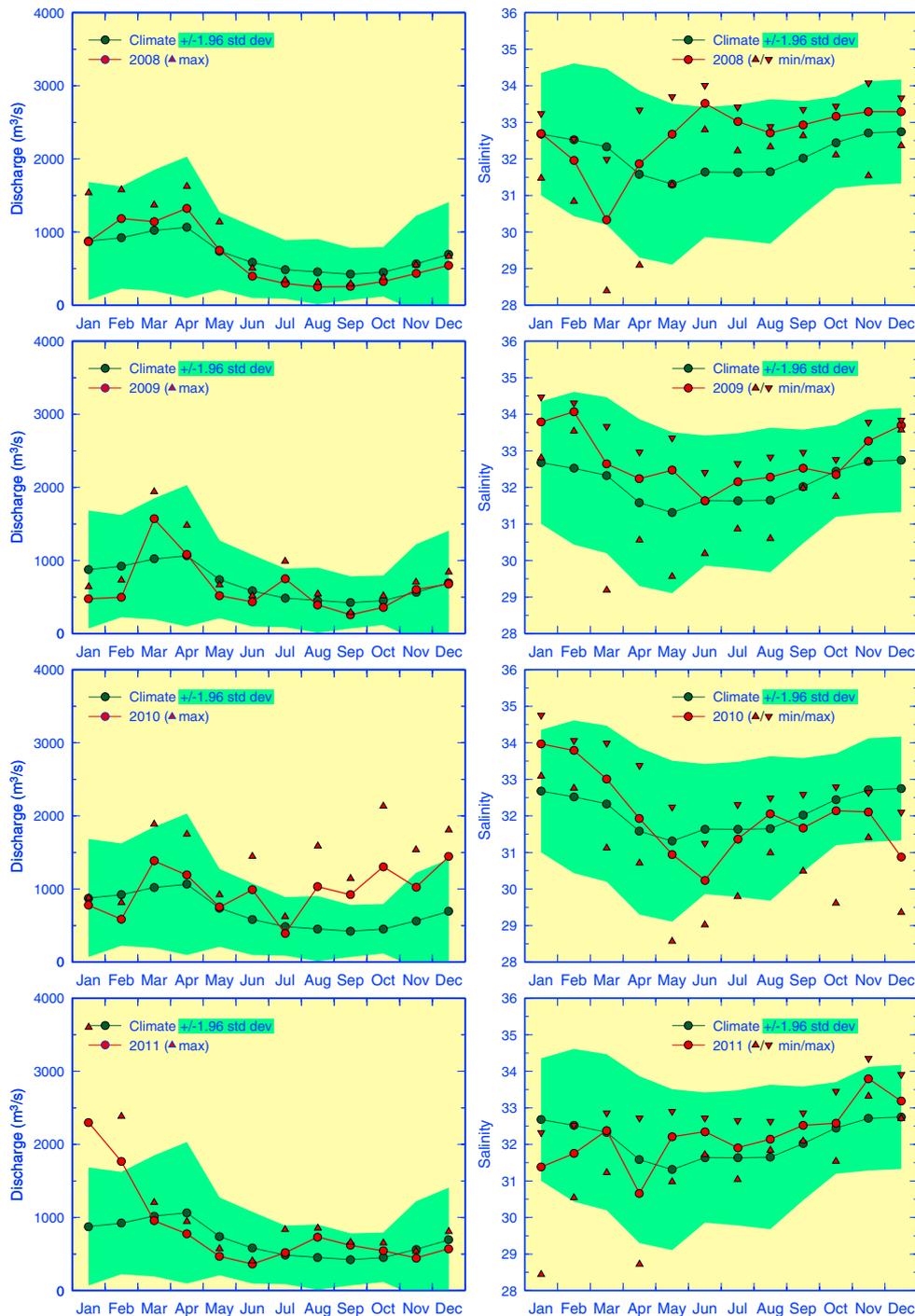


Abbildung 3-45: Links: Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971–2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). Rechts: Jahresgänge des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971–2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).

Figure 3-45: Left: Monthly mean and maximum runoff of Elbe River at the weir Neu-Darchau with 1971–2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). Right: Seasonal cycles of monthly mean SSS at Helgoland Roads with monthly extremes, 1971–2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).

(Abflussdaten/runoff data: courtesy of WSA Lauenburg; Salzgehaltsdaten/salinity data: courtesy of K. Wiltshire, Biologische Anstalt Helgoland)

Die Süßwassereinträge der Elbe haben einen deutlichen Einfluss auf die Salzgehaltsverteilung der Deutschen Bucht und damit auch auf das Seegebiet um Helgoland, das im Mittel in der Hauptachse des Elbeausstroms liegt. Dies bewirkt in der Regel eine inverse Korrelation zwischen dem Salzgehalt und der Abflussmenge der Elbe. Die räumliche Ausdehnung der Elbfahne ist jedoch auch von den dynamischen Veränderungen durch Gezeitenströme und wechselnde großräumige Reststrommuster abhängig. Ostwestverlagerungen der Frontalzone zwischen Elbfahne und Nordseewasser sind dabei mit sprunghaften Salzgehaltsänderungen (River Plume Fronten) verbunden, wie sie bei Helgoland seit 1873 beobachtet werden.

Die in *Abbildung 3-45* gemeinsam mit der Monatsklimatologie des Zeitraums 1971–2000 dargestellten jahreszeitlichen Entwicklungen des Oberflächensalzgehalts bei Helgoland Reede basieren auf werktäglichen Messungen, die freundlicherweise von der zum Alfred-Wegener-Institut (AWI) gehörenden Biologischen Anstalt Helgoland bereitgestellt wurden³. Die wesentlichen Signale finden sich auch in den Salzgehaltsdaten der MARNET-Station „Deutsche Bucht“ wieder (6 m Messtiefe), auch wenn diese Daten zum Teil erhebliche Lücken aufweisen. Das deutlichste Signal findet sich während einer Phase zum Teil signifikant erhöhter Elbeabflüsse von August 2010 bis Februar 2011. Hier reagiert der Salzgehalt bei Helgoland mit einem Abfall der sein Maximum im Dezember 2010 und Januar 2011 hat und bis zum Februar 2011 anhält.

³ (WILTSHIRE und MANLY 2004, FRANKE ET AL. 2004, PANGAEA 2004)

3.7 Literatur

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

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.

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.

Janssen F., C. Schrumm, J. O. Backhaus, A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea, *Dt. hydrogr. Z.*, Supplement 9, 245pp., 1999.

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

Kodra E., K. Steinhaeuser, A. R. Ganguly: Persisting cold extremes under 21st-century warming scenarios, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L08705, 2011.
DOI: 10.1029/2011GL047103

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 und Rostock, 2005.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht38/index.jsp

Loewe, P. (Ed.), U. Brockmann, S. Dick, A. Frohse, J. Hermann, B. Klein, H. Klein, H. Nies, S. Schmolke, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald und S. Weigelt, 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

Loewe, P., H. Klein, A. Frohse, A. Schulz, N. Schmelzer, Temperatur, 142–155 in: Loewe, P., H. Klein, S. Weigelt (Eds.), System Nordsee – 2006 & 2007: Zustand und Entwicklungen, *Berichte des BSH*, Nr. 49, 308pp., BSH, Hamburg und Rostock, 2013.

www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht49/index.jsp

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

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 Tidekurven in der Deutschen Bucht, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 53, 380–388, 2009b.

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., Gezeitenvorausberechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten. [Mit engl. Übers.: On tidal predictions by means of harmonic representation of inequalities.] *Berichte des BSH*, Nr. 50, 29pp., BSH, Hamburg und Rostock, 2013a.
www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Berichte_/Bericht50/index.jsp

Müller-Navarra, S. H., J. Jensen, G. Rosenhagen, S. Dangendorf, Rekonstruktion von Gezeiten und Windstau am Pegel Cuxhaven 1843 bis 2013, *Ann. Meteorol.*, 46, 50–56, 2013b.

PANGAEA, Data Publisher for Earth and Environmental Science, 2012.
www.pangaea.de

Schmelzer, N., J. Holfort, M. Sztobryn, P. Przygodzki, Climatological ice atlas for the western and southern Baltic Sea (1961–2010), 88pp., BSH, Hamburg und Rostock, 2012.

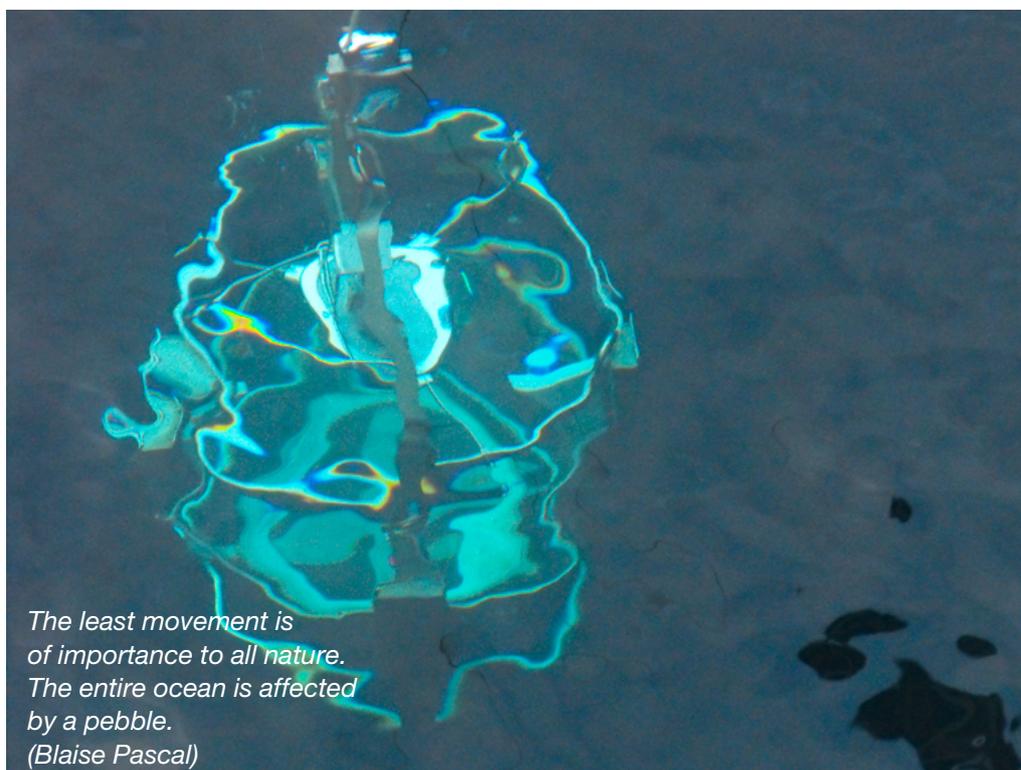
Vavrus, S., J. E. Walsh, W. L. Chapman, D. Portis, The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming, *Int. J. Climatol.*, 26/9, 1133–1147, 2006.

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



Glaskugelschöpfer (SWK 2012)

4.1 Einführung	153
4.2 Nährstoffe	159
4.2.1 Einführung	159
4.2.2 Nährstoff-Flusseinträge in die Deutsche Bucht	161
4.2.3 Nährstoffverteilungen – Deutsche Bucht und Nordsee	162
4.2.4 Nährstoffveränderungen in der Deutschen Bucht	172
4.2.5 Bewertung der Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht	175
4.2.6 Langzeitliche Entwicklung des pH-Wertes in der DB	180
4.2.7 Sauerstoffgehalte in der Nordsee	181
4.2.8 Chlorophyll-a Gehalte in der Nordsee	183
4.3 Organische Stoffe	187
4.3.1 Einführung	187
4.3.2 Hexachlorcyclohexan-Isomere	189
4.3.3 Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe	197

4.3.4 Kohlenwasserstoffe	203
4.3.5 Polare Pestizide	215
4.3.6 Neue Schadstoffe	228
4.4 Metalle	232
4.4.1 Einführung	232
4.4.2 Bewertungskriterien	234
4.4.3 Oberflächenwasser	236
4.4.4 Sediment	247
4.5 Radioaktive Stoffe	258
4.5.1 Einführung	258
4.5.2 Quellen künstlicher Radionuklide	261
4.5.3 Caesium-137 und Strontium-90	262
4.5.4 Tritium	269
4.5.5 Transurane	271
4.6 Literatur	279

4.1 Einführung

Sieglinde Weigelt-Krenz, Norbert Theobald

Der Stoffhaushalt im Meer wird einerseits durch natürliche Prozesse und Gleichgewichte bestimmt, wird aber auch durch menschliche Aktivitäten wie Landwirtschaft, Industrie und Verkehr belastet. Eine zunehmende Nutzung der Meere durch steigenden Schiffsverkehr und neue marine Industrien wie Offshore-Windenergie und Öl-/Gasförderung führen zu einer zusätzlichen Belastung des marinen Ökosystems.

Viele der freigesetzten und in die Nordsee gelangenden Elemente und Verbindungen werden nur schwer abgebaut. Sie lagern sich am Sediment an oder werden nur langsam aus der marinen Umwelt entfernt. Diese Stoffe können aber auch in marinen Lebewesen angereichert werden und potenzieren sich durch Akkumulationsprozesse in der marinen Nahrungskette.

In der 2008 verabschiedeten EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) wird ein erstrebenswerter guter Umweltzustand formuliert, der durch die Entwicklung geeigneter Strategien und Maßnahmen erreicht werden soll. Wesentliche Grundlage und Voraussetzung für die Definition und Überprüfung dieser Ziele sind langfristig erhobene hydrographische und chemische Daten, die vom BSH routinemäßig im Rahmen der Meeresumweltüberwachung erhoben werden. Die Beprobung des Meerwassers und des Meeresbodens (Sediment) erfolgt dabei an festen geographischen Positionen eines Stationsnetzes, welches 2004 erweitert und vereinheitlicht wurde (*Abbildung 4-1*). Die in den Jahren 2008 bis 2011 durchgeführten Überwachungsfahrten und dabei erhobenen Datensätze zur Charakterisierung und Bewertung des chemischen Zustands sind in *Tabelle 4-1* zusammengestellt.

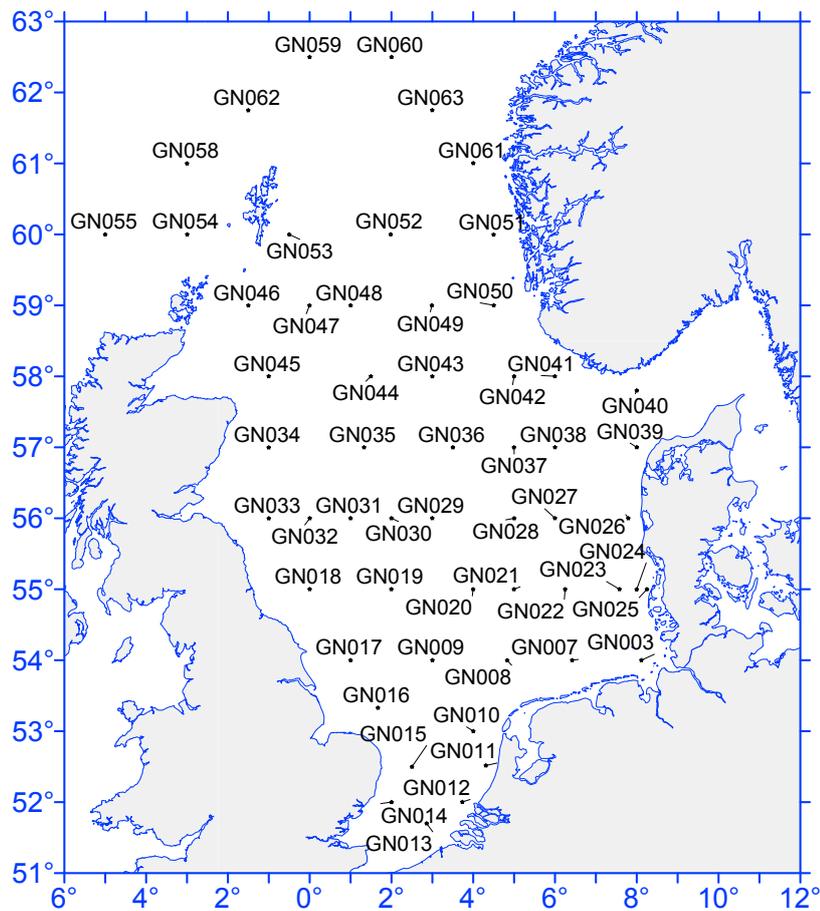
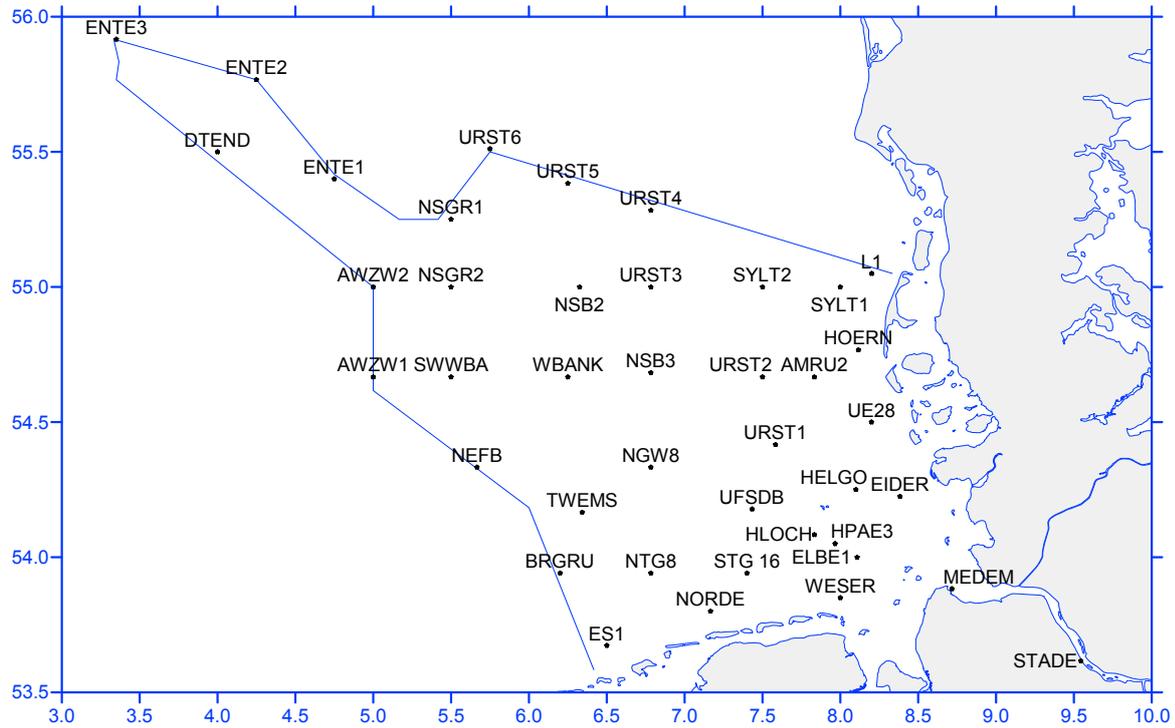


Abbildung 4-1: BSH-Stationsnetz zur Nährstoff- und Schadstoffüberwachung der Deutschen Bucht und Nordsee.

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

Cruise	Term	Domain	Nutrients	Organic Pollutants	Metals	Radio-nuclides
PE 282	Feb 2008	GB	×		×	
PE 286	March/April	GB	×		×	
ATAIR 161	May/June	GB		×		
PE 293	Jul/Aug	NS+GB	×	× (GB)	×	
L'ATALANTE 2008	Oct	GB	×	×	×	×
CE 0902	Jan 2009	GB	×		×	
CE 0905	March	GB	×		×	
ATAIR 170	May/June	GB		×		
PE 311	Aug/Sept	NS+GB	×	×	× (GB)	×
PourquoiPas?	Nov	GB	×	×	×	
CE 1001	Jan 2010	GB	×		×	
ZIRFAEA	March	GB	×			
ATAIR 180	May	GB		×		
PE 323	Aug/Sept	NS+GB	×	× (GB)	×	×
CE 1017	Nov	GB	×	×	×	
CE 1102	Jan 2011	GB	×		×	
CE 1105	March	GB	×		×	
ATAIR 190	May/June	GB		×		
CE 1110	Aug/Sept	NS+GB	×	×	× (GB)	×
CE 1116	Oct/Nov	GB	×		×	

Tabelle 4-1: 2008/11 durchgeführte Überwachungsfahrten und im NORDSEEZUSTANDSBERICHT 2008/11 verwendete Daten (×).

Table 4-1: Monitoring cruises in 2008/11, and data used in this state assessment (×).

Salzgehalt

Der Eintrag eines Großteils der Nähr- und Schadstoffe erfolgt über die Flüsse der südlichen Nordsee, so dass in erster Näherung parallel zur Verdünnung des Süßwassers der Flüsse eine Verdünnung der darin gelösten Nähr- und Schadstoffe erfolgt. Daher ist der Salzgehalt des Meerwassers eine wichtige Kenngröße bei der Interpretation von Nähr- und Schadstoffverteilungen in dem hochvariablen Gebiet der Deutschen Bucht. In *Abbildung 4-2* ist die geographische Verteilung des Salzgehaltes während der Untersuchungsfahrt im November 2010 dargestellt.

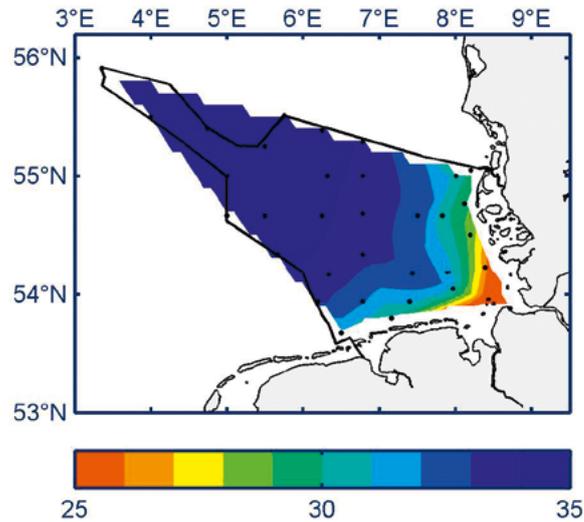


Abbildung 4-2: Salzgehaltsverteilung während der November-Monitoringfahrt 2010.
 Figure 4-2: Geographical distribution of salinity during November cruise 2010.

Aufgrund der großen Datenmenge wird versucht, bei der Interpretation der Daten z. T. eine Aggregation der Daten in Seegebiete vorzunehmen, die anhand von Salzgehaltsbereichen erfolgt. In der Deutschen Bucht sind dies die folgenden drei Bereiche:

- Küstengebiet: Salzgehalte < 32
- Mischgebiet: Salzgehalte > 32 und < 34
- Offene See: Salzgehalte > 34

Die Zuordnung der Beprobungsstationen zu diesen Gebieten, sowie die Mittelwerte, Mediane und Variationskoeffizienten der Salzgehalte sind in *Abbildung 4-3*, *Abbildung 4-4* und *Tabelle 4-2* dargestellt. Es ist erkennbar, dass aufgrund der kontinuierlichen Veränderungen diese Eingruppierung etwas willkürlich ist, doch ermöglicht sie trotzdem eine nützliche Strukturierung, wenn man sich über die „Unschärfe“ im Klaren ist.

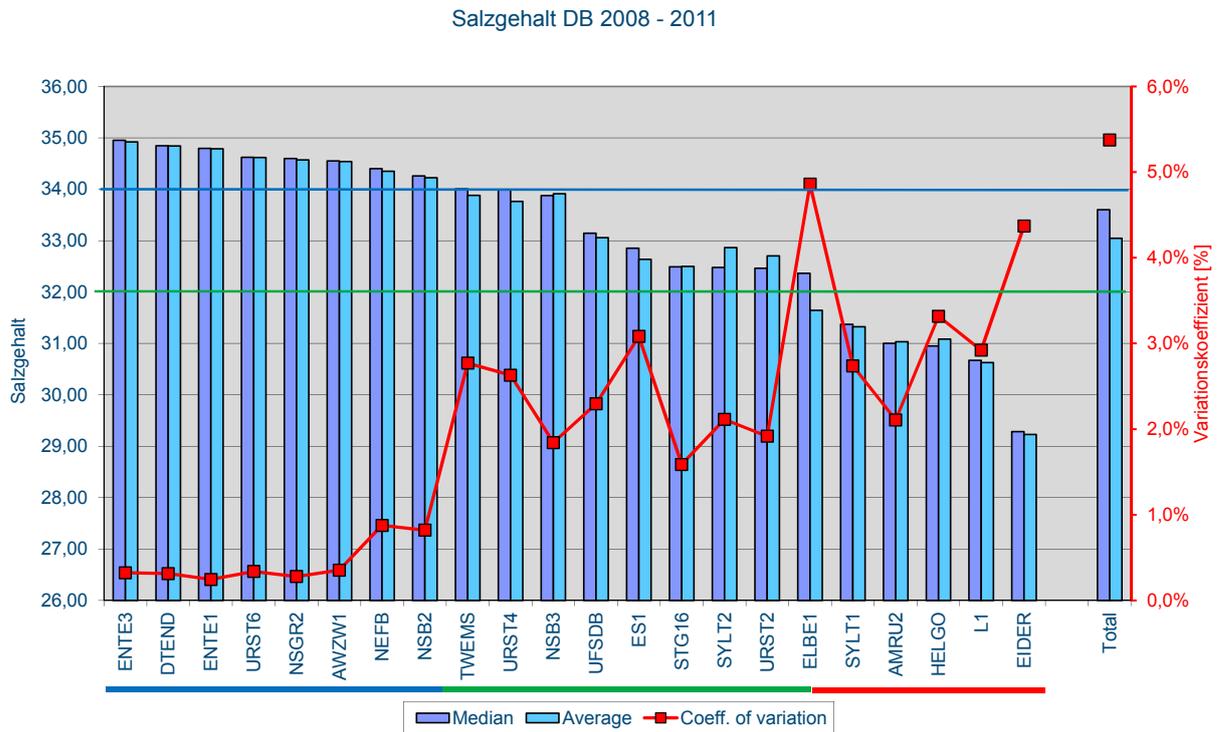


Abbildung 4-3: Statistik der Salzgehalte an den einzelnen Stationen während der Untersuchungsfahrten.
 Figure 4-3: Statistic of salinities at individual stations during the monitoring cruises.

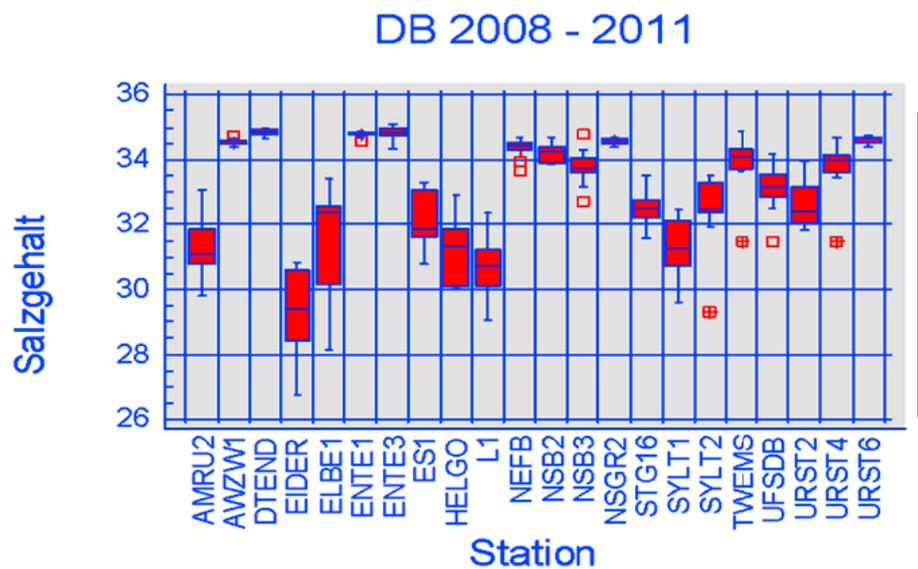


Abbildung 4-4: Konzentrationen des Salzgehalts an Monitoringstationen in der Deutschen Bucht.
 Figure 4-4: Salinity concentrations at monitoring stations in the German Bight.

station	count	mean value	median	minimum	maximum	variation coeff.
ENTE3	11	34.92	34.95	34.72	35.07	0.32%
DTEND	10	34.84	34.85	34.61	35.00	0.31%
ENTE1	11	34.78	34.79	34.59	34.90	0.25%
URST6	12	34.62	34.62	34.37	34.79	0.34%
NSGR2	10	34.57	34.60	34.37	34.70	0.28%
AWZW1	9	34.54	34.55	34.37	34.75	0.35%
NEFB	11	34.35	34.40	33.65	34.70	0.88%
NSB2	11	34.22	34.26	33.83	34.69	0.82%
TWEMS	10	33.88	34.01	31.47	34.88	2.77%
URST4	10	33.76	33.99	31.46	34.69	2.63%
NSB3	12	33.91	33.88	32.71	34.77	1.84%
UFSDB	10	33.06	33.15	31.48	34.20	2.30%
ES1	10	32.63	32.85	31.27	34.58	3.08%
STG16	11	32.50	32.49	31.56	33.52	1.59%
SYLT2	9	32.86	32.48	31.91	33.97	2.11%
URST2	10	32.70	32.46	32.00	33.96	1.92%
ELBE1	12	31.64	32.37	28.11	33.41	4.86%
SYLT1	10	31.32	31.37	29.62	32.46	2.74%
AMRU2	11	31.03	31.00	29.80	32.11	2.11%
HELGO	8	31.08	30.95	30.06	32.89	3.32%
L1	12	30.63	30.67	29.06	32.38	2.92%
EIDER	12	29.23	29.29	26.75	30.85	4.37%

Tabelle 4-2: Zusammenstellung der Mittelwerte, Mediane und Variationskoeffizienten der Salzgehalte an den Monitoringstationen.

Table 4-2: Compilation of mean values, medians and variation coefficients of salinities at the monitoring stations.

Anhand der Abbildungen und Tabelle ist ferner erkennbar, dass die Variabilität der Salzgehalte sehr stark vom Ort abhängig ist. So weisen die Stationen der offenen See (Sal. >34) wesentlich geringere Schwankungen auf (0,2 bis 0,8 % Var.-Koeff.) als die beiden anderen Gebiete. Besonders hohe Variabilitäten weisen die Elbe- und Weser-nahen Stationen ELBE1 und EIDER auf.

Schwebstoffgehalt

Ein anderer Parameter, der die Verteilung von einigen Metallen und – insbesondere – lipophilen Schadstoffen beeinflusst, ist der Schwebstoffgehalt des Wassers. Die Mittelwerte sind in *Abbildung 4-5* zusammengefasst: Auch hier sind es wieder die küstennahen Stationen (ES1, Sylt1, L1, AMRU2, EIDER und ELBE1), die hohe Werte und hohe Schwankungen aufweisen. Entsprechendes ist von den an den Schwebstoffen adsorbierten Schadstoffen zu erwarten (siehe *Kapitel 4.3.3* und *4.3.4.3*, lipophile CKW und PAKs).

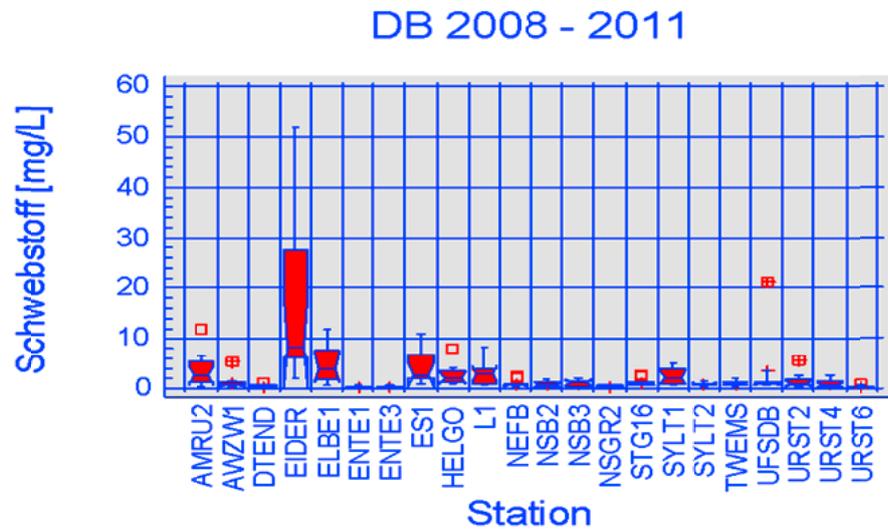


Abbildung 4-5: Konzentrationen des Schwebstoffgehalts an Monitoringstationen in der Deutschen Bucht.

Figure 4-5: Particulate matter concentrations at monitoring stations in the German Bight.

4.2 Nährstoffe

Sieglinde Weigelt-Krenz

4.2.1 Einführung

Die Eutrophierung¹ ist nach wie vor eines der größten ökologischen Probleme der deutschen Nordseegebiete (OSPAR 2010). Der größte Bereich der Deutschen Bucht wurde im Rahmen des allgemeinen Verfahrens zur Eutrophierungsbewertung (Comprehensive Procedure, OSPAR 2005) für den Zeitraum 2001–2005 als „Problem Area“ bewertet. Nur der „Entenschnabel“ (der äußere Deutsche Bucht Bereich) konnte als „Potential Problem Area“ eingestuft werden (Abbildung 4-6).

Eutrophierung bedeutet die durch menschliche Aktivitäten verursachte Anreicherung des Wassers mit Nährstoffen. Dies kann zu beschleunigtem Algen-Wachstum führen und dadurch unerwünschte Störungen der im Gewässer vorhandenen Lebensgemeinschaften hervorrufen und somit auch eine Veränderung der Gewässerqualität verursachen. In den letzten 50 Jahren stiegen die Nährstofffrachten der in die Nordsee mündenden Flüsse erheblich an. Deutliche Anzeichen von Eutrophierung, wie erhöhte Chlorophyllgehalte, Artenverschiebungen (auch toxische Algen), Sauerstoffmangel und Veränderung der Sichttiefe sind die Folge.

Zu den Nährstoffen zählen, neben in hohen Konzentrationen vorhandenem Kohlenstoff (CO_2 und HCO_3^-), sowohl organische als auch anorganische Phosphor- und Stickstoffverbindungen. Die in löslicher Form vorliegenden Phosphat-, Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Verbindungen werden auch als anorganische Nährsalze bezeichnet. Zu den organischen Nährstoffen zählen u. a. Harnstoff und Aminosäuren, sowie organische Phosphorverbindungen. Bei der analytischen Bestimmung von Gesamt-Phosphor und Gesamt-Stickstoff werden, sowohl die anorganischen Nährsalze, als auch die organischen und partikulären Nährstoffkomponenten als Summenparameter erfasst.

¹ Von griechisch ›eu‹ (gut) und ›trophie‹ (ernähren, wachsen)

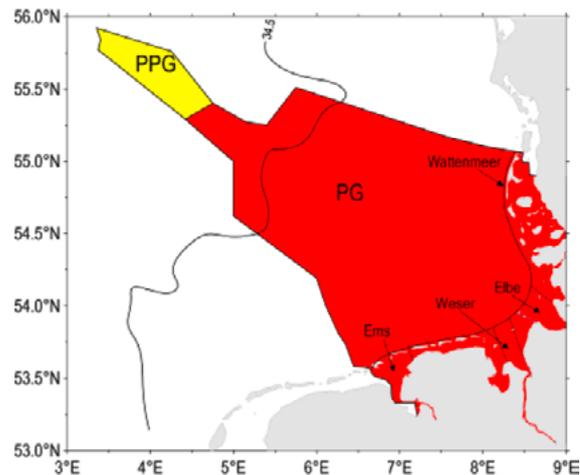


Abbildung 4-6: Eutrophierungsstatus in der Deutschen Bucht und der deutschen AWZ gemäß OSPAR COMPP. PPG = Potentielles Problemgebiet, PG = Problemgebiet (BROCKMANN et al., 2007).

Figure 4-6: Eutrophication status in the German Bight and the German exclusive economic zone under OSPAR COMPP. PPG = Potential Problem Area, PG = Problem Area (BROCKMANN et al., 2007).

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.

Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar – Fortsetzung

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.)

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 Elbe-Gesamtfrachten von Gesamt-Stickstoff, Gesamt-Phosphor und Silikat im Zeitraum 1978 bis 2009 sind in *Abbildung 4-7* und *4-8* dargestellt (*H.-J. LEHNHART und J. PÄTSCH 2001*, ergänzt bis 2009). Hierbei zeigen die Nährstofffrachten eine große interannuelle Variabilität, die vor allem beim Stickstoff mit dem Frischwasserabfluss korreliert. Während bei den Phosphor- und Stickstofffrachten seit den 1980er-Jahren eine deutliche Abnahme erkennbar ist, erreichen die Siliziumfrachten in der Elbe sehr unterschiedliche Konzentrationen. Ein Trend ist hier nicht erkennbar. 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 in den letzten Jahren nur noch ein geringer Rückgang zu verzeichnen ist. Auch der Eintrag von Stickstoff über die Flüsse hat in den letzten 20 Jahren deutlich abgenommen, befindet sich aber in den letzten fünf Jahren auf einem fast gleichbleibenden Niveau.

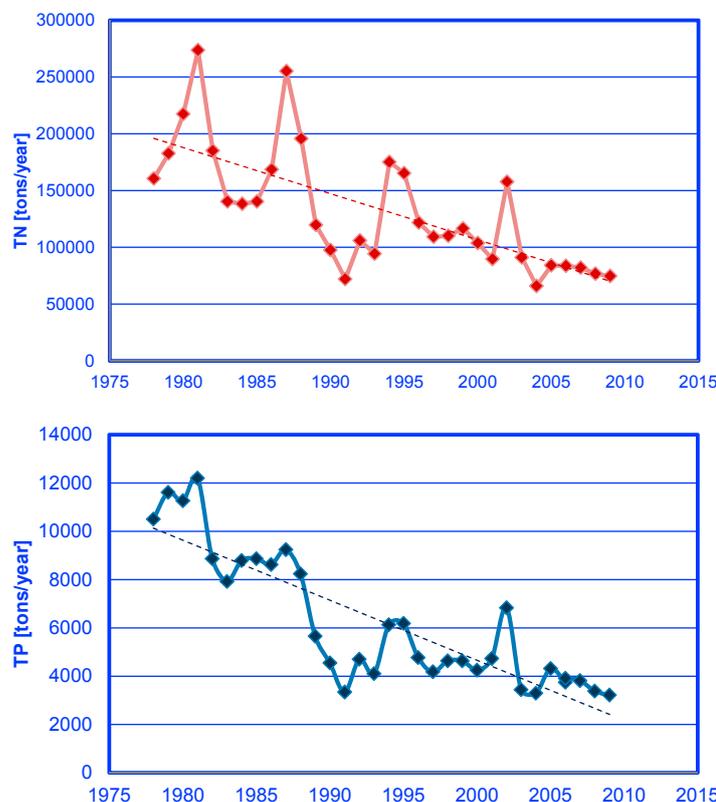


Abbildung 4-7: Stickstoff- und Phosphor-Gesamtfracht der Elbe. Die Daten basieren auf Messungen von FGG Elbe.

Figure 4-7: Total nitrogen and phosphorus loads of Elbe. The data are based on measurements of FGG Elbe.

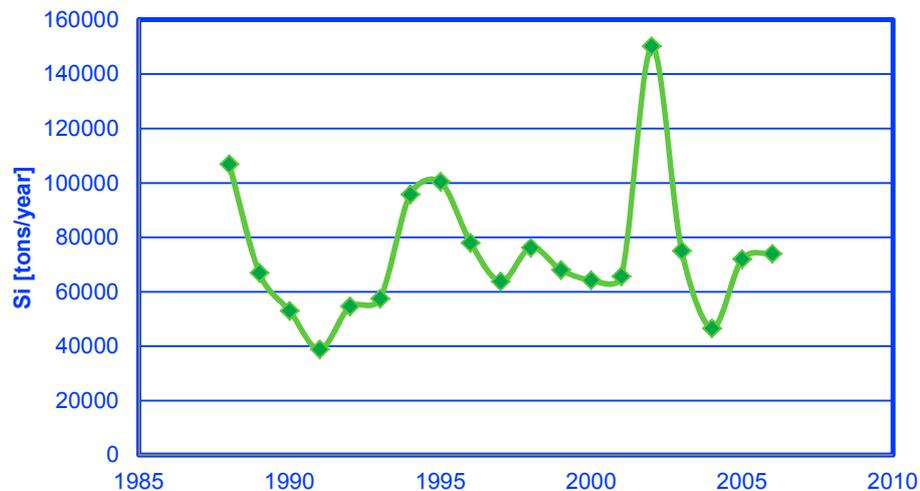


Abbildung 4-8: Silikat-Fracht von der Elbe. Die Daten basieren auf Messungen von FGG Elbe.
 Figure 4-8: Silicate load of Elbe. The data are based on measurements of FGG Elbe.

4.2.3 Nährstoffverteilungen – Deutsche Bucht und Nordsee

Seit den 1980er-Jahren führt das BSH regelmäßig Anfang des Jahres Nährstoffüberwachungen in der Deutschen Bucht durch, da um diese Zeit die Nährstoffkonzentrationen aufgrund der geringen biologischen Aktivität und weit fortgeschrittener Remineralisierung saisonale Maxima erreichen, die im Rahmen von OSPAR (Oslo Paris Kommission) und der MSRL (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie) für überregionale Vergleiche und Trendbetrachtungen verwendet werden.

Neben flächendeckenden Nährstoffaufnahmen werden an jeder beprobten Station (Stationsnetz siehe *Abbildung 4-1*) Metadaten wie Secchitiefe, Temperatur, Salzgehalt und pH-Wert aufgenommen.

Temperatur

Die Temperaturverteilung im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht ist in *Abbildung 4-9* für Februar 2008 bis Januar 2011 dargestellt. Sie wird in *Kapitel 3.5* umfassend diskutiert.

Salzgehalt

Die Salzgehaltsverteilungen während der Monitoringfahrten im Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011 sind in *Abbildung 4-10* dargestellt. Im Winter 2008 liegen im küstennahen Bereich, besonders vor Amrum, sehr geringe Salzgehalte (26,98 bis 29,07) vor, die auf starke Süßwassereinträge hinweisen. Höhere Salzgehalte (> 34,00) werden im Winter 2008, wie auch im Winter 2011 erst in der mittleren und äußeren Deutschen Bucht gemessen.

In den Wintern 2009 und 2010 drückt aufgrund verhältnismäßig niedriger Oberflächenabflussraten und Windverhältnissen aus NNW Atlantikwasser weit in die Deutsche Bucht vor, was im Elbeausstrombereich zu einem Salzgehalt bis 34,46 führt.

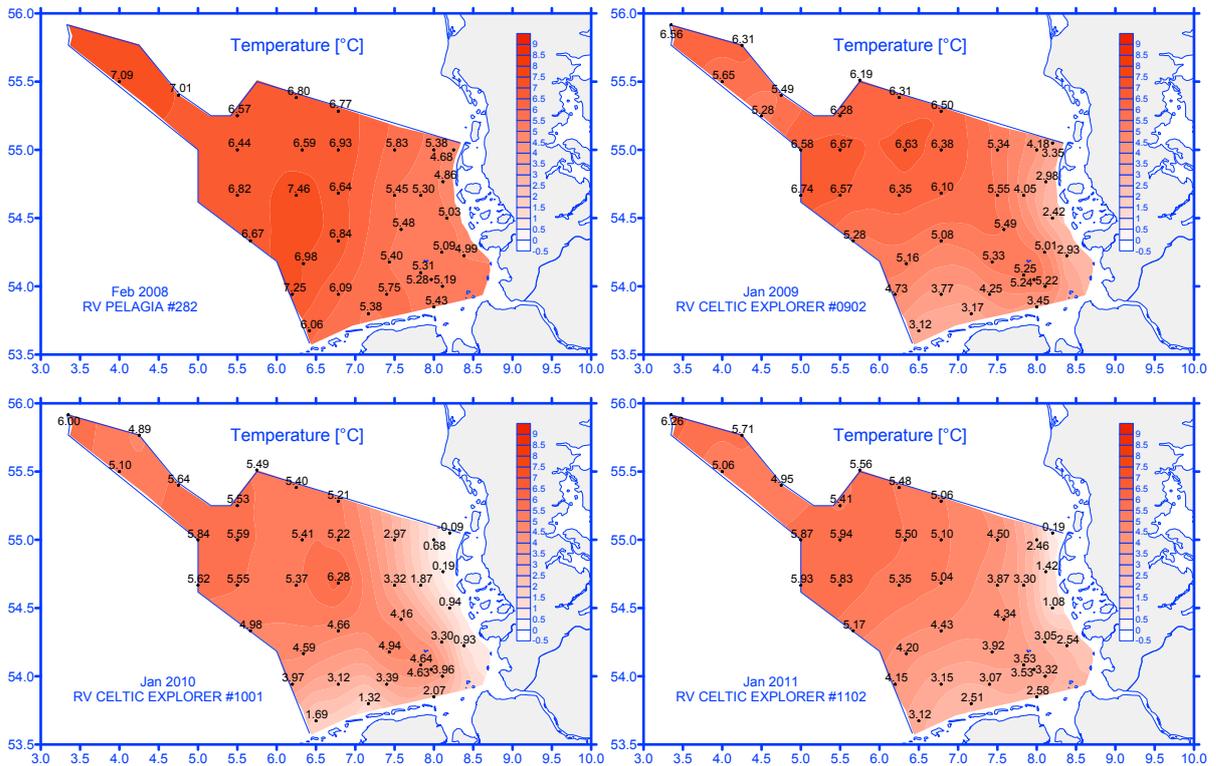


Abbildung 4-9: Temperaturen im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht; Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011.

Figure 4-9: Temperatures in bottom sea water of the German Bight in February 2008, January 2009, 2010 and 2011.

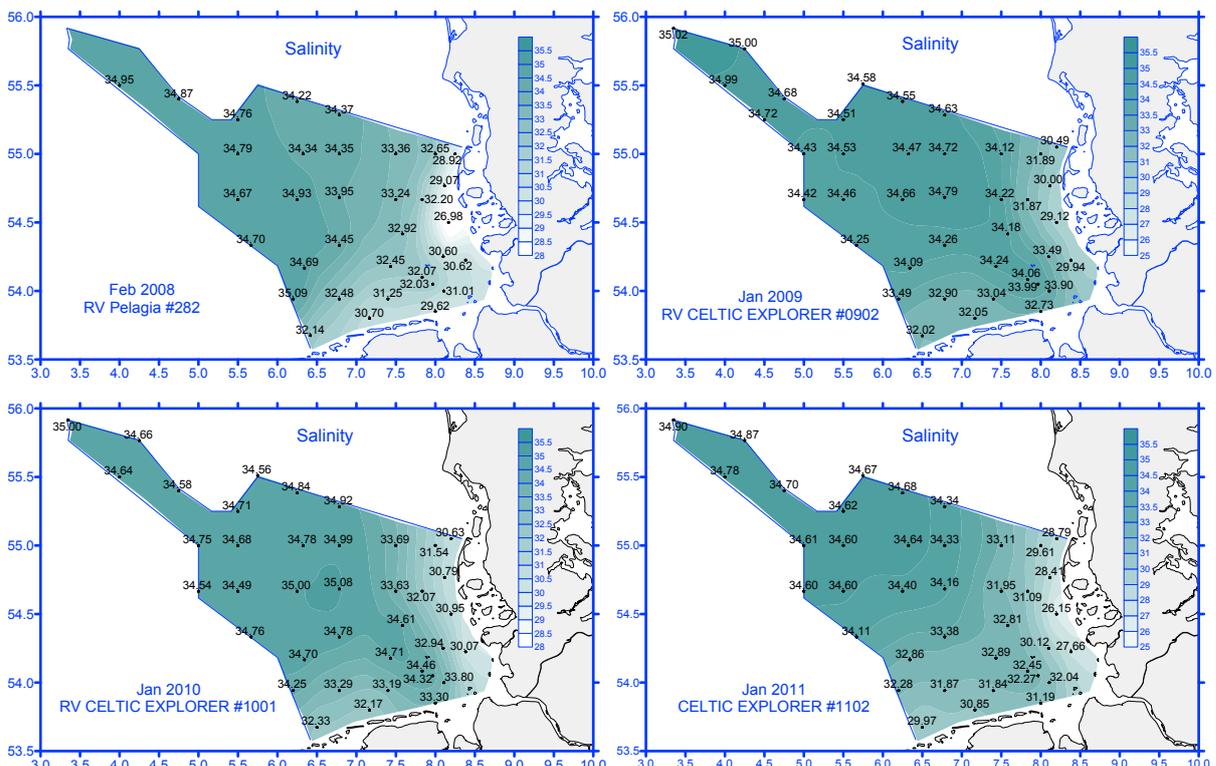


Abbildung 4-10: Salzgehaltsverteilung im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht; Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011.

Figure 4-10: Geographical distributions of salinity in bottom sea water of the German Bight in February 2008, January 2009, 2010 and 2011.

pH-Wert

Die pH-Werte liegen in den Wintern 2008, 2010 und 2011 zwischen 8,09 und 8,17 (Abbildung 4-11). Dieser Bereich spiegelt die zu dieser Zeit ablaufenden Remineralisierungsprozesse wider; biologische Aktivitäten, die höhere pH-Werte zur Folge haben, treten noch nicht auf. Im Winter 2009 erreichen die pH-Werte in großen Bereichen der Deutschen Bucht nur 8,01 bis 8,09.

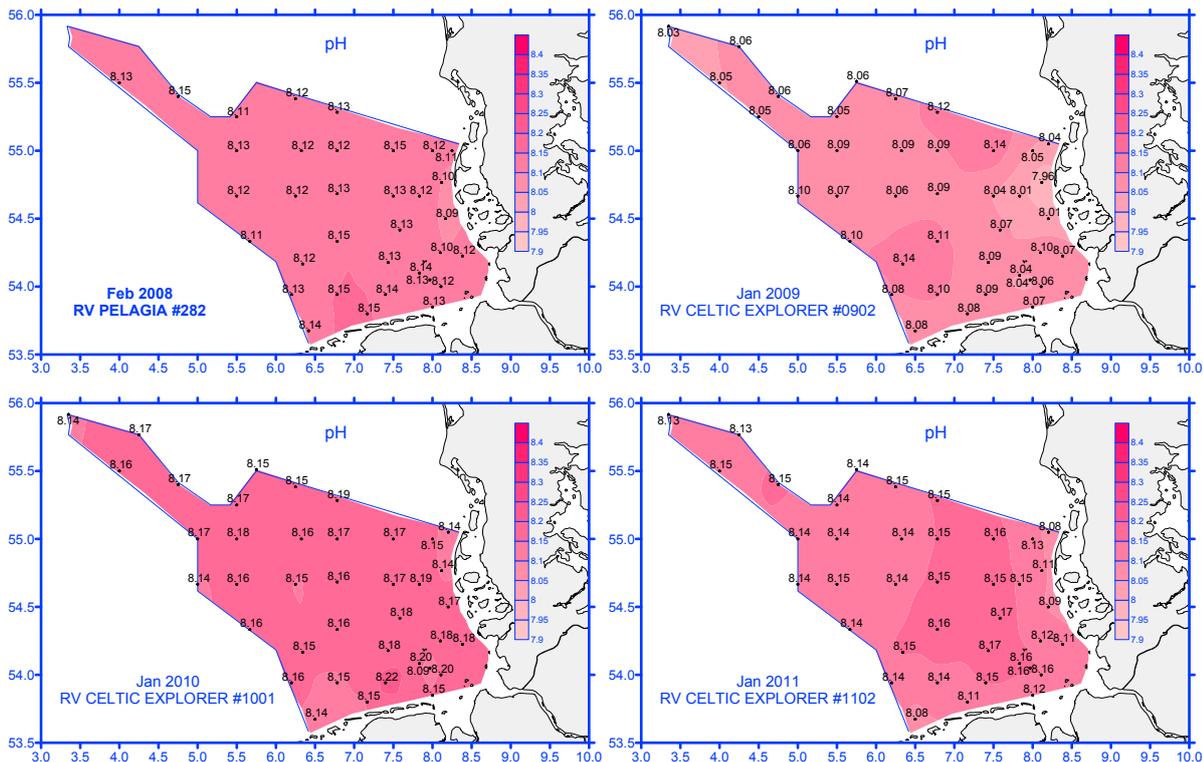


Abbildung 4-11: pH-Wert im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht; Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011.

Figure 4-11: pH in bottom sea water of the German Bight in February 2008, January 2009, 2010 and 2011.

4.2.3.1 Nährstoff-Verteilungsmuster Februar 2008 bis Januar 2011 (DB)

In *Abbildung 4-12* werden die Verteilungsmuster für DIN (gelöster anorganischer Stickstoff) bzw. TN (Gesamt-Stickstoff) im Bodenwasser der Deutschen Bucht dargestellt. Die Ergebnisse sind repräsentativ für die gesamte Wassersäule, da durch die Winterstürme das Seewasser gut durchmischt ist. Die Konzentrationen erreichen im Küstenbereich bis zu 10-fach höhere Werte als in der offenen See, wobei für die Winterwerte von DIN und TN ähnliche Strukturen zu beobachten sind. Ursache hierfür sind erhebliche Nährstofffrachten vor allem aus 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 Verteilungsmuster, die von Jahr zu Jahr variieren, ergeben sich aus dem Zusammenspiel von Eintragsstärke der Flüsse, Richtung des Nettotransports (Reststroms) und fortschreitender Verdünnung. Diese hochvariablen Einflussgrößen integrieren sich in der Salzgehaltsverteilung (*Abbildung 4-10*), wie ähnliche räumliche Strukturen belegen.

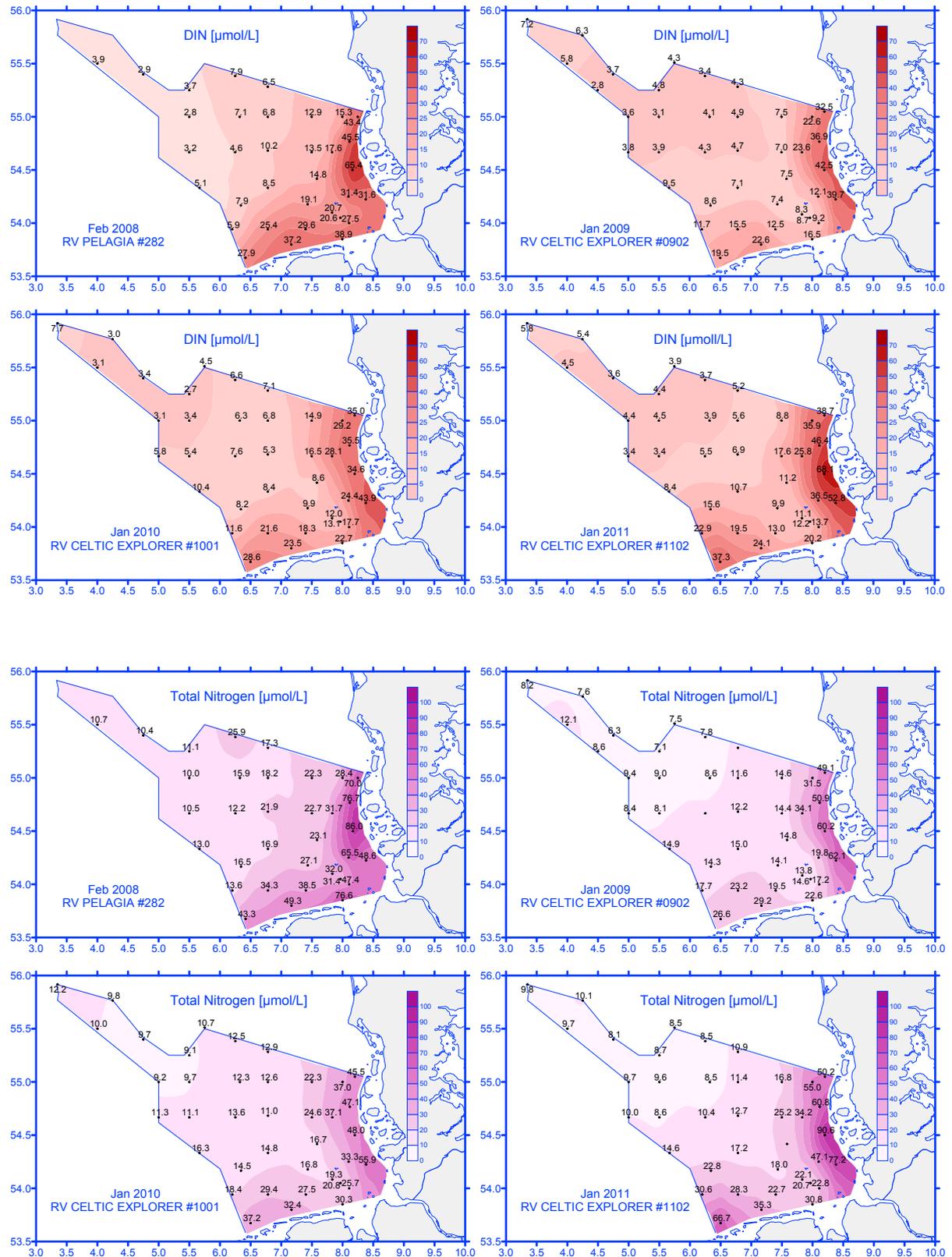


Abbildung 4-12: DIN- und Gesamt-N-Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht Februar 2008 bis Januar 2011.

Figure 4-12: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of DIN and total-nitrogen in bottom sea water of the German Bight in February 2008 to January 2011.

Die höchsten küstennahen DIN-Konzentrationen werden Anfang Februar 2008 bzw. Januar 2011 vor der nordfriesischen Küste mit 65,4 $\mu\text{mol/L}$ bzw. 68,1 $\mu\text{mol/L}$ gemessen. Diese Monate waren geprägt durch überdurchschnittlich hohe Oberflächenabflüsse über die Elbe, mit denen hohe Stickstofffrachten in die Deutsche Bucht transportiert wurden. In der mittleren Deutschen Bucht werden Werte zwischen 3,2 und 10,7 $\mu\text{mol/L}$ erreicht, während im Entenschnabel die Konzentrationen bis auf 2,8 $\mu\text{mol/L}$ absinken können.

Die höchsten Gesamt-Stickstoffkonzentrationen liegen im Januar 2011 bei 90,6 $\mu\text{mol/L}$ vor der schleswig-holsteinischen Küste. Hauptsächlich durch Verdünnungseffekte sind die Konzentrationen im Entenschnabel bis auf 8,2 $\mu\text{mol/L}$ abgesunken.

Abbildung 4-13 gibt die Verteilungsstrukturen von DIP (anorganisches lösliches Phosphat) und TP (Gesamt-Phosphor) wieder. Die höchsten Phosphatkonzentrationen sind ebenfalls in den nord- und ostfriesischen Küstenbereichen zu beobachten. Im Gegensatz zu DIN wird Phosphat jedoch kaum noch über die Flüsse eingetragen. Aufgrund des Verbots phosphathaltiger Waschmittel und des Ausbaus von Kläranlagen sind die Phosphateinträge um ca. 80% gesunken (siehe *Kapitel 4.2.2*). Da sich jedoch Phosphat in den Sommermonaten als Eisen(III)-komplex im Wattbereich anreichert und bei Sauerstoffmangel als lösliches Eisen(II)phosphat wieder in das Meerwasser freigesetzt wird, führt dies im Herbst und Winter zu erhöhten Konzentrationen im küstennahen Bereich.

Die höchsten Phosphatkonzentrationen werden im Winter 2009 vor Amrum mit 1,38 $\mu\text{mol/L}$ gemessen, während die Phosphat-Konzentrationen in den Jahren 2008, 2010 und 2011 zwischen 0,70 und 1,10 $\mu\text{mol/L}$ liegen. Auch die pH-Werte, die im Winter 2009 mit 7,96–8,01 niedriger als in den Vergleichsjahren sind, deuten auf eine ungewöhnliche Situation hin (siehe *Abbildung 4-11*). Niedrigere pH-Werte beeinflussen die Löslichkeit der Phosphorkomplexe und führen somit zu höheren Phosphatkonzentrationen in der Wassersäule.

Die Verteilung der Gesamt-Phosphor-Konzentrationen ist nicht grundsätzlich mit DIP zu vergleichen. Gesamt-Phosphor setzt sich aus anorganischen, organischen, gelösten und partikulären Bestandteilen zusammen, wobei der partikuläre Phosphatanteil stark variiert. Bei Sturmereignissen ist der Schwebstoffanteil und somit auch der partikuläre Phosphoranteil in der Wassersäule höher und wird bei der Bestimmung von Gesamt-Phosphor mit erfasst. Liegen ruhigere Wetterverhältnisse vor, lagert sich ein Teil der partikulären Bestandteile am Meeresboden ab und führt zu einem Rückgang des Gesamt-Phosphoranteils in der Wassersäule.

Ungewöhnlich hohe Gesamt-Phosphorkonzentrationen werden im Februar 2008 an der Station HELGO gemessen. Auch die Stationen URST5 und NEFB weisen mit 6,3 bzw. 4,3 $\mu\text{mol/L}$ in diesen Bereichen vergleichsweise hohe Werte auf.

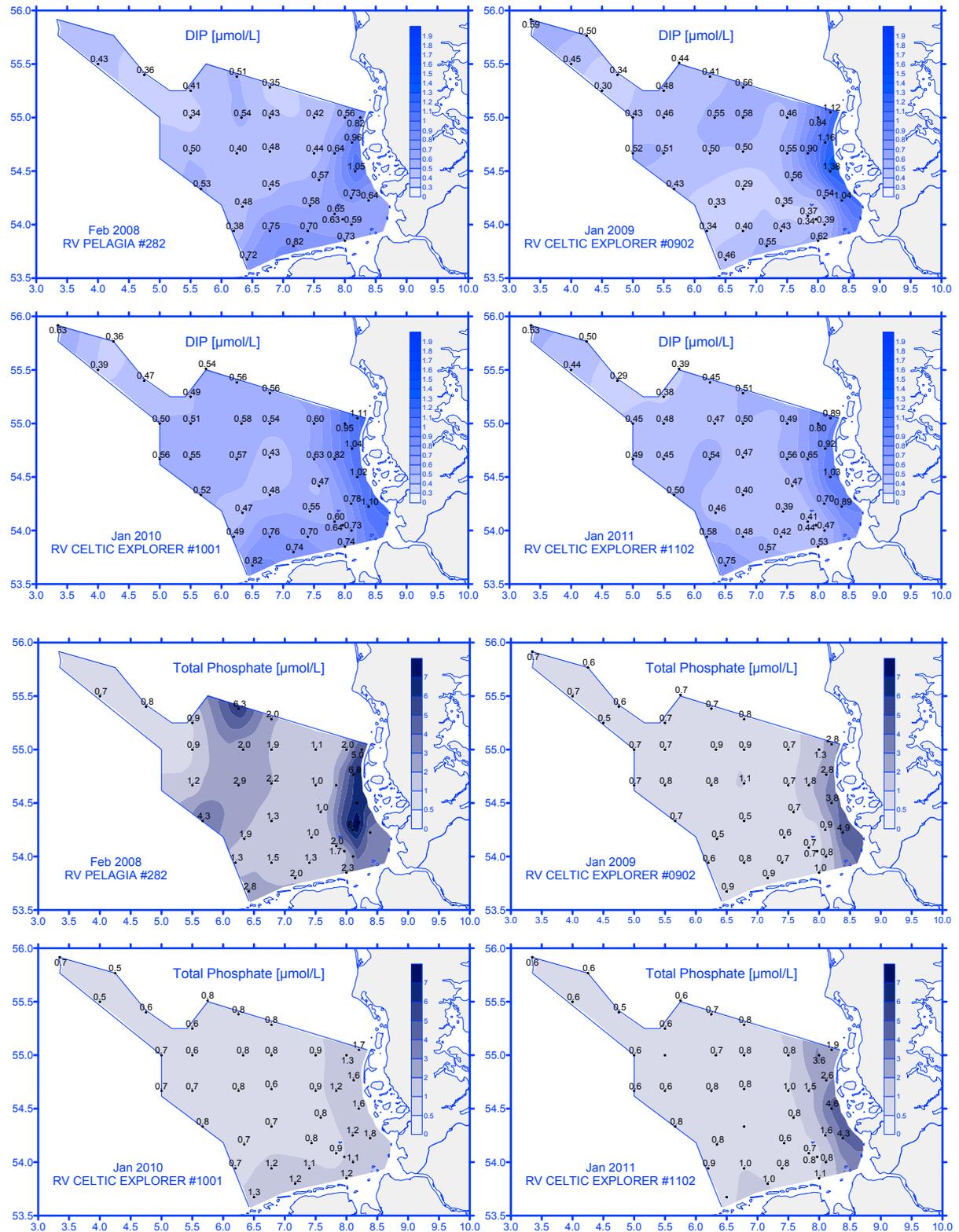


Abbildung 4-13: DIP (gelöstes anorganisches Phosphat) und Gesamt-P-Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht Februar 2008 bis Januar 2011.

Figure 4-13: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of DIP (dissolved anorganic phosphate) and total-phosphorus in bottom sea water of the German Bight in February 2008 to January 2011.

Silikat gelangt durch Verwitterungsprozesse sowie durch Abbau sedimentierter Kieselalgen in die Wassersäule. In den Jahren 2009 und 2010 liegen die Konzentrationen unter denen der Vergleichsjahre. Die zu dieser Zeit vorherrschenden niedrigen Wassertemperaturen beeinflussen die temperaturabhängigen Remineralisierungsvorgänge und verlangsamen die Abbauprozesse (Abbildung 4-14).

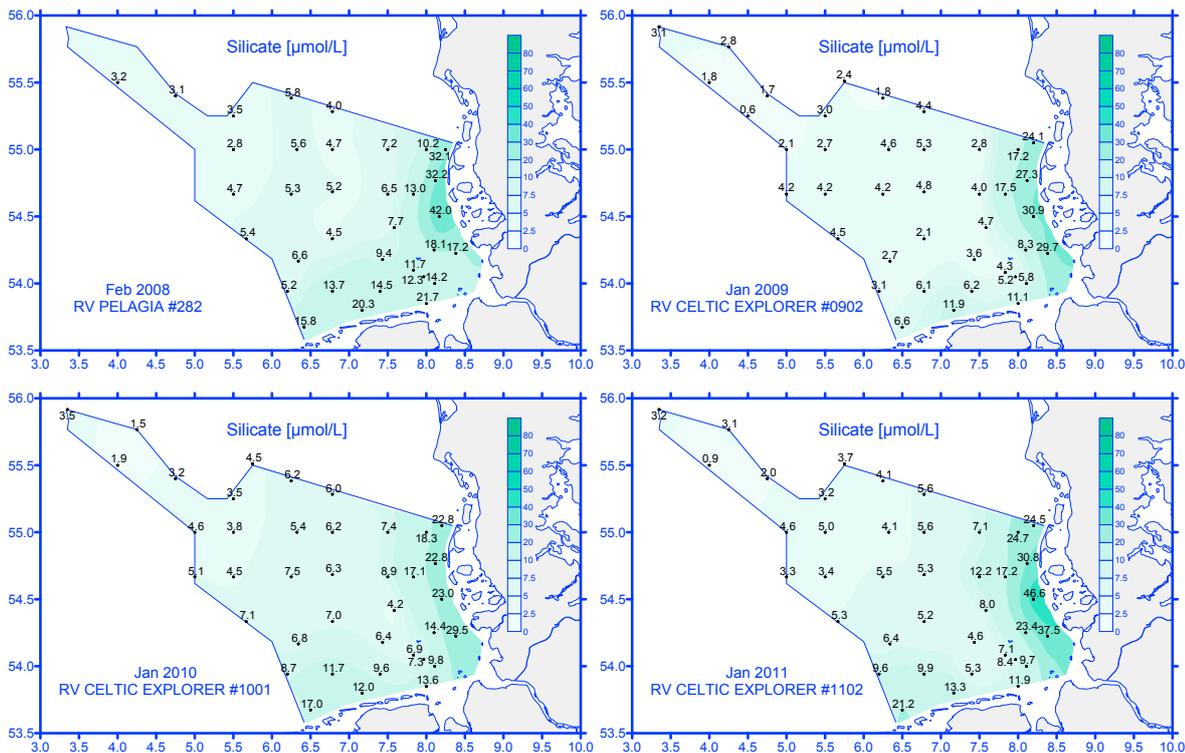


Abbildung 4-14: Silikat-Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht Februar 2008 bis Januar 2011.

Figure 4-14: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of silicate in bottom sea water of the German Bight in February 2008 to January 2011.

Die Abweichung der aus Nitrit+Nitrat und Phosphat berechneten Redfield-Verhältnisse (Abbildung 4-15) vom natürlichen Redfield-Verhältnis $\text{N/P}=16$ ist auch im Winter 2008 bis 2011 in den Küstengewässern unverändert hoch. Nur in wenigen Bereichen der mittleren Deutschen Bucht liegen natürliche Werte vor (REDFIELD 1934). Nach wie vor kennzeichnet ein Ungleichgewicht der Nährstoffkonzentrationen die Eutrophierungsproblematik in der AWZ (Ausschließliche Deutsche Wirtschaftszone). Hohe Stickstoffkonzentrationen im küstennahen Bereich, verursacht durch hohe Einträge über die Flüsse und die Atmosphäre (Industrie, Schifffahrt), im Verhältnis zu niedrigen Phosphatkonzentrationen führen zu Werten bis 55,4.

Diese aus dem natürlichen Gleichgewicht gelangten Redfield-Verhältnisse können Stoffwechselstörungen (\rightarrow toxische Algen) und Artenverschiebungen (Diatomeen \rightarrow Dinoflagellaten) zur Folge haben.

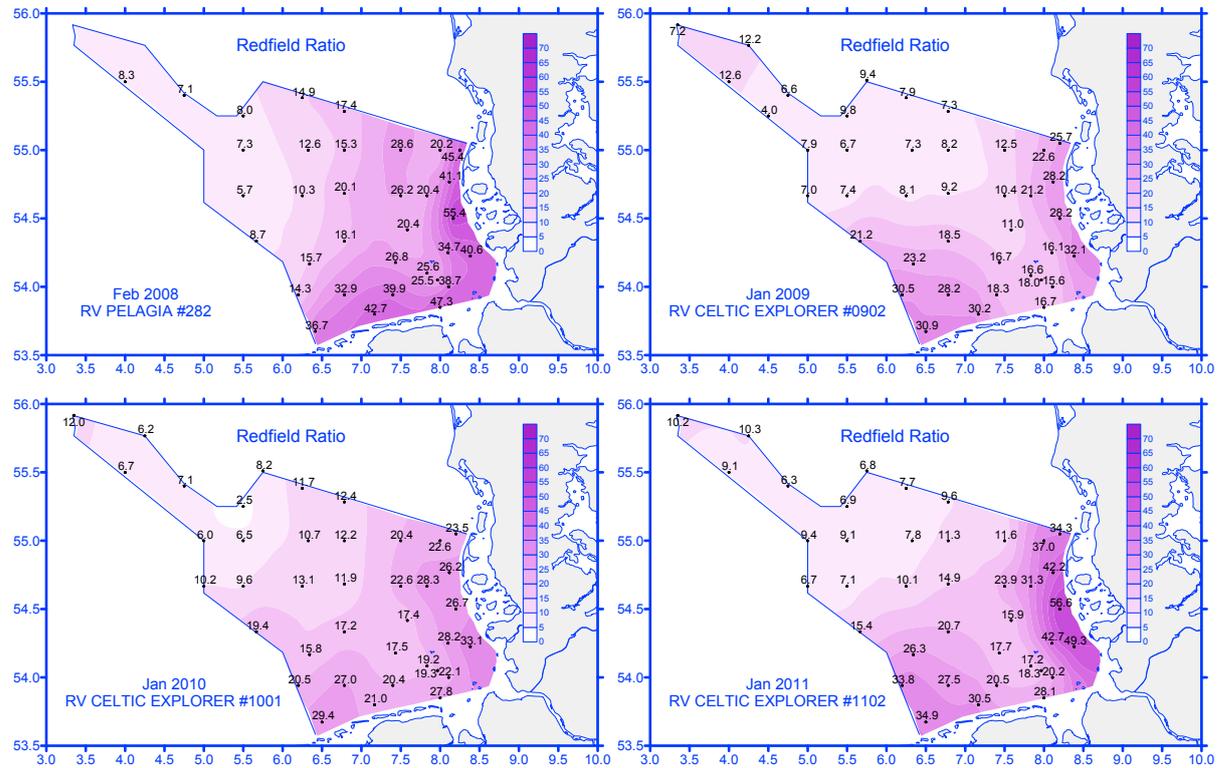


Abbildung 4-15: Redfield-Verhältnis ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) im Bodenwasser der Deutschen Bucht im Februar 2008 bis Januar 2011.

Figure 4-15: Redfield ratio ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) in the bottom water of the German Bight in February 2008 to January 2011.

4.2.3.2 Nährstoff – Verteilungsmuster Sommer 2008 bis Sommer 2011 (NS)

Wie schon in den Vorjahren wurden auch im Sommer 2008 bis 2011 flächendeckende Gesamtaufnahmen in der Nordsee durchgeführt und umfangreiche Datensätze gewonnen. Während anorganische Nährsalze nur in den Jahren 2008 und 2010 aufgenommen wurden, wurden Chlorophyll und gelöster Sauerstoff jährlich analysiert. Nachfolgend werden geographische Verteilungen dargestellt und im Vergleich zu den Vorjahren diskutiert.

Südlich von 57° N weist die Nordsee im Sommer 2008 kühlere Temperaturen und niedrigere Salzgehalte als im Vorjahr auf, während das Wasser vor der norwegischen Küste deutlich wärmer ist. Am Boden dringt das Atlantische Wasser mit $S > 35$ über die gesamte Breite der Nordsee bis auf etwa 57° N vor.

Das in den Jahren 2006 und 2007 massive Eindringen von atlantischem Wasser wird im Sommer 2010 nicht beobachtet. Auch hat sich aufgrund des langen und kalten Winters die warme Deckschicht der südlichen und zentralen Nordsee weniger als in den Vorjahren ausgebildet (ausführlicher, siehe Kapitel – Ozeanographie).

DIN: (Abbildung 4-16)

In den Sommermonaten sind die Nährstoffe in der Oberflächenschicht weitestgehend durch Algenwachstum verbraucht. Im Bodenwasser liegen die DIN-Gehalte an der Südküste Großbritanniens noch bei $0,7 \mu\text{mol}/\text{L}$; östlich der Shetlandinseln werden mit $13,1 \mu\text{mol}/\text{L}$ die höchsten Werte erreicht, hier macht sich der atlantische Einstrom deutlich bemerkbar.

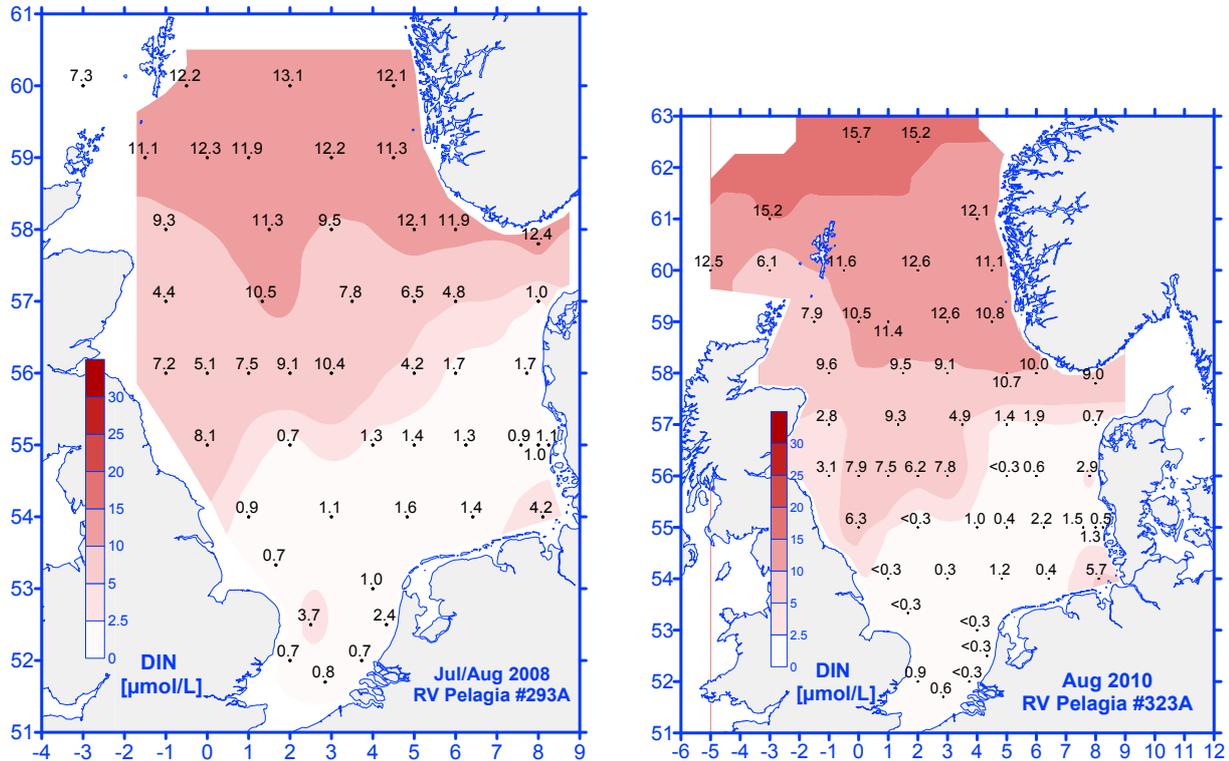


Abbildung 4-16: DIN-Konzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2010.
 Figure 4-16: DIN concentration ($\mu\text{mol/L}$) in bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2010.

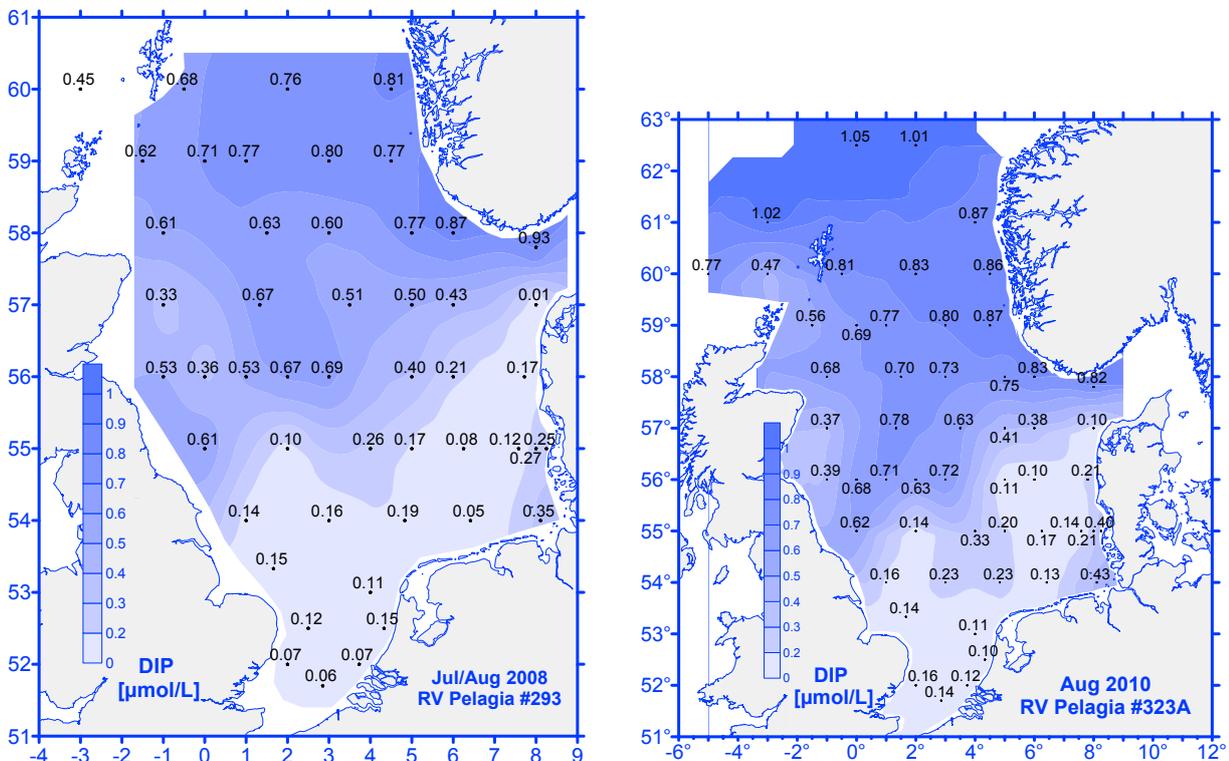


Abbildung 4-17: Phosphatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2010.
 Figure 4-17: Phosphate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2010.

Die DIN-Konzentrationen in der Elbefahne erreichen aufgrund der niedrigeren Oberflächenabflüsse im Sommer 2008 nur 4,2 $\mu\text{mol/L}$ bzw. im Sommer 2010 5,7 $\mu\text{mol/L}$ (2007: 7,0 $\mu\text{mol/L}$).

Im Sommer 2010 wurde das Probenahmegebiet bis zu dem 63° N Breitengrad nördlich der Shetlandinseln ausgedehnt. Deutlich ist der Einstrom des Atlantikwassers mit hohen DIN-Konzentrationen zwischen 61° und 63° N Breitengrad erkennbar. Extrem niedrig liegen die DIN-Konzentrationen vor der niederländischen und südeinglischen Küste im August 2010. Hier werden selbst in Bodennähe die Nachweiskonzentrationen kaum erreicht.

Phosphat: (Abbildung 4-17)

Auch die Phosphatkonzentrationen erreichen während der Sommermonate in der Oberflächenschicht ein Minimum. In Bodennähe liegen höhere Konzentrationen vor, da durch Remineralisierungsprozesse Phosphat freigesetzt und dem bodennahen Meerwasser wieder zugeführt wird. Zusätzlich werden die Phosphatkonzentrationen durch den atlantischen Einstrom erhöht. *Abbildung 4-17* (August 2010) zeigt nördlich der Shetlandinseln Konzentrationen bis 1,05 $\mu\text{mol/L}$, die in der mittleren Nordsee bis auf 0,72 $\mu\text{mol/L}$ zurück gehen. In den küstennahen Gewässern liegen Werte zwischen 0,07 und 0,27 $\mu\text{mol/L}$ vor. Der Elbeausstrom zeichnet sich in den Jahren 2008 und 2010 nicht so deutlich wie im Sommer 2007 ab (2007: 0,83 $\mu\text{mol/L}$; 2008: 0,35 $\mu\text{mol/L}$; 2010: 0,43 $\mu\text{mol/L}$).

Silikat: (Abbildung 4-18)

Auch für die Silikatkonzentrationen gilt, dass durch das Kieselalgenwachstum im Frühjahr die Nährstoffe aus dem Oberflächenwasser weitestgehend aufgezehrt sind. Im Vergleich zum Sommer 2007 liegen die Konzentrationen im Sommer 2008 im Bodenwasser bis zu 1,5 $\mu\text{mol/L}$ unter den Werten des Vorjahres. Die höchsten Werte werden im Bereich der norwegischen Rinne mit 6,1 bis 10,5 $\mu\text{mol/L}$ erreicht.

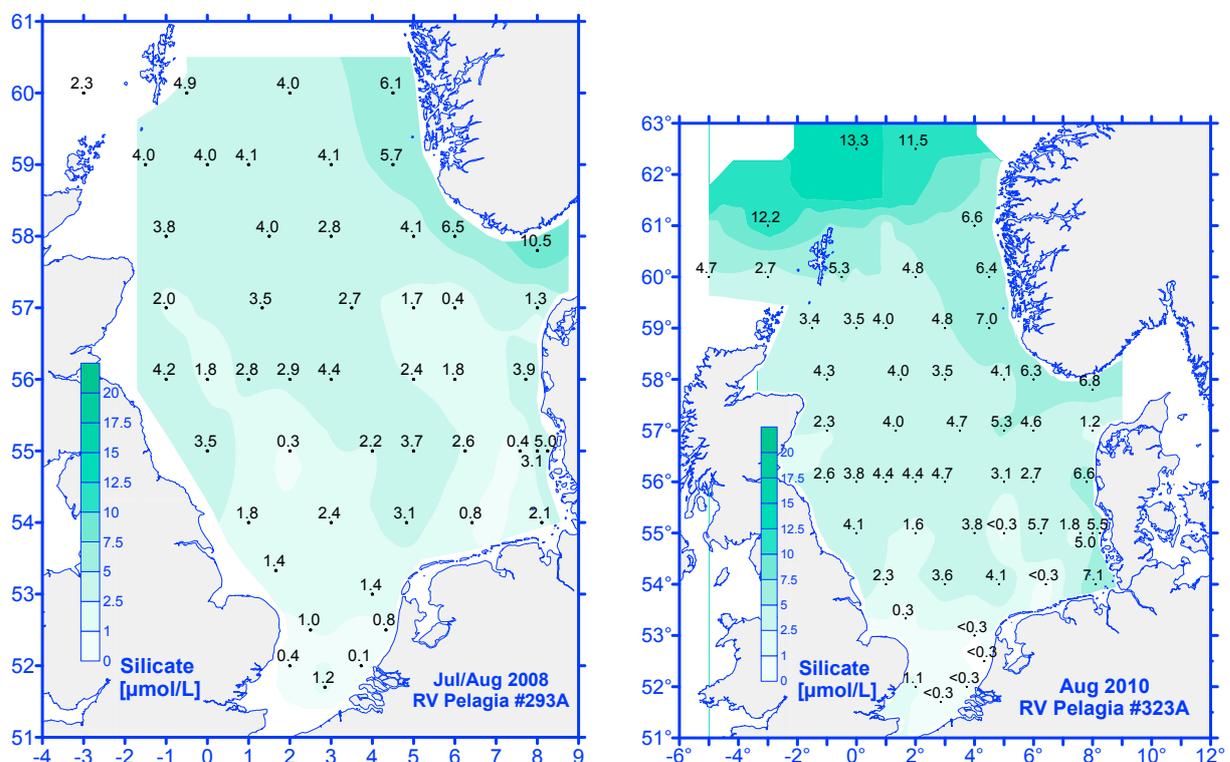


Abbildung 4-18: Silikatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2010.
Figure 4-18: Silicate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2010.

Durch die bis nördlich der Shetlandinseln ausgedehnte Gesamtaufnahme im Sommer 2010 wird deutlich, dass über das Atlantikwasser hohe Silikatkonzentrationen (bis 13,3 $\mu\text{mol/L}$ zwischen 62° und 63° Breitengrad) eingetragen werden. Vor der ostfriesischen Küste liegen in diesem Sommer die Silikatwerte unter der Nachweisgrenze ($<0,3 \mu\text{mol/L}$), während im Elbeestrom Konzentrationen bis 7,1 $\mu\text{mol/L}$ gemessen werden (2008: 2,1 $\mu\text{mol/L}$; 2007: 4,5 $\mu\text{mol/L}$).

4.2.4 Nährstoffveränderungen in der Deutschen Bucht

4.2.4.1 Zeitlich hochaufgelöste Messungen an der BSH-Messnetzstation UFS Deutsche Bucht

An der BSH-Messnetzstation UFS DB (Unbemanntes Feuerschiff Deutsche Bucht) wurden im Jahr 2010 und 2011 zeitlich hochaufgelöste Nährstoffmessungen durchgeführt. *Abbildung 4-19* zeigt die Jahrgänge von Nitrat, Phosphat und Silikat parallel zum Salzgehalt im Jahr 2011.

Die Nitratkonzentrationen sind im Frühjahr erwartungsmäßig hoch, da die Remineralisierungsvorgänge abgeschlossen und die Nährstoffe der Wassersäule wieder zugeführt sind. Mit der Frühjahrsplanktonblüte werden sowohl Nitrat, Phosphat als auch Silikat aus der Wassersäule aufgezehrt. Während die Silikat- und Phosphatkonzentrationen schnell abnehmen und für das Wachstum der Diatomeen (Kieselalgen) zum limitierenden Faktor werden, ist Nitrat noch in geringen Konzentrationen verfügbar. Im August/September ist in der Wassersäule wieder eine langsame Zunahme der Phosphatkonzentrationen zu messen, während Nitrat zum limitierenden Faktor wird. Auch die in den Kieselalgenschalen eingelagerten Silikate werden in den Wintermonaten langsam remineralisiert und stehen im kommenden Frühjahr wieder zur Verfügung.

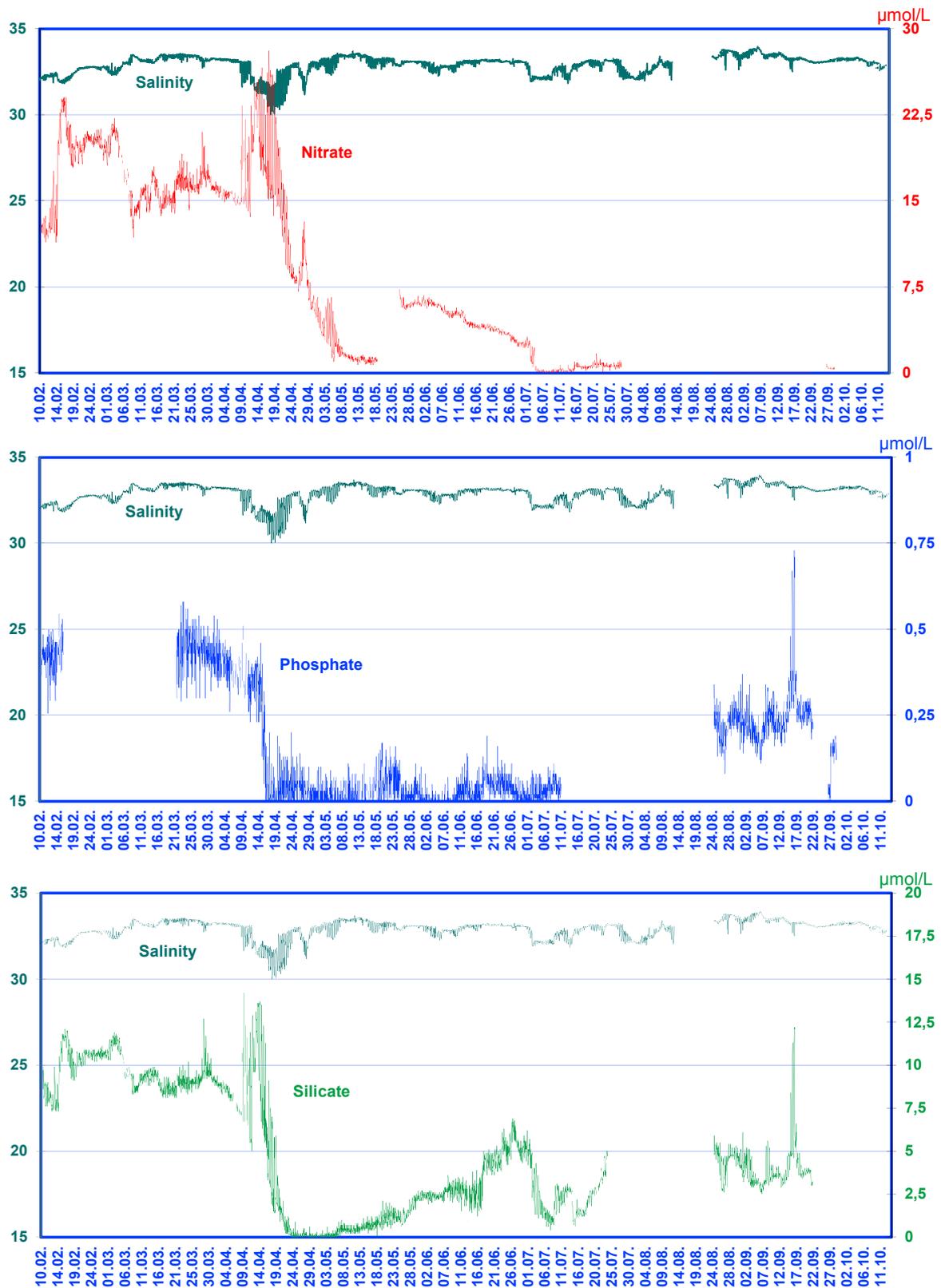


Abbildung 4-19: Zeitlich hochaufgelöste Nährstoff-Messungen an der BSH-Messnetzstation UFS Deutsche Bucht im Jahr 2011.

Figure 4-19: High-resolution time series of nutrients at the BSH network station UFS German Bight in 2011.

4.2.4.2 Langzeitliche Nährstoff-Entwicklung in der Deutschen Bucht

Zur Diskussion der langzeitlichen Entwicklung werden für definierte Salzgehalte (S) aus entsprechenden Regressionsgeraden Nährstoffkonzentrationen (WEIGELT-KRENZ 2013) berechnet, welche charakteristisch für das Küstenwasser (S=30), die eigentliche Deutsche Bucht (S=33) und die äußere Deutsche Bucht (S=34) sind.

Die *Abbildungen 4-20ff.* zeigen die langzeitliche Entwicklung der winterlichen Nährstoffkonzentrationen von 1978/85 bis 2011. Für Phosphat und Silikat sind darüber hinaus Messwerte 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 Konzentration der löslichen anorganischen Stickstoffverbindungen (DIN) im Küstenwasser unterliegt starken zwischenjährigen Schwankungen, wobei ein leichter Rückgang zu verzeichnen ist. Seit 2002 werden immer wieder Werte unter 40 $\mu\text{mol/L}$ erreicht. Die Konzentration der Gesamt-Stickstoffverbindungen (TN), die ca. 30 % über den Werten von DIN liegt, zeigt einen ähnlichen Verlauf. Im Winter 2011 beträgt die aktuelle DIN-Konzentration 34,6 $\mu\text{mol/L}$, die Gesamt-Stickstoffkonzentration erreicht einen Wert von 47,6 $\mu\text{mol/L}$. Beide Werte liegen noch weit oberhalb des im Rahmen von OSPAR angestrebten Orientierungswertes (Salzgehalt 28–34,5) von 11–12 $\mu\text{mol/L}$ (TN=17–18 $\mu\text{mol/L}$) (BROCKMANN *et al.* 2007). Die Nährstoffeinträge über die Flüsse sind zwar rückläufig, der atmosphärische Eintrag durch Industrie, Offshoreanlagen, Seeschifffahrt und die ‚*transboundary effects*‘ (grenzüberschreitende Effekte) nehmen jedoch immer noch zu und beeinflussen die Stickstoffkonzentrationen in der Wassersäule negativ.

Auch in der mittleren Deutschen Bucht (S=33) werden mit DIN=13,7 $\mu\text{mol/L}$ (Orientierungswert: 11–12 $\mu\text{mol/L}$) bzw. TN=21,5 $\mu\text{mol/L}$ (Orientierungswert: 17–18 $\mu\text{mol/L}$) die Zielwerte noch nicht erreicht. Im offenen Seebereich (S=34) liegen im Winter 2011 die DIN- bzw. TN-Konzentrationen bei 6,8 bzw. 12,8 $\mu\text{mol/L}$ und unterschreiten den Orientierungswert für Stickstoffverbindungen, der den guten Zustand widerspiegelt.

Die lösliche anorganische Phosphatkonzentration (DIP), die zu Beginn der 1990er-Jahre im Küstenwasser aufgrund der durchgeführten Maßnahmen deutlich zurückging, hat sich in den vergangenen 13 Jahren im Bereich der natürlichen Schwankungsbreite kaum verändert. Im Winter 2011 wird für S=30 ein Wert von 0,70 $\mu\text{mol/L}$ berechnet (Orientierungswert: 0,6 $\mu\text{mol/L}$; S=28–34,5), in der mittleren Deutschen Bucht 0,52 $\mu\text{mol/L}$ und in der offenen See 0,45 $\mu\text{mol/L}$. Der angestrebte Orientierungswert ist in Küstennähe fast erreicht. In den offenen Seegebieten liegt für die Phosphorverbindungen der gute Zustand vor.

Die Gesamt-Phosphor-Konzentrationen (TP) schwanken zwischenjährlich sehr stark und erreichen in den Jahren 2006–2008 vergleichbar hohe Werte zu den Jahren 1989–1993. Das Verbot phosphathaltiger Waschmittel spiegelt sich zwar deutlich in der langzeitlichen Abnahme der DIP-Konzentrationen wider (WEIGELT-KRENZ 2013), nicht jedoch in den Gesamt-Phosphorkonzentrationen. Die TP-Konzentration im Winter 2011, die vergleichbar ist mit den Werten von 1995/96, erreicht mit 1,86 $\mu\text{mol/L}$ den im Rahmen von OSPAR angestrebten Orientierungswert (1–1,1 $\mu\text{mol/L}$) nicht. In der mittleren Deutschen Bucht liegen die gemessenen Konzentrationen mit TP=0,95 $\mu\text{mol/L}$ und in der offenen See mit TP = 0,65 $\mu\text{mol/L}$ unter dem anzustrebenden Orientierungswert.

Der zeitliche Verlauf der Gesamtphosphor- (TP) und Phosphat-Konzentrationen (DIP) verdeutlicht das unterschiedliche Verhalten von TP und löslichem Phosphat im Seewasser. Der Anteil an löslichem anorganischem Phosphat vom Gesamtphosphor-Gehalt liegt zwischen 40–50 % mit einer hohen Schwankungsbreite. Der partikuläre und organische Phosphor-Anteil erreicht entsprechend 50–60% und liegt somit um den Faktor 2 über dem Anteil an partikulären

und organischen Stickstoffverbindungen. Während ein Großteil der löslichen Stickstoffkomponenten durch Remineralisierung der Wassersäule wieder zugeführt wird, lagert sich das freiwerdende Phosphat u. a. als Eisen(III)komplex am Meeresboden ab und wird erst durch steigende Temperaturen und bei vorherrschenden anoxischen Verhältnissen, meist im Spätsommer/Herbst, wieder als lösliche Eisen(II)Verbindung freigesetzt (VAN BEUSEKOM *et al.* 1999). Ein Teil des Phosphats wird auch als Calcium-Apatit im Sediment eingelagert und steht dem Phosphatkreislauf viele Jahre nicht zur Verfügung.

Die winterlichen Silikatkonzentrationen unterliegen von Jahr zu Jahr starken Änderungen. Während die Ergebnisse von 1993 bis 1996 im Bereich des Vergleichswertes von 1936 (18,5 $\mu\text{mol/L}$) liegen, wird dieser Wert in den Folgejahren deutlich überschritten.

Insgesamt hat sich die Nährstoffsituation gegenüber derjenigen der Vorjahre nur im Rahmen der natürlichen Variabilität verändert. Die im Winter durch Algenwachstum kaum beeinflussten Phosphatgehalte liegen in der zentralen Nordsee und in der mittleren Deutschen Bucht auf dem Vergleichsniveau von 1936, im Küstenbereich etwas darüber. Die Gesamtphosphorkonzentration befindet sich im Küstenbereich deutlich über dem angestrebten Orientierungswert. 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, sodass zwischenjährige Schwankungen biologische und auch geologische Veränderungen anzeigen.

4.2.5 Bewertung der Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht

4.2.5.1 Bewertungsgrundlage

Im Rahmen der 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 werden. Daraus ergibt sich bei einem Salzgehalt von 28–34,5 für die löslichen anorganischen Stickstoffverbindungen (DIN) ein Orientierungswert von 11–12 $\mu\text{mol/L}$ und für Phosphat (DIP) ein Orientierungswert von 0,6 $\mu\text{mol/L}$. Für TN wird ein Orientierungswert von 17–18 und für TP ein Wert von 1–1,1 $\mu\text{mol/L}$ festgelegt.

4.2.5.2 Bewertung 2011

Die in diesem Bericht durchgeführte Bewertung der Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht bezieht sich 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 salzgehalt-normierten Ergebnisse werden mit o. g. Orientierungswerten verglichen und diskutiert.

Für die löslichen Stickstoffverbindungen (DIN) wurde im Winter 2011 für einen Salzgehalt 30 (küstennaher Bereich) eine mittlere Konzentration von 34,6 $\mu\text{mol/L}$ berechnet. Dieser Wert liegt noch deutlich über dem Orientierungswert von 12 $\mu\text{mol/L}$. Die für die offene Deutsche Bucht (S=34) berechnete mittlere Konzentration von 6,8 $\mu\text{mol/L}$ hat inzwischen den Orientierungswert erreicht. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich für die Gesamtstickstoffkonzentrationen. Für

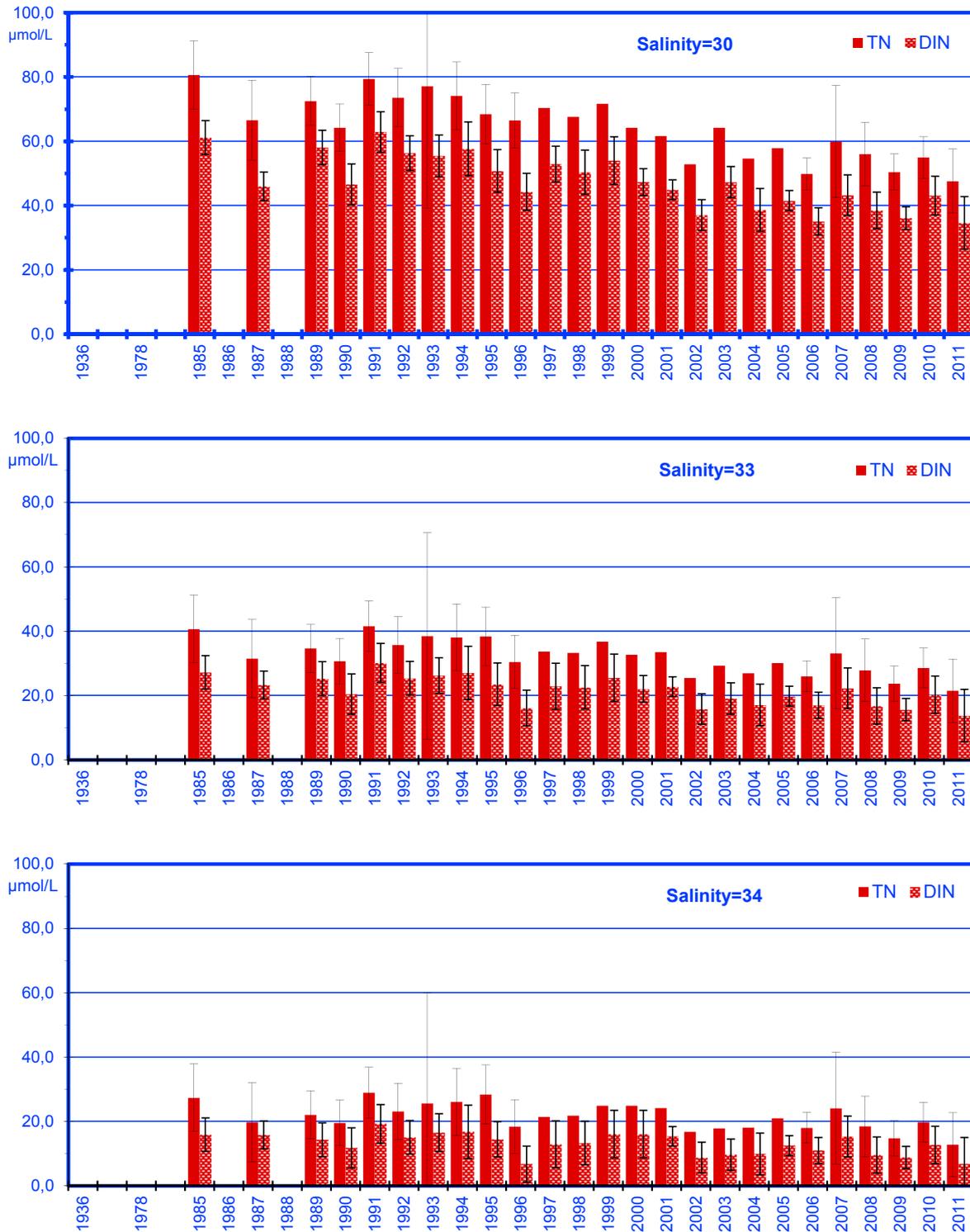


Abbildung 4-20: Zeitserien der berechneten winterlichen DIN- und TN-Konzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall).

Figure 4-20: Time series of wintry DIN and TN concentrations. Prediction limits are depicted as 95 % bars.

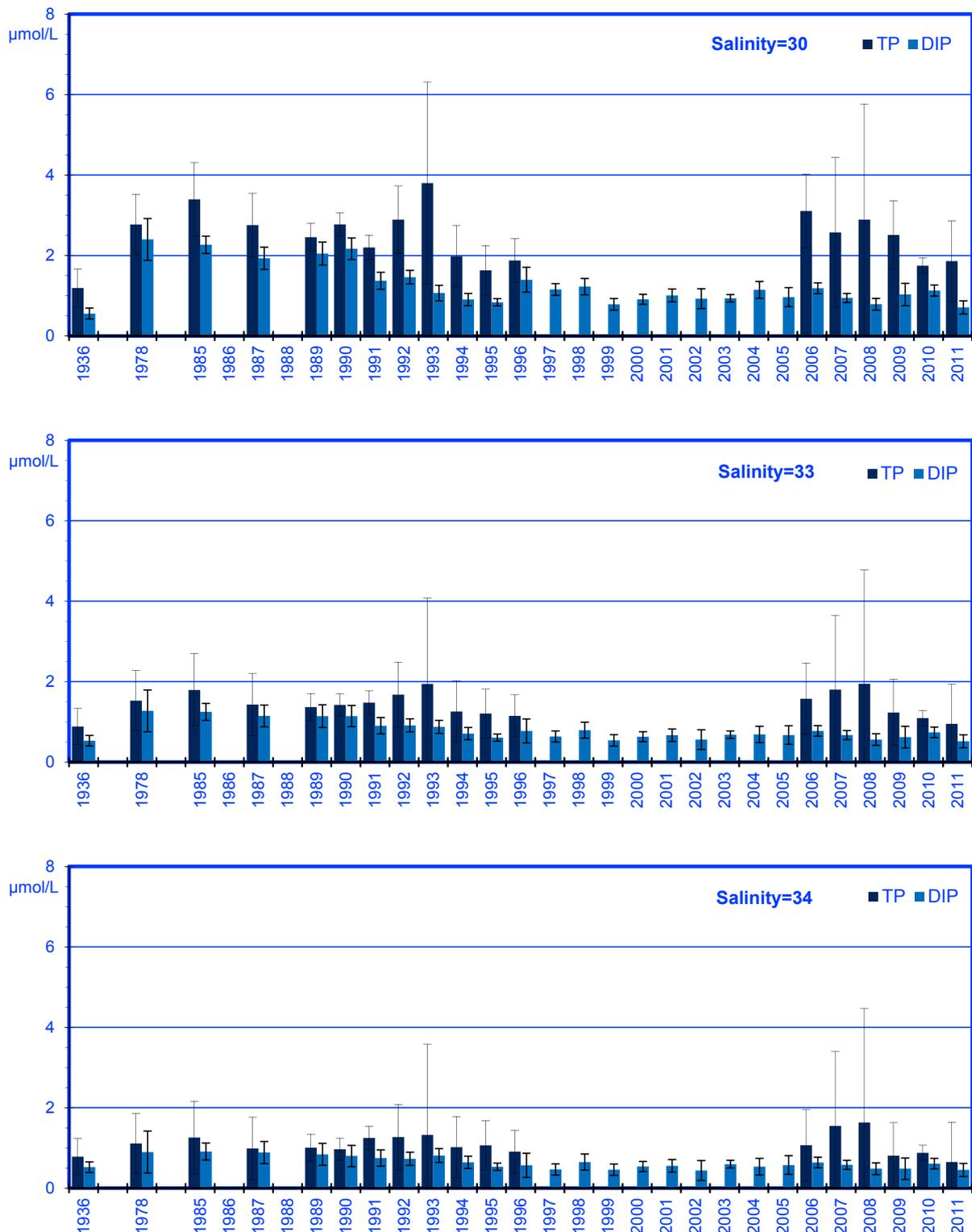


Abbildung 4-21: Zeitserien der berechneten winterlichen DIP- und TP-Konzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Vergleichswerten von 1936.

Figure 4-21: Time series of wintry DIP and TP concentrations. Prediction limits are depicted as 95 % bars. Reference concentrations from 1936.



Abbildung 4-22: Zeitserien der berechneten winterlichen Silikat-Konzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Vergleichswerten von 1936.

Figure 4-22: Time series of wintry silicate concentrations. Prediction limits are depicted as 95 % bars. Reference concentrations from 1936.

Gesamt-Stickstoff (S=30) wird bei einer Konzentration von 47,6 $\mu\text{mol/L}$ der Orientierungswert um mehr als das Doppelte überschritten. Erst in der offenen See (S=34) wird mit 12,8 $\mu\text{mol/L}$ der Orientierungswert erreicht.

Die im Winter 2011 im küstennahen Bereich (S=30) ermittelte Phosphatkonzentration (0,70 $\mu\text{mol/L}$) weicht nur noch geringfügig von dem angestrebten Orientierungswert ab. Trotz abnehmender Phosphateinträge über die Flüsse sinken die Phosphatkonzentrationen im Seewasser jedoch nicht weiter sondern liegen seit mindestens 13 Jahren auf einem ähnlichen Niveau. Anders verhält sich die Konzentration für Gesamtphosphor. Mit 1,86 $\mu\text{mol/L}$ im Winter 2011 liegt der Wert noch 50 % über dem angestrebten guten Zustand.

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.
- In Küstennähe liegen die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen noch deutlich über dem angestrebten Orientierungswert.
- Für das lösliche Phosphat wird zwar die angestrebte Konzentration im Küstenbereich erreicht nicht jedoch für Gesamtphosphor, das auch die unlöslichen partikulären und organischen Bestandteile umfasst.

4.2.5.3 Gesamtbewertung

Eine Gesamtbewertung der Eutrophierungssituation in der Nordsee wird auf nationaler und internationaler Ebene im Rahmen der von OSPAR entwickelten Common Procedure (OSPAR Commission; Reference Number 2005-3) durchgeführt. In dieses Bewertungssystem fließen nicht nur Nährstoffeinträge über die Flüsse und Nährstoffkonzentrationen im Seewasser und daraus berechnete Redfieldverhältnisse ein, sondern es werden auch direkte (Chlorophyllgehalt, Planktonvorkommen) und indirekte Effekte (Sauerstoffmangelsituationen, Zoobenthos) berücksichtigt. Die letzte im Jahr 2008 durchgeführte Klassifizierung (OSPAR Commission, 2008) stufte sowohl die deutschen Küstengewässer als auch die mittlere Deutsche Bucht als „problem area“ ein (siehe *Abbildung 4-6*). In der äußeren Deutschen Bucht, die als „potential problem area“ (PPA) eingestuft wurde, liegen zwar die Nährstoffkonzentrationen im Bereich der Orientierungswerte, es werden aber immer noch Sauerstoffmangelsituationen bzw. erhöhte Chlorophyllgehalte gemessen.

Der gute Zustand für Deskriptor 5 („Eutrophierung“) wird im Rahmen der MSRL (Umsetzung der MSRL, Artikel 9; 2012) wie folgt formuliert:

„Die vom Menschen verursachte Eutrophierung ist auf ein Minimum reduziert; das betrifft insbesondere deren negativen Auswirkungen wie Verlust der biologischen Vielfalt, Verschlechterung des Zustands der Ökosysteme, schädliche Algenblüten sowie Sauerstoffmangel in den Wasserschichten nahe dem Meeresgrund.“

Zum Erreichen und Erhaltung des guten Umweltzustands gilt daher, die Nährstoffeinträge über die Flüsse weiter zu reduzieren, ebenso die Nährstoffe über Ferneinträge aus anderen Meeresgebieten und die Nährstoffeinträge aus der Atmosphäre. Das Problem der sogenannten Punktquellen (wie kommunale Abwässer) ist in Deutschland weitestgehend gelöst. Eine weitere Reduktion der Nährstoffeinträge über diffuse Quellen (Landwirtschaft, Energiewirtschaft, Verkehr einschließlich Schiffsverkehr) ist jedoch erforderlich (Umsetzung der MSRL, Artikel 10; 2012).

4.2.6 Langzeitliche Entwicklung des pH-Wertes in der DB

Ein großer Teil (ca. 30 %) des durch menschliche Aktivitäten und durch natürliche Prozesse entstehenden Kohlendioxids gelangt in die Ozeane und erhöht dadurch die Konzentration an gelöstem CO_2 , Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-), Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}) und H^+ -Ionen im Meerwasser.

Der in der Umwelt kontinuierlich steigende CO_2 -Gehalt und somit die Zunahme an Wasserstoffionen im Meerwasser kann daher zur Verringerung des pH-Wertes führen und sich negativ auf die Meeresumwelt (z. B. Planktonwachstum) auswirken. Verschiedene Studien gehen von einer Abnahme des pH-Wertes in den Weltmeeren seit der Industrialisierung um ca. 0,1 Einheiten aus (UBA, 2009). Mit einer weiteren Abnahme des pH-Wertes ist zu rechnen.

Neben der Überwachung der Nährstoffe wird daher auch der pH-Wert regelmäßig in der AWZ untersucht. Der pH-Wert spiegelt einerseits das biologische Geschehen wider (Anstieg des pH-Wertes durch Planktonblüten), andererseits können Gewässerverunreinigungen erkannt (z. B. Dünnsäureverklappung) und Auswirkungen des Klimawandels identifiziert werden.

Die *Abbildung 4-11* zeigt die räumliche Verteilung des pH-Wertes in der Deutschen Bucht im Januar/Februar 2008 bis 2011. Die winterlichen pH-Werte liegen zwischen 8,0 und 8,2, da zu dieser Zeit die biologische Aktivität sehr gering und die Remineralisierung fast abgeschlossen ist.

Der jahreszeitliche Verlauf der pH-Werte, dargestellt in *Abbildung 4-23*, zeigt, dass auch biologische Einflüsse zur Veränderung des pH-Werts führen. So steigen die pH-Werte während der Planktonentwicklung an und nehmen während der Remineralisierungsprozesse wieder ab. Auch steigende Wassertemperaturen können sich auf die Höhe des pH-Wertes auswirken.

Zur Diskussion der langzeitlichen Entwicklung der pH-Werte in der Deutschen Bucht von 1990 bis 2011 wurden die jeweiligen Jahresmittelwerte gebildet und in *Abbildung 4-24* dargestellt. Trotz jahreszeitlicher Schwankungen (*Abbildung 4-23*) und interannueller Unterschiede zeichnet sich ein abnehmender Trend bei der pH-Wert Entwicklung in der Deutschen Bucht ab. Die ständig steigende Kohlendioxidbelastung, verursacht durch Industrie und Verkehr, führt zu einer weiteren Abnahme der pH-Werte im Meerwasser. Negative Auswirkungen auf die Meeresumwelt, wie z. B. negative Einflüsse auf das Korallen- und Diatomeenwachstum sind die Folge. In dem vom BMBF geförderten Projekt BIOACID werden in Deutschland vom IOW und IFM GEOMAR biologische Auswirkungen auf die Meeresumwelt untersucht (www.bioacid.de).

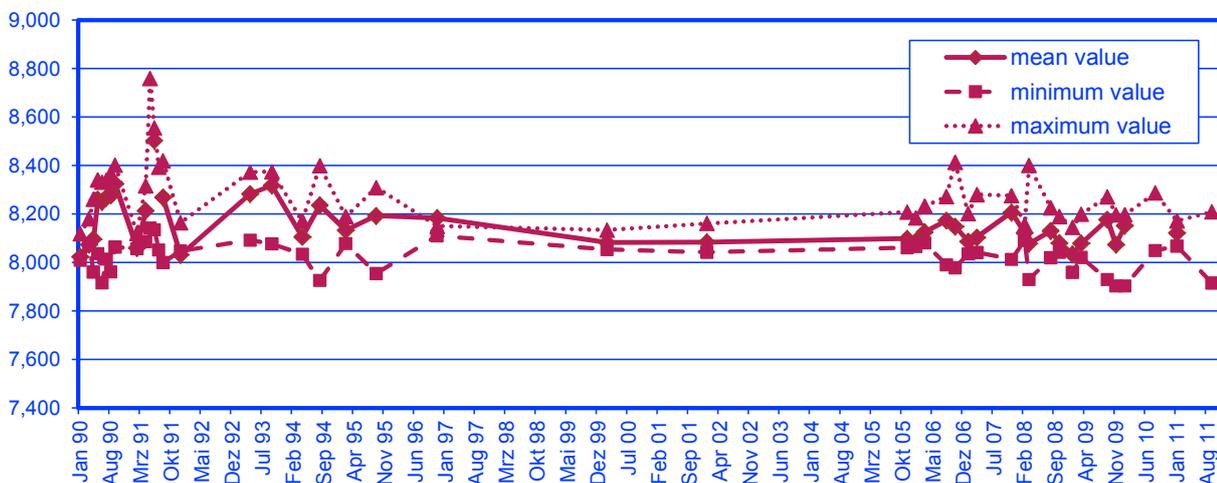


Abbildung 4-23: Jahreszeitlicher Verlauf der pH-Werte in der Deutschen Bucht zwischen Januar 1990 und August 2011.

Figure 4-23: Seasonal pH-data in the German Bight from January 1990 to August 2011.

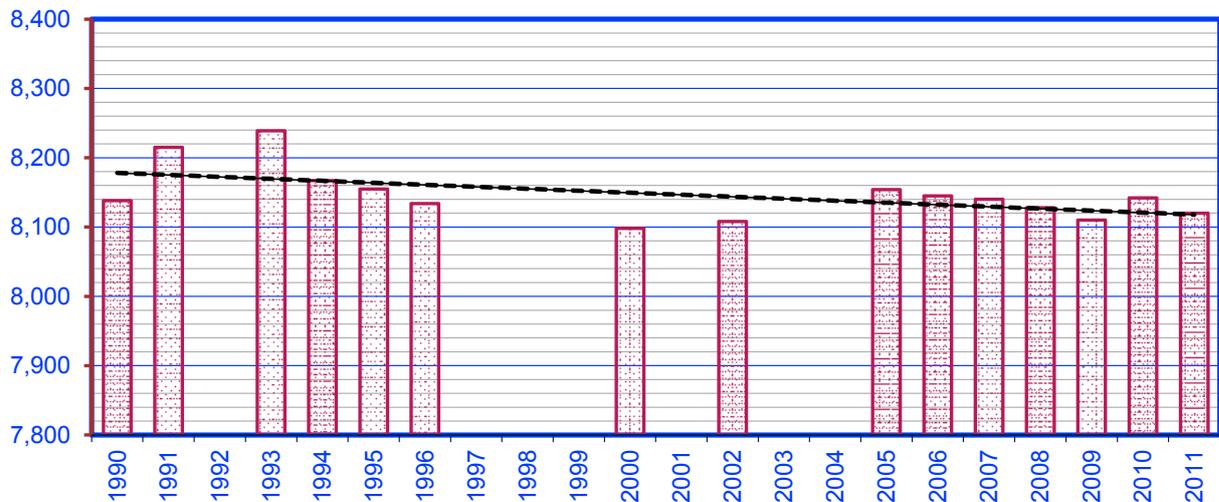


Abbildung 4-24: Mittlere pH-Konzentrationen von 1990 bis 2011 im Meerwasser der Deutschen Bucht. Die schwarze gestrichelte Linie gibt den abnehmenden Trend an.

Figure 4-24: Mean pH-concentrations from 1990 to 2011 in seawater of the German Bight. The black dotted line shows the declining trend.

4.2.7 Sauerstoffgehalte in der Nordsee

Vergleichbar mit den vorhergehenden Jahren erreichen die Sauerstoffkonzentrationen im Oberflächenwasser der zentralen Nordsee im Berichtszeitraum 88 % bis 108 % Sättigung. Konzentrationen über 100 % Sättigung zeigen u.a. vermehrtes Planktonwachstum an. So werden beispielsweise im August 2010 westlich der Orkney-Inseln bis 116 % Sauerstoffsättigung bei einer Chlorophyllkonzentration von 3,4 µg/L (Abbildung 4-28) gemessen.

In Bodennähe liegen die Sauerstoffkonzentrationen sowohl 2008 als auch in den Folgejahren in großen Bereichen der zentralen Nordsee bei 80 % (Abbildung 4-25, Abbildung 4-26). Die niedrigsten Konzentrationen werden im Sommer 2009 nordöstlich des Elbeurstromtals mit 67 % erreicht und im Sommer 2011 mit 66 % im Bereich des Entenschnabels.

Eine Sauerstoffsättigung von 84 % (ca. 7,5 mg/L) wird 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).

In großen Bereichen des Untersuchungsgebietes wird der im Rahmen von OSPAR diskutierte Orientierungswert von 84 % Sättigung erreicht. Es treten aber auch während dieser Untersuchungsjahre in Teilbereichen der Nordsee Konzentrationen unter 70 % Sättigung auf, die das Leben der am Boden lebenden Meerestiere negativ beeinflussen können.

Bei der Bewertung der Sauerstoffsituation ist zu bedenken, dass die im Rahmen der Monitoringfahrten aufgenommenen und hier diskutierten Sauerstoffkonzentrationen Momentaufnahmen darstellen. Durch Wettereinflüsse wie z. B. Sturmereignisse kann eine negative Sauerstoffsituation schnell behoben werden. Umgekehrt können geringe Sauerstoffkonzentrationen durch eine stabile Hochdruckwetterphase und eine stabile Schichtung in der Wassersäule länger und stärker ausgeprägt sein.

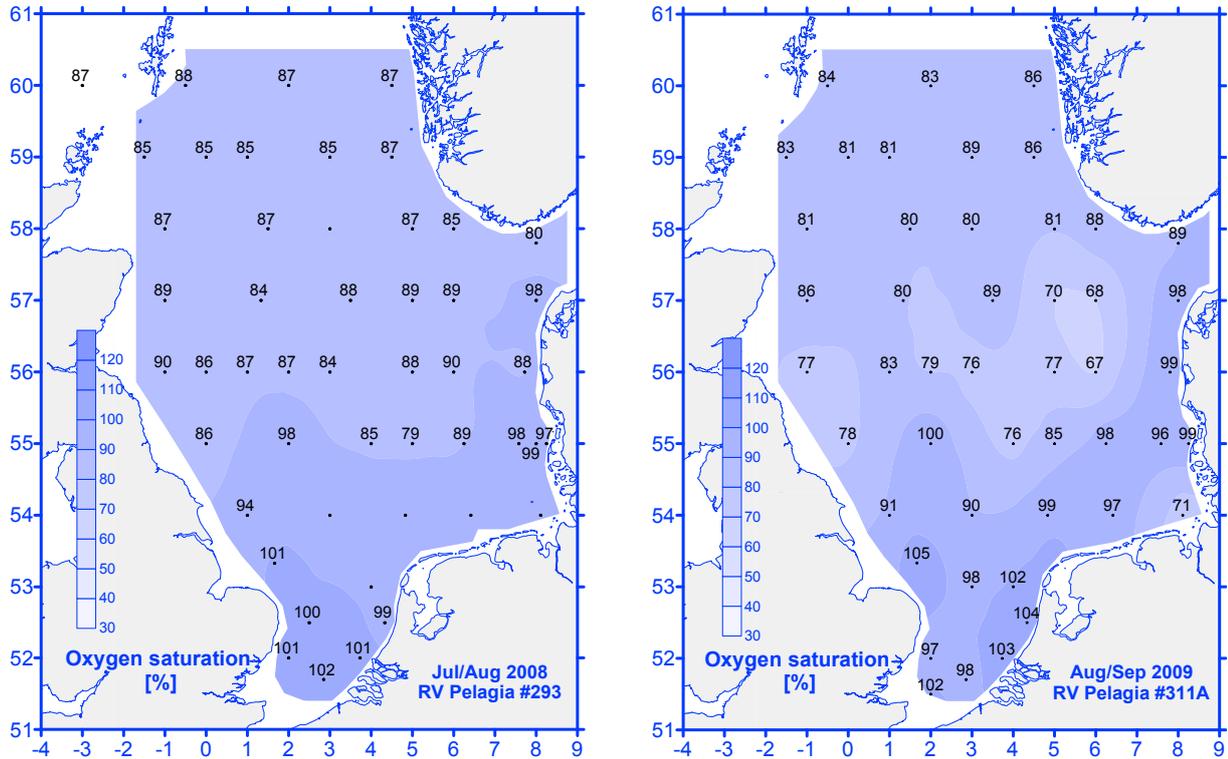


Abbildung 4-25: Sauerstoffsättigung (%) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2009.
 Figure 4-25: Oxygen saturation (%) in near-bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2009.

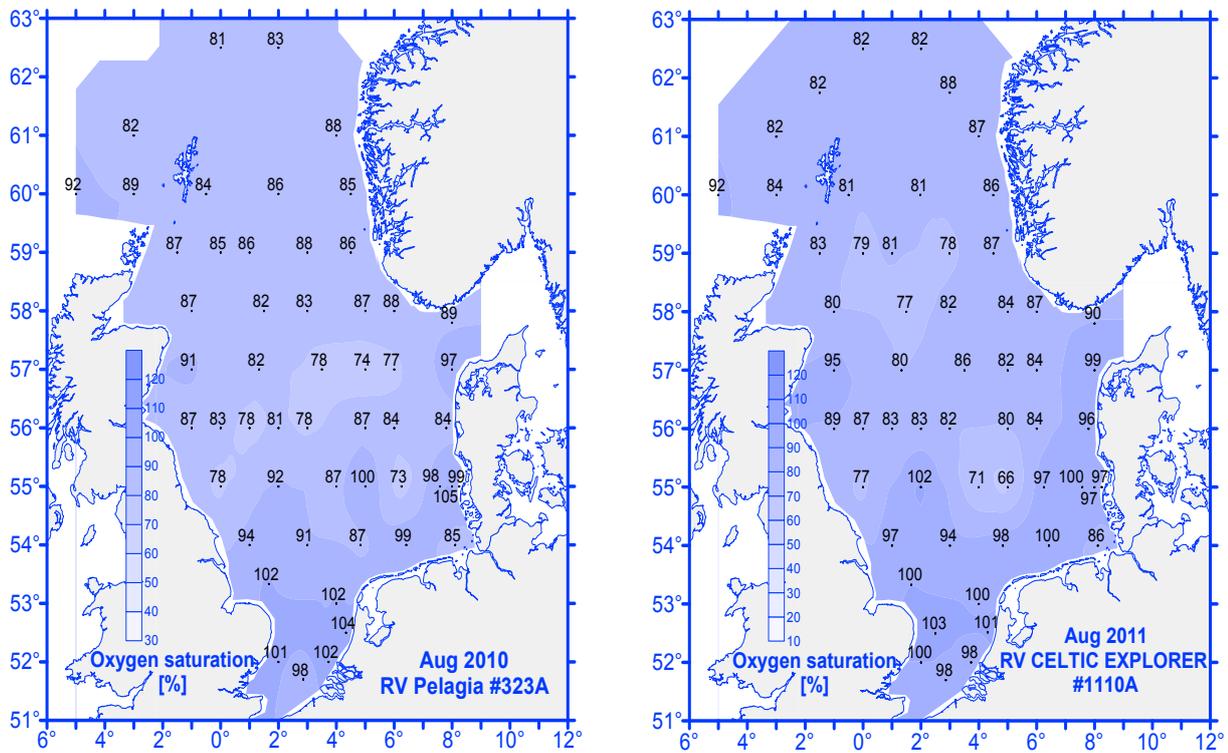


Abbildung 4-26: Sauerstoffsättigung (%) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2010 und 2011.
 Figure 4-26: Oxygen saturation (%) in near-bottom water of the North Sea in summer 2010 and 2011.

4.2.8 Chlorophyll-a Gehalte in der Nordsee

4.2.8.1 Jahreszeitlicher Verlauf der Chlorophyll-a Konzentration an der Station HELGO

In den Jahren 2008 bis 2011 wurden vom Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) im Auftrag des BSH an definierten Stationen in der Deutschen Bucht während der BSH-Untersuchungsfahrten Chlorophyllproben analysiert.

Abbildung 4-27 stellt exemplarisch in situ Daten im Vergleich zu Fernerkundungsdaten (Ocean Colour Sensor MERIS) an der Station HELGO dar. Die Satellitendaten wurden von Brockmann Consult im Rahmen des ESA Projektes MARCOAST aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die gemeinsame Darstellung ermöglicht einerseits eine Validierung der über definierte Algorithmen ausgewerteten Fernerkundungsdaten mit im Labor analysierten in situ Daten. Andererseits können durch die Ergänzung mit Satellitendaten Chlorophyll-Jahresgänge erstellt und somit auch Chlorophyllmaxima erkannt werden.

Während im Jahr 2008 über die Satellitendatenauswertung kein Chlorophyll-Maximum an der Station HELGO erkennbar ist, liegen im Jahr 2009 zwei Maxima Mitte April und Anfang August vor. Selbst im Dezember ist noch ein leichter Anstieg der Chlorophyll-a Konzentration zu beobachten.

Im Jahr 2010 ist ein deutliches Maximum in der zweiten Aprilhälfte zu beobachten, welches später als 2009 auftritt, da die Wassertemperaturen im April 2010 noch unter denen des Vorjahres lagen.

Im Jahr 2011 entwickelt sich ebenfalls im April ein Chlorophyllmaximum, das in der Größenordnung des Frühjahrsmaximums 2009 liegt. Interessant ist ein Vergleich der Chlorophyllentwicklung an der Station HELGO mit der zeitlich hochaufgelösten Nährstoffentwicklung an der Messnetzstation UFS Deutsche Bucht (*Abbildung 4-19*). Die Stationen liegen zwar ca. 25 Seemeilen auseinander, die Wasserkörper müssten zu dieser Zeit jedoch vergleichbar sein. Die aufgenommenen Phosphat- und Silikatkonzentrationen sinken deutlich mit dem Anstieg der Chlorophyllkonzentrationen, während die Nitratkonzentration langsam abnimmt. Sowohl die löslichen Phosphate als auch die Silikate sind durch die Frühjahrsblüte verbraucht und werden erst durch Remineralisierungsprozesse langsam wieder freigesetzt. In den Folge Monaten Juli, August und Anfang September treten kleinere Chlorophyllmaxima auf, die sich durch remineralisierte Nährstoffe erneut entwickeln können.

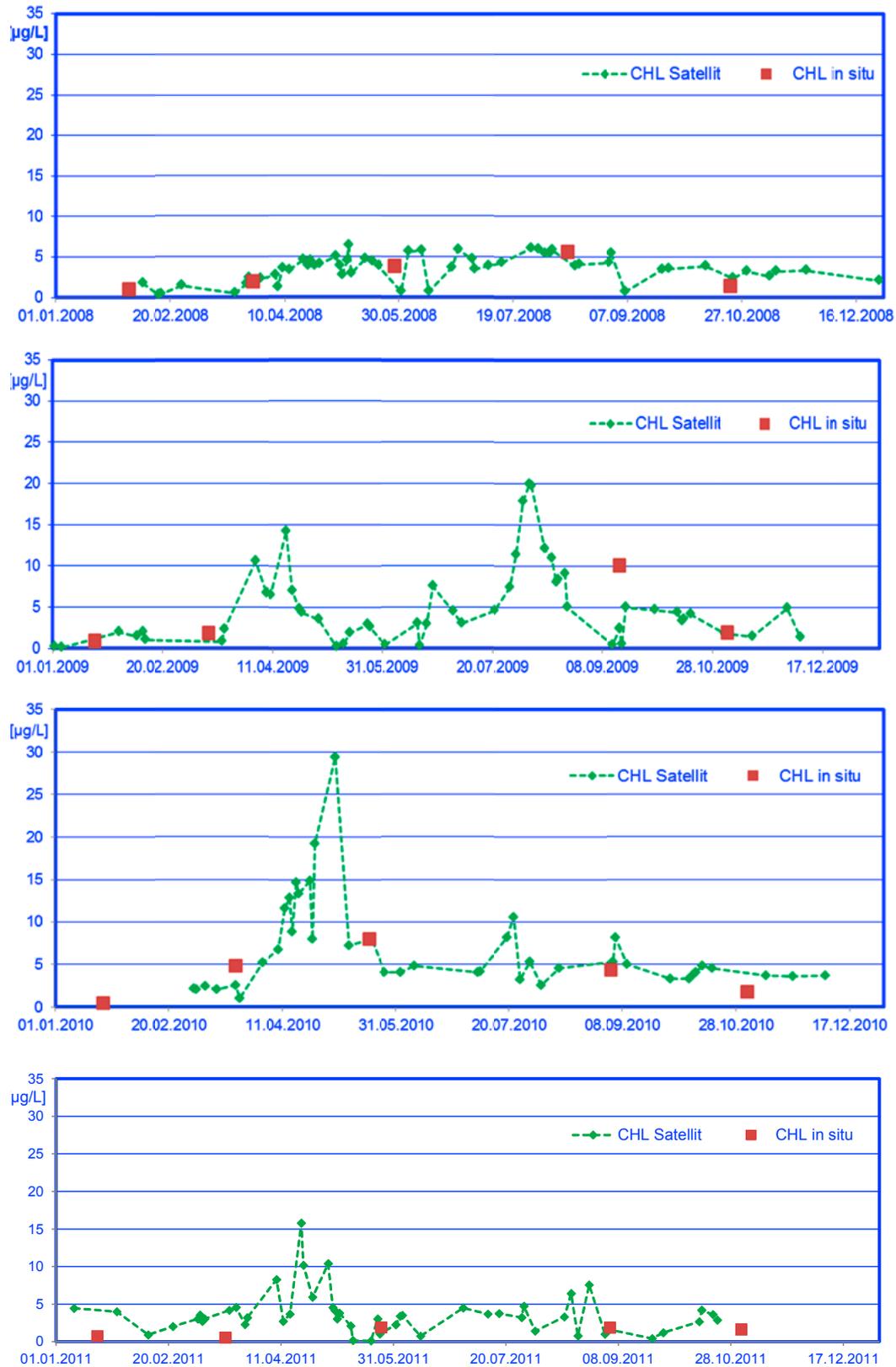


Abbildung 4-27: Jahresgänge der Chlorophyll-a Konzentration an der Station HELGO für die Jahre 2008–2011; Satellitendatenauswertungen (grün) im Vergleich zu in situ Daten (rot).

Figure 4-27: Annual chlorophyll-a concentration at the station HELGO from 2008–2011; satellite data evaluation (green) in comparison to in situ data (red).

4.2.8.2 Chlorophyll-a Verteilungsmuster Sommer 2008 bis Sommer 2011 (Nordsee)

In *Abbildung 4-28* und *4-29* sind die Verteilungsstrukturen der Chlorophyllkonzentrationen während der Nordsee-Gesamtaufnahmen 2008 bis 2011 dargestellt. In den Sommermonaten sind in großen Bereichen der Nordsee die Chlorophyllkonzentrationen im Oberflächenwasser gering, da die Nährstoffe, vor allem Nitrat in den oberen Schichten der Wassersäule durch das Plankton aufgezehrt sind und erst nach Remineralisierung aus den unteren Wasserschichten wieder zugeführt werden können.

Im Küstenbereich, in dem die Nährstoffe über die Flüsse und aus dem Wattenmeer auch in den Sommermonaten nachgeliefert werden, steigen die Chlorophyll-a Konzentration bis auf 5,7 µg/L (Juli/August 2008) bzw. 5,8 µg/L (August 2010) an. Vor Sylt werden im August 2010 6,8 µg/L erreicht.

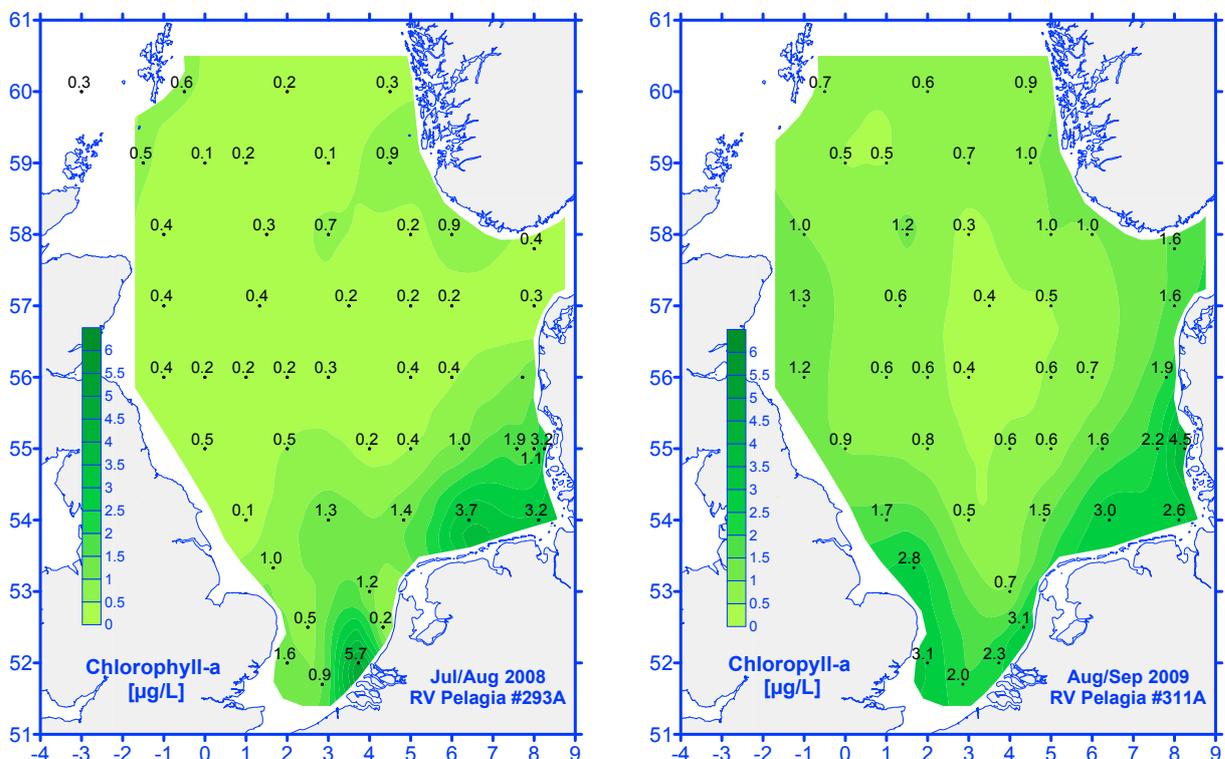


Abbildung 4-28: Chlorophyll-a Konzentration im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2009.

Figure 4-28: Chlorophyll-a concentration in sea-surface water of the North Sea in summer 2008 and 2009.

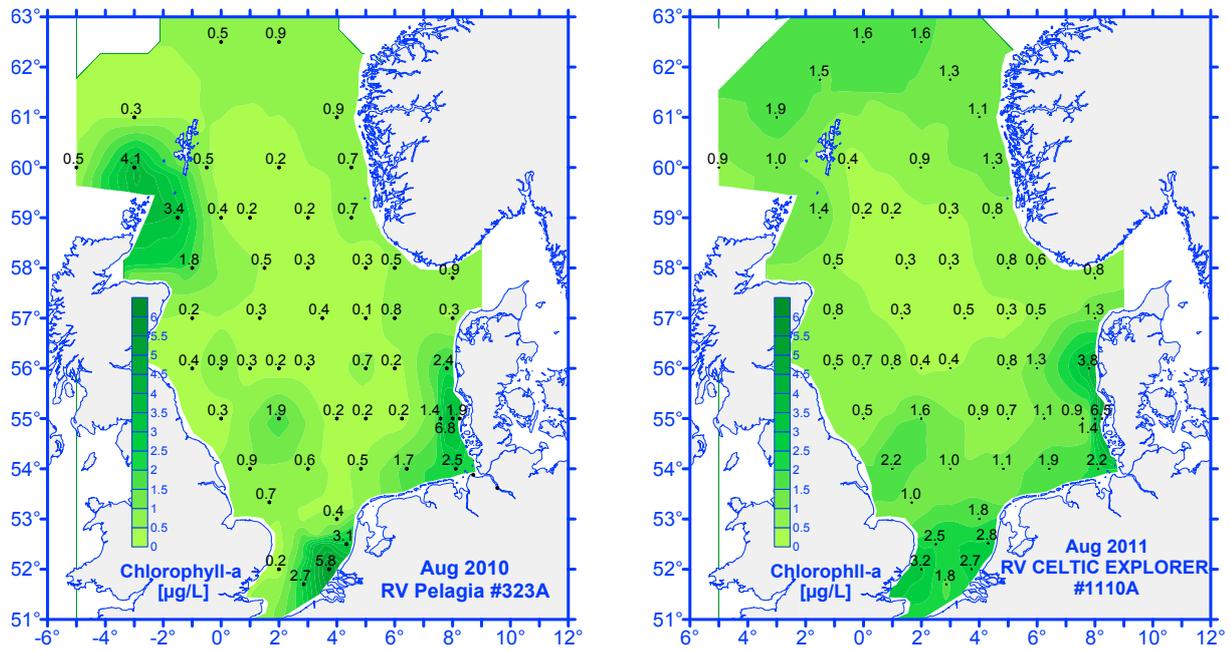


Abbildung 4-29: Chlorophyll-a Konzentration im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2010 und 2011.

Figure 4-29: Chlorophyll-a concentration in sea-surface water of the North Sea in summer 2010 and 2011.

4.3 Organische Stoffe

Norbert Theobald

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 zzt. 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.

Viele „klassische“ Schadstoffe sind 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 umso größer, je hochrangiger seine Stellung in der Nahrungskette ist. Neben der unmittelbaren toxischen Wirkung der aufgenommenen Substanzen können im Organismus erzeugte Abbauprodukte zu einer Verstärkung der Schadstoffwirkung führen.

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

Anthropogene organische Schadstoffe sind im Meer ungleichmäßig verteilt und kommen in sehr unterschiedlichen Konzentrationen vor. Ihre Verteilung in der marinen Umwelt ist von vielfältigen Faktoren abhängig. Neben den Eintragsquellen (Schifffahrt, Industrie, Haushalt, Landwirtschaft), Eintragsmengen und Eintragspfaden (direkt über Flüsse, diffus über Atmosphäre) sind die charakteristischen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Schadstoffe und der dynamisch-thermodynamische Zustand des Meeres für Ausbreitungs-, Vermischungs- und Verteilungsprozesse relevant. Die relative Einflussstärke all dieser Variablen kann dabei von Stoff zu Stoff sehr verschieden sein und hat zur Folge, dass sich nur wenige Schadstoffe konservativ verhalten; d. h. ein einfacher Zusammenhang zwischen der Konzentration anthropogener Stoffe und hydrodynamischen Variablen ist selten erfüllt. Allenfalls für regional begrenzte Gebiete mit klaren Quellenzuordnungen lassen sich einfache Korrelationen finden und nutzen. Für eine Zustandsbeschreibung ist daher eine separate und differenzierte Betrachtung der verschiedenen Schadstoffklassen unumgänglich.

Die Routineüberwachung organischer Schadstoffe in der Deutschen Bucht wird vom BSH hauptsächlich im Frühjahr, Sommer und Herbst im Rahmen von zwei bis drei Überwachungsfahrten durchgeführt. Im August 2009 und 2011 wurde zusätzlich die Schadstoffbelastung der gesamten Nordsee untersucht. Im Untersuchungszeitraum wurden insgesamt elf Überwachungsfahrten durchgeführt (Kapitel 4: Meereschemie, Einführung, *Tabelle 4-1*).

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.

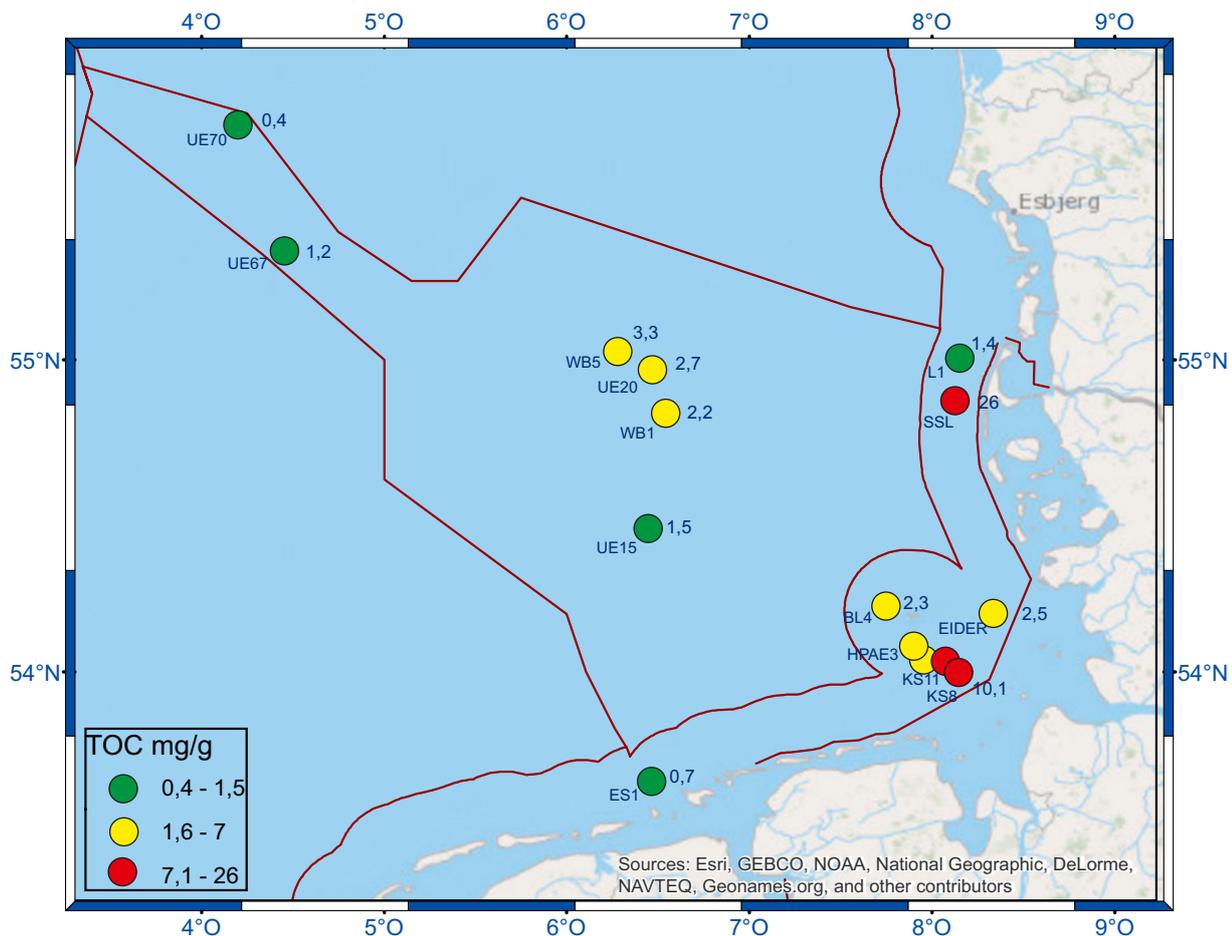


Abbildung 4-30: Geographische Verteilung des TOC-Gehalts im Oberflächensediment der Deutschen Bucht (Mittelwerte von Mai 2008 und Mai 2011).

Figure 4-30: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight (mean values of May 2008 and May 2011).

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 *Abbildung 4-30* dargestellt. Die TOC-Gehaltsverteilung lässt sich nach drei Belastungsgruppen klassifizieren, welche über die Konzentrationsintervalle 7,1–26 mg/g (rot), 1,6–7,0 mg/g (gelb) und < 0,4–1,5 mg/g (grün) definiert sind (Mittelwerte der Jahre 2008 bis 2011).

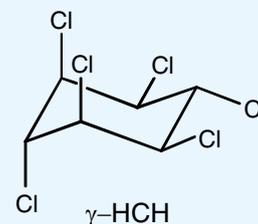
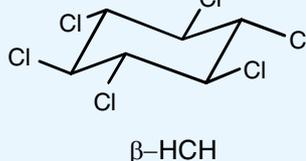
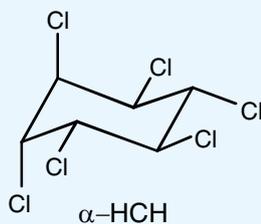
Nachfolgend werden die aus den Schadstoffbeprobungen gewonnenen Ergebnisse dokumentiert und mit denen früherer Jahre verglichen um Entwicklungstendenzen aufzuzeigen. Ferner liefern Strukturen und Muster in räumlichen Schadstoffverteilungen Hinweise auf Eintragsquellen sowie zu Ausbreitung und Verbleib 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, sodass 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.

Tafel 4-2 HCH-Isomere

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



Die unterschiedlichen Hintergrundbelastungen für die einzelnen Isomere in der Nordsee und Deutschen Bucht ermöglichen über die Bestimmung der Isomerenverhältnisse Aussagen zu Quellen und Wassermassen.

Alle drei Isomere werden durch die Elbe eingetragen; diese ist damit eine deutliche Belastungsquelle für die Deutsche Bucht. In *Abbildung 4-31* sind die Konzentrationsbereiche der HCH-Isomere im Elbewasser an der Süßwassergrenze (STADE) und im Ästuarbereich bei Cuxhaven (MEDEM) dargestellt. Der Vergleich mit anderen chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) zeigt, dass die HCH in deutlich höheren Konzentrationen vorliegen als die anderen, mehr lipophilen CKW (s. *Kapitel 4.3.3*). Durch die Abnahme der α - und γ -HCH Konzentrationen in den letzten Jahren haben sich die Isomeren-Verhältnisse 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. 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. Die technischen Nebenbestandteile α - und β -HCH liegen auf deutlich höherem Level (ca. Faktor 3). Der Grund hierfür liegt in noch immer stattfindenden Einträgen aus Altlasten, die vor allem aus dem Mittellauf der Elbe (Region Saale, Mulde) stammen.

4.3.2.1 HCH-Gehalte des Meerwassers

Räumliche Verteilung der HCH-Isomeren

Die Konzentrationsverteilungen von α -, β - und γ -HCH (Lindan) in der Deutschen Bucht wiesen für die 11 Beprobungen des Untersuchungszeitraums eine recht hohe Variabilität auf; die Variationskoeffizienten lagen in Küstengewässern (Salzgehalt < 32) mit einem Bereich von 26 % γ -HCH) bis 76 % (β -HCH) etwas höher als in der offenen See (33 % bis 43 %). In *Abbildung 4-32* sind die Mediane und Schwankungsbreiten auf den einzelnen Stationen zusammenfassend dargestellt. Die Median-Konzentrationen in der inneren Deutschen Bucht lagen im Untersuchungszeitraum für α -HCH bei 50 pg/L, für β -HCH bei 67 pg/L, für γ -HCH bei 77 pg/L und für δ -HCH bei 15 pg/L. Zwischen den einzelnen Stationen variieren die Konzentrationen erheblich.

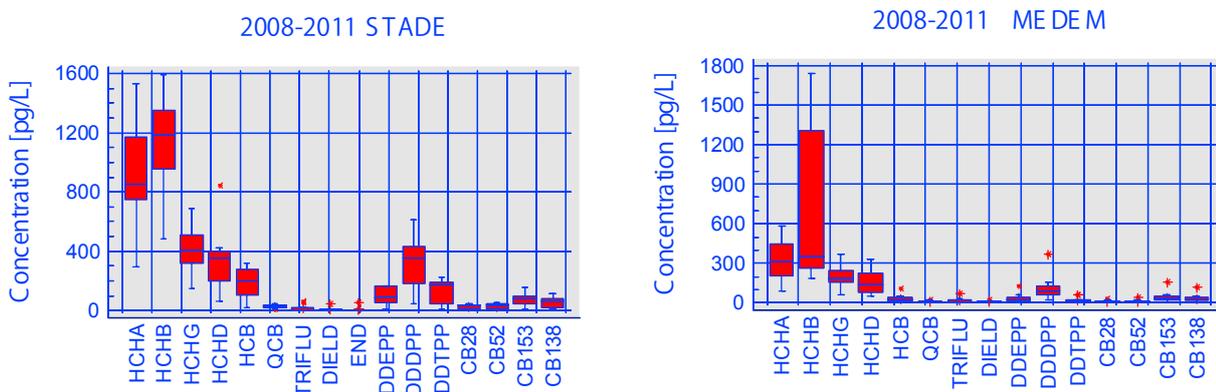


Abbildung 4-31: Konzentrationsverteilung der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) in der Elbe bei Stade und Cuxhaven für den Zeitraum 2008 bis 2011; (Box Plot: der Kasten (Box) umfasst die mittleren 50% der Daten, der Medianwert ist als horizontale Linie dargestellt, die vertikalen Spitzen repräsentieren den 1,5 Interquartil-Bereich der unteren bzw. oberen Quartile).

Figure 4-31: Concentration of chlorinated hydrocarbons (CKW) in the river Elbe at Stade and Cuxhaven from 2008 to 2011; (Box plot: the box represents the middle 50 % of the data; the horizontal line shows the median; the vertical lines represent the 1.5 interquartil ranges of the lower and upper quartils).

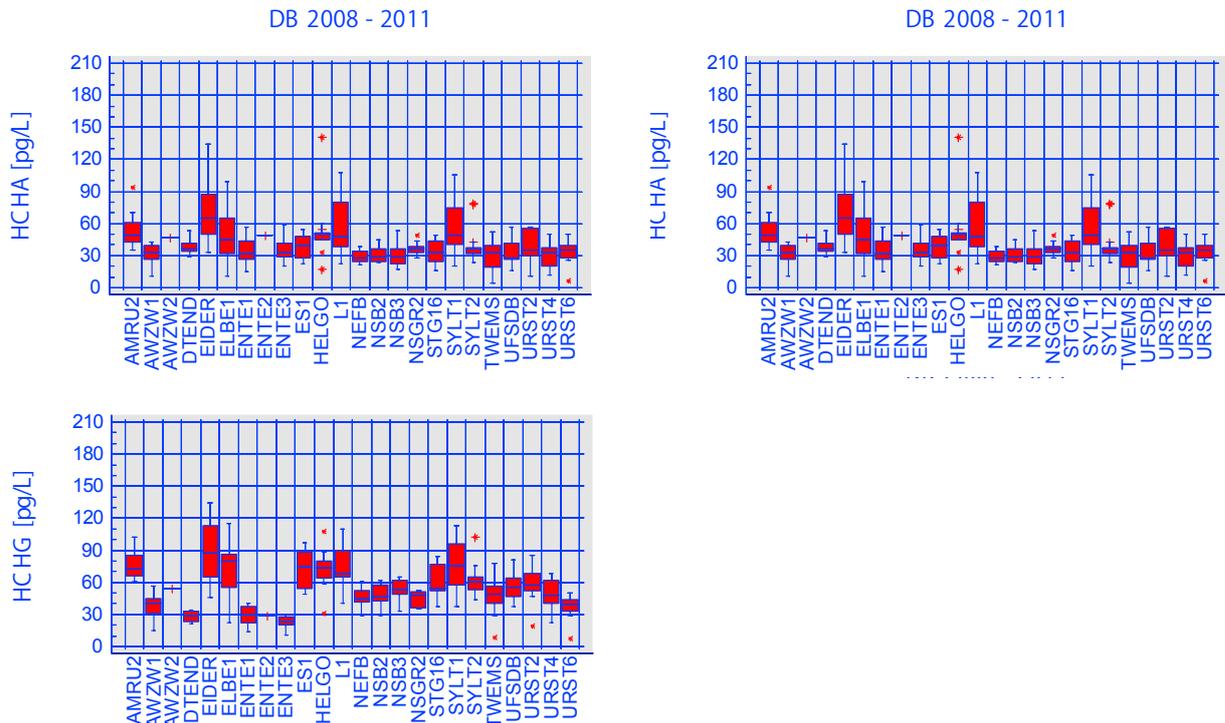


Abbildung 4-32: Konzentrationsverteilung der HCH-Isomere in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008 bis 2011.

Figure: 4-32: Concentrations of HCH isomers in the German Bight from 2008–2011.

Da keine zeitlichen Trends in dem Untersuchungszeitraum erkennbar waren, werden im Folgenden die räumlichen Verteilungen anhand der Konzentrationsmittelwerte dargestellt (Abbildung 4-33). Die Verteilungen der drei HCH-Isomere ähneln sich dahingehend, dass alle einen deutlichen abnehmenden Gradienten von der Küste zur offenen See aufweisen und dass sie insbesondere in der Elbfahne vor der Nordfriesischen Küste deutlich erhöhte Konzentrationen zeigen. Sie unterscheiden sich allerdings auch grundsätzlich voneinander, weil die Isomere in den einzelnen Wassermassen, die sich in der Deutschen Bucht vermischen, in unterschiedlichen Konzentrationen vorliegen. Diese Unterschiede werden sowohl in *Abbildung 4-33* als auch in *Abbildung 4-32* deutlich. Vollständig erklären lässt sich die Verteilung erst, wenn sie in der gesamten Nordsee betrachtet wird (*Abbildung 4-34*).

Die vorherrschenden Isomere α - und γ -HCH lassen sich in der gesamten Nordsee nachweisen. Die Grundbelastung für β -HCH im Meerwasser ist sehr gering, kann aber aufgrund der sehr niedrigen Bestimmungsgrenze (5 pg/L) großflächig nachgewiesen werden. Dagegen ist δ -HCH nur in der Elbfahne und vor der Rhein-Mündung in sehr geringen Konzentrationen zu finden. 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 (*Abbildung 4-33*).

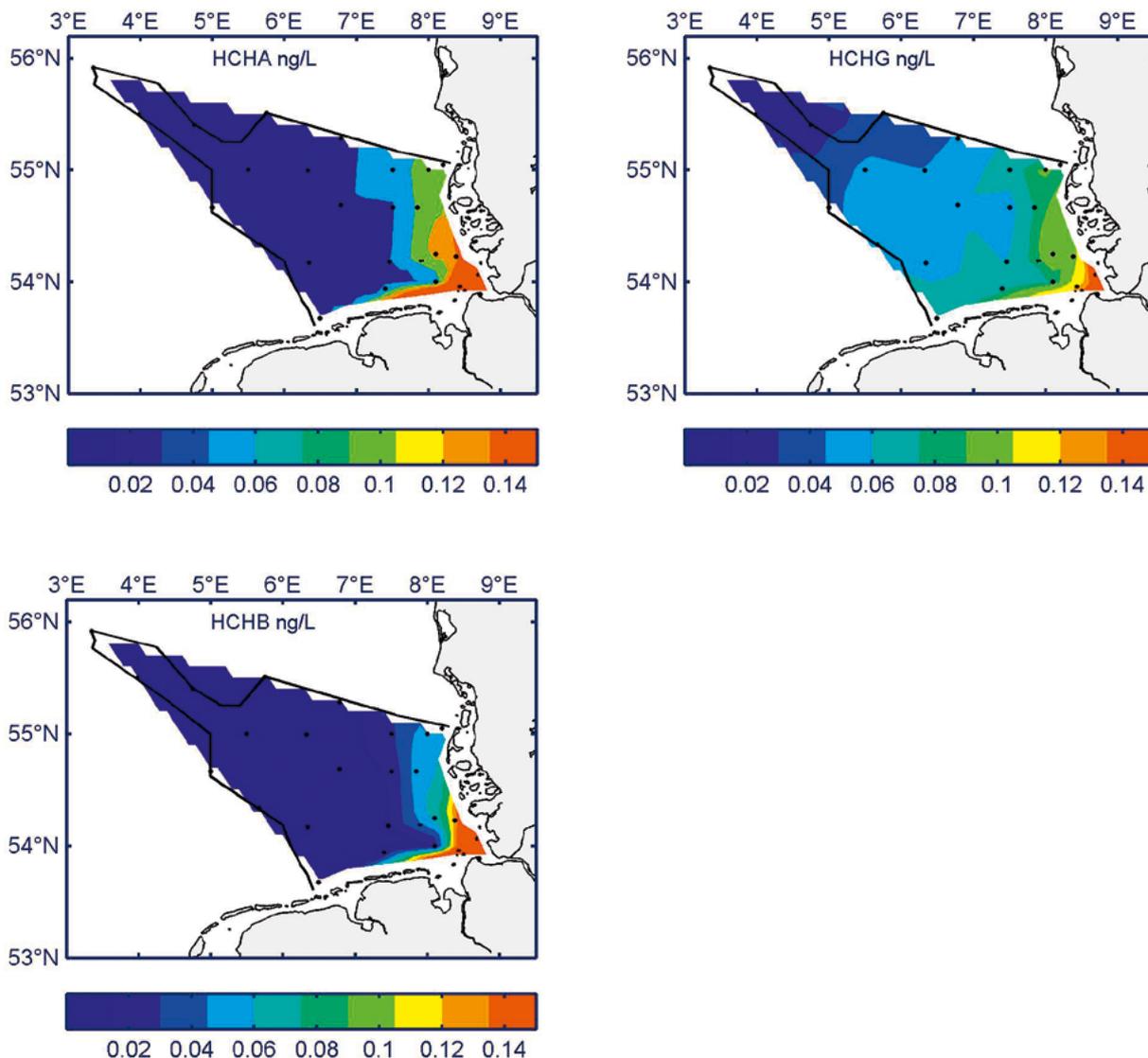


Abbildung 4-33: HCH-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) der DB im Mai 2011.

Figure 4-33: HCH concentrations in near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May 2011.

Aufgrund der beachtlichen Reduktion von α - und γ -HCH (s. u.) lagen die durchschnittlichen Konzentrationen in der äußeren Deutschen Bucht (und der zentralen Nordsee) mit Werten von 34 pg/L (α -HCH) und 35 pg/L (γ -HCH) in den Jahren 2008 bis 2011 nur noch geringfügig über denen des Atlantikwassers. Am Eingang des Englischen Kanals wurden für α -HCH 10 pg/L und für γ -HCH 20 pg/L beobachtet (Werte aus dem Jahr 2009); nördlich der schottischen Küste lagen die Werte bei 30 und 11 pg/L (Werte aus dem Jahr 2011).

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 (Abbildung 3-1 ff.). Kenntnisse zum prinzipiellen Wassertransport (Kapitel 3.2.2) 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 Nordseegesamtaufnahmen vom August 2009 und 2011 demonstriert (Abbildung 4-34).

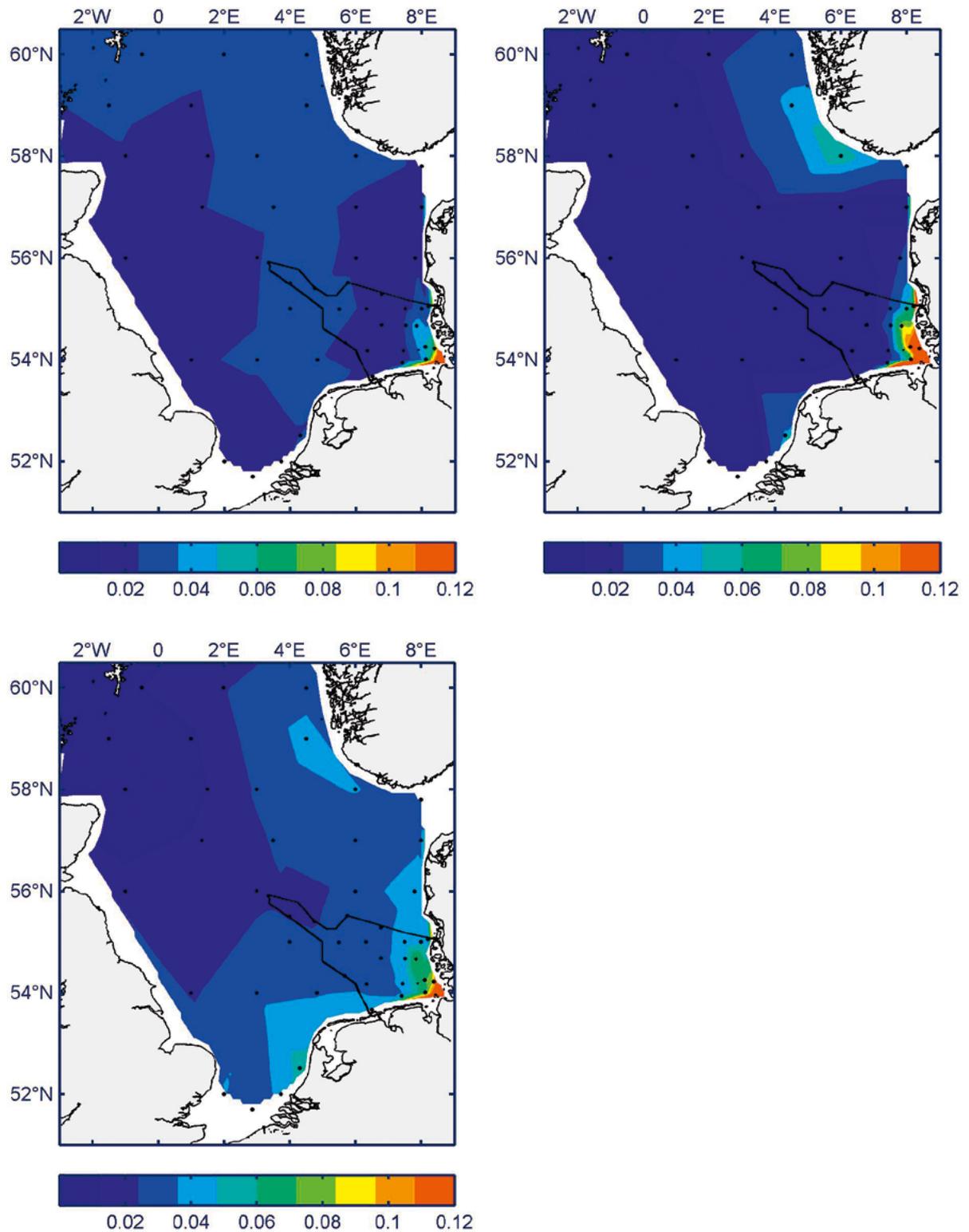


Abbildung 4-34: HCH-Konzentrationen [ng/L] des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im August/September 2011. (α HCH oben, links; β HCH oben, rechts; γ HCH unten, links)

Figure 4-34: HCH concentrations [ng/L] for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August/September 2011. (α HCH top, left; β HCH top, right; γ HCH bottom, left)

4.3.2.2 Zeitliche Entwicklung der HCH-Konzentrationen

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 episodenhaft Konzentrations sprünge aufgetreten, die die langfristigen Abwärtstrends ab 1995 gestört und unterbrochen haben (Abbildung 4-35). Die Spitzen der Jahre 2002 und

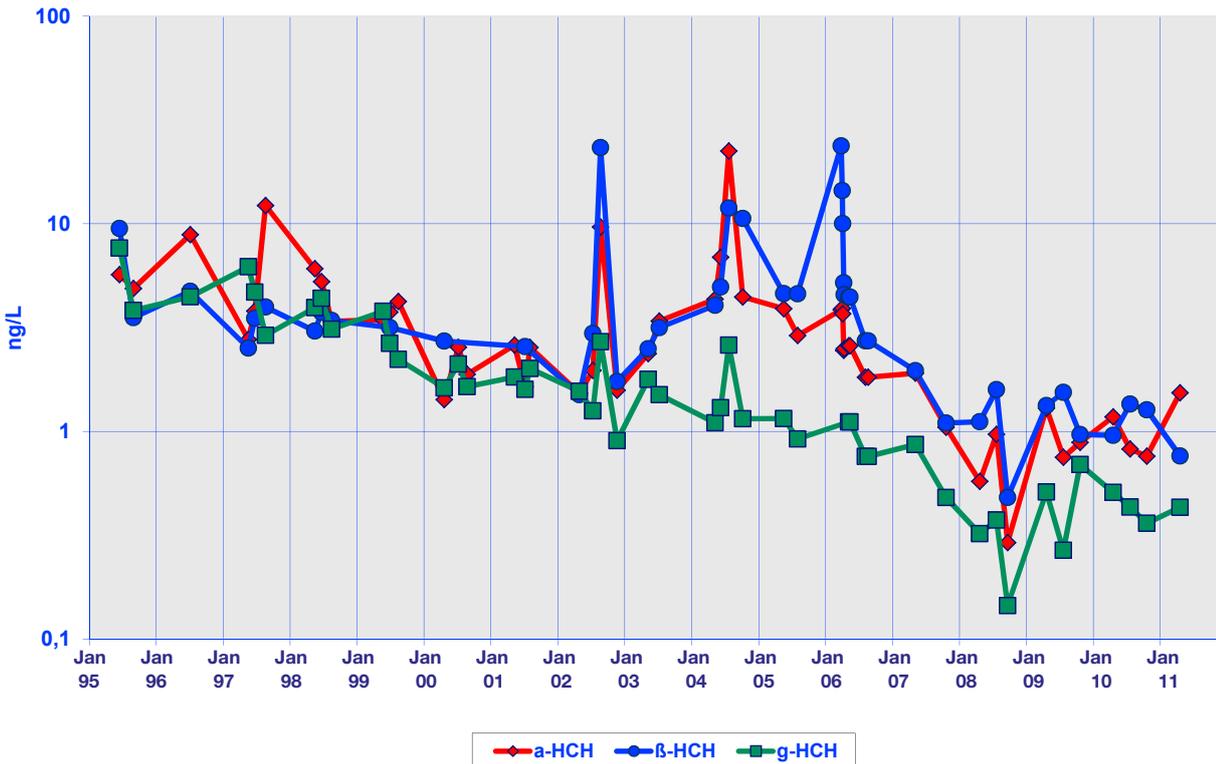


Abbildung 4-35: Zeitliche Entwicklung der α -, β - und γ -HCH-Konzentrationen bei Stade (Elbe) seit 1995.

Figure 4-35: Temporal evolution since 1995 of α -, β -, and γ -HCH concentrations near Stade (Elbe River).

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. In dem Untersuchungszeitraum 2008 bis 2011 sind relativ hohe Streuungen der Konzentrationen mit Max-/Min-Verhältnissen von ca. 3 zu beobachten. Ein Trend ist in diesem Zeitraum nicht feststellbar. Im langzeitigen Vergleich mit den Vorjahren ist jedoch eine weitere Abnahme der HCH-Konzentrationen zu beobachten. Die Median-Konzentrationen lagen bei 0,85 ng/L (α -HCH), 1,19 ng/L (β -HCH) und 0,40 ng/L (γ -HCH).

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 Konzentrations-

zeitserien für α - und γ -HCH an den Stationen EIDER und NSB2 stellvertretend für die Verhältnisse in der inneren und zentralen Deutschen Bucht in *Abbildung 4-36* und *4-37* 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 Jahren 2000 bis 2005 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 (*Abbildung 4-37*). Ab 2005 ist auch auf den durch die Elbe beeinflussten Stationen wieder ein leichter Rückgang zu verzeichnen, der in den Jahren 2008 bis 2011 wieder flacher geworden ist. Auch auf der Station NSB2 ist in diesem Zeitraum kaum noch ein weiterer Rückgang zu beobachten.

Die Lindankonzentration unterlag bis 1998 großen Schwankungen, die durch eine ausgeprägte saisonale Variabilität verstärkt wurden (*Abbildung 4-36*); 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 0,09 ng/L ab. Dieser Rückgang ist ab etwa 2009 auf der Station EIDER in eine Seitwärtsbewegung übergegangen. Auf der Station NSB2 scheint sich der Rückgang fortzusetzen.

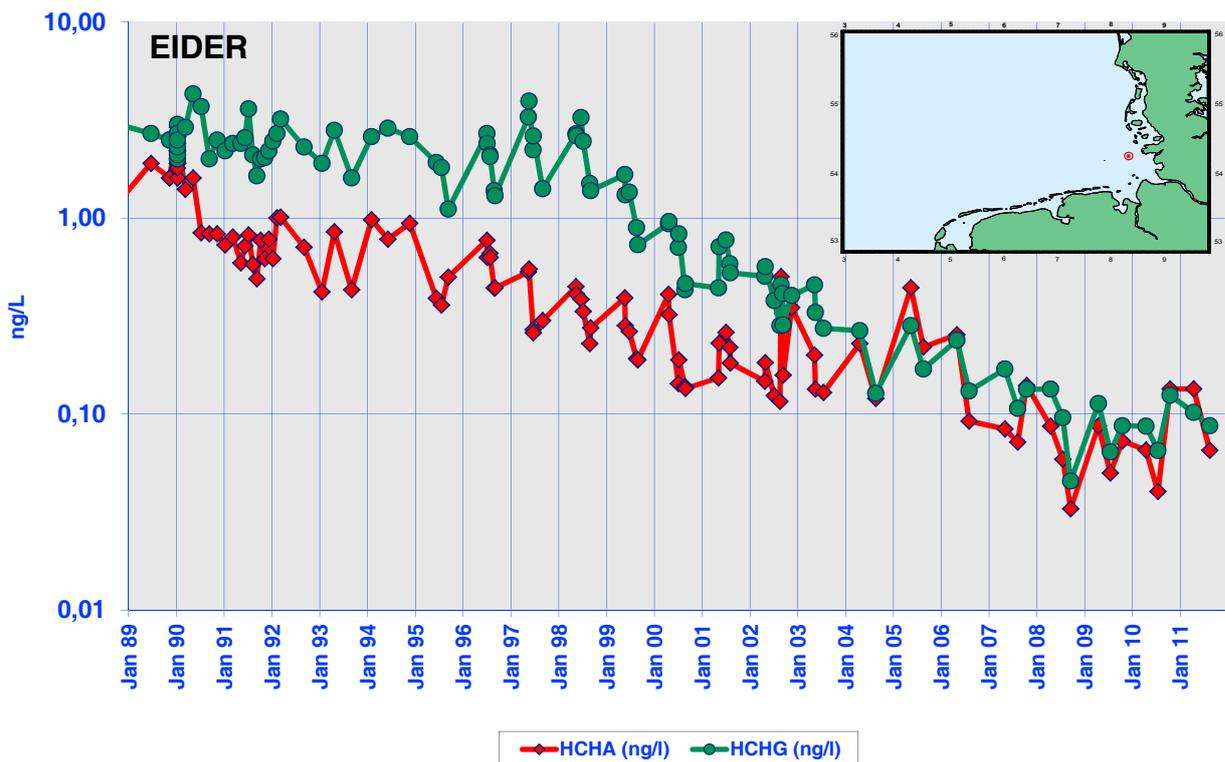


Abbildung 4-36: Zeitliche Entwicklung der α - und γ -HCH-Konzentrationen an Station Eider seit 1989.
Figure 4-36: Temporal evolution since 1989 of α - and γ -HCH concentrations at station Eider.

Bei Betrachtung der Langzeitreihen wird deutlich, dass in dem Berichtszeitraum (2008 bis 2011) an allen Stationen die Konzentrationen weiterhin leicht rückläufig sind, jedoch scheinen sich die Trends zu verlangsamen. Durch die hohen Schwankungen, die auf natürliche Einflussgrößen zurückzuführen sind, wird es zunehmend schwieriger, Trends zu quantifizieren.

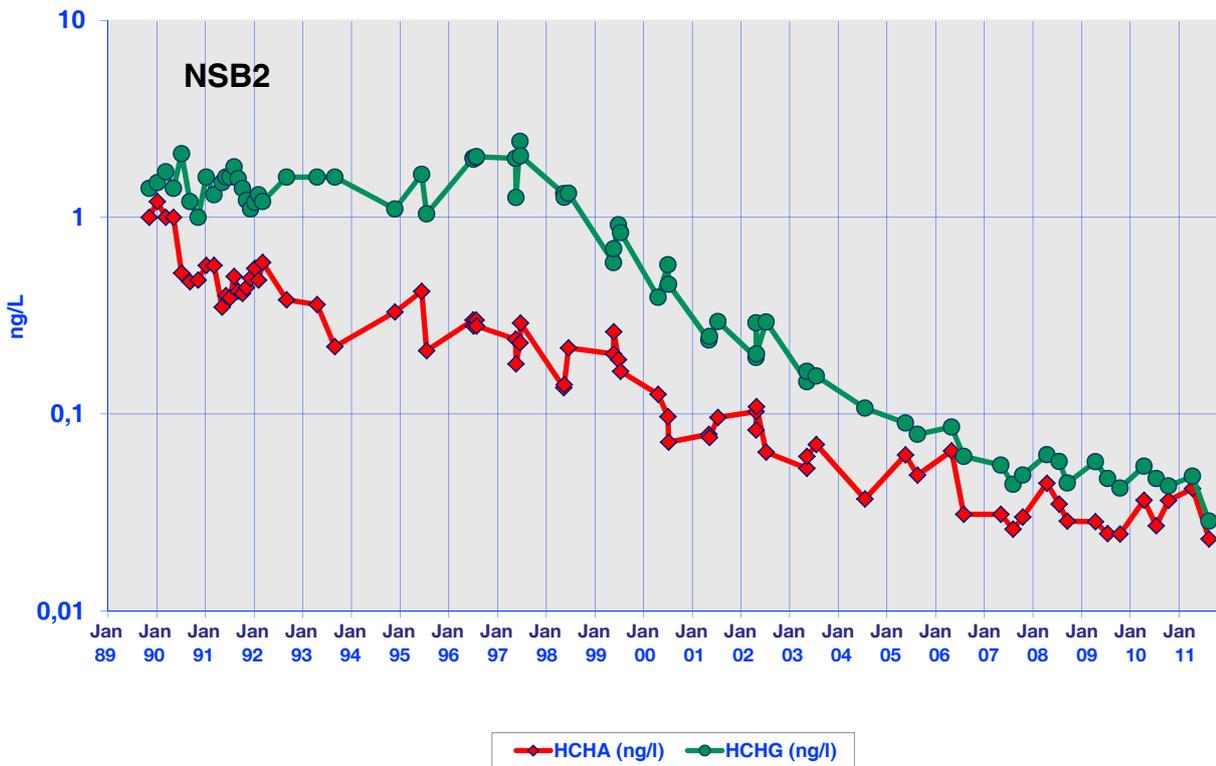


Abbildung 4-37: Konzentrationstrends für α - und γ -HCH in der äußeren Deutschen Bucht (Station NSB2).

Figure 4-37: Trends in α - and γ -HCH concentrations in the outer German Bight (station NSB2).

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 in den Jahren 2008 bis 2011 die höchsten Konzentrationen in Proben der schlickreichen Stationen KS11 und KS8 vor der Elbmündung sowie SSL vor Sylt gemessen. Auch auf der neu hinzu gekommenen Station HPAE3, auf der Baggergut aus dem Hamburger Hafen verklappt worden ist, wurden Konzentrationen in dem gleichen Bereich gemessen. Im Mittel wurden hier Belastungen mit α -HCH von $0,08 \mu\text{g}/\text{kg TM}$ und mit γ -HCH von $0,03 \mu\text{g}/\text{kg TM}$ festgestellt. Im übrigen Gebiet variierten die Gehalte von $< 0,005$ bis $0,01 \mu\text{g}/\text{kg TM}$.

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} -Werte² 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, sodass nur geringe Mengen in gelöster Form im Wasser verbleiben. Eine noch stärkere Anreicherung findet in Biota statt (Bioakkumulation). Auch die Eintragspfade ähneln sich insofern, da es heute durch die Reglementierung der Anwendung dieser Stoffe kaum noch direkte Eintragsquellen gibt. Als Eintragswege kommen insbesondere diffuse Quellen in Betracht, unter denen die atmosphärische Deposition eine bedeutende Rolle spielt.

Die Elbe ist deutlich mit HCB, DDT (-Metaboliten) und PCB belastet und stellt die größte Quelle dieser Stoffe für die Deutsche Bucht dar. Die Median-Konzentrationen lagen in dem Berichtszeitraum zwischen 33 ng/L (CB28) und 355 (pp'-DDD) (siehe *Tabelle 4-3* und *Abbildung 4-38*). Alle Konzentrationen nehmen im Ästuar sehr stark ab.

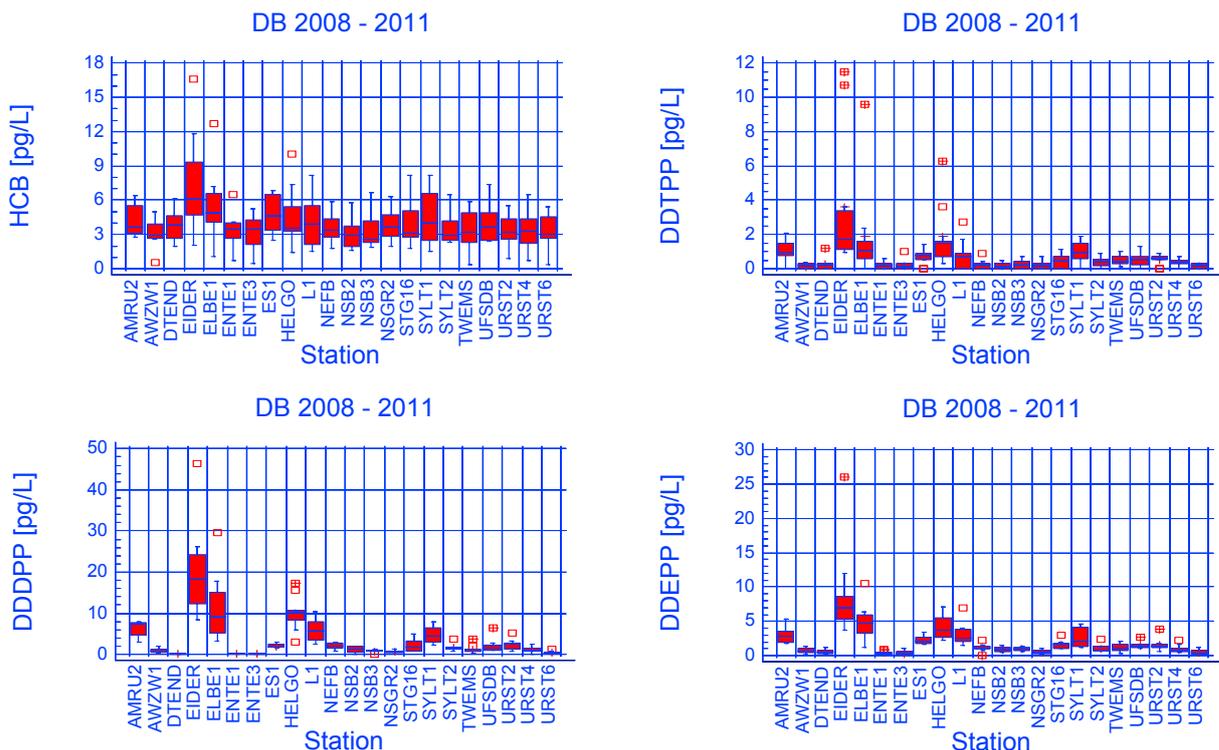
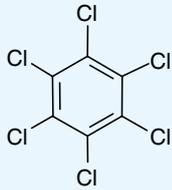


Abbildung 4-38: Konzentrationsverteilung der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008–2011.

Figure 4-38: Concentration of chlorinated hydrocarbons (CKW) in the German Bight from 2008–2011.

² 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 hohen $\log K_{OW}$ -Wert gelten als lipophil und zeigen eine hohe Affinität zu festen Phasen (Schwebstoffe, Sedimente) sowie eine hohe Tendenz der Bioakkumulation.

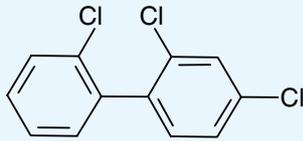
Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)



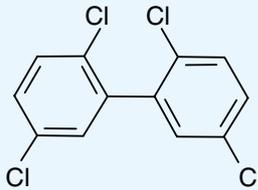
Hexachlorbenzol (HCB) wurde als Weichmacher und Flammenschutzmittel für Kunststoffe und Schmiermittel, vor allem aber als Fungizid in Holzschutzmitteln angewandt; ferner gelangt es bei der Herstellung von Lösungsmitteln und beim Verbrennen chlorhaltiger Produkte in die Umwelt. Herstellung und Weiterverarbeitung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

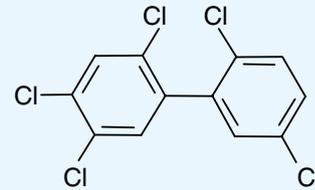
PCB sind giftig und zeigten im Tierversuch krebserregende Wirkung. Im tierischen Organismus werden sie kaum abgebaut, sondern reichern sich zu hohen Konzentrationen an. In der Übersicht sind einige der wichtigsten PCB-Kongeneren dargestellt.



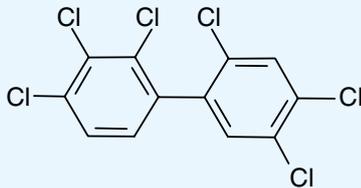
PCB 28



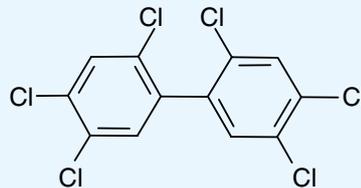
PCB 52



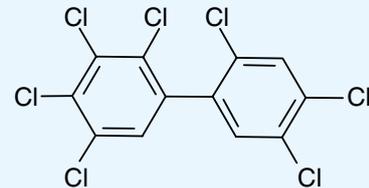
PCB 101



PCB 138

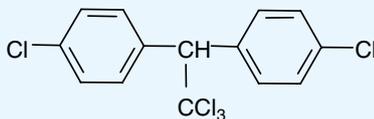


PCB 153

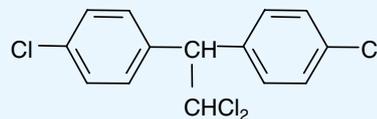


PCB 180

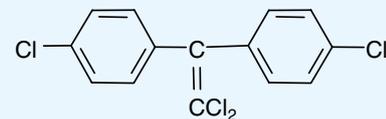
Dichlordiphenyl-trichlorethan (DDT) ist ein Insektizid, das seit den 1930er Jahren in der Land- und Forstwirtschaft zur Bekämpfung von Schadinsekten eingesetzt wurde. Seine Anwendung wurde in der BRD 1972 und in der ehemaligen DDR 1988 verboten. In einigen Entwicklungsländern wird DDT nach wie vor zur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



p,p'- DDT



p,p'- DDD



p,p'- DDE

Im Mai 2010 sanken beispielsweise die HCB-Konzentration von Stade (293,0 pg/L) über Cuxhaven (55,0 pg/L) bis zur Station ›Eider‹ (8,7 pg/L) in der inneren Deutschen Bucht um mehr als eine Größenordnung. Die Abnahme ist stärker als der reine Verdünnungseffekt durch die Vermischung des Flusswassers mit dem Nordseewasser und ist auf eine starke Affinität der unpolaren CKW zum Schwebstoff zurückzuführen. Die Sedimentation von Schwebstoffen führt zu einer raschen Reduktion der Konzentrationen in der Wassersäule. Im Küstenwasser

der Deutschen Bucht (Salzgehalt < 32) lag die Median-Konzentration von HCB während des Untersuchungszeitraums bei 5,4 pg/L. In der übrigen Deutschen Bucht und Nordsee (Salzgehalt < 34) lag eine sehr homogene und sehr niedrige HCB-Grundbelastung des Wassers in einem Bereich von 2 bis 3 pg/L vor, ohne dass Konzentrationschwerpunkte oder Quellen außerhalb der Flüsse festgestellt wurden.

	HCB	QCB	DDEPP	DDDPP	DDTPP	CB28	CB52	CB153	CB138	DIELD
Min	19,8	6,2	13,9	44,8	6,1	2,4	3,4	13,4	12,6	7,4
Max	316,6	43,7	165,6	609,0	223,1	45,4	51,9	153,5	112,3	40,4
Median	201,1	30,3	88,7	354,8	172,6	33,1	38,0	82,2	65,7	11,5
Mittelw.	183,8	27,0	102,7	311,6	122,0	24,6	29,1	71,8	56,6	14,1

Tabelle 4-3: CKW-Konzentrationen bei Stade (Elbe) im Zeitraum 2008–2011 in [pg/L].

Table 4-3: Chlorinated hydrocarbons near Stade (Elbe) from 2008–2011 in [pg/L].

Ganz ähnlich verhielten sich auch die PCB- und DDT-Gruppe. Während in Stade für das Leit-PCB CB153 eine Median-Konzentration von 82 pg/L beobachtet wurde, sank sie in der inneren Deutschen Bucht (Salzgehalt < 32) auf 6,3 pg/L und in der offenen See (Salzgehalt > 34) auf 1,3 pg/L ab. Minimale Konzentrationen von < 0,5 pg/L wurden vereinzelt in der offenen Nordsee nachgewiesen. Bei der räumlichen Verteilung ist eine leichte Abnahme der PCB-Konzentrationen vom Süden nach Norden zu beobachten (Abbildung 4-39). Bei der Bewertung muss berücksichtigt werden, dass die Umweltbelastung durch PCB nicht allein aus dem CB153-Gehalt resultiert, sondern aus den Beiträgen von insgesamt 209 PCB-Kongeneren (in technischen Gemischen variiert der CB153-Anteil zwischen ca. 4 und 11 %).

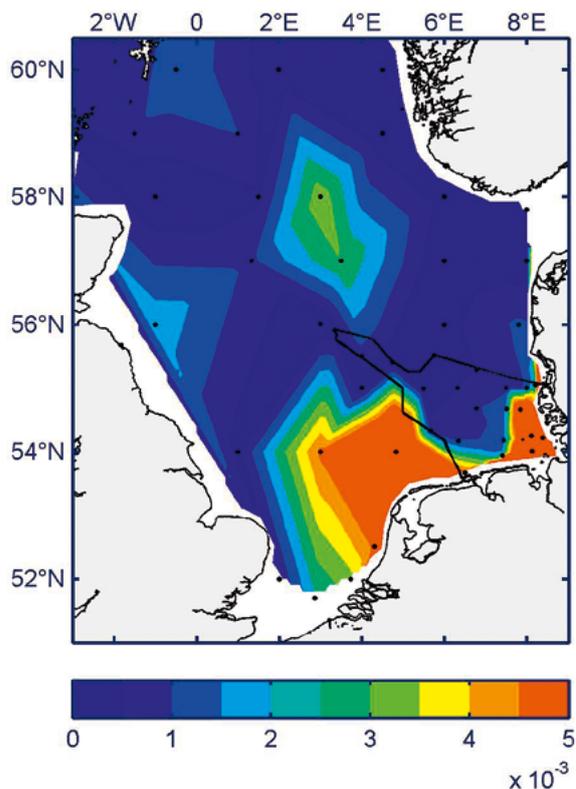


Abbildung 4-39: CB153-Konzentrationen [ng/L] des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im Aug/Sept 2011.

Figure 4-39: CB153 concentrations [ng/L] for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in Aug/Sept 2011.

Das Abbauprodukt p,p'-DDD ist aus der DDT-Gruppe diejenige Verbindung, die im Wasser (und Sediment) die höchsten Konzentrationen aufweist. Bei Stade wurde ein Median-Gehalt von 355 pg/L bestimmt; für p,p'-DDE und p,p'-DDT lagen die Mediane bei 89 pg/L und 173 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 1,6 pg/L bis 46 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. Signifikante Trends können innerhalb dieses Beobachtungszeitraums bislang für keine Substanzgruppe beobachtet werden.

4.3.3.2 CKW-Gehalte des Sediments

Die Muster der Konzentrationen der einzelnen CKW sind in der Deutschen Bucht sehr ähnlich. In *Abbildung 4-40* sind als Beispiel die Mittelwerte auf Station KS11 in der inneren Deutschen Bucht dargestellt.

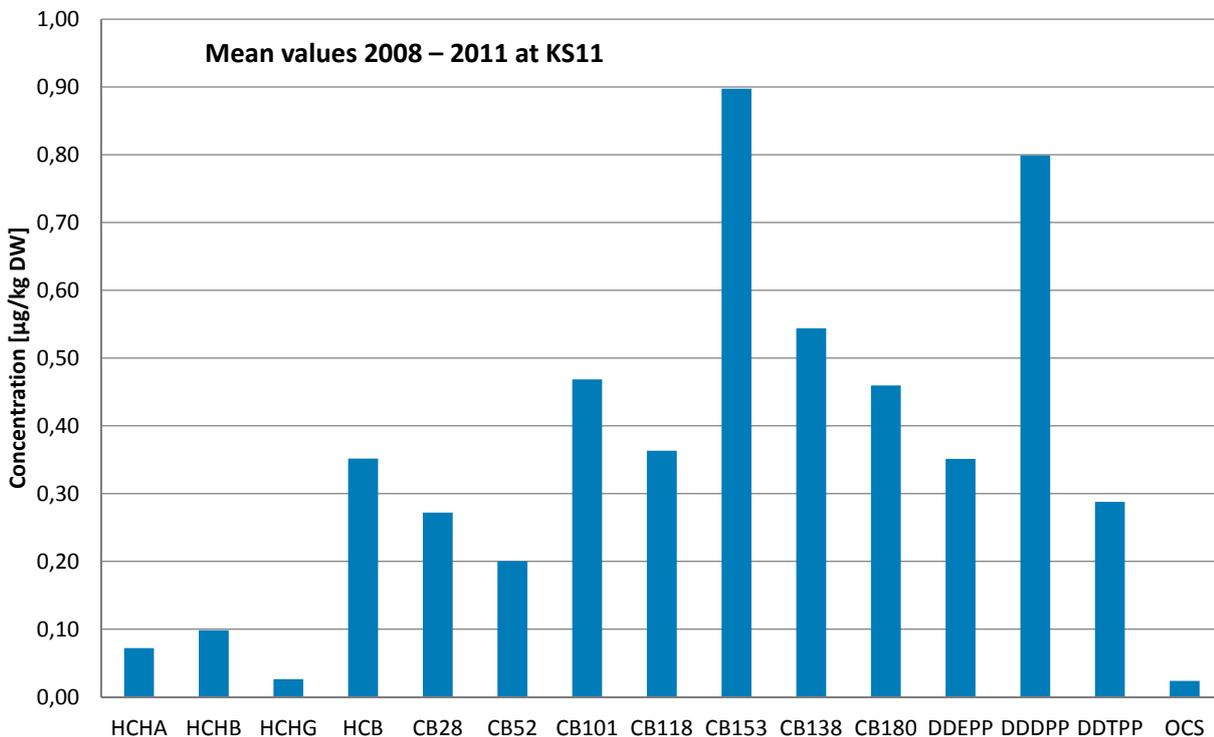


Abbildung 4-40: Mittelwerte (2008–2011) der CKW-Konzentrationen auf Station KS11 in [µg/kg] Trockenmasse.

Figure: 4-40: Mean values (2008–2011) of CHC concentrations at station KS11 in [µg/kg] dry weight (DW).

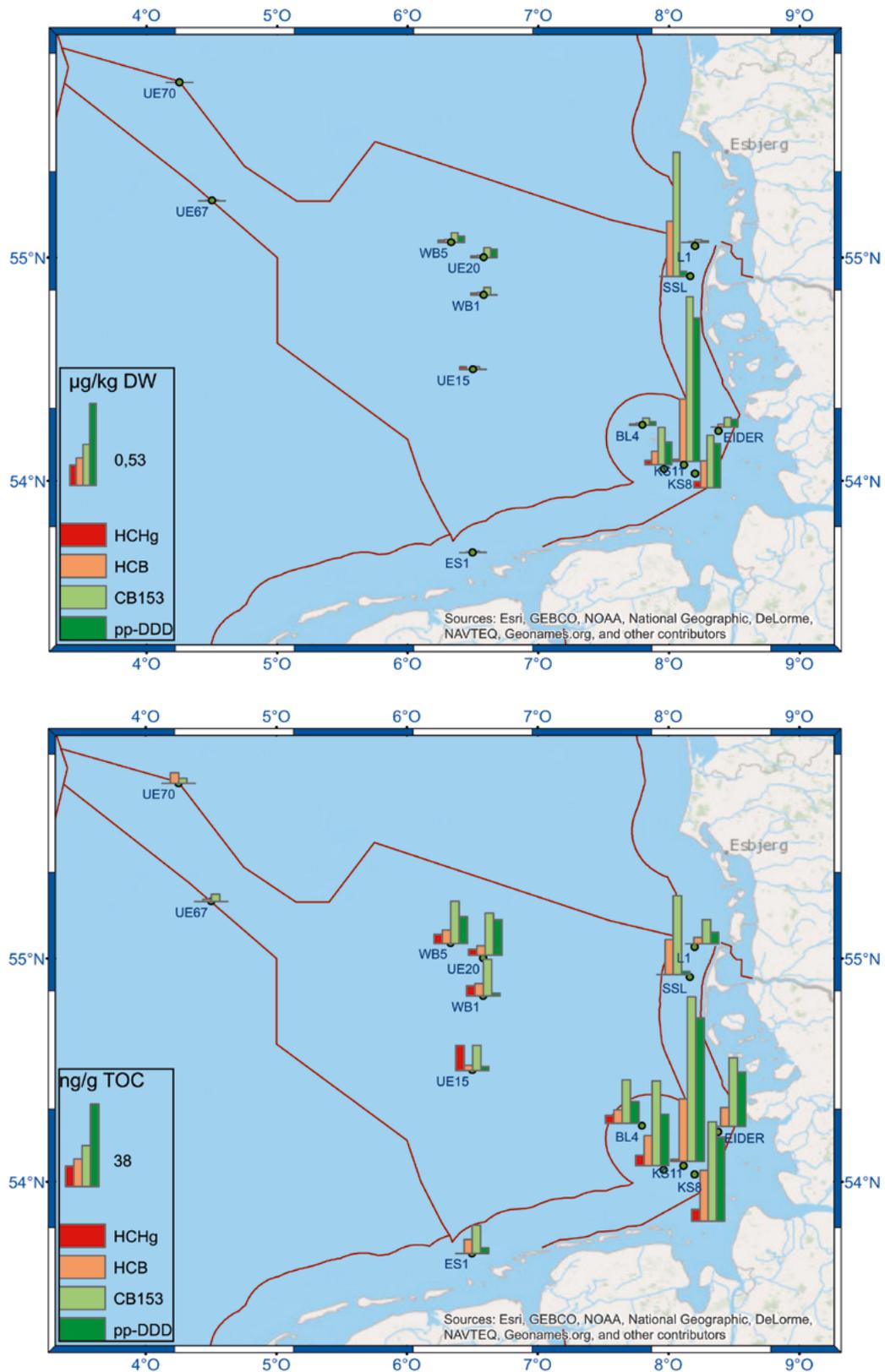


Abbildung 4-41: HCH-, HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment (0–2cm) der Deutschen Bucht im Mai 2010.

Figure 4-41: HCH-, HCB-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment (0–2 cm) of the German Bight in May 2010.

Die räumliche Verteilung der CKW-Konzentrationen in der Deutschen Bucht ist anhand von HCH, HCB, CB153 und DDD exemplarisch für Mai 2010 in *Abbildung 4-41* wiedergegeben. Die auf Trockenmasse bezogenen Konzentrationsverteilungen sind in *Abbildung 4-41* oben, die auf TOC bezogenen in *Abbildung 4-41* unten dargestellt. Alle drei Schadstoffgruppen zeigen gleiche Belastungsschwerpunkte. Diese Schwerpunkte fallen mit dem räumlichen Muster der TOC-Gehaltsverteilung zusammen (*Abbildung 4-30*).

Die höchsten auf Trockenmasse bezogenen Schadstoffkonzentrationen wurden auf der schlickreichen Station »SSL«, »KS11« sowie den benachbarten Stationen »KS8«, »HESE« und »HPAE3« in der inneren Deutschen Bucht festgestellt. Die Konzentrationen der Leitkomponenten DDD, HCB und CB153 erreichten auf »KS11« im Mai 2010 Werte von 1,38 µg/kg TM, 0,48 µg/kg TM und 1,28 µg/kg TM. Etwas geringere Werte wurden auf der Station »EIDER« beobachtet. 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: 0,10 µg/kg, HCB: 0,02 µg/kg und CB153: 0,06 µg/kg TM. Die Sedimente der 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 (*Abbildung 4-41*, unten). Maximum-zu-Minimum-Verhältnisse reduzieren sich dabei von >300 auf <20. Die niedrigsten Konzentrationen wurden auf den meisten Stationen für HCH, gefolgt von HCB gefunden. CB153 lag meist in leicht höheren Konzentrationen als DDD vor.

Abbildung 4-42 gibt anhand von CB153 und DDD die Variationsbreiten während des Untersuchungszeitraums an den einzelnen Stationen wieder und zeigt nochmals die großen Konzentrationsunterschiede an den einzelnen Stationen auf.

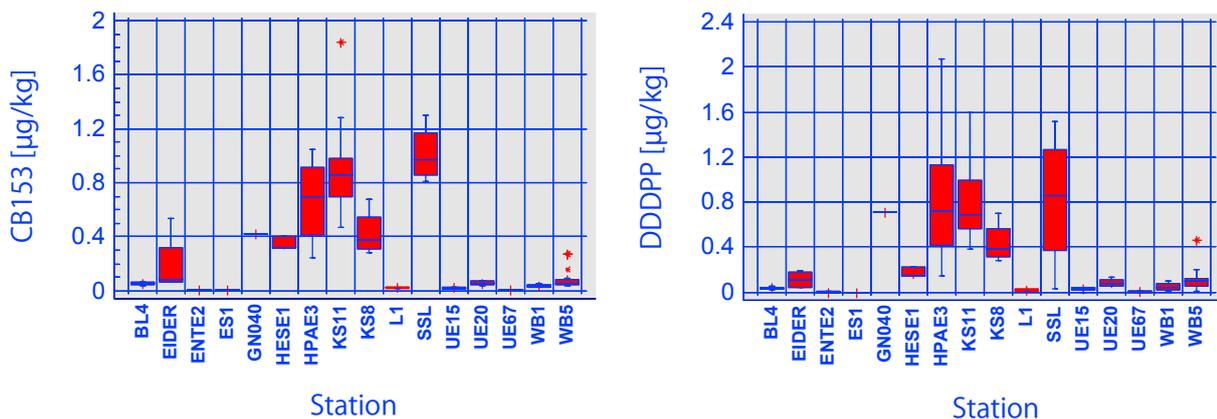


Abbildung 4-42: Konzentrationsverteilung der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) in Sedimenten der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008 bis 2011.

Figure 4-42: Concentration of chlorinated hydrocarbons (CKW) in sediments of the German Bight from 2008–2011.

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

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 ungeradzahiger Kettenlängen auf Landpflanzen als Ursprung hin. Als Maß für den Anteil an biogenen Alkanen wird der ›**Carbon Preference Index**‹ (CPI: Summe der ungeradzahigen n-Alkane dividiert durch die Summe der geradzahigen im Bereich von n-C₂₀ bis n-C₃₀) verwendet, der für petrogene Muster etwa 1 und für biogene Muster > 4 ist. Auch Algen sind Produzenten bestimmter n-Alkane; von diesen werden vor allem n-C₁₇, n-C₁₉ und n-C₁₅ gebildet.

Bei der Stoffgruppe der Kohlenwasserstoffe (KW) haben zwei Untergruppen eine besondere ökologische Bedeutung: Gesättigte KW (Alkane, Aliphaten) und aromatische KW. Die Alkane (*Kapitel 4.3.4.2*) 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 (*Kapitel 4.3.4.3*). 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. Kapitel 4.3.4.2), sind auch in den Jahren 2008 bis 2011 zahlreiche akute Verschmutzungen durch Öl in der Deutschen Bucht beobachtet worden (Tabelle 4-4).

Von der Küstenwache (Bundesgrenzschutz See, Zoll, Vollzugsorgane der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Fischereiaufsicht), der Marine, der Wasserschutzpolizei sowie durch private Dritte wurden von 2008 bis 2011 insgesamt 174 Ölverschmutzungen gemeldet. Die positive Tendenz der Jahre zuvor setzte sich allerdings fort: Von 2008 bis 2011 nahm die Zahl der entdeckten Ölverschmutzungen weiterhin stark ab.

Jahr	Anzahl
2008	60
2009	47
2010	39
2011	28

Tabelle 4-4: Anzahl der in der Deutschen Bucht beobachteten Öl-Verschmutzungen.
Table 4-4: Number of oil pollutants in the German Bight.

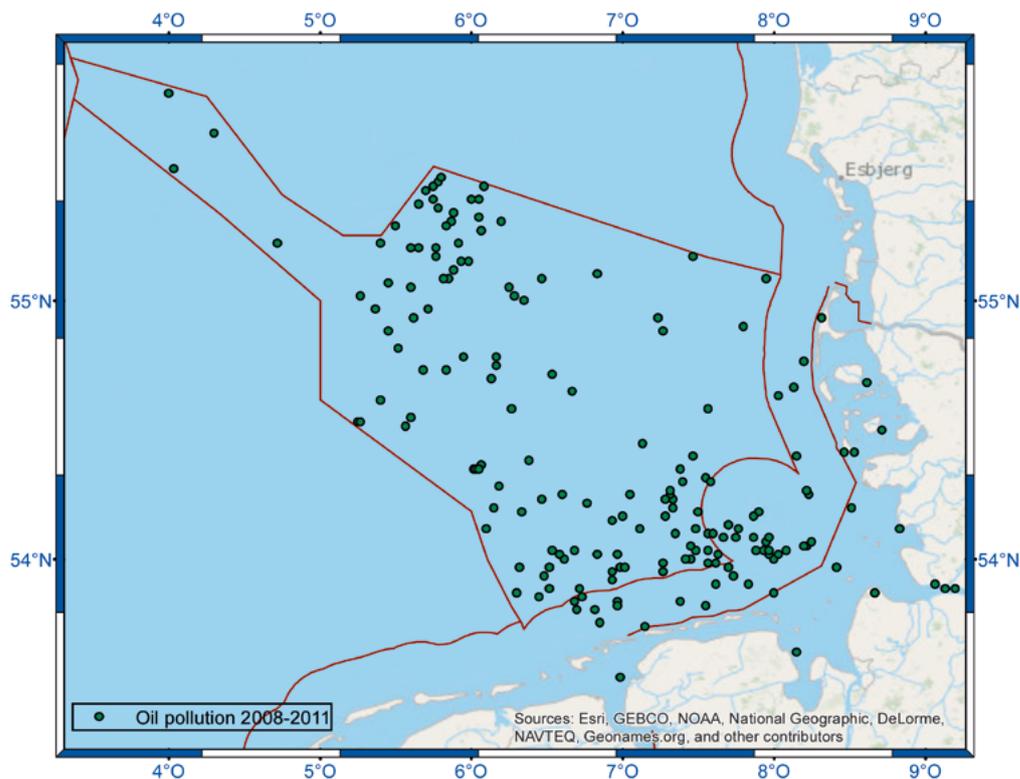


Abbildung 4-43: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2008 bis 2011.

Figure 4-43: Pollution sightings in the German Bight from 2008 to 2011.

Die räumliche Verteilung der beobachteten Verschmutzungen ist in *Abbildung 4-43* dargestellt. Die zahlreichen Ölverschmutzungen nördlich der ostfriesischen Inseln sowie im Nordwesten der AWZ fallen mit den Hauptfahrwassern zusammen.

Im Rahmen laufender Strafverfahren wurden im BSH in den Jahren 2008 bis 2011 in insgesamt 53 Fällen vergleichende Analysen zwischen Proben aus Ölfilmen und von verdächtigten Schiffen durchgeführt. Insgesamt wurden dazu 235 Proben untersucht.

4.3.4.2 Aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane

Der Konzentrationsbereich der Summe der Alkane (C20 bis C30) lag in den Jahren 2008 bis 2011 zwischen 6 ng/L in der zentralen Nordsee und 270 ng/L in der Elbe (Stade). In der Deutschen Bucht und der Nordsee wurden Werte bis max. 67 ng/L beobachtet, während der Medianwert bei nur 10 ng/L lag. Nur bei wenigen Proben oberhalb von 20 ng/L wurden Alkan-Muster gefunden, die auf eine Ölverschmutzung zurückzuführen waren. Die Mediankonzentrationen einzelner n-Alkane (im Bereich C20 bis C30) lagen in der Deutschen Bucht zwischen 0,4 und 1,6 ng/L. Die relativ homogene Konzentrationsverteilung und ein mittlerer Carbon Preference Index von 2,2 deuten auf eine gewisse Grundbelastung der Nordsee durch Erdölkohlenwasserstoffe hin. Die Summe (C20 bis C30) der Mediankonzentrationen von 10 ng/L weist diese chronische Belastung jedoch als relativ gering aus.

In der Elbe wurde ein alternierendes Verteilungsmuster der Konzentrationsbeiträge der n-Alkane mit einer Kettenlänge größer als C20 beobachtet. Die Bevorzugung ungeradzahlgiger Kettenlängen (Maximum bei C29) deutet auf Landpflanzen als Hauptquelle hin; ein zusätzlicher (petrogener) Öl-Anteil ist jedoch auch hier vorhanden.

In den Monaten mit starker Primärproduktion (Mai bis August) übertrafen auf einigen Stationen die Konzentrationen von C17 (bis 126 ng/L), C19 (bis 40 ng/L) und vereinzelt auch C15 (bis 12 ng/L) diejenigen aller anderen Alkane. Diese drei Alkane sind bekannte Stoffwechselprodukte von Algen. Die hohen Konzentrationen von C17 und C19 waren dabei vor allem in den Küstengewässern der südlichen und östlichen Nordsee zu beobachten. Eine gute Korrelation zum Schwebstoffgehalt besteht nicht.

Aufgrund der hohen Variabilität waren bisher keine zeitlichen Tendenzen in den Konzentrationsverteilungen der Alkane erkennbar.

Das Überwachungsprogramm des BSH sieht gegenwärtig keine Bestimmung von Alkankonzentrationen im Sediment vor, sodass zur Sedimentbelastung durch Ölreste keine Aussagen möglich sind.

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 >20 ng/L) und ein Muster gefunden, 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.

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.

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 stark lipophile Verbindungen in dieser Schadstoffklasse ($\log K_{ow}$ Bereich von 3,3–8,0). Unterschiedliche Konzentrationsverteilungen sind sowohl in der Verschiedenheit physikalisch-chemischer Eigenschaften als auch durch unterschiedliche Eintragspfade begründet.

4.3.4.3.1 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.

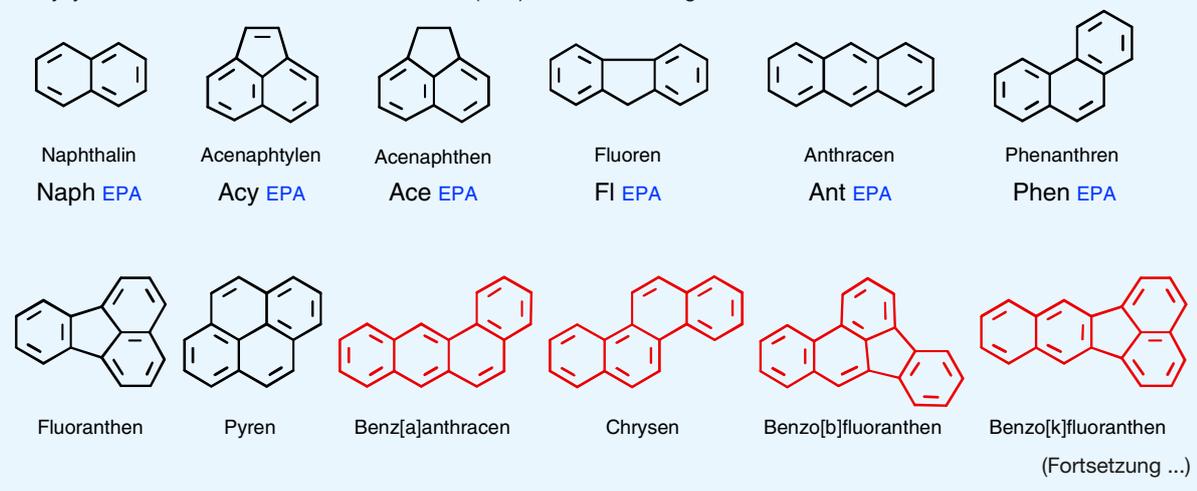
Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

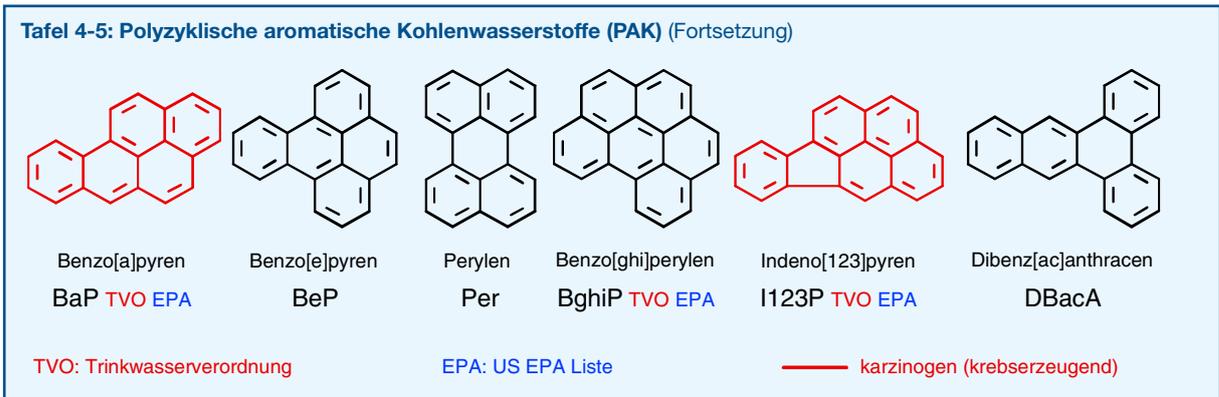
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, engl. PAH) sind organische Verbindungen, die aus zwei oder mehreren kondensierten, aromatischen Ringen bestehen. Von den Hunderten PAK, die bisher in der Umwelt nachgewiesen wurden, wird nur eine begrenzte Auswahl für Überwachungsuntersuchungen herangezogen.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

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

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

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





Die Konzentrationen dieser PAK-Verbindungen variierten bei den 10 Beprobungen der Jahre 2008 bis 2011 in der Elbe bei Stade zwischen 0,11 ng/L (Flu) und 8,9 ng/L (Flu). In der Deutschen Bucht lagen Konzentrationen im Küstenbereich (Salzgehalt <32) im Intervall <0,005 – 3,2 ng/L, während sie in der offenen See zwischen <0,005 und 0,94 ng/L lagen. (Tabelle 4-5 und Abbildung 4-44). Sowohl in der Elbe als auch in der Deutschen Bucht entsprechen diese Konzentrationen den beobachteten Bereichen der Vorjahre.

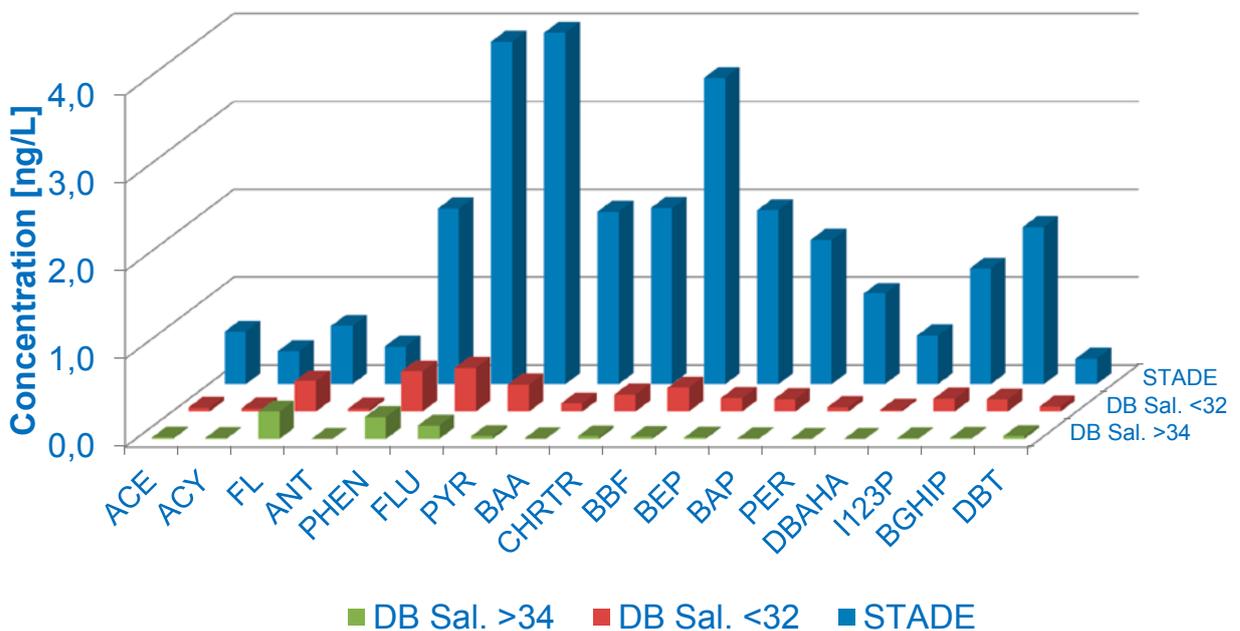


Abbildung 4-44: Median-Werte (2008–2011) der PAK-Konzentrationen in der Elbe bei Stade und küstennahen und küstenfernen Stationen (Oberflächenwasser, 5 m).

Figure 4-44: Median water concentrations (2008–2011) of PAHs in the river Elbe (Stade), in coastal areas and in the open sea (surface water, 5 m).

Station	STADE			DB Salzgehalt <32			DB Salzgehalt >34		
	Min	Max	Median	Min.	Max.	Median	Min	Max	Median
NAPH	0,309	28,309	0,688						
ACE	0,268	0,873	0,598	0,012	0,251	0,044	0,000	0,051	0,015
ACY	0,136	0,517	0,375	0,000	0,305	0,036	0,000	0,037	0,008
FL	0,111	1,577	0,663	0,083	1,331	0,345	0,061	1,038	0,310
ANT	0,168	0,685	0,427	0,006	0,202	0,032	0,000	0,028	0,000
PHEN	0,430	4,206	1,997	0,176	1,855	0,457	0,078	0,846	0,250
FLU	0,647	8,887	3,895	0,160	3,231	0,495	0,033	0,942	0,153
PYR	0,726	7,818	3,999	0,025	2,692	0,306	0,006	0,874	0,031
BAA	0,655	2,099	1,963	0,015	0,503	0,092	<0,005	0,160	0,006
CHRTR	0,328	5,275	2,003	0,031	1,738	0,193	<0,005	0,480	0,029
BBF	1,366	4,541	3,485	0,045	1,455	0,271	<0,005	0,438	0,023
BEP	0,840	2,864	1,980	0,027	0,766	0,152	<0,005	0,236	0,015
BAP	0,272	5,329	1,640	<0,005	1,732	0,141	<0,005	0,556	0,004
PER	0,589	1,642	1,031	<0,005	0,432	0,049	<0,005	0,107	<0,005
DBAHA	0,095	0,638	0,551	<0,005	0,322	0,023	<0,005	0,081	<0,005
I123P	0,200	4,340	1,316	<0,005	1,530	0,145	<0,005	0,431	0,007
BGHIP	0,725	2,623	1,788	0,024	0,727	0,136	<0,005	0,236	0,009
DBT	0,148	0,321	0,289	0,019	0,225	0,055	0,011	0,377	0,030

Tabelle 4-5: PAK-Konzentrationen in der Elbe und der Deutschen Bucht.

Table 4-5: PAK-concentrations in the river Elbe and the German Bight.

Mit Ausnahme der NAPH- und FL-Verteilung zeigten alle PAK-Verteilungen einen mehr oder minder starken Konzentrationsabfall von den Küsten (Flüssen) zur offenen See hin (*Abbildung 4-45* und *4-46*). 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 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 *Abbildung 4-46* zeigt, sind die Konzentrationen von Naphthalin und z. T. auch die von Phenanthren sehr variabel und folgen nicht immer den üblichen Verteilungsstrukturen. Dies deutet auf zusätzliche Punktquellen hin. Wahrscheinlich werden die erhöhten Werte durch lokale Ölverschmutzungen verursacht.

Die unterschiedlich starken Gradienten führen letztlich zu sehr verschiedenen PAK-Konzentrationsmustern zwischen küstennahen (schwebstoffreichen) und küstenfernen (schwebstoffarmen) Wasserkörpern.

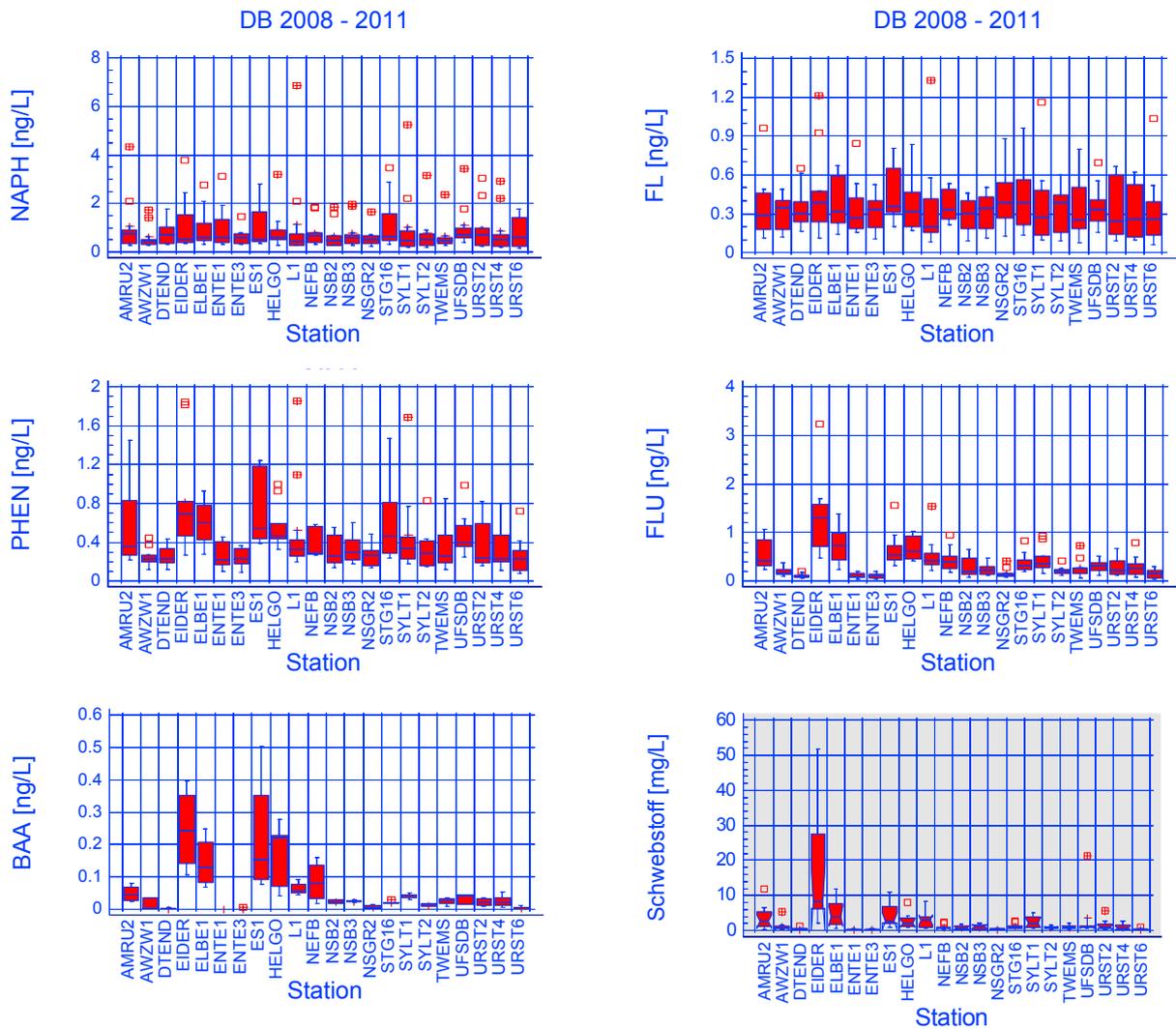


Abbildung 4-45: Konzentrationsverteilung ausgewählter PAK [ng/L] und Schwebstoff [mg/L] (grau) im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008 bis 2011.

Figure 4-45: Concentrations of selected PAHs [ng/L] and particulate matter [mg/L] (grey) in surface water of the German Bight from 2008 to 2011.

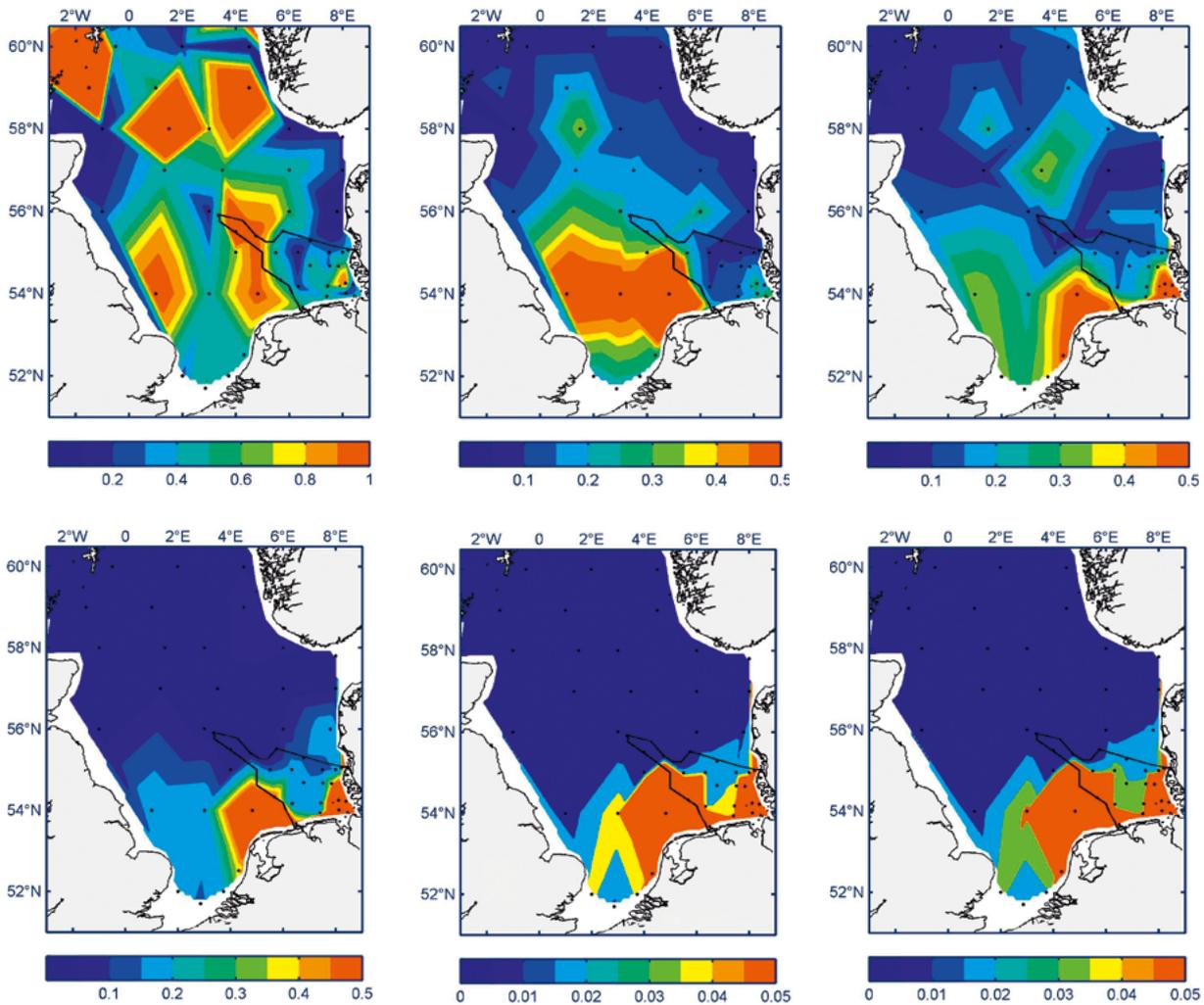


Abbildung 4-46: Konzentrationen ausgewählter PAK [ng/L] im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Aug/Sept. 2011. (NAPH: oben, links; FL: oben, Mitte; PHEN: oben, rechts; FLU: unten, links; BAP: unten, Mitte; BghiP: unten, rechts)

Figure 4-46: Concentrations of some PAHs [ng/L] in near-surface water (5 m) of the German Bight in Aug/Sept 2011. (NAPH: top, left; FL: top, middle; PHEN: top, right; FLU: bottom, left; BAP: bottom, middle; BghiP: bottom, right)

4.3.4.3.2 Zeitliche Entwicklung der PAK-Konzentrationen

Kurzzeit-Ereignisse

Die Konzentrationen der verschiedenen PAK sind zeitlich hochvariabel und zeigen eine saisonale Abhängigkeit. Im Hochsommer (August/September) wird meist 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. In *Abbildung 4-47* sind die Konzentrationsmittelwerte im Küstengewässer (Salzgehalt < 32) und die der hohen See (Salzgehalt > 34) jeweils in drei jahreszeitlichen Quartilen zusammengefasst dargestellt. Die höchsten Werte wurden meist für Q4 (Okt.–Nov.-Fahrten) beobachtet; die niedrigsten im Sommer (Aug.–Sept.-Fahrten, Q3).

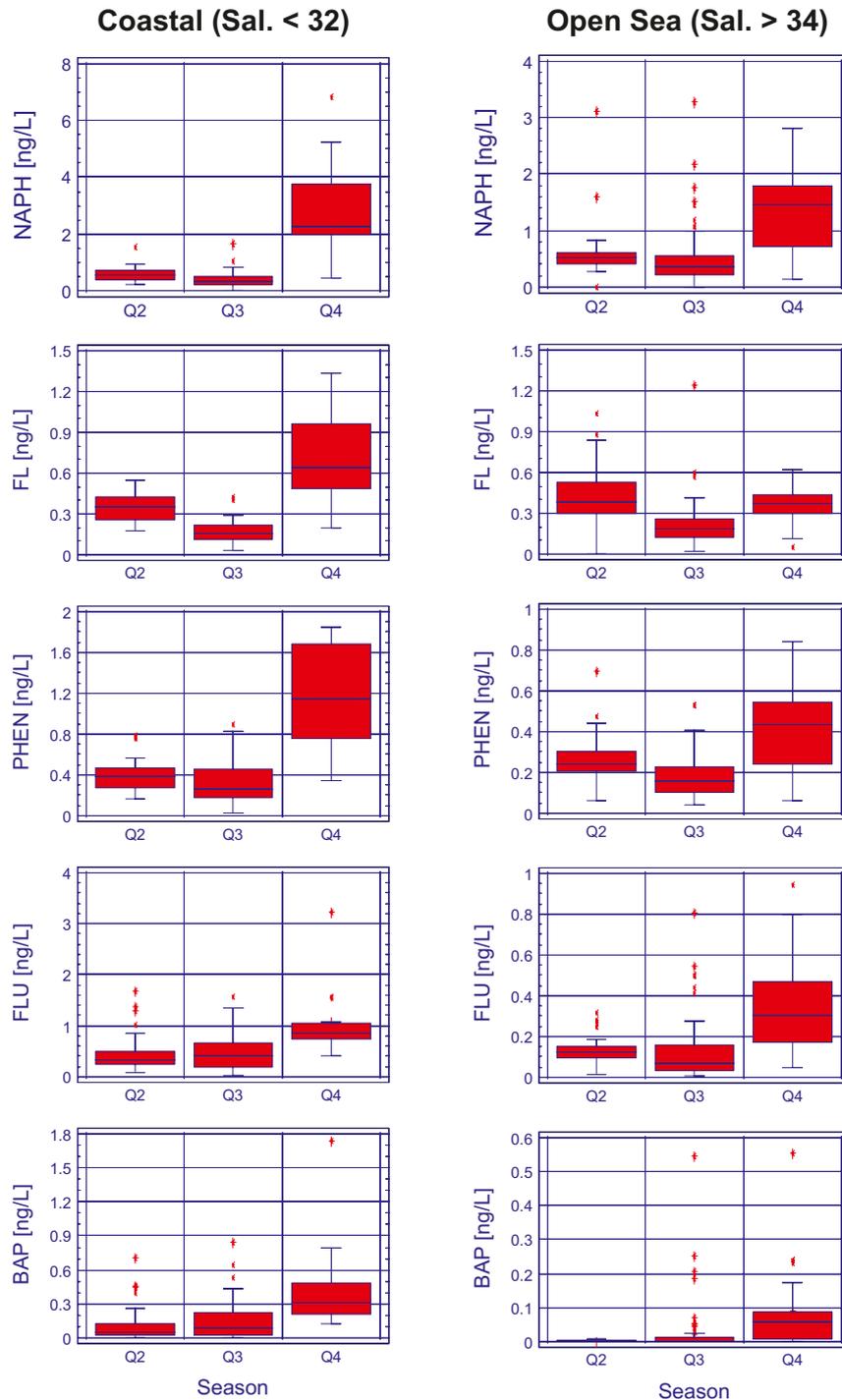


Abbildung 4-47: Saisonale Verteilung ausgewählter PAK im Küstenwasser (Salzgehalt < 32, links) und in der hohen See (rechts, Salzgehalt > 34), Q2: Mai, Juli; Q3: Aug., Sept.; Q4: Okt., Nov. im Zeitraum 2008–2011.

Figure 4-47: Seasonal distribution of selected PAHs in coastal waters (left: salinity < 32) and open sea (right: salinity > 34); Q2: May, July; Q3: Aug., Sept.; Q4: Oct., Nov. from 2008–2011.

Langzeit-Trends

Aufgrund der hohen Schwankungen können weiterhin keine Aussagen zur langfristigen Entwicklung getroffen werden.

4.3.4.3.3 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 105-fach höherer Konzentration vor als in der Wasserphase. Die PAK-Konzentrationen im Sediment übertreffen diejenigen der chlorierten Kohlenwasserstoffe um das 100- bis 1000-fache. 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 Konzentrationen vorhanden als die 2- bis 4-Ring-Aromaten. Im Gegensatz dazu werden maximale Konzentrationen in Wasserproben aus der offenen See meist für Naph und Fl, in schwebstoffreichen Küstengebieten meist für Phen oder Flu festgestellt. Während die PAK-Muster in Wasserproben stark von dem Schwebstoff-Anteil abhängen (vgl. *Abbildung 4-45*), ähneln die Konzentrationsmuster der PAK im Sediment einander recht stark (*Abbildung 4-48*) und ähneln sehr stark dem Muster, das im schwebstoffreichen Wasser der Elbe beobachtet wird (*Abbildung 4-44*).

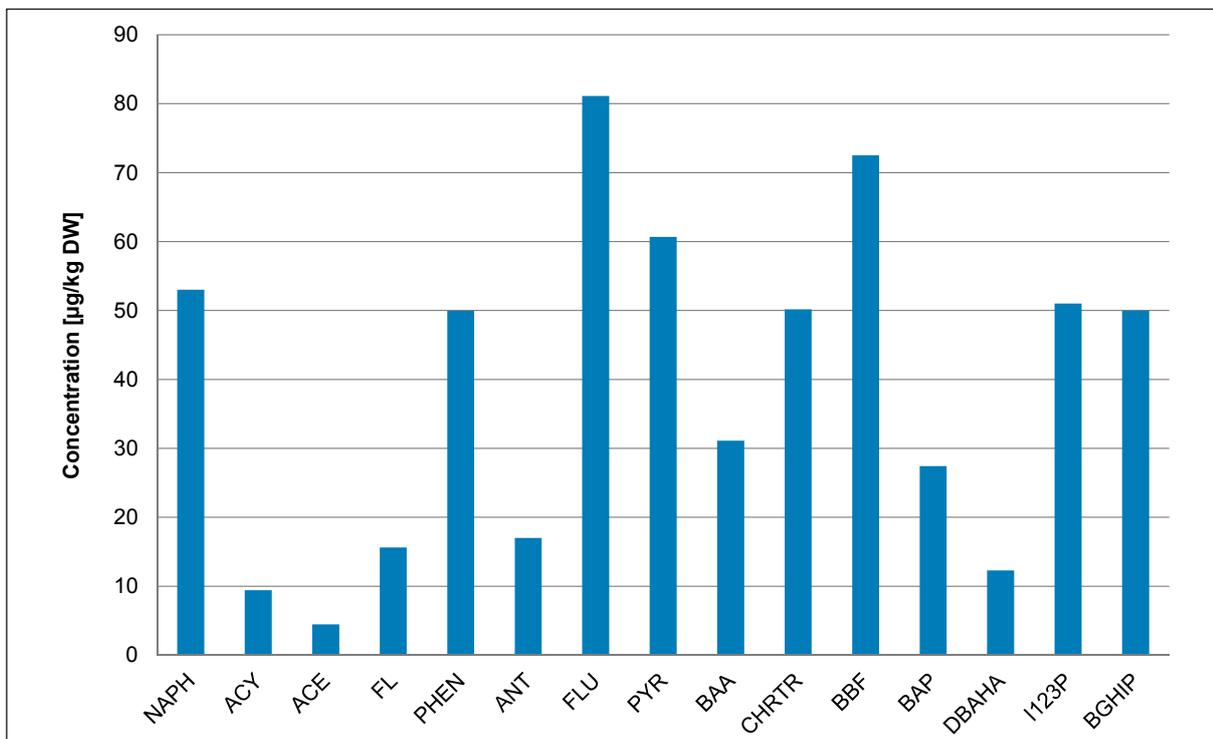


Abbildung 4-48: Mittelwerte (2008–2011) der PAK-Konzentrationen auf Station KS11 in µg/kg Trockenmasse.

Figure 4-48: Mean values (2008–2011) of PAHs concentrations at station KS11 in µg/kg dry weight (DW).

Die Konzentrationsverteilungen ausgewählter PAK im Sediment der Deutschen Bucht sind in *Abbildung 4-49* exemplarisch für Mai 2010 dargestellt. Die geographische Verteilung der Konzentrationen orientiert sich – ähnlich wie bei den CKW – an dem TOC-Verteilung der Sedimente. Die Mediane der Konzentrationen aller Stationen lagen in dem Untersuchungszeitraum zwischen 1,2 µg/kg TM (ACE) und 33,0 µg/kg TM (BbF).

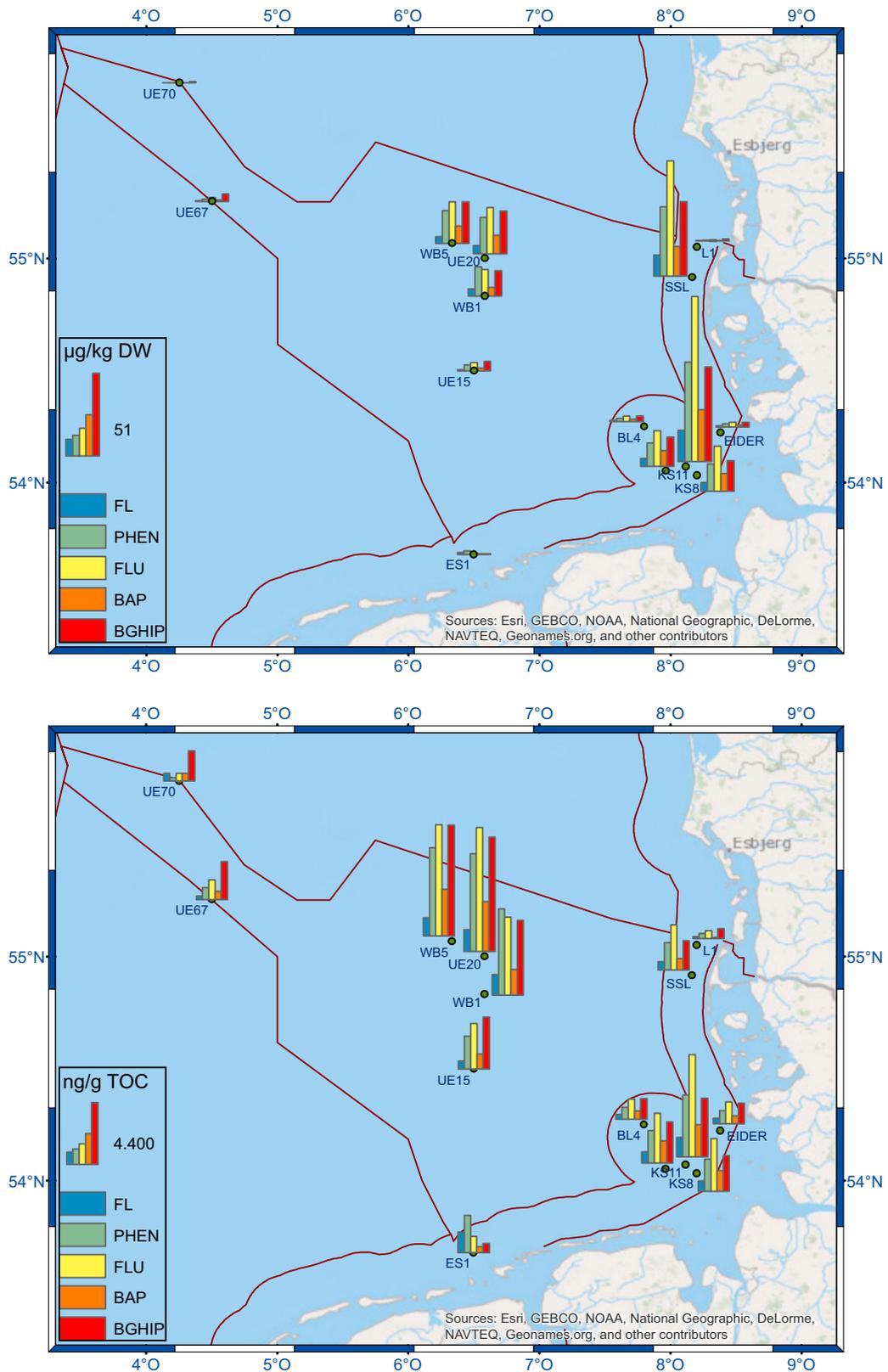


Abbildung 4-49: PAK-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2010.

Figure 4-49: PAH concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2010.

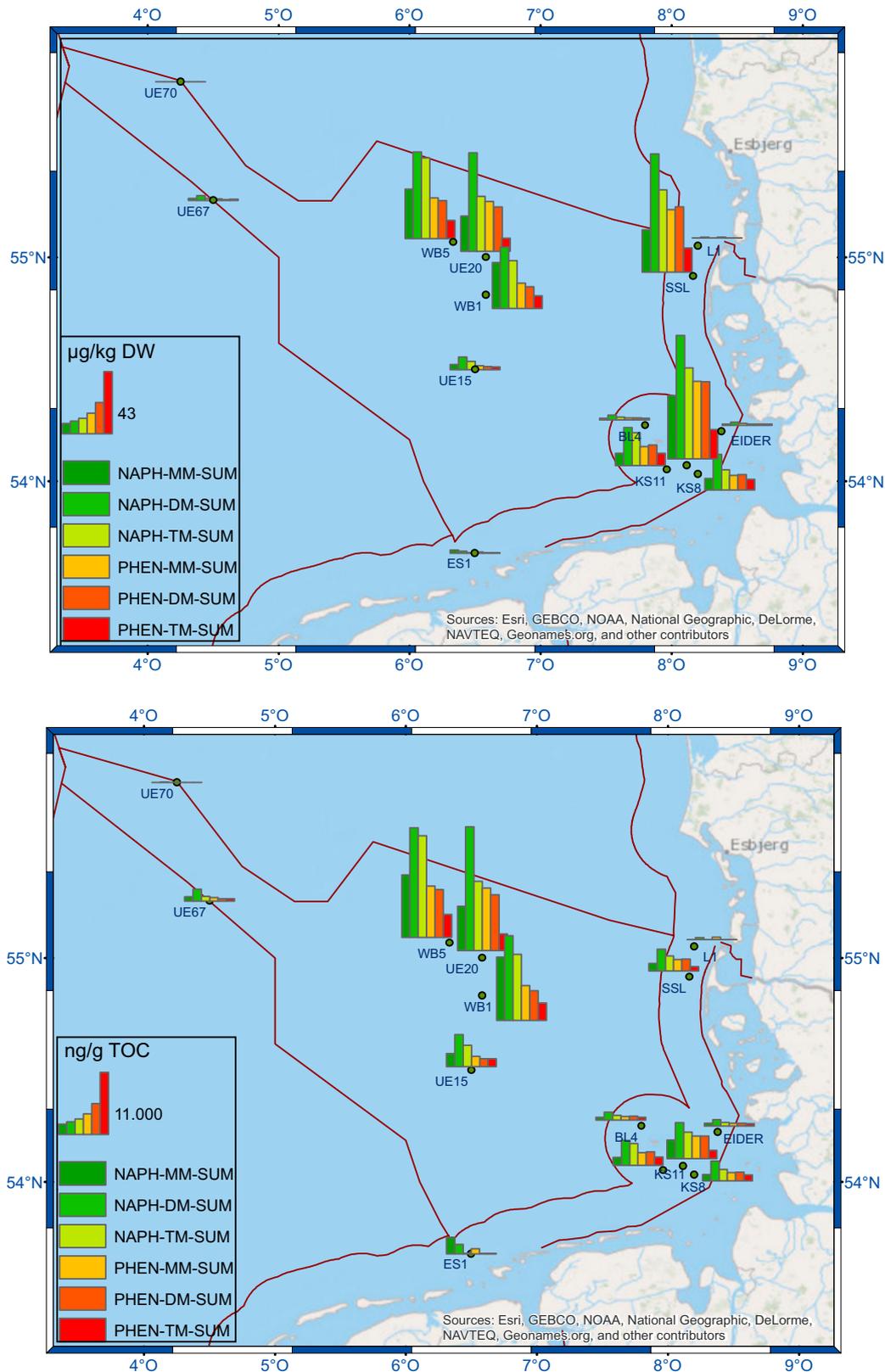


Abbildung 4-50: Alkyl-PAK-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2010.

Figure 4-50: Alkyl-PAH concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2010.

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 (*Abbildung 4-49*).

Vergleicht man die auf den TOC-Gehalt bezogenen Konzentrationsverteilungen der PAK (*Abbildung 4-49*) und die der CKW (*Abbildung 4-41*), fällt auf, dass die PAK in der zentralen Deutschen Bucht (WB5, UE20 und WB1) 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. *Abbildung 4-43*), konnte bisher noch nicht bestätigt werden.

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

4.3.5 Polare Pestizide

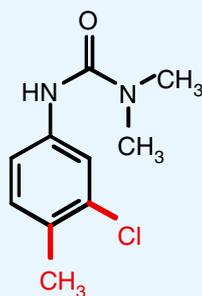
Im Gegensatz zu den „klassischen“, unpolaren Schadstoffen haben die meisten modernen Pflanzenbehandlungsmittel polare Eigenschaften und sind oft auch weniger persistent. Sie umfassen eine Vielzahl verschiedener Stoffgruppen, so dass ihre Analytik schwierig und aufwendig ist. Neben den in der Wasserrahmenrichtlinie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

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 Deutschen Bucht und Nordsee meist zusammenfassend für den Zeitraum 2008 bis 2011 dokumentiert und interpretiert. Anschließend werden Ergebnisse zu jahreszeitlichen Veränderungen und langzeitliche Entwicklungen in der Herbizidbelastung der Deutschen Bucht vorgestellt.

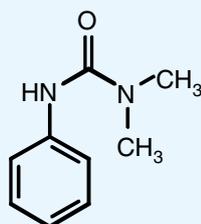
Tafel 4-6: Herbizide

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

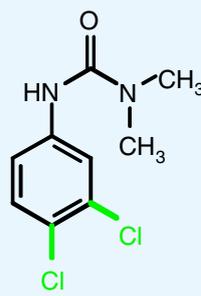
Phenylharnstoff-Herbizide



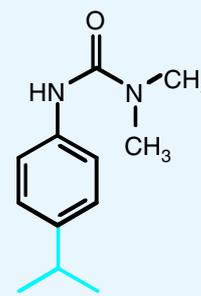
Chlortoluron



Fenuron



Diuron

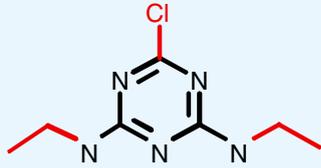


Isoproturon

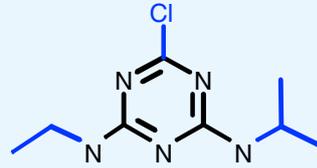
(Fortsetzung ...)

Tafel 4-6: Herbizide (Fortsetzung)

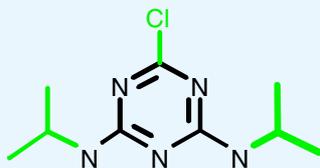
Triazin-Herbizide



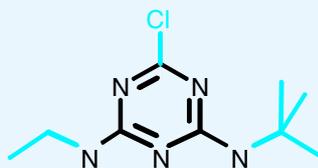
Simazin



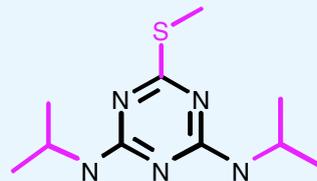
Atrazin



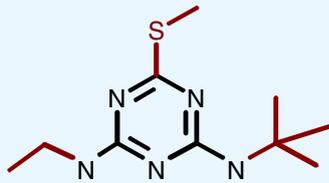
Propazin



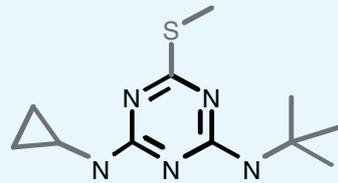
Terbutylazin



Prometryn

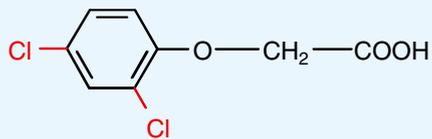


Terbutryn

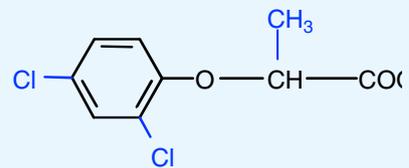


Irgarol

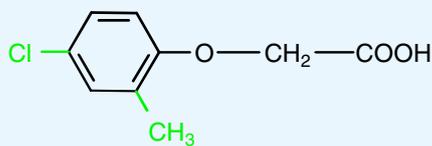
Phenoxyessigsäure-Herbizide



2,4-D [2,4-Dichlorphenoxyessigsäure]



Dichlorprop



MCPA



Mecoprop

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. Die dort beobachteten Konzentrationsbereiche sind in *Abbildung 4-51* zusammengefasst. Der Pestizideintrag und demzufolge die Pestizidkonzentrationen des Wassers unterliegen erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen, die aus der saisonalen Anwendung der einzelnen Wirkstoffe resultieren (siehe *Kapitel 4.3.5.2*).

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 (*Abbildung 4-52*). 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. Von den übrigen Herbizidklassen wiesen Bentazon, Metazachlor und Metolachlor relativ hohe Konzentrationen auf.

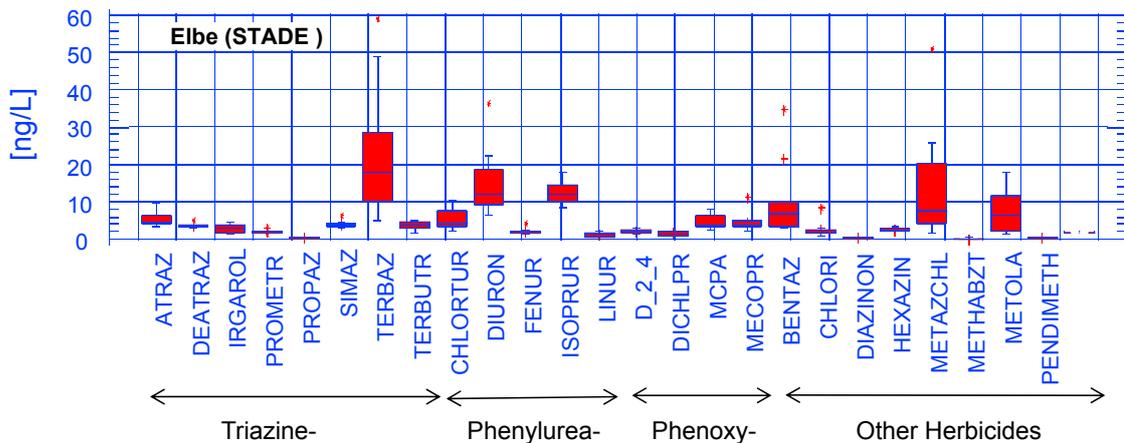


Abbildung 4-51: Herbizid-Konzentrationen in der Elbe bei Stade (2008 bis 2011).

Figure 4-51: Herbicide concentrations in the river Elbe at Stade (2008 to 2011).

Aus *Abbildung 4-52* wird deutlich, dass in der Deutschen Bucht die Konzentrationen im Küstenbereich um den Faktor 10, in der Hohen See etwa um den Faktor 100 abnehmen.

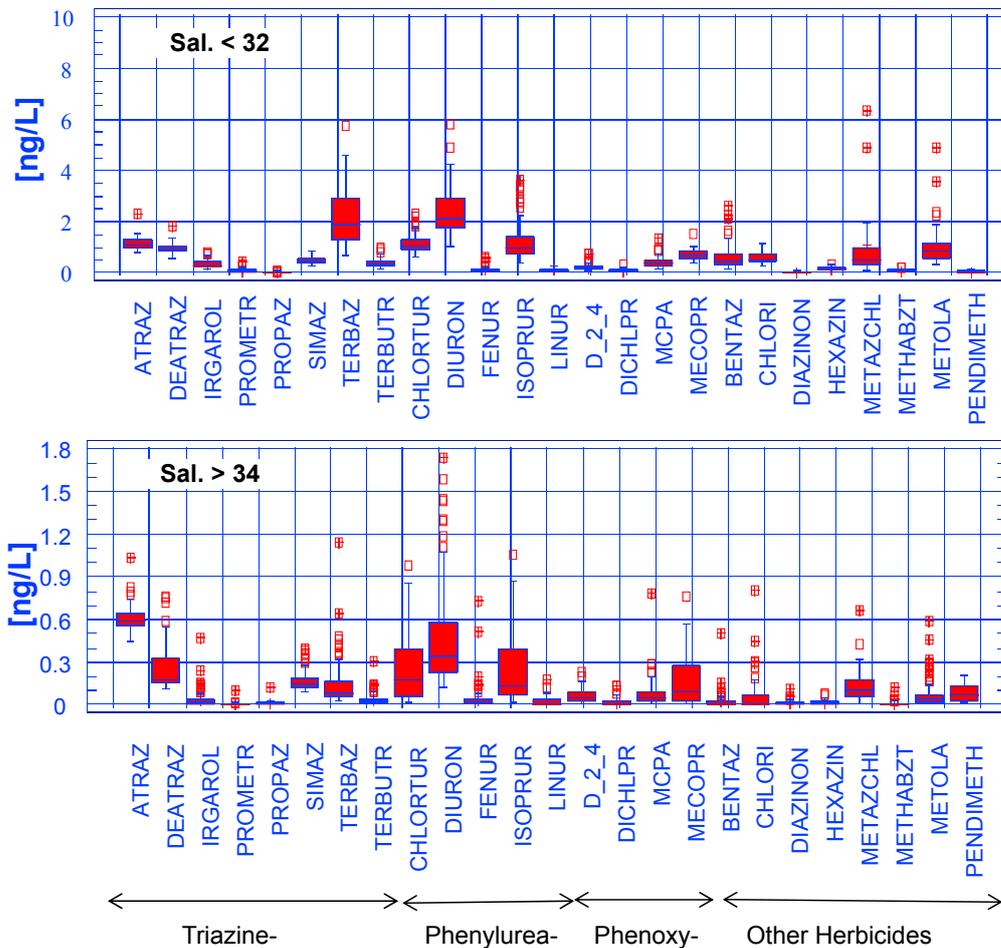


Abbildung 4-52: Herbizid-Konzentrationen im Küstengewässer (Salzgehalt < 32, oben) und in der äußeren Deutschen Bucht (Salzgehalt > 34, unten) (2008 bis 2011).

Figure 4-52: Herbicide concentrations in coastal waters (salinity < 32, upper figure) and in the open sea (salinity > 34, lower figure) (2008 to 2011).

Die räumlichen Konzentrationsverteilungen in der Nordsee im Aug/Sept 2011 sind für vier wichtige Triazine in *Abbildung 4-53* 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 Deutschen Bucht. Eine weitere Belastungsquelle für die südliche Nordsee ist der Rhein, wie an den erhöhten Konzentrationen im Mündungsgebiet erkennbar ist (*Abbildung 4-53*). 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 – Irgarol und Terbutylazin nachweisbar waren. Der steilste Gradient ist für Terbutylazin zu beobachten. Irgarol ist fast überall nachweisbar und zeigt auch vor der norwegischen Küste, im Einflussbereich des Ostsee-Ausflusses deutlich erhöhte Werte. Irgarol ist von besonderem Interesse, da es als Bestandteil von Antifouling-Schiffsanstrichen verwendet wird und die höchste Toxizität aller Triazin-Herbizide aufweist.

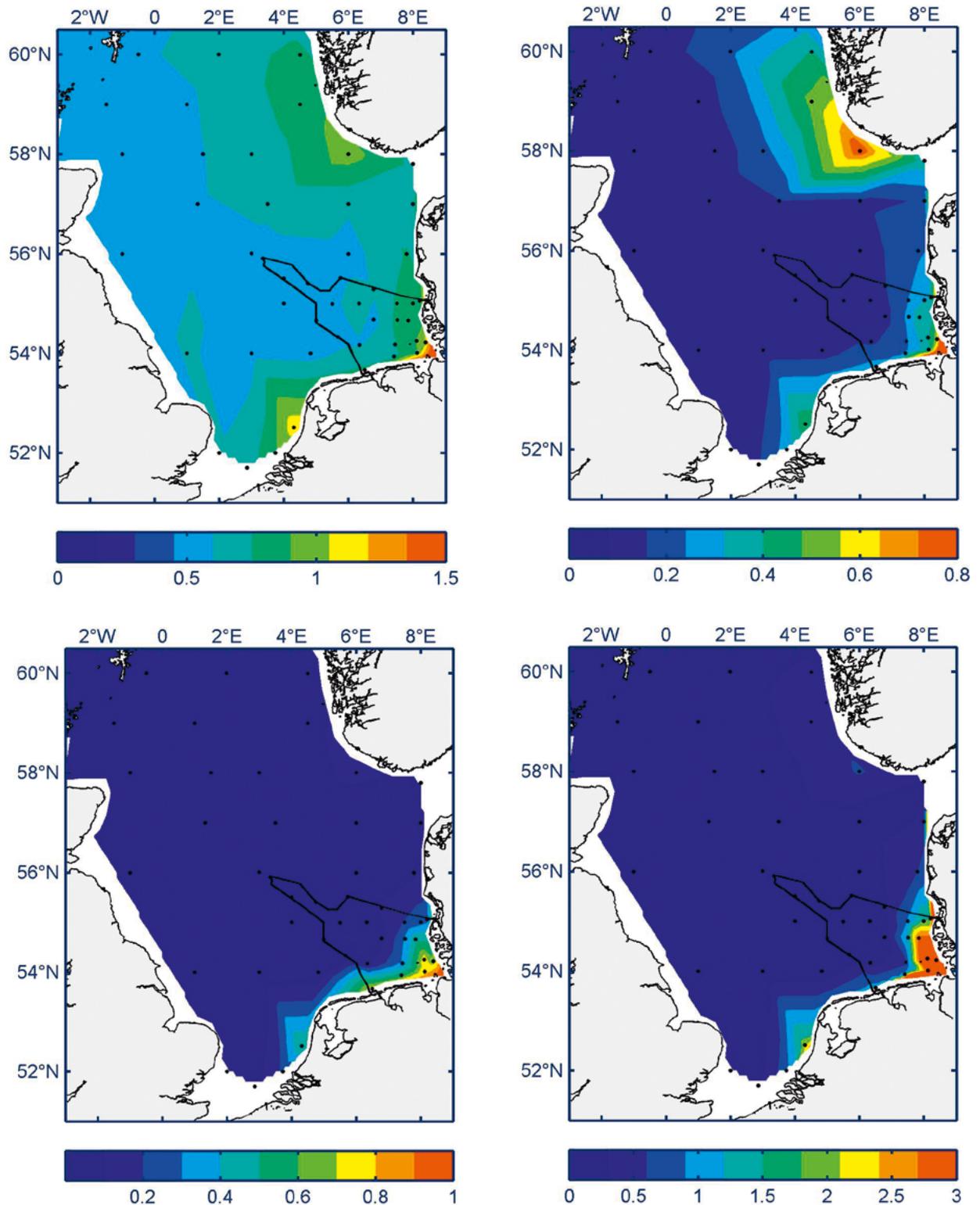


Abbildung 4-53: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Aug/Sept 2011. (ATRAZ: oben, links; SIMAZ: oben, rechts; IRGAROL: unten, links; TERBAZ: unten, rechts)

Figure 4-53: Concentrations (ng/L) of selected triazine herbicides in near-surface sea water of the North Sea in Aug/Sept 2011. (ATRAZ: top, left; SIMAZ: top, right; IRGAROL: bottom, left; TERBAZ: bottom, right)

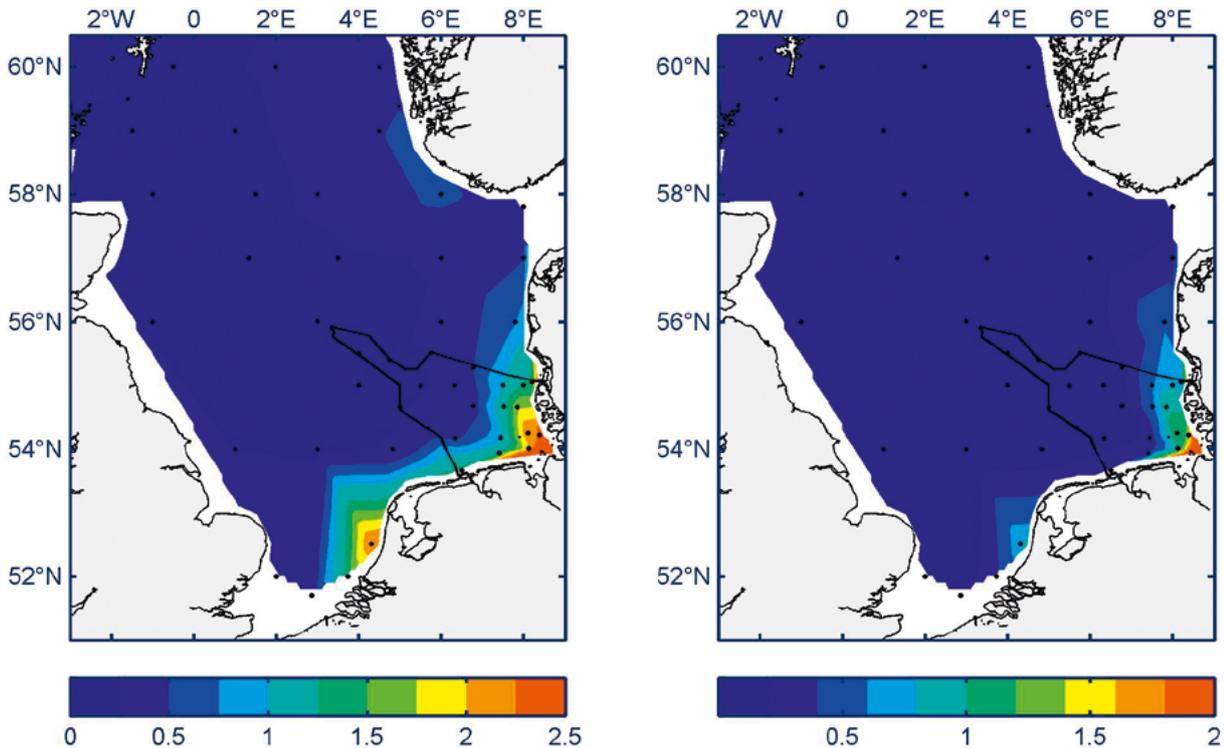


Abbildung 4-54: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Aug/Sept 2011.

Figure 4-54: Concentrations (ng/L) of selected phenylurea herbicides in near-surface sea water of the North Sea in Aug/Sept 2011.

Die Konzentrationsverteilungen für die zwei wichtigsten Phenylharnstoff-Herbizide Diuron und Isoproturon sind in *Abbildung 4-54* dargestellt. Das grundsätzliche Verteilungsmuster ähnelt dem der Triazine stark; die absoluten Konzentrationen unterscheiden sich natürlich aufgrund verschiedener Eintragsmengen.

Die Phenylharnstoff-Herbizide wiesen bei den Beprobungen von 2008 bis 2011 in der Elbe ähnlich hohe Konzentrationen auf wie die Triazine. Bei Stade und Cuxhaven wurden für Diuron durchschnittliche Konzentrationen von 11 ng/L gefunden, gefolgt von Isoproturon mit 8,3 ng/L, Chlortoluron (3,8 ng/L), Fenuron (1,3 ng/L) und Linuron (0,9 ng/L). Trotz dieser hohen Quellkonzentrationen wurden in der offenen See meist nur sehr geringe Werte von unter 0,1 ng/L gemessen. In allen Gebieten war Diuron die Komponente mit den höchsten Konzentrationen. Dagegen konnten in Küstennähe meist alle Stoffe gut nachgewiesen und bestimmt werden.

Ähnliches gilt für die drei Phenoxyessigsäure-Herbizide, die hauptsächlich küstennah gefunden wurden. In der Elbe (Stade) wurden MCPA und Mecoprop mit mittleren Konzentrationen von 4,8 ng/L bzw. 4,6 ng/L beobachtet, während 2,4-D (2,0 ng/L) und Dichloprop (1,5 ng/L) deutlich geringere Mittelwerte aufwiesen. In der äußeren Deutschen Bucht wurden für MCPA und Mecoprop nur noch Konzentrationen von 0,01 ng/L bis 0,04 ng/L beobachtet, während die anderen Verbindungen meist unter der Bestimmungsgrenze lagen (< 0,01 ng/L bis 0,02 ng/L).

Die geographischen Verteilungen der polaren Herbizidgehalte sind einander sehr ähnlich und zeichnen sich durch starkes Gefälle von der kontinentalen Küste zur offenen See aus (*Abbildung 4-53* bis *4-54*). Die regional unterschiedliche Ausprägung dieser Konzentrationsgradienten ist dabei wesentlich abhängig von der variablen Quellstärke bedeutender Punkt-

quellen, 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 Frischwasserquellen gleichzeitig erheblichen Einfluss auf die Salzgehaltsverteilung aus (Kapitel 4.1, Abbildung 4-2), 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 2008 bis 2011 durchgeführt. Es zeigt sich erneut, dass die regionale Unterteilung

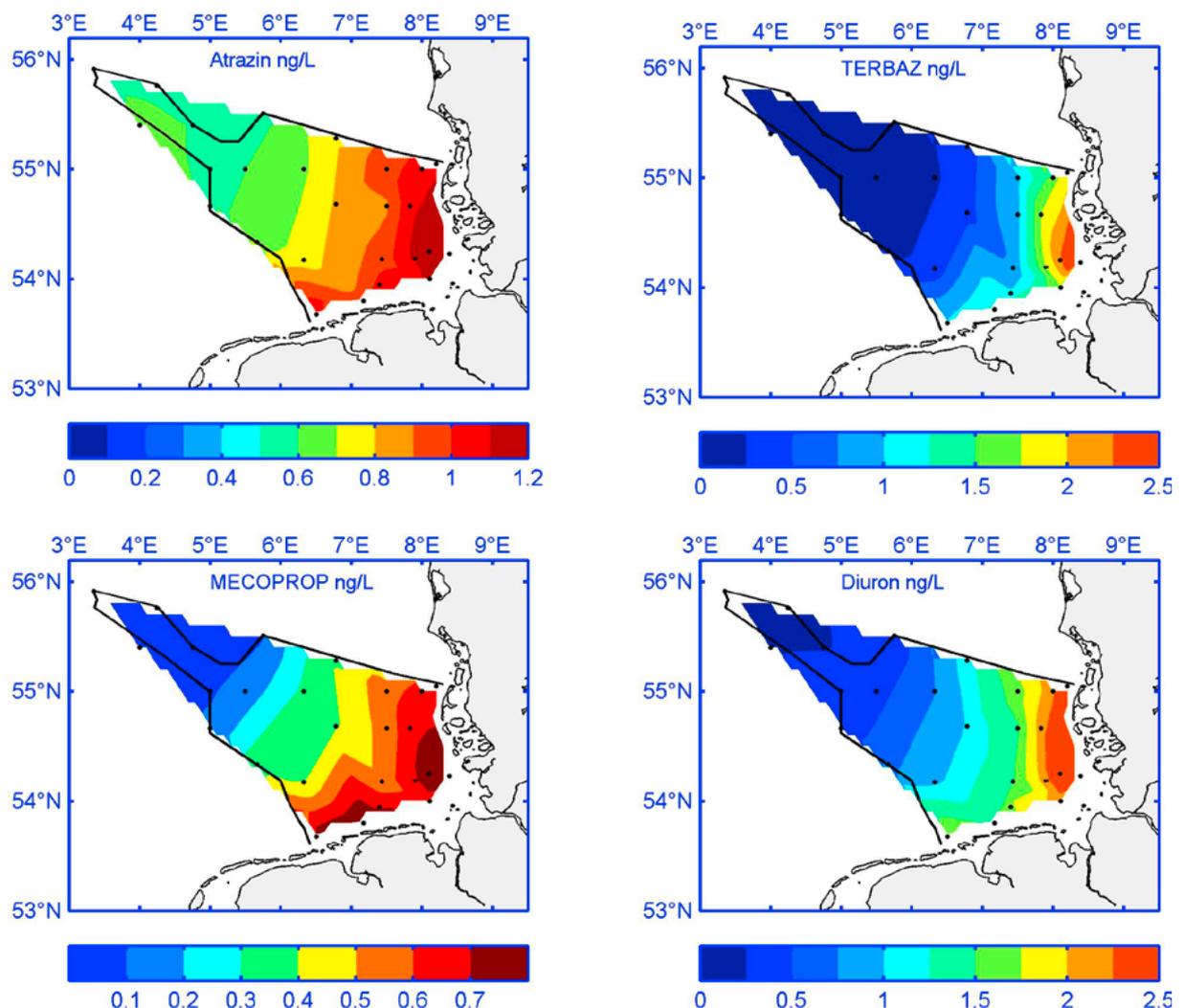


Abbildung 4-55: Konzentrationsmittelwerte (2008 bis 2011) ausgewählter Herbizide im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht.

Figure 4-55: Mean concentrations (2008 to 2011) of herbicides in surface water (5 m) in the German Bight.

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 (*Abbildung 4-55*). In der nordöstlichen Nordsee ist das Ostseewasser als eigenständige Eintragsquelle identifizierbar.

Um den Einfluss der stofflichen Eigenschaften auf die Verteilung in der Deutschen Bucht zu verdeutlichen, wurden in *Abbildung 4-56* 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 „Süßwasser-Anteil“ (SW) dargestellt. Bei streng konservativem Verhalten müssten Süßwasser-Kurve und Herbizid-Kurven aufeinander liegen. Bei Kurven, die unterhalb der SW-Kurve liegen, findet – neben der Verdünnung – eine zusätzliche Konzentrationsverringerung durch einen weiteren Prozess statt. Da die betroffenen Komponenten Irgarol und Terbutylazin bzw. Fenuron und Linuron 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 sowie Diuron und Chlortoluron ist eine Vorbelastung des Nordseewassers ein nachvollziehbarer Grund: die Kurven sind parallel zur Grundbelastung, die man im Wasser der zentralen Nordsee beobachtet (Simazin: 0,12 ng/L, Atrazin: 0,56 ng/L, Diuron: 0,2 g/L, Chlortoluron: 0,04 ng/L), gegenüber der SW-Kurve nach oben verschoben.

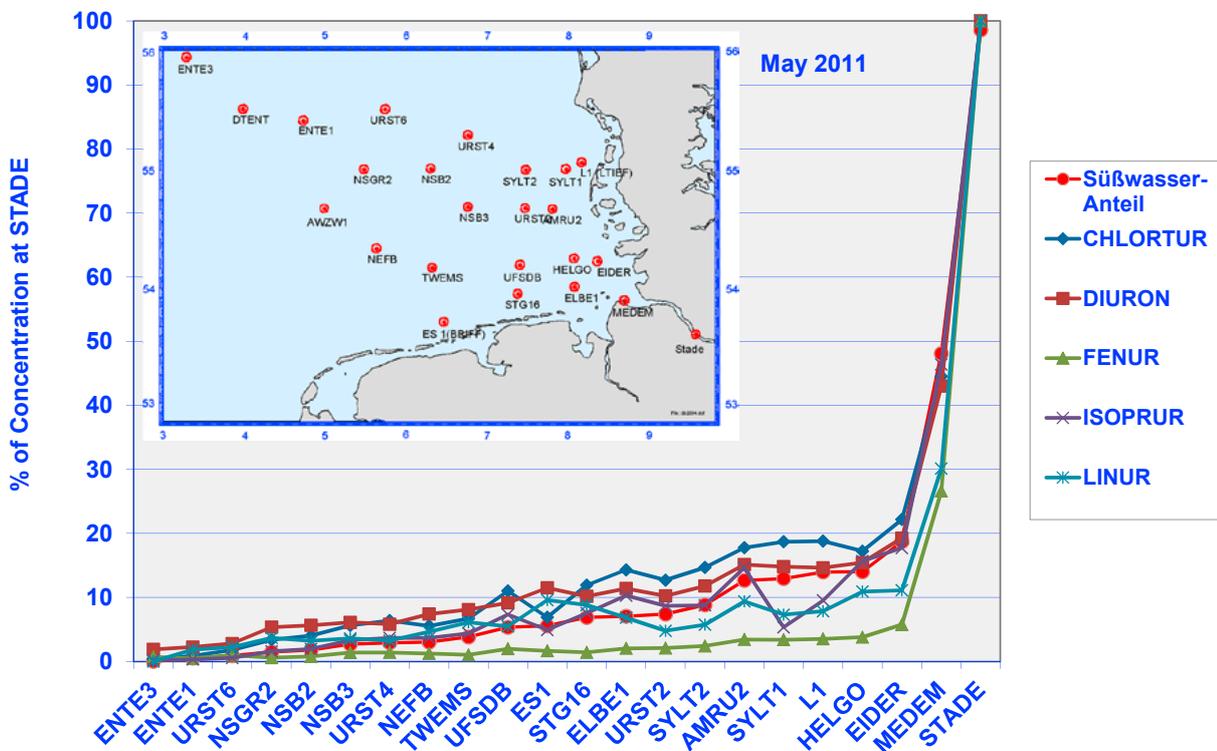


Abbildung 4-56: Herbizid-Konzentrationen in der Deutschen Bucht als %-Anteil der Stadelkonzentrationen im Mai 2011.

Figure 4-56: Concentrations of herbicides as % of concentration of Stadel in May 2011.

Mit Hilfe dieser Darstellung lassen sich stoffspezifische Besonderheiten relativ leicht erkennen. *Abbildung 4-56* 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 und Trends der Herbizidgehalte

Jahreszeitliche Variabilität

Pestizide werden meist sehr gezielt eingesetzt, sodass die Eintragsmengen und demzufolge die Konzentrationen des Wassers starken saisonalen Schwankungen unterliegen. Wie anderswo gezeigt (*THEOBALD 2013*), weisen die verschiedenen Pestizide sehr heterogene Jahresgänge und kein gemeinsames Grundmuster auf, 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 *Abbildung 4-57* werden die jahreszeitlichen Schwankungen der Konzentrationen der am häufigsten nachgewiesenen Herbizide dargestellt. Diese werden für die Elbe und für küstennahe Stationen (Salzgehalt < 32) sowie für Stationen der offenen See (Salzgehalt > 34) betrachtet. Die Fahrten wurden jeweils in drei Quartile (Q2: Mai/Jun; Q3: Aug./Sep. und Q4: Okt./Nov.) zusammengefasst. In der offenen See wurden die geringsten Schwankungen und die gleichmäßigste Verteilung beobachtet, was wegen der größeren Trägheit dieses Wasserkörpers gut erklärbar ist. In der Elbe (STADE) variierten dagegen die Konzentrationen sehr stark und die einzelnen Herbizide zeigten zu unterschiedlichen Zeiten Maximalkonzentrationen. Für Bentazon, Diuron und Terbutylazin wurden die höchsten Konzentrationen in Q3 beobachtet, während Atrazin, Metolachlor und MCPA in Q2 zu höheren Werten tendierten. Das Auftreten dieser Substanzabhängigen Maxima ist durch Quellennähe und anwendungsspezifische Einträge plausibel. Auf den küstennahen Stationen scheinen die Signale wesentlich gedämpfter und z. T. verzögert.

Langzeittrends

Nach einer nun 10-jährigen Beobachtungsphase werden erstmals langfristige Trendabschätzungen durchgeführt. In *Abbildung 4-58* sind die zeitlichen Verläufe der beiden Triazin-Herbizide Atrazin und Terbutylazin an drei exemplarischen Stationen der Deutschen Bucht und der Elbe bei Stade aufgeführt. Während die Anwendung von Atrazin seit ca. 1995 in Deutschland und vielen EU-Staaten verboten ist, wird Terbutylazin noch weiterhin verwendet. In der Elbe ist seit Beginn der Messungen ein deutlicher Abfall der Atrazin-Konzentrationen zu beobachten. In dem Zeitraum von 2001 bis 2007 sind die Konzentrationen von ca. 80 ng/L auf ca. 4 ng/L gesunken (Reduktion 95%). Seit etwa 2007 stagnieren die Werte im Bereich von 3 bis 10 ng/L. Auf der in der Elb-Fahne liegenden Station EIDER ist ein ähnlich abfallender Trend zu beobachten, hier sind die Konzentrationen von 7 ng/L (2001) auf 1 ng/L (2011) gesunken (Reduktion 86 %). Ganz anders sieht der Trend in der äußeren Deutschen Bucht auf der Station ENTE3 aus; hier ist nur ein sehr geringer Konzentrationsabfall von 0,7 ng/L auf 0,55 ng/L feststellbar (Reduktion 21%). Der deutliche Rückgang der Atrazin-Konzentrationen zeigt einerseits sehr gut, dass Beschränkungsmaßnahmen Erfolge aufweisen; auf der anderen Seite zeigen die immer noch relativ hohen Konzentrationen, dass persistente Stoffe sehr lang noch in der Umwelt zirkulieren können und das vollständige Verschwinden aus dem Ökosystem mehr als ein Jahrzehnt erfordern kann. Im Gegensatz zu Atrazin ist bei Terbutylazin weder in der Elbe noch in der Deutschen Bucht ein Rückgang der Konzentrationen zu beobachten.

Als Beispiele aus den Klassen der Phenylharnstoff- und Phenoxyessigsäure-Herbiziden sind in *Abbildung 4-59* die Konzentrationsverläufe von Diuron und Mecoprop dargestellt. Für Diuron ist bei Stade im Zeitraum von 2001 bis 2007 ein hoch variabler Bereich von 20 bis 60 ng/L zu beobachten, der danach auf unter 10 ng/L sinkt (Reduktion 75 %). Ein ähnlicher Verlauf ist in der inneren Deutschen Bucht auf der Station EIDER sichtbar; hier nehmen die Werte von 4–12 ng/L auf 2–3 ng/L ab (Reduktion 70 %). Dagegen ist auf Station ENTE3 in der äußeren Deutschen Bucht kein Trend feststellbar; die Konzentrationen schwanken auf niedrigem Niveau im Bereich von 0,1 bis 0,4 ng/L.

Mecoprop zeigt wiederum einen anderen zeitlichen Trend. Sowohl in der Elbe bei Stade als auch auf der Station EIDER sind bereits im Zeitraum von 2001 bis 2004 deutliche Konzentrationsabnahmen von ca 80 % zu beobachten (von 20 ng/L auf 4 ng/L bzw. von 5,5 ng/L auf 0,8 ng/L). Auf der Station ENTE3 ist wiederum ein deutlich geringeres Konzentrationsniveau (0,02 bis 0,06 ng/L) und kein Trend festzustellen.

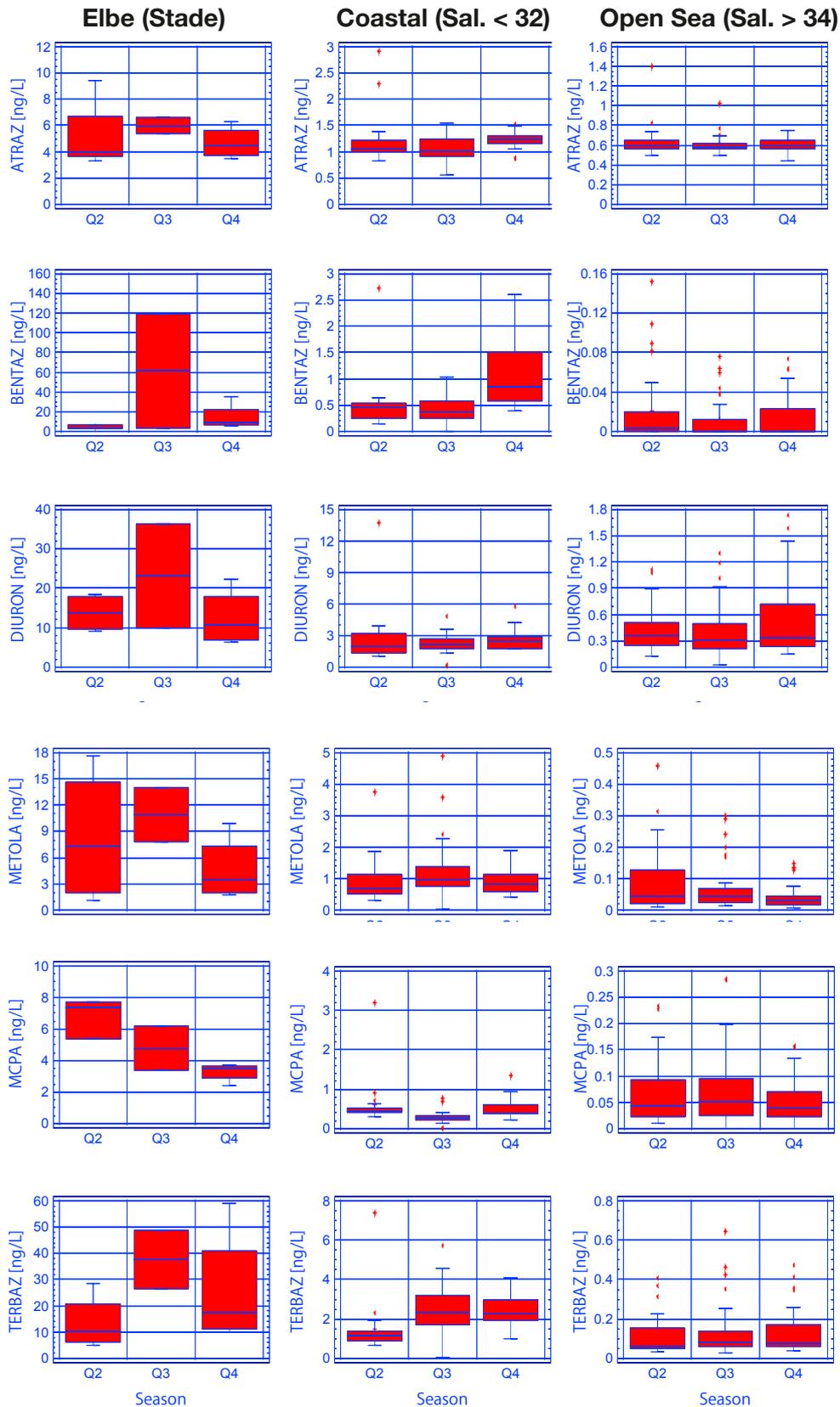


Abbildung 4-57: Saisonale Konzentrationsverteilung ausgewählter Herbizide in der Elbe, in Küstengewässern und in der hohen See; Q1: Mai/Juni, Q2: Aug./Sept., Q3: Okt./Nov. im Zeitraum 2008–2011.
Figure 4-57: Seasonal distribution of selected herbicides concentrations in the Elbe, in coastal waters and in the open sea; Q1: May/June, Q2: Aug./Sept., Q3: Oct./Nov. from 2008–2011.

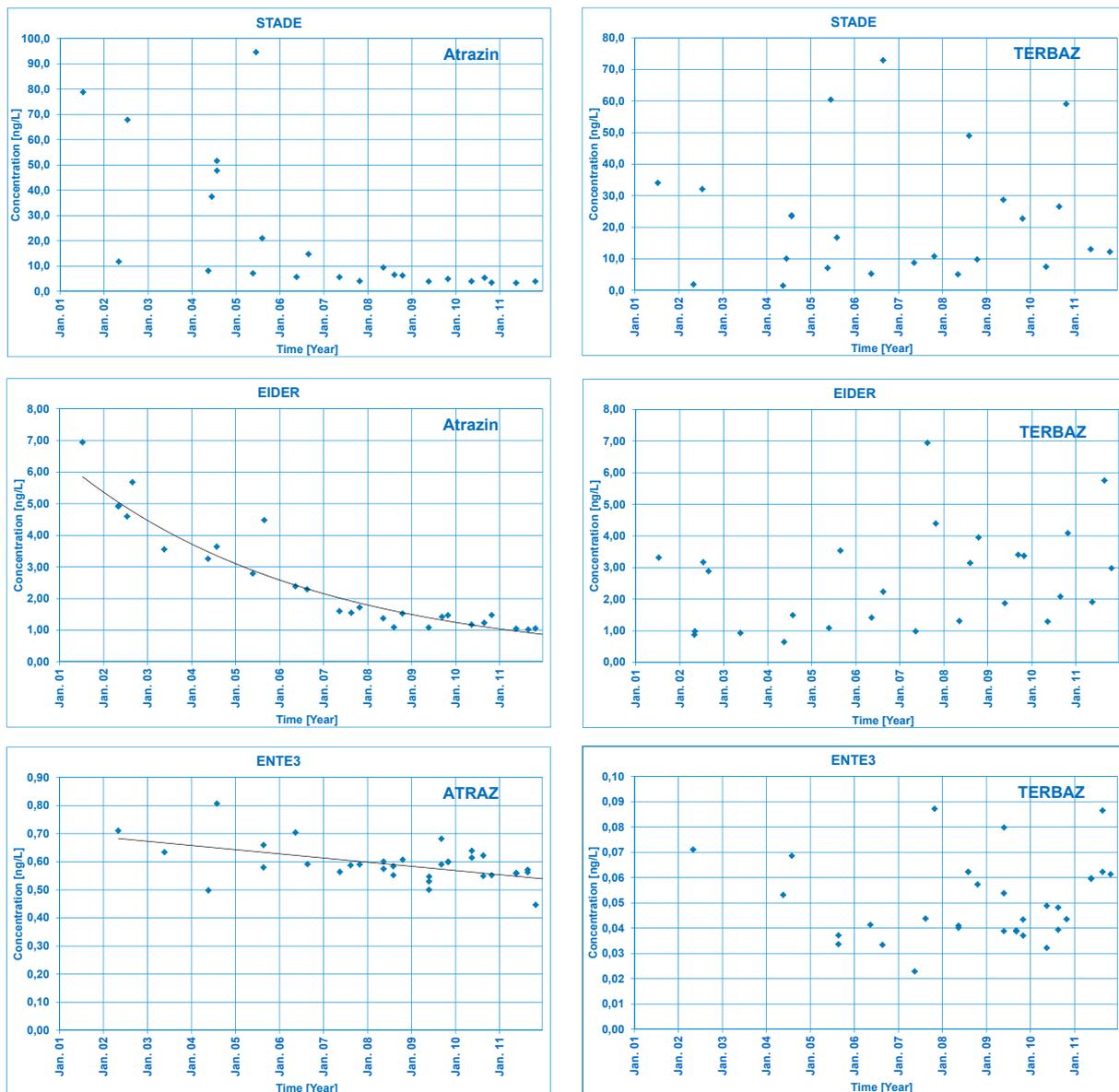


Abbildung 4-58: Zeitlicher Verlauf der Atrazin- und Terbutylazin-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) an drei Stationen der Deutschen Bucht.

Figure 4-58: Temporal trends of Atrazin and Terbutylazin surface water concentrations at three stations of the German Bight.

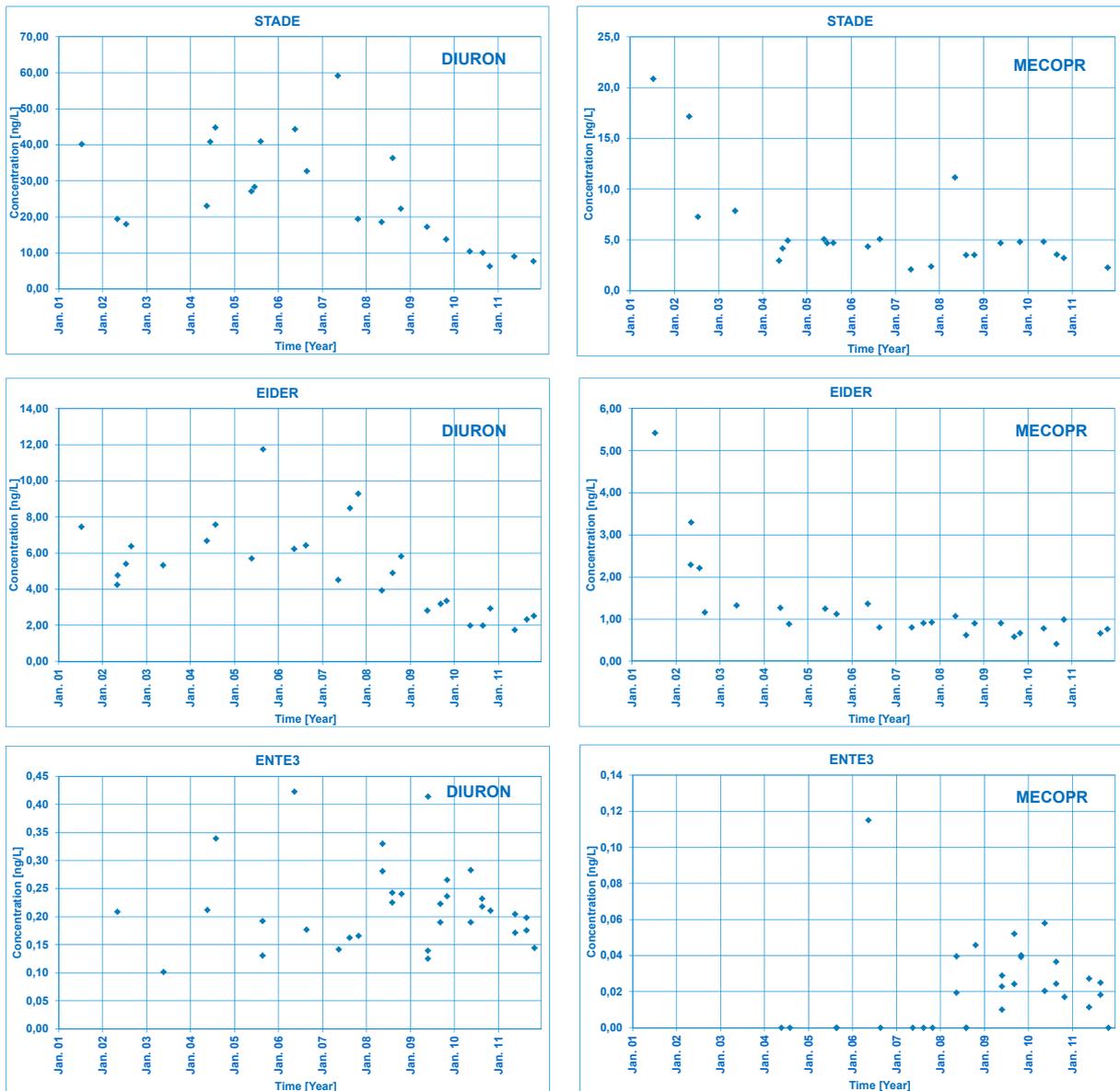


Abbildung 4-59: Zeitlicher Verlauf der Diuron- und Mecoprop-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) an drei Stationen der Deutschen Bucht.

Figure 4-59: Temporal trends of Diuron- and Mecoprop surface water concentrations at three stations of the German Bight.

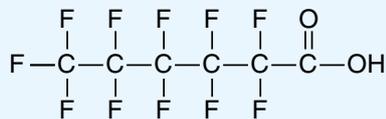
4.3.6 Neue Schadstoffe

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 Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (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 Perfluorooctansäure (PFBA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFBS) zunehmend an Bedeutung.

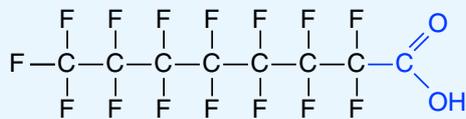
Strukturformeln der untersuchten PFC:



PFHxA Perfluorhexansäure

... ..

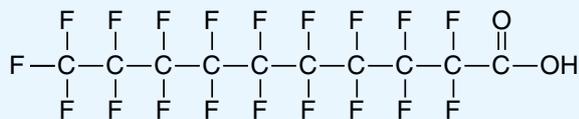
PFHpA Perfluorheptansäure



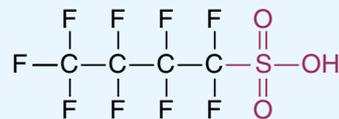
PFOA Perfluorooctansäure

... ..

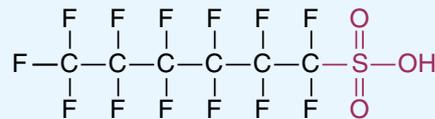
PFNoA Perfluornonansäure



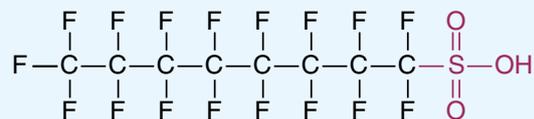
PFDeA Perfluordecansäure



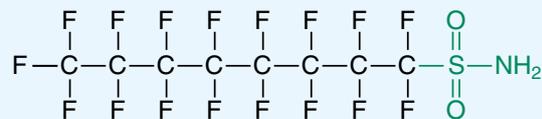
PFBS Perfluorbutansulfonsäure



PFHxS Perfluorhexansulfonsäure



PFOS Perfluorooctansulfonsäure



PFOSA Perfluorooctansulfonamid

4.3.6.1 PFC-Gehalte des Meerwassers

Perfluorierte Substanzen (PFC) wurden 2005 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 und 8,1 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 Werte zwischen 0,5 und 9,5 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 (1,6 ng/L) beobachtet (Abbildung 4-60; Abbildung 4-61).

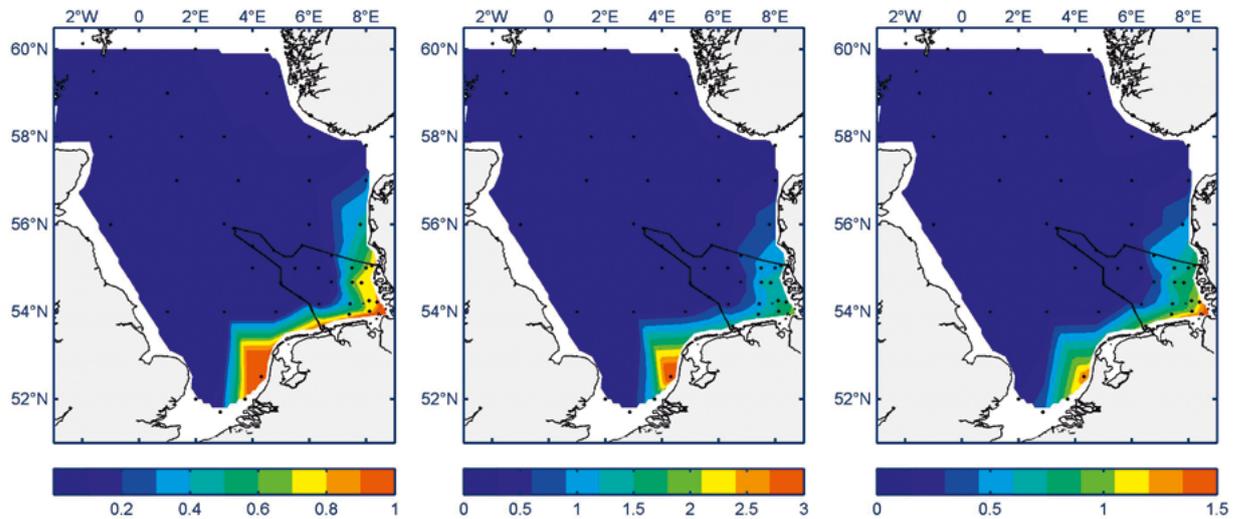


Abbildung 4-60: PFC-Konzentrationen [ng/L] im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Aug/Sept 2011. (PFBS: links; PFOA: Mitte; PFOS: rechts)

Figure 4-60: PFC concentrations [ng/L] in near-surface sea water (5 m) of the North Sea in Aug/Sept 2011. (PFBS: left; PFOA: middle; PFOS: right)

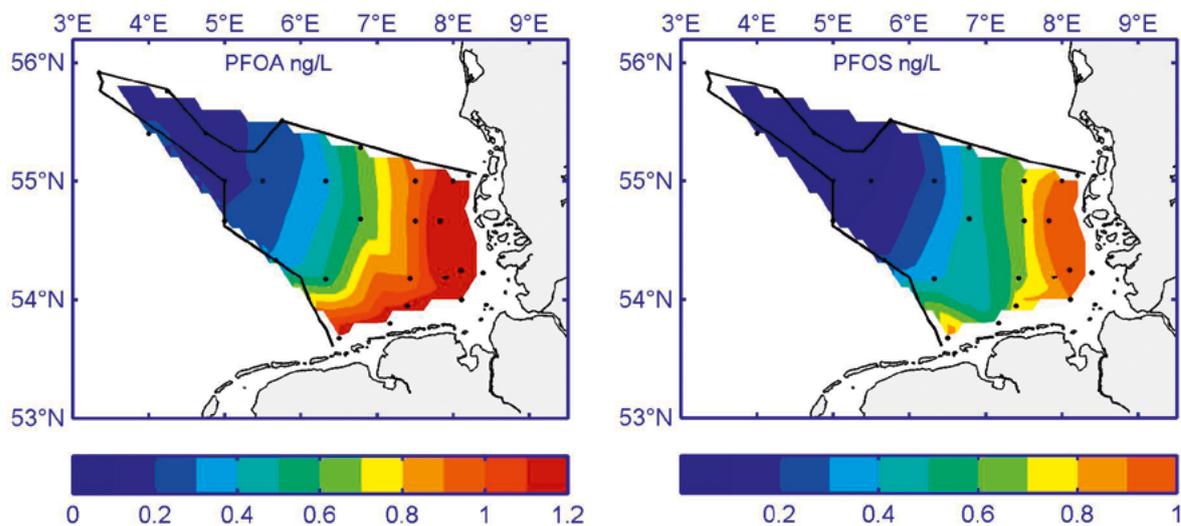


Abbildung 4-61: Konzentrationsmittelwerte (2008 bis 2011) von PFOA und PFOS im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht.

Figure 4-61: Mean concentrations (2008 to 2011) of PFOA und PFOS in surface water (5 m) in the German Bight.

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.

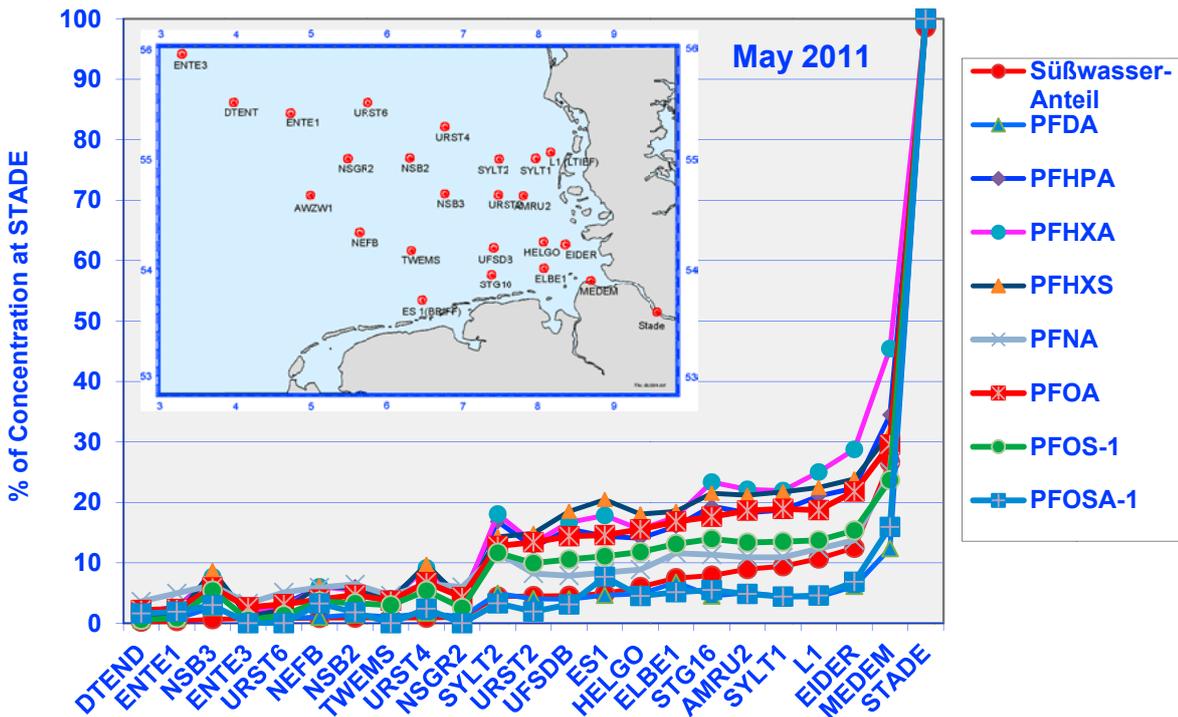


Abbildung 4-62: PFC-Konzentrationen in der Deutschen Bucht als %-Anteil der Stade Konzentrationen im Mai 2011.

Figure 4-62: Concentrations of PFC as % of concentration of Stade in May 2011.

4.3.6.3 Zeitliche Trends

Obwohl die Messungen erst in den Jahren 2003 bis 2005 begannen, ist eine erste Untersuchung zeitlicher Trends möglich. Die Entwicklung der Konzentrationen von PFOA und PFOS ist in *Abbildung 4-63* exemplarisch an drei Stationen der Deutschen Bucht und Stade gezeigt. Auf der Elbe-Station bei Stade sind nicht nur die höchsten Konzentrationen (PFOA: 3,2–10,3 ng/L; PFOS: 2,3–8,2 ng/L) sondern auch die höchsten Schwankungen zu beobachten. Trotzdem ist ein deutlicher Rückgang in dem Zeitraum von 2005 bis 2011 festzustellen; PFOA sinkt von ca. 9 ng/L auf unter 4 ng/L (Reduktion um 67 %), während PFOS von 8 ng/L auf 3 ng/L sinkt (Reduktion um 62 %). Auf der Station „EIDER“ (mittlerer Salzgehalt: 29) sind die Schwankungen interessanterweise deutlich geringer als in der Elbe, so dass die auch hier zu beobachtenden abnehmenden Trends deutlicher erkennbar sind. PFOA nimmt von 4 ng/L auf 1,3 ng/L ab (67 %) und PFOS von 1,7 ng/L auf 1 ng/L (41 %). Die zeitlichen Verläufe sind sehr ähnlich: die Abnahmen sind von 2005 bis etwa 2008 am stärksten und gehen in den drei Folgejahren in eine Stagnationsphase über.

Auf der in der zentralen Nordsee liegenden Station ENTE 3 (S=34,9) ist ein deutlich verschiedenes Verhalten zu beobachten. Die dort deutlich reduzierten Konzentrationen zeigen für PFOA praktisch keinen Trend und schwanken in dem Bereich von 0,1 bis 0,2 ng/L; während PFOS in noch geringeren Konzentrationen vorliegt (0,03 bis 0,08 ng/L), aber einen leichten Abwärtstrend aufweist, der jedoch aufgrund der hohen Schwankungen nicht sehr sicher ist.

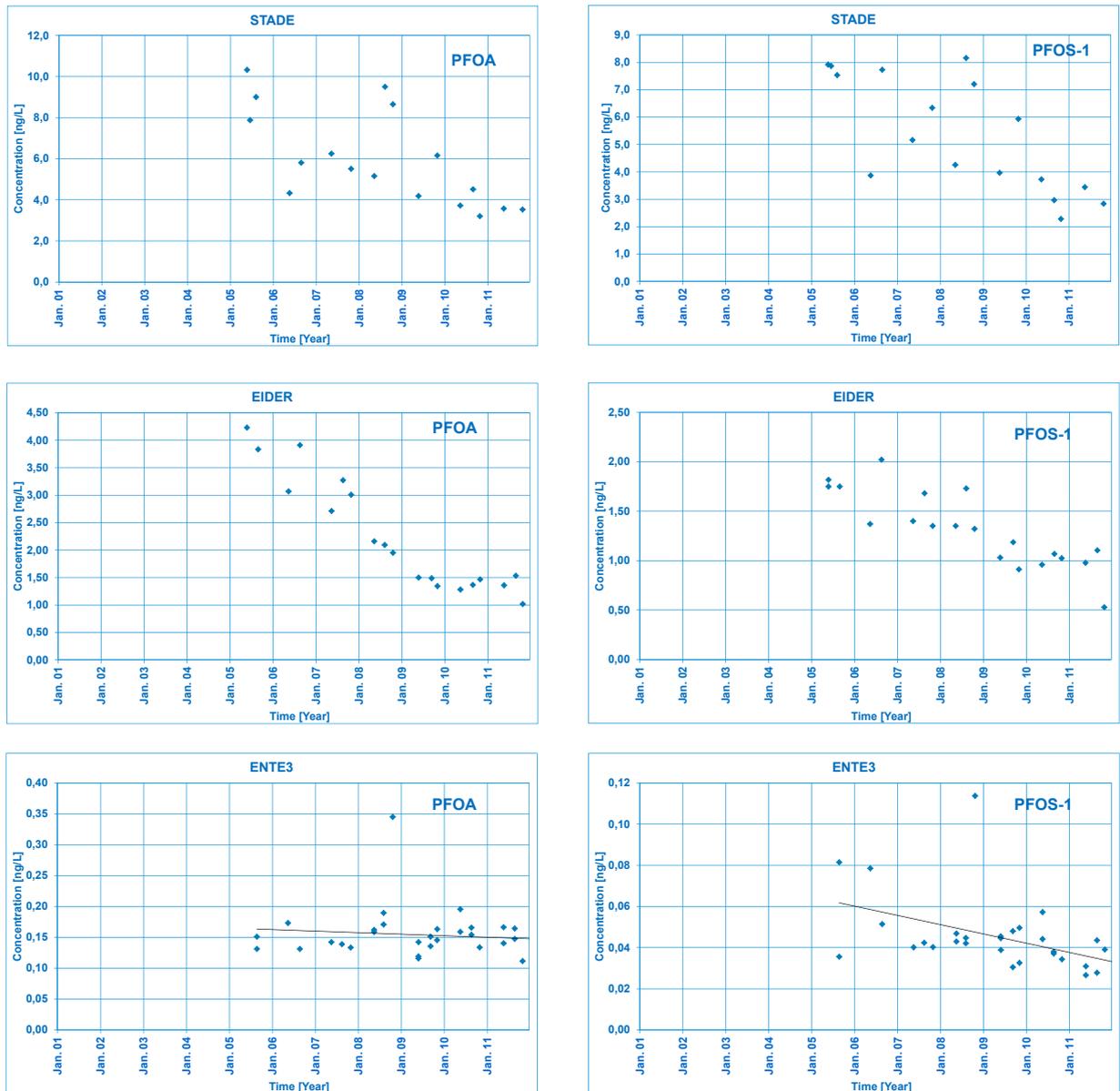


Abbildung 4-63: Zeitlicher Verlauf der PFOA und PFOS-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) an drei Stationen der Deutschen Bucht.

Figure 4-63: Temporal trends of PFOA and PFOS surface water concentrations at three stations of the German Bight.

4.4 Metalle

Stefan Schmolke

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

Im BSH wurde mit der Überwachung der Metallgehalte im Meerwasser, Schwebstoff und Sediment in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts begonnen. Sie ist national in die Überwachungsprogramme des Bund-Länder-Messprogramms (BLMP) und international in die Monitoringprogramme der Meeresschutzkonventionen für Nordsee (OSPAR) und Ostsee (HELCOM) eingebettet und trägt in Zukunft zur Bewertung des angestrebten „guten Umweltzustandes“ im Rahmen der europäischen Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie bei.

Hauptuntersuchungsgebiet ist die Deutsche Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ). Das aktuelle Messprogramm umfasst drei bis 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.

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 flüssig vor und ist durch einen relativ hohen Dampfdruck gekennzeichnet. Gleichzeitig ist Quecksilber in der Atmosphäre mit einer durchschnittlichen Verweilzeit von einem Jahr sehr reaktionsträge. Folglich werden regionale Quecksilberemissionen über die Atmosphäre global verteilt. Aus der Atmosphäre wird es in elementarer und in reaktiver Form überwiegend durch Niederschläge in das Meer eingetragen.

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

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

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

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

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

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

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

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.

4.4.2 Bewertungskriterien

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 Werte sind in *Tabelle 4-6* zusammengefasst.

Hintergrundkonzentration:

- 1) **OSPAR BRC** (Background Reference Concentration, OSPAR 1997, OSPAR 2005): Die angegebenen BRC-Werte basieren auf Messungen in unbelasteten Gebieten der OSPAR-Region „Northern North Sea“.

Ökotoxikologische Bewertungskriterien:

- 2) **WRRL AA-EQS** (Annual Average Concentration Environmental Quality Standard; (RICHTLINIE 2008/105/EG)) Umweltqualitätsstandard zur chronischen Belastung von Küstengewässern.
- 3) **WRRL MAC-EQS** (Maximum Acceptable Concentration Environmental Quality Standard; (RICHTLINIE 2008/105/EG)) Nicht zu überschreitende Maximalbelastung (kurzfristige). (Die WRRL gibt keine EQS für die Metalle Kupfer und Zink an. Aus diesem Grund sind ähnlich abgeleitete 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 Salzwasserökosystemen.

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 unterschiedlicher 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.

[ng/L]	Cd	Cu	Pb	Hg	Zn	Ni
BRC¹⁾ (OSPAR)	8-25	50-90	10-20	0,2-0,5	250-450	200-250
AA-EQS²⁾ (WRRL)	200	-	7200	50	-	20000
MAC-EQS³⁾ (WRRL)	450	-	-	70	-	-
WQS⁴⁾ (US-EPA)	8800	3100	8100	940	8100	8200

Tabelle 4-6: Kriterien 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 4-6: Assessment criteria metals in water. EU Water Framework Directive (EU-WFD), OSPAR Convention, US Environmental Protection Agency (US-EPA).

4.4.2.2 Sediment

Die Bewertung der Metallbelastung des Sedimentes ist weitgehend an das von OSPAR verwendete Bewertungsschema angelehnt (vergl. hierzu OSPAR 2009b). Alle verwendeten Werte sind in *Tabelle 4-7* zusammengefasst.

- 1) **BSH BC** (Background Concentration) Hintergrundkonzentrationen, abgeleitet aus der Feinkornfraktion (Korngröße < 20 µm) älterer, mutmaßlich weitgehend unbelasteter 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, vergl. 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:

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.

mg/kg	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
BSH BC ¹⁾	0,08–0,26	16–29	0,02–0,04		12–38	81–116
OSPAR BC ²⁾	0,2	20	0,05	30	25	90
OSPAR BAC ³⁾	0,31	27	0,07	36	38	122
NOAA ERL ⁴⁾	1,2	34	0,15	20,9 ¹⁾	46,7	150

Tabelle 4-7: Kriterien 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 4-7: Assessment criteria 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 (US-NOAA, Effect Range Low 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 so genannten „Effect Range Low“ (ERL) Werte (Tabelle 4-7).

4.4.3 Oberflächenwasser

Über die vier Jahreszeiten verteilt wurden im Zeitraum von Januar 2007 bis November 2011 insgesamt 34 Überwachungsfahrten, unter Beteiligung der Metallanalytik, in die Deutsche Bucht unternommen sowie 5 weitere in die gesamte Nordsee. In der Deutschen Bucht wurden 45 Stationen regelmäßig beprobt, um die Metallbelastung des Oberflächenwassers zu bestimmen. Seit 2007 werden die Überwachungsfahrten überwiegend mit Charterschiffen durchgeführt.

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 gebracht und dort 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 den 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.

Abbildung 4-64 zeigt die Verteilung einiger Elemente zwischen schwebstoffgebundener und gelöster Fraktion. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der gelöst vorliegenden Metallgehalte, bezogen auf den Gesamtmetallgehalt der Wasserproben, in einem Boxdiagramm³. In die Statistik einbezogen sind alle Messungen, die im Zeitraum von 2000 bis 2010 jeweils im Frühjahr (Januar–März) durchgeführt wurden. Jede einzelne Teilgrafik von links oben nach rechts unten zeigt die Verhältnisse bei unterschiedlichen Salzgehalten (links oben Brackwasser, rechts unten Meerwasser). Deutlich ist die in der Reihe Fe > Pb > Mn > Zn > Ni > Cu > Cd abnehmende Affinität der Elemente zum Schwebstoff zu erkennen. Eine weitere Diskussion der Verteilung zwischen Schwebstoff und gelöster Phase findet sich in *SCHMOLKE 2013 (Seite 238 ff.)*.

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. Elemente, wie Uran, die im Meerwasser stärker angereichert sind als in den Süßwasserzuflüssen, zeigen dagegen ein mit dem Salzgehalt weitgehend identisches Verteilungsmuster in der Deutschen Bucht. Entlang dem Mischungsverhältnis von ozeanischem Wasser und Küstenwasser zeigt sich idealerweise ein linearer Konzentrationsgradient konservativer Spurenbestandteile. Dieser reinen Mischung überlagern 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 verhaltenden Elemente zeigen eine ähnlich starke Korrelation mit dem Salzgehalt wie die Nährstoffe (siehe *Kapitel 4.2*). Dies gilt vor allem für die gelösten Kupfer- und Nickelgehalte, aber mit Einschränkungen auch für Cadmium.

³ Die Boxstatistik bietet eine kompakte Zusammenfassung wichtiger Verteilungskennzahlen. Das Boxsymbol zeigt 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). Messwerte, die einen Abstand von 1,5 Interquartilbreiten zu den Interquartilgrenzen überschreiten, sind durch Kreuze als Ausreißer kenntlich gemacht.

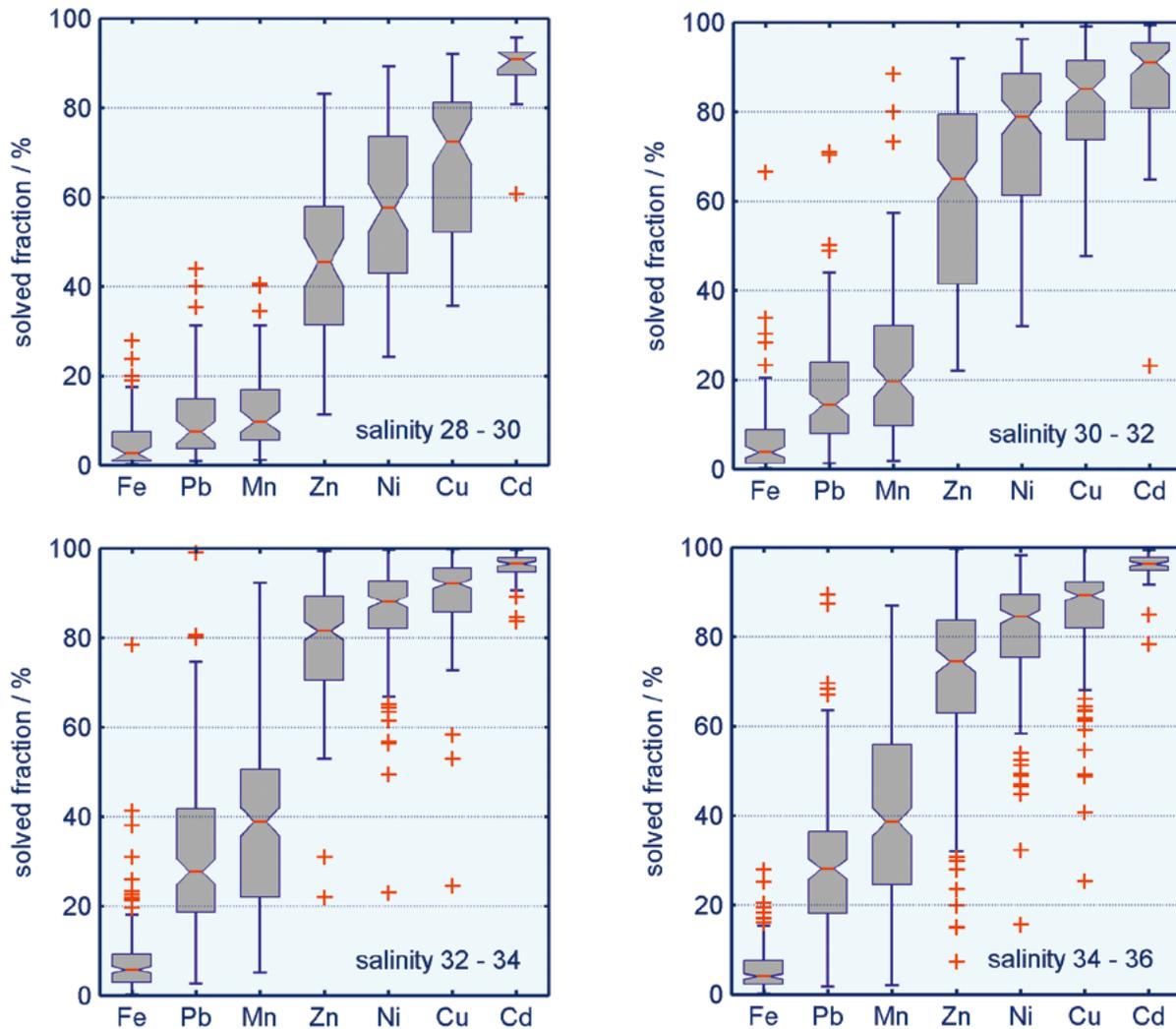


Abbildung 4-64: Prozent-Verteilungsstatistik der gelöst vorliegenden Metallgehalte bezogen auf den Gesamtmittelgehalt der untersuchten Meerwasserproben in einer Boxdarstellung. Jede Box stellt die Streuung aller Wintermesswerte (JFM) eines Elements im Zeitraum von 2000 bis 2011 dar, wobei Wasserkörper unterschiedlicher Salzgehalte (28–30, 30–32, 32–34, >34) in eigenen Teilgrafiken zusammengefasst sind.

Figure 4-64: Distribution statistics of the percent fraction of dissolved to total metal concentrations in sea water as box and whisker plots. All box statistics are based on winter samples (JFM) from 2000–2011 and are separated in four figures by increasing salinity ranges (upper left to lower right: 28–30, 30–32, 32–34, >34).

Die in SCHMOLKE 2013 vorgestellte Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Salzgehalt und gelöst vorliegenden Metallgehalten ergibt ein differenziertes Bild. Vor allem die Elemente mit einer relativ hohen Affinität zum Schwebstoff (u. a. Blei, Quecksilber) zeigen in der Deutschen Bucht 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.

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. Grundsätzlich zeigen die Monitoringergebnisse eine abnehmende saisonale Abhängigkeit der gelöst vorliegenden Metallgehalte mit zunehmenden Salz- und abnehmenden Schwebstoffgehalten. Die Saisonalität der gelöst vorliegenden Metallgehalte wurde in *SCHMOLKE 2013 (Seite 232 ff.)* detailliert beschrieben. Demnach lassen sich folgende jahreszeitlichen Verläufe differenzieren:

1. Maximum gelöster Metallgehalte im Winter bis in das Frühjahr hinein, Minimum im Sommer und wieder zunehmende Gehalte im Herbst. Dieses Muster zeigen vor allem die Elemente Cadmium und Zink, in abgeschwächter Form Nickel. Die jahreszeitlichen Profile dieser Elemente verhalten sich in groben Zügen parallel zu den biologischen Wachstums- und Remineralisierungszyklen, wie sie auch für die Nährstoffgehalte prägend sind.
2. Ausgeprägtes Maximum im Winter und Spätherbst. Vor allem Blei zeigt diese Charakteristik. Anders als bei Typ 1 zeigt Blei kaum noch erhöhte Konzentrationen im Frühjahr. Als prägender Prozess dieses Typs kann die Resuspension kolloidalen Materials gesehen werden, das während der stürmischen Wintermonate vermehrt in die Wassersäule gelangt und dort bis ins Oberflächenwasser transportiert wird. Teile dieses Materials sind fein genug, um bei der Trennung von gelöster und schwebstoffgebundener Fraktion mit $0,45\ \mu\text{m}$ Porenfiltern den Filter zu passieren, in das Filtrat zu gelangen und dort als „gelöst“ vorliegendes Blei gemessen zu werden.
3. Konzentrationsmaximum im Sommer. Diesen besonderen jahreszeitlichen Verlauf zeigt der gelöste Mangangehalt im Meerwasser. Die Ursache liegt in der vom Sauerstoffgehalt der Wassersäule abhängigen Manganspeziation. Mit abnehmendem Sauerstoffgehalt verschiebt sich das Gleichgewicht vom wasserunlöslichen Mn^{4+} (z. B. MnO_2) zum gelöst vorliegenden Mn^{2+} . Ein erhöhter, gelöst vorliegender Mangangehalt in der Wassersäule deutet demnach auf reduzierte Sauerstoffgehalte in der sommerlichen Wassersäule der Deutschen Bucht hin.
4. Keine ausgeprägte saisonale Abhängigkeit. Zum Beispiel zeigt Kupfer im Wasserkörper mit Salzgehalten zwischen 30 und 32 keinen signifikanten Jahresgang.

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.

4.4.3.4 Verteilungsmuster der Metallgehalte im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht

Im *Kapitel 4.4.3.3* wurde kurz auf die saisonale Abhängigkeit der Metallgehalte im Wasser hingewiesen. 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 ist deutlich in den räumlichen Konzentrationsverteilungen der gelöst vorliegenden Metallgehalte erkennbar. Alle Wintermessungen der Elemente Kupfer, Quecksilber und Nickel sowie Mangan, Blei und Zink in den Jahren 2008 bis 2011 sind in Karten (*Abbildung 4-65* und *4-66*) dargestellt. Die verwendete Farbskala ist in allen Darstellungen gleich und zeigt in den Schattierungen von blau nach rot zunehmende Konzentrationen an. Die Farben repräsentieren keine Risikobewertung. Eine Bewertung der gemessenen Gehalte wird in *Kapitel 4.4.3.7* vorgenommen.

Vor allem überwiegend gelöst vorliegende Elemente (Cu, Ni, Cd) bilden einen deutlich ausgeprägten, über die Jahre im Wesentlichen gut reproduzierten, von der Küste zur offenen See hin abnehmenden Gradienten aus.

In der Regel transportiert die Strömung 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 *Abbildung 4-65* zeigt sich dies besonders durch die erhöhten Kupfer- und Nickelgehalte entlang der nordfriesischen Küste. Genauso ist bei diesen Elementen der Beitrag der weiter westlich gelegenen Flusssysteme erkennbar. Die erhöhten Gehalte entlang der niedersächsischen Küste zeigen dies. Die hier flacheren, weit in die Deutsche Bucht hinein reichenden Gradienten zeigen jedoch, dass nicht allein die Abflüsse der Weser und Ems, sondern ebenso weiter westlich liegende Emissionen aus dem Rhein und andere kontinentale Flusssysteme beitragen. Auch der direkte Oberflächenabfluss spielt hier eine Rolle.

Blei, als ein Element mit starker Schwebstoffaffinität, zeigt eine weniger eindeutige räumliche Verteilungsstruktur. Es treten an unterschiedlichen Stellen der Deutschen Bucht unvermittelt erhöhte Konzentrationen auf. Diese Gebiete befinden sich jedoch meist in Küstennähe im flacheren Wasser. Die Vermutung liegt nahe, dass resuspendiertes kolloidales Sedimentmaterial im flachen Küstenstreifen in den filtrierten Proben angereichert und für die erhöhten Messwerte verantwortlich ist.

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 Eintrag erkennbar.

Die Gehalte an reaktivem Quecksilber im Oberflächenwasser der deutschen AWZ zeigen vor allem im küstennahen Bereich und entlang der nordfriesischen Küste erhöhte Konzentrationen. Die räumliche Verteilung identifiziert die Elbe als wichtige Quelle der Quecksilberbelastung der Deutschen Bucht. Auch entlang der ostfriesischen Küste werden erhöhte Quecksilberkonzentrationen gemessen, allerdings deutlich weniger ausgeprägt.

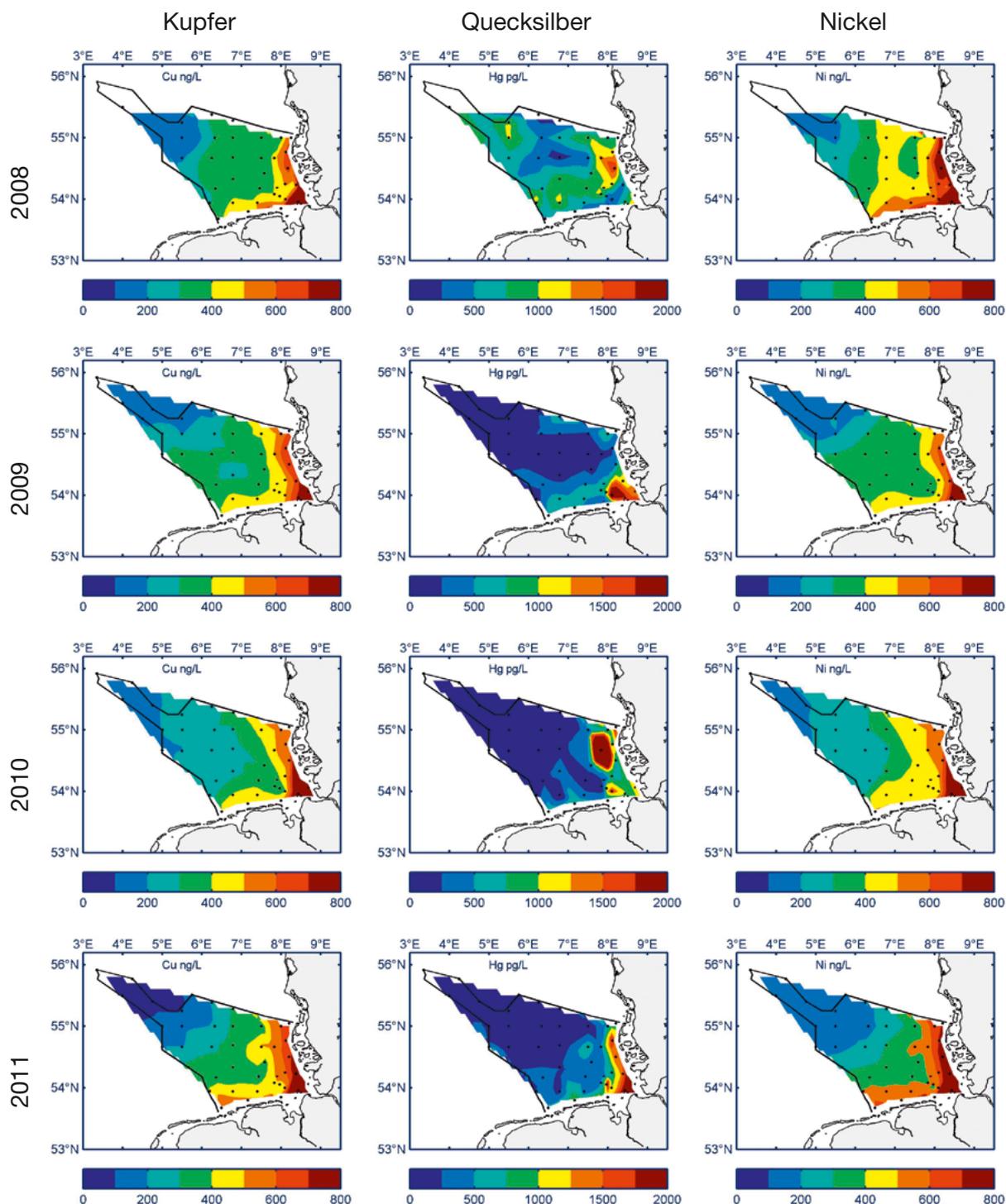


Abbildung 4-65: Räumliche Verteilung der Elemente Kupfer, Quecksilber und Nickel (Spalten) im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (Zeilen).

Figure 4-65: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions (Copper, Mercury and Nickel (columns) in filtrated water in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (rows).

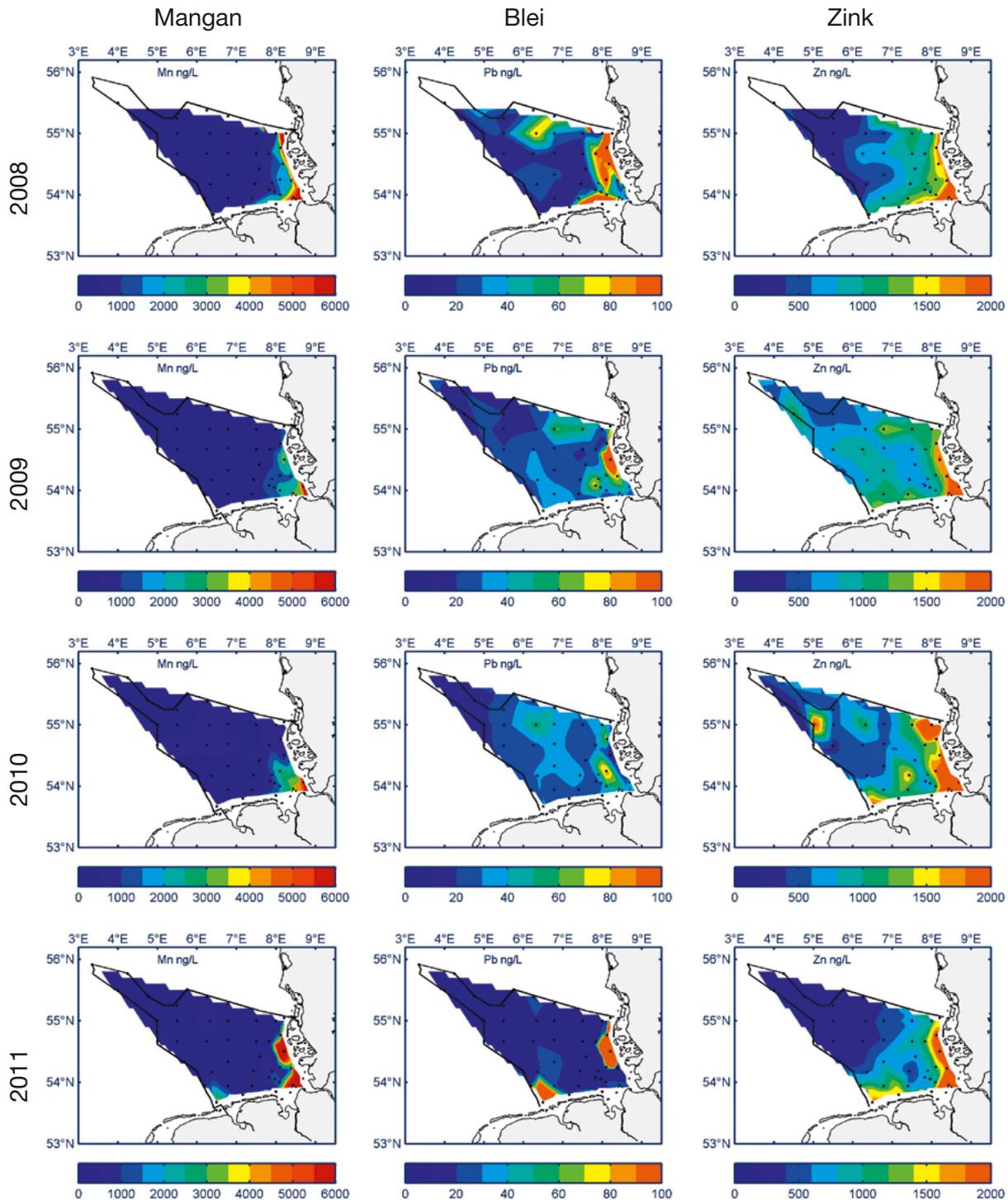


Abbildung 4-66: Räumliche Verteilung der Elemente Mangan, Blei und Zink (Spalten) im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (Zeilen).

Figure 4-66: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions (Manganese, Lead and Zink (columns) in filtrated water in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (rows).

4.4.3.5 Verteilungsmuster der Metalle im Oberflächenwasser der gesamten Nordsee im Sommer 2010

Abbildung 4-67 fasst die Messungen in den Seewasserproben der Sommeraufnahme 2010 zusammen (gelöste Fraktion). Es zeigt sich eine typische sommerliche Verteilungsstruktur. Die überwiegend gelöst vorliegenden Elemente Cu, Ni, Hg sind im südlichen Teil der Nordsee mit zunehmender Küstennähe stärker angereichert. Deutlich setzt sich die Deutsche Bucht als Belastungsschwerpunkt ab. Reaktives Quecksilber zeigt den stärksten Gradienten, Kupfer und Nickel sind auch im Wasser der weiter westlich liegenden südwestlichen Nordsee angereichert. Hier zeigen sich die Einträge aus den westlich liegenden Flusssystemen. Dagegen werden in der gesamten sommerlichen Nordsee nur sehr niedrige Konzentrationen der Elemente Blei und Zink gemessen (vergl. hierzu auch Kapitel 4.4.3.3). Mangan zeigt im Sommer im Küstenbereich der östlichen und der südlichen Nordsee erhöhte Konzentrationen. Diese deuten auf eine reduzierte Sauerstoffsättigung der Wassersäule hin. Auffällig ist die weit in die offene Nordsee ausgedehnte Zone erhöhter Mangangehalte nördlich des IJsselmeers. Auch hier zeigt sich der Einfluss von Rhein und Schelde. Eine ähnliche räumliche Struktur wurde auch 2006 beobachtet. Diese korrelierte sehr gut mit der hier ebenfalls nachgewiesenen geringen Sauerstoffsättigung von lediglich 75% im Bodenwasser.

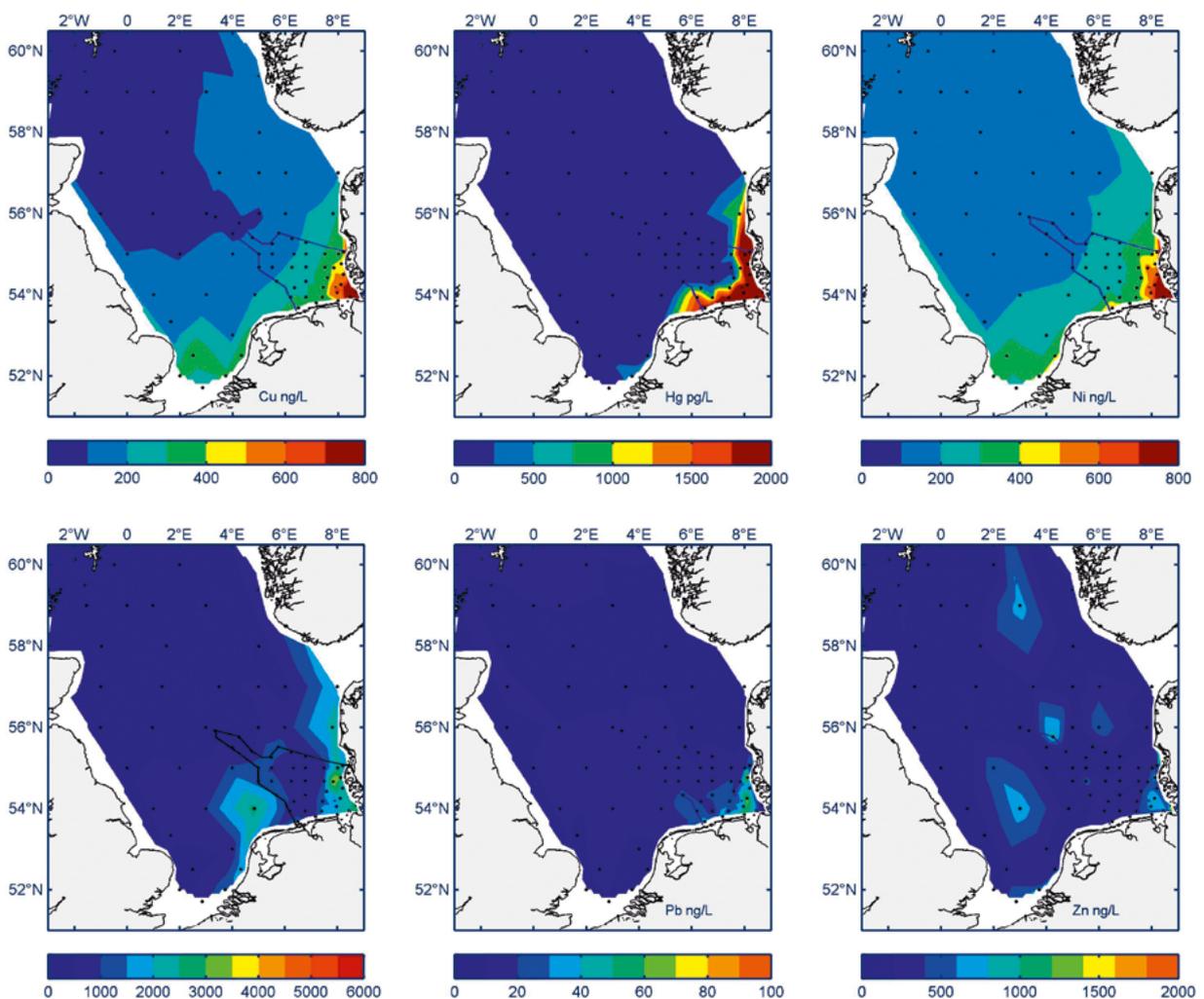


Abbildung 4-67: Räumliche Struktur der gelösten Elementgehalte (Kupfer, Quecksilber, Nickel, Mangan, Blei, Zink) im filtrierten Oberflächenwasser im Sommer 2010.

Figure 4-67: Spatial structure of solved element concentrations in near surface water during the summer 2010 surveillance cruise.

4.4.3.6 Langzeitliche Entwicklung der Metallbelastung im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht

Die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Metallgehalte im Oberflächenwasser wird auf Basis der Messungen im küstennahen Wasser (Salzgehalt: 30–32) durchgeführt. Dieser Wasserkörper ist einerseits noch durch die regionalen Küsten- und Süßwasserzuflüsse beeinflusst, andererseits dominieren hier lokale, küstennahe Einzelquellen und sehr flache Küstenstreifen noch nicht. Weiterhin werden bei der Trendauswertung lediglich Probenahmen aus dem ersten Quartal des Jahres berücksichtigt, um die jahreszeitlich bedingte Varianz der Datensätze auszuklammern. In *Abbildung 4-68* sind die jährlichen Verteilungsstatistiken der Elemente Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn im Zeitraum von 1990 bis 2011 als Zeitreihe dargestellt. Alle diesen Auswahlkriterien entsprechenden Messwerte der einzelnen Jahre sind in Box and Whisker Symbolen zusammengefasst. Zur Bewertung der Messwerte ist das OSPAR BRC Intervall (Background Reference Concentration) 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. Seit 2008 wurden überwiegend geringe Bleigehalte gemessen, die unter 50 ng/L lagen. Die Quecksilbergehalte bewegten sich im üblichen Rahmen, seit 2008 eher im niedrigen Bereich, mit Konzentrationen, die im Wesentlichen unter 1 ng/L lagen.

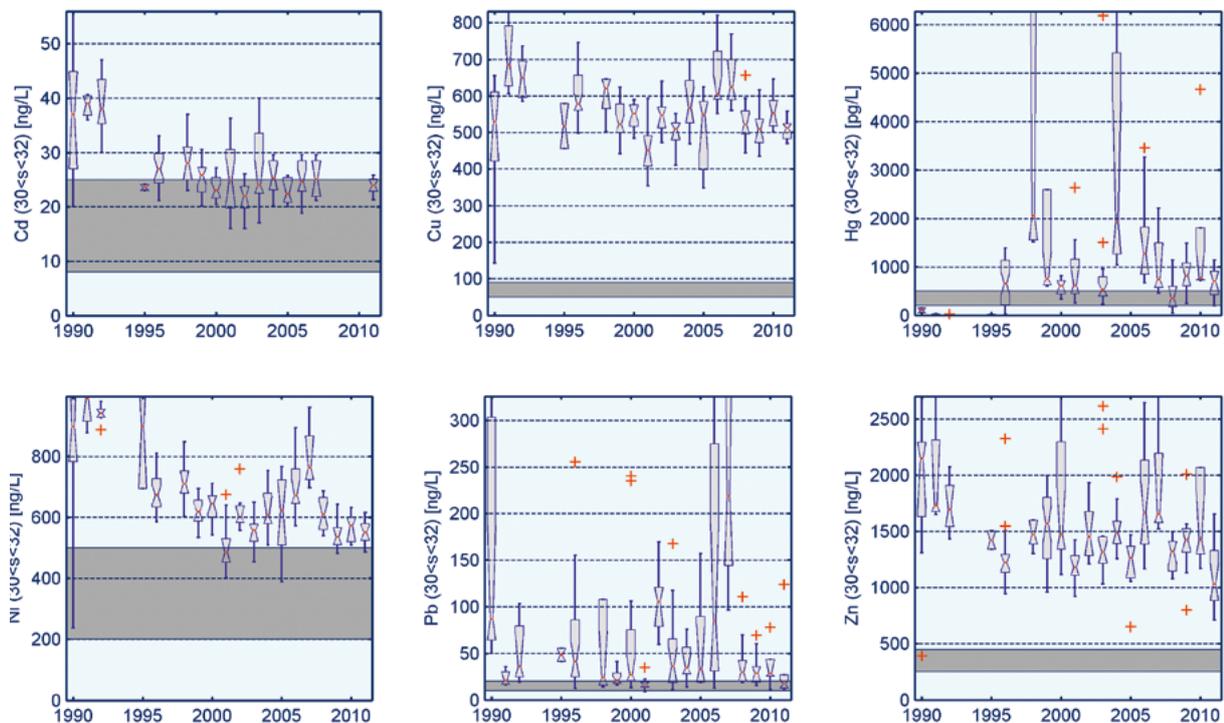


Abbildung 4-68: Zeitreihe der jährlichen Verteilungsstatistiken der gelösten Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) im Winter (Jan./Feb./Mrz.) im filtrierten küstennahen (Salzgehalt 30–32) Oberflächenwasser bei 10 m Wassertiefe in einer Boxdarstellung. OSPAR-Hintergrundwerte sind als grauer Balken eingefügt.

Figure 4-68: 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 bei Cadmium 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, für Cadmium 2002 gemessen. Seitdem blieben die Cadmiumgehalte mit gewissen Schwankungen nahe den Hintergrundkonzentrationen auf gleichbleibend niedrigem Niveau. Besonders deutlich nahmen von 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. Anschließend, von 2008 bis 2011 wurden dann wieder Konzentrationen gemessen, die denen um die Jahrtausendwende entsprachen. Insgesamt befand sich das Konzentrationsniveau der Elemente Zn und Cu im Jahr 2011 um den Faktor 2 bis 5 über den angenommenen Hintergrundwerten, die der Elemente Pb, Ni, Cd und Hg nahe den Hintergrundwerten.

4.4.3.7 Bewertung Wasser

Zur Bewertung der Metallgehalte im Wasserkörper wird ein dreistufiges Bewertungssystem angewendet, wie es in ähnlicher Form von OSPAR für die Sedimentbewertung im Rahmen des QSR 2010 (OSPAR 2009a) verwendet wurde (*Tabelle 4-6*). Es wird zunächst getestet, ob die im Wasser gemessenen Konzentrationen nahe oder gleich dem „natürlichen“ Hintergrundwert sind. Hiermit wird die Erreichung des gleichlautenden Ziels der OSPAR-Meereschutzkonvention geprüft. Ist diese Bedingung erfüllt, wird der Status als „blau“ eingestuft. Bei Überschreitung des Hintergrundwertes wird geprüft, ob bei den gemessenen Konzentrationen mit negativen Effekten im Ökosystem zu rechnen ist. Hierzu wird gegen ein ökotoxikologisches (Effekt-) Bewertungskriterium geprüft (siehe hierzu auch *Kapitel 4.4.2.1*). Wird dieser Prüfwert nicht erreicht, dann wird der Status „grün“, bei Überschreiten des Prüfwertes „rot“ vergeben. Um einen einfachen Überblick zu ermöglichen, sind in *Abbildung 4-69* die Verteilungsstatistiken der betrachteten Metallbelastungen in küstennahen (oben) und küstenfernen Wasserkörpern (unten) in den Jahren 2010 und 2011 gemeinsam auf einer Abszisse dargestellt, auf der auch die unterschiedlichen Bewertungsbereiche farblich gekennzeichnet sind. Es ergibt sich ein schneller Überblick über die Lage der Belastungswerte innerhalb des dreigliedrigen Bewertungssystems. An der rechten Abszisse jeder Einzelgrafik ist weiterhin die Eingruppierung der Metallbelastung im letzten Bewertungsjahr (2011, Median) als Farbcode in einem Kreis dargestellt. Dieser ist ggf. durch einen auf/abwärts gerichteten Pfeil ergänzt, der andeutet, ob innerhalb der letzten fünf Jahre ein signifikanter zeitlicher Trend der Belastung nachweisbar war. Grundlage der Trendanalyse waren die mittleren Metallbelastungen (Median) im ersten Quartal der vergangenen fünf Jahre, also im Zeitraum von 2006 bis 2011. Richtung und Signifikanz identifizierter Trends wurden mit dem nicht parametrischen Sperman-Rangkorrelationsverfahren geprüft.

Tabelle 4-8 ergänzt die grafische Darstellung durch die Angabe der 2011 gemessenen Konzentrationen und deren Verteilung (25 % und 75 % Perzentile sowie Median).

Der grafische Überblick über beide Wasserkörper ($28 < S < 30$) und ($S > 34$) in *Abbildung 4-69* oben und unten zeigt, dass die Konzentrationen aller untersuchten Schwermetalle in den Jahren 2010 und 2011 sehr deutlich unter den verwendeten Effektgrenzwerten lagen. Im küstennahen Wasserkörper überschritten die Kupfer-, Nickel- und Zinkkonzentrationen aber deutlich den Hintergrundwert, Quecksilber lag nur knapp darüber (25 % der Messwerte unter dem Hintergrundwert) und die Konzentrationen von Cadmium und Blei knapp unter dem Hintergrundwert (75 % aller Messwerte).

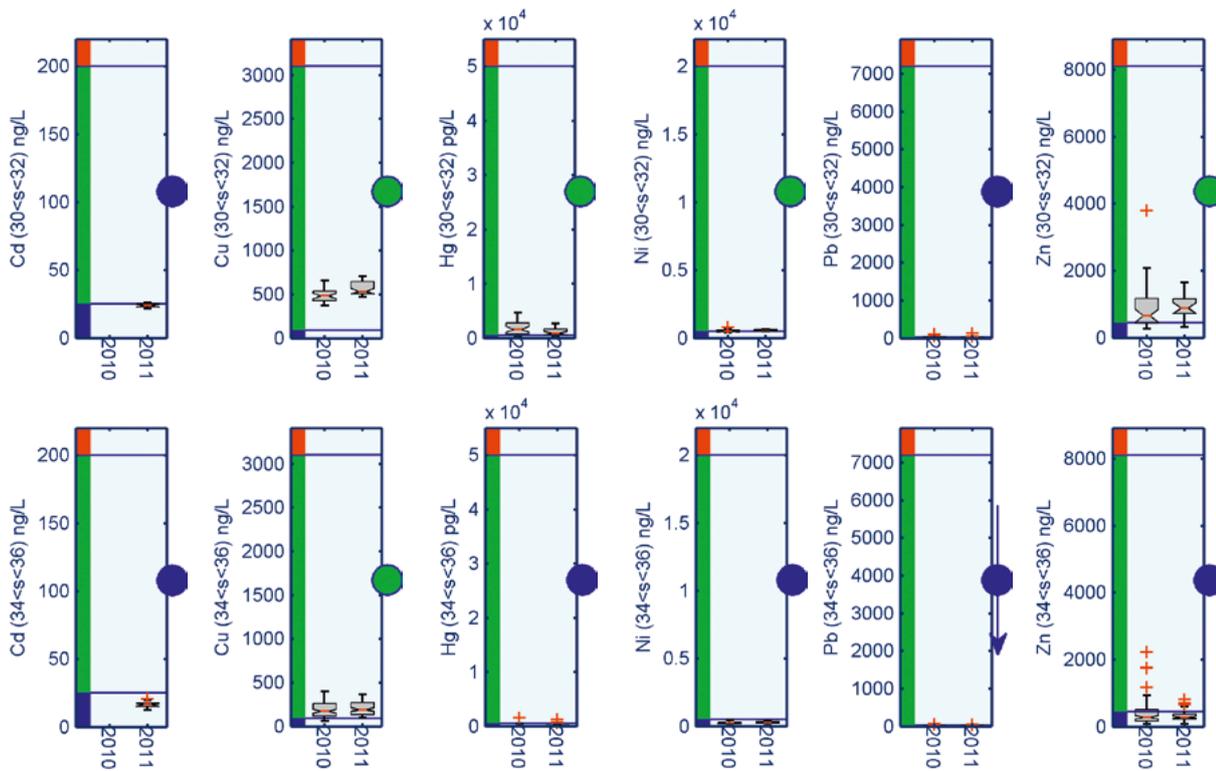


Abbildung 4-69: Zusammenfassende Bewertung der Metallbelastung im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) der Nordsee. Verteilungsstatistiken der Metallgehalte im küstennahen Wasser (Salzgehalte 30–32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (Salzgehalte >34, Entenschnabel) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) der Jahre 2010 und 2011 in einer Boxdarstellung. An der Ordinate sind den Bewertungskriterien entsprechende Farbcodes aufgetragen: Blau: Gehalt < OSPAR-BRC; Grün: BRC < Gehalt < Effekt; Rot: Gehalt > Effekt. (vergleiche Kapitel 4.4.2.1; 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 2011 wieder. Ein signifikanter Trend (95%) innerhalb der vergangenen fünf Jahre wird durch einen aufwärts/abwärts gerichteten Pfeil angezeigt.

Figure 4-69: Assessment of element burdens in filtered near surface water (10 m). 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 2010 and 2011 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 (refer to 4.4.2.1). The right hand coloured dot relates to the assessment result of 2011. An additional upward/downward arrow indicates a significant temporal trend during the recent five years.

Im küstenfernen Wasser ($S > 34$) wurden sehr geringe Cadmium-, Quecksilber-, Nickel- und Zinkkonzentrationen gemessen, die eindeutig im Bereich der Hintergrundwerte lagen. Blei lag knapp darin und Kupfer zeigte auch hier eindeutig leicht erhöhte Gehalte über den Hintergrundwerten.

Im küstenfernen Wasser zeigte lediglich Blei in den vergangenen 5 Jahren einen schwach ausgeprägten abnehmenden Trend auf insgesamt sehr niedrigem Konzentrationsniveau.

Time	Salinity	Element	Samples (n)	25th Perc.	Median	75th Perc.
JFM 2011	30–32	Cd	7	22,9	24,0	25,1
		Cu	14	494,3	514,2	542,2
		Hg	13	425,5	752,5	1000,9
		Ni	14	525,5	556,2	607,5
		Pb	21	13,7	17,1	23,5
		Zn	14	811,2	999,8	1197,3
JFM 2011	34–36	Cd	16	15,3	16,4	17,2
		Cu	51	131,5	188,5	290,5
		Hg	48	0	0	31,1
		Ni	51	206,0	234,3	327,4
		Pb	67	11,4	17,0	22,1
		Zn	51	204,3	252,7	404,0

Tabelle 4-8: Metallgehalte im küstennahen Wasser (Salzgehalte: 30–32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (Salzgehalte: >34) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) 2011 in 10 m Wassertiefe. Angegeben sind die Anzahl der Proben (n) und die 25 %, 50 % (Median) und 75 % Perzentile der gemessenen Metallgehalte in ng/L (Hg in pg/L). Alle Konzentrationsangaben sind entsprechend dem OSPAR-Bewertungssystem eingefärbt.

Table 4-8: Element concentration in filtered coastal water samples (salinity 30–32) and open North Sea (salinity >34) near surface waters during the first quarter (JFM) of the year 2011. Given are the number of samples and the 25 %, 50 % and 75 % percentiles in ng/L (Hg in pg/L). All concentration values are coloured according the OSPAR-assessment scheme.

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 belastetem Material regional auch als Belastungsquelle wirken. 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 von 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 (Körngrößen <20 µm) 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 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.

Im Zeitraum von 2008 bis 2011 wurden die Trendmonitoringstationen jährlich im ersten Quartal beprobt. Drei Stationen südöstlich von Helgoland wurden zusätzlich, über das jeweilige Jahr verteilt, drei bis viermal untersucht. Die höhere Probenahmefrequenz im äußeren Elbe-Ästuar dient der Erfassung der deutlich erhöhten Dynamik im Oberflächensediment dieses

Seegebietes. Für die im folgenden Text beschriebenen Trenduntersuchungen wurden zur Verbesserung der Statistik Stationen zu Gruppen zusammengefasst. Die räumliche Lage der Stationen und Ausdehnung dieser Gruppen ist in *Abbildung 4-70* (links) durch rote Ellipsen markiert. Im Einzelnen handelt es sich um vier 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).

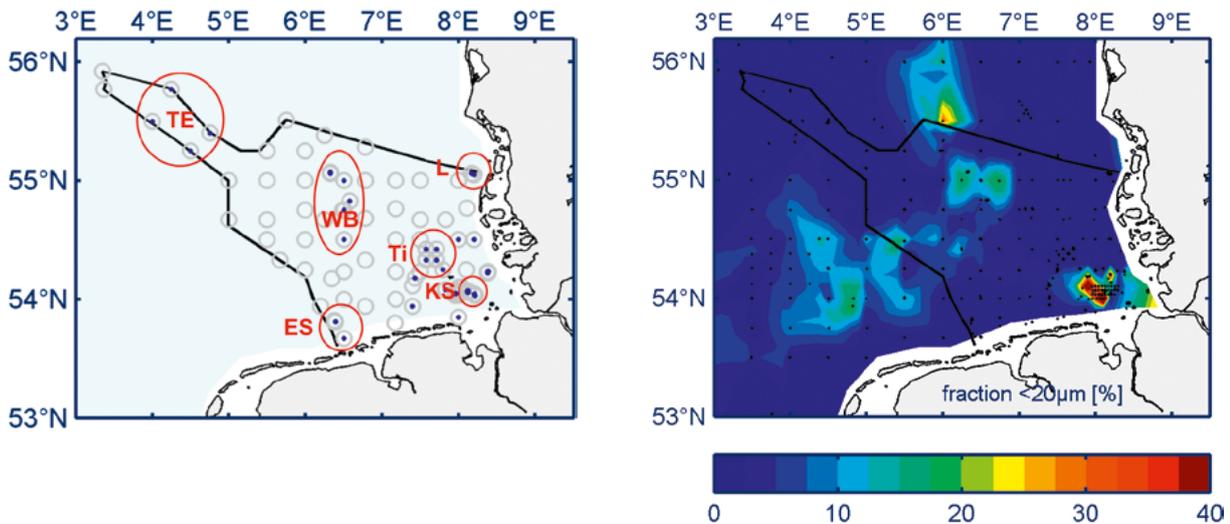


Abbildung 4-70: Sedimentprobenahmestationen Deutsche Bucht (links) im Zeitraum von 2008 bis 2011 (grauer Kreis). Alle bisher bearbeiteten Proben sind durch einen zusätzlichen blauen Punkt gekennzeichnet. Einzelne Trendstationen sind zu Gruppen zusammengefasst (rote Ellipse). Metallgehalte und Trends werden in diesen „Trendregionen“ bewertet. Rechts: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion (<20 µm) am Gesamtsediment 1985–2007.

Figure 4-70: Sediment sampling sites (left) German Bight from 2008 to 2011. Trend monitoring stations are indicated by blue dots. For any subsequent assessment of temporal trend and concentration level in sediment, these sites are combined to regional site groups, which are indicated by red circles. Right: Spatial distribution of percent fraction of sediment fines (<20 µm) measured during the period 1985 to 2007.

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 Skagerraks 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 µm) von 15 % bis 45 %. 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 *Abbildung 4-70* (Deutsche Bucht) zeigt die Ergebnisse von Korngrößenanalysen im Oberflächensediment des deutschen Festlandssockels aus dem Zeitraum 1985 bis 2007. Die schlickigen bzw. feinsandigen Gebiete in der inneren Deutschen Bucht und auf der Weißen Bank treten durch einen hohen Feinkornanteil deutlich hervor.

Die grobe Sandfraktion des Sediments besteht vor allem aus Silikaten. 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 µm bestimmt. Auf diese Weise wird eine Verdünnung der die Schadstoffe adsorbierenden Feinkornfraktion 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 im Zeitraum 2008 bis 2011 (Trendmonitoringgebiete Deutsche Bucht)

In den Jahren 2008 bis 2011 wurden alle Trendmonitoringstationen in der deutschen AWZ jährlich beprobt. *Tabelle 4-9* fasst die Ergebnisse der Untersuchungen in den sechs differenzierten Untersuchungsgebieten während der Jahre 2010 und 2011 zusammen (vergleiche *Abbildung 4-70* links). Die Gehalte der Elemente Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Blei und Zink sind entsprechend Ihrer Lage zu den maßgeblichen Bewertungskriterien dreistufig eingefärbt (angelehnt an OSPAR-Bewertungsverfahren, vergleiche 4.4.2.2 und *Tabelle 4-7*). Angegeben sind die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie in Klammern die zugrundeliegende Probenzahl der sechs genannten Schwermetalle und der dazugehörigen Normierungsparameter (Matrixelemente und Korngrößenanteil). Die Matrixelemente Aluminium und Lithium weisen in der Feinkornfraktion Gehalte zwischen 6,1 und 7,7% bzw. 50 und 78 mg/kg auf. Diese Werte liegen für Aluminium um den Faktor 1,2 bis 1,5 bzw. für Lithium 1 bis 1,5 über den von OSPAR zu Normierungszwecken verwendeten Werten von 5 % (Al) bzw. 50 mg/kg (Li).

2010 2011	TE	WB	Ti	ES	L	KS
Al	(3) 7.6 ± 0.1	(5) 7.7 ± 0.1	(4) 6.9 ± 0.3	(2) 6.4 ± 0.7	(2) 6.4 ± 0.2	(14) 6.2 ± 0.4
Fe	(3) 6.6 ± 0.5	(5) 5.1 ± 0.4	(4) 11.4 ± 2.0	(2) 4.6 ± 0.8	(2) 9.0 ± 0.3	(14) 4.2 ± 0.3
Li	(3) 65.7 ± 1.4	(5) 72.3 ± 2.2	(4) 77.8 ± 0.8	(2) 56.6 ± 6.0	(2) 65.3 ± 2.2	(10) 56.2 ± 4.7
<20	(3) < 1	(5) 7 ± 3	(4) 1 ± 0	(2) 1 ± 0	(2) 2 ± 0	(10) 12 ± 9
Cd	(3) 0.22 ± 0.01	(5) 0.15 ± 0.05	(4) 0.43 ± 0.25	(2) 0.82 ± 0.57	(2) 0.87 ± 0.03	(14) 0.75 ± 0.20
Cu	(3) 20.2 ± 1.6	(5) 19.2 ± 1.7	(4) 28.8 ± 2.3	(2) 18.7 ± 3.3	(2) 26.0 ± 3.4	(14) 25.3 ± 4.8
Hg	(3) 0.05 ± 0.01	(5) 0.11 ± 0.01	(4) 0.17 ± 0.02	(2) 0.16 ± 0.04	(2) 0.22 ± 0.01	(14) 0.45 ± 0.17
Ni ⁴	(3) 51.9 ± 3.6	(5) 45.5 ± 2.6	(4) 49.5 ± 3.6	(2) 43.4 ± 4.1	(2) 44.5 ± 3.2	(14) 38.8 ± 3.8
Pb	(3) 178 ± 27	(5) 66 ± 4	(4) 182 ± 45	(2) 84 ± 15	(2) 147 ± 25	(14) 76 ± 12
Zn	(3) 163 ± 10	(5) 158 ± 23	(4) 864 ± 208	(2) 230 ± 89	(2) 658 ± 30	(14) 220 ± 40

Tabelle 4-9: Mittelwert und Standardabweichung der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments in den Jahren 2010 und 2011 (< 20 µm Fraktion, Al, Fe in (%)) alle anderen Elemente in (mg/kg DW). In Klammern ist die Anzahl der gemittelten Messwerte angegeben.

Table 4-9: Average and standard deviation of surface sediment fines percent fraction of total, as well as element burden in surface sediment fines (< 20 µm). All 2010 and 2011 samples (< 20 µm fraction, Al, Fe in (%)) and all other elements in (mg/kg DW). The number of observations is given in brackets.

⁴ kein sinnvoller Effektgrenzwert vorhanden, alle Werte um den Faktor 1,5–1,8 über den OSPAR BAC Werten.

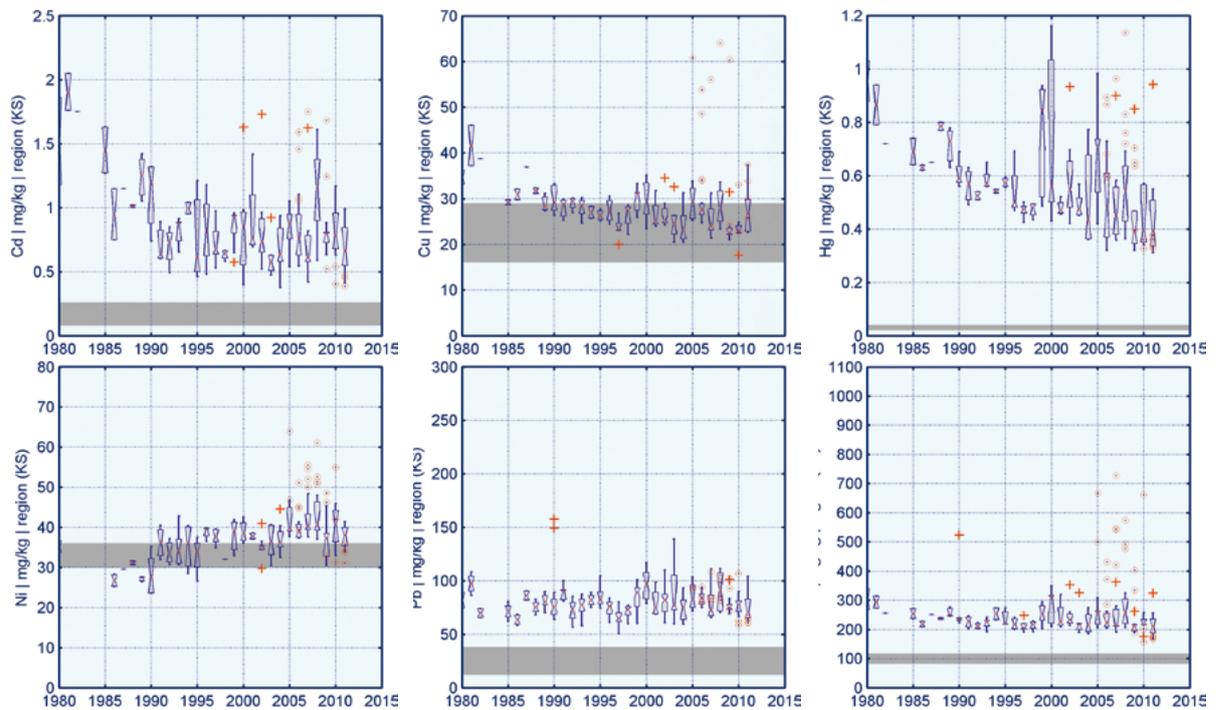
Unter den Matrixelementen fällt der hohe Eisenwert im ehemaligen Dünnsäureverklappungsgebiet (Ti) nordwestlich von Helgoland auf. Erhöhte Eisengehalte, aber auch relativ hohe Arsen-, Zink- und Bleigehalte, werden in diesem Gebiet seit Jahren regelmäßig beobachtet. Nach heutigem Kenntnisstand ist hierfür 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 bewegen sich in den meisten Regionen der deutschen AWZ bei niedrigen Gehalten oder im Bereich der Hintergrundkonzentrationen (für Nickel liegen nur OSPAR Hintergrundwerte (BC und BAC) zur Bewertung vor). 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 demgegenüber zur zentralen Nordsee hin (TE) weiter ab. Diese sehr deutlichen Gradienten, mit erhöhten Gehalten in Küstennähe 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 *Kapitel 4.4.4.3* 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 Langzeitliche Entwicklung der Metallbelastung des Feinkornanteils 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. *Abbildung 4-71* fasst die Zeitreihen der Messungen in zwei Trendregionen zusammen. Es handelt sich einerseits um die schlickigen Stationen im Klärschlammgebiet SO Helgolands (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 (vergleiche auch *Abbildung 4-70* links). Die einzelnen Zeitreihen sind aus jährlich in Boxsymbolen zusammengefassten Verteilungsstatistiken zusammengesetzt.

KS



WB

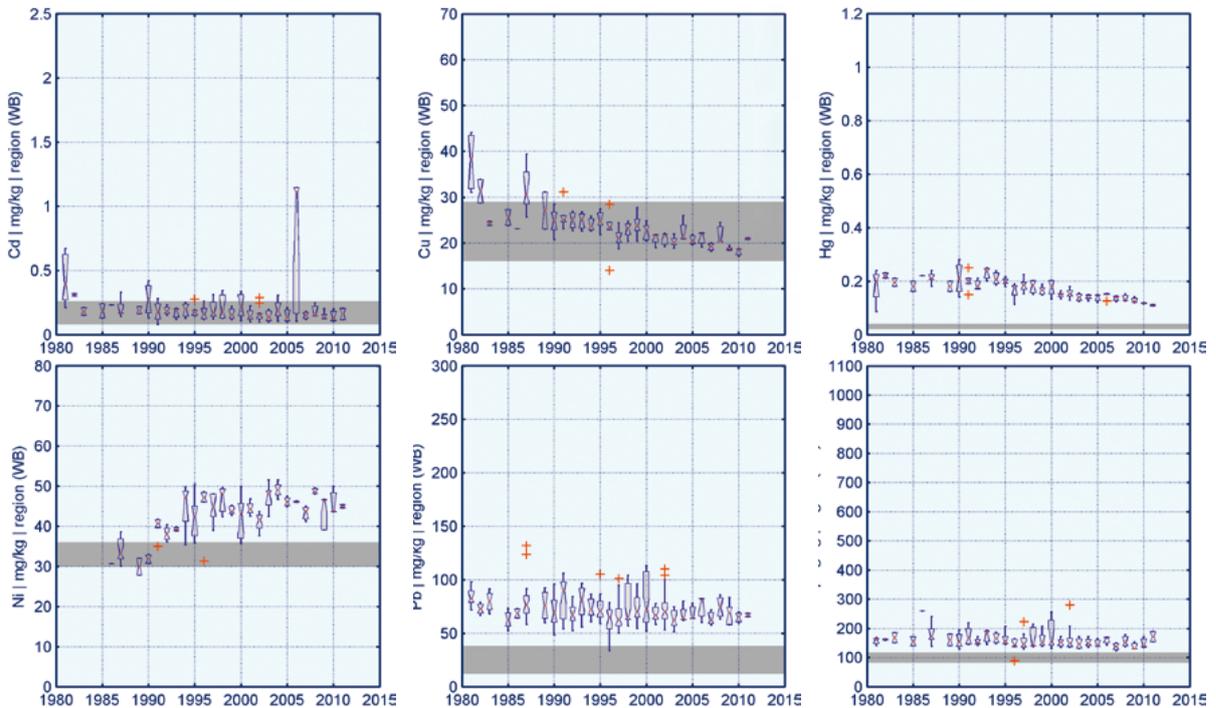


Abbildung 4-71: Zeitreihen der Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) in den Regionen KS (SE Helgoland) und Weiße Bank (WB). Zusätzlich sind in den ersten sechs Grafiken Einzelmesswerte von der Klappstelle Tonne E3 dargestellt (roter Kreise). BSH-Hintergrundwerte sind als graue Balken hinzugefügt. (Vergleiche hierzu Tabelle 4-7).

Figure 4-71: 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, (red circles). BSH-background values are displayed as grey bars (compare to Table 4-7).

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 wurde in den Jahren 2005 bis 2011 Baggergut aus der Fahrwasserunterhaltung im Hamburger Hafengebiet verbracht (BfG 2013). 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. Bis 2011 wurden insgesamt 6,5 Mio. m³ Baggergut aus der Hamburger Delegationsstrecke zur Verbringstelle nordwestlich von Scharhörn (Tonne E3) verbracht.

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 hat die Streuung der Quecksilbermesswerte seit 1999 deutlich zugenommen. Genauso wie an weiter nördlich im nordfriesischen Küstenstreifen liegenden Stationen wurden hier in den folgenden Jahren auch höher belastete Einzelproben gemessen.

Beispielhaft für diese Entwicklung ist die Zeitreihe der Quecksilberbelastung in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments der KS-Region, die in *Abbildung 4-72* (oben rechts) dargestellt ist. Die Konzentrationen lagen im gesamten Beobachtungszeitraum erheblich oberhalb des Hintergrundintervalls (grauer Balken). 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 Trend wurde im Untersuchungsgebiet KS im Jahr 1999 unterbrochen, als eine Phase 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 wurden keine vergleichbaren Effekte beobachtet. Die Quecksilbergehalte nehmen hier bei geringer Streuung genauso weiter ab wie die Kupfergehalte, die bereits auf einem sehr niedrigen Niveau angekommen sind (*Abbildung 4-72*).

Die Auswirkung der Verklappungsaktivität an der Tonne E3 auf die Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments ist in den ersten zwei Reihen der *Abbildung 4-72* ablesbar. Zusätzlich zu den Boxdarstellungen des KS-Gebietes sind durch blaue Punkte mit rotem Kreis die Messungen an der nahe gelegenen Station (E3) hinzugefügt. 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 zwischen den Jahren 2005 und 2011. In diesem Zeitraum 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 (BfG 2013).

4.4.4.4 Bewertung Sediment

Die Bewertung der Sedimentqualität in der Deutschen Bucht wurde auf Basis der im *Kapitel 4.4.2.2* vorgestellten Bewertungskriterien durchgeführt und ist bereits in *Tabelle 4-9* für die Einfärbung der Messwerte verwendet worden. 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 (siehe *Tabelle 4-7*). Für Nickel wurde mangels Alternative der OSPAR-BAC-Wert verwendet. Wurde der Hintergrundwert überschritten, wird gegen den niedrigeren Effektwert (ERL), der von der amerikanischen ozeanographischen Behörde (NOAA) entwickelt wurde, getestet. Wird dieser ebenfalls überschritten, sind biologische Effekte möglich, die auf die Belastung durch den betreffenden Schadstoff zurückzuführen wären. 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 (dieses Kriterium ist vergleichbar mit dem MSRL-Kriterium zur Bestimmung des „guten Umweltzustands“).

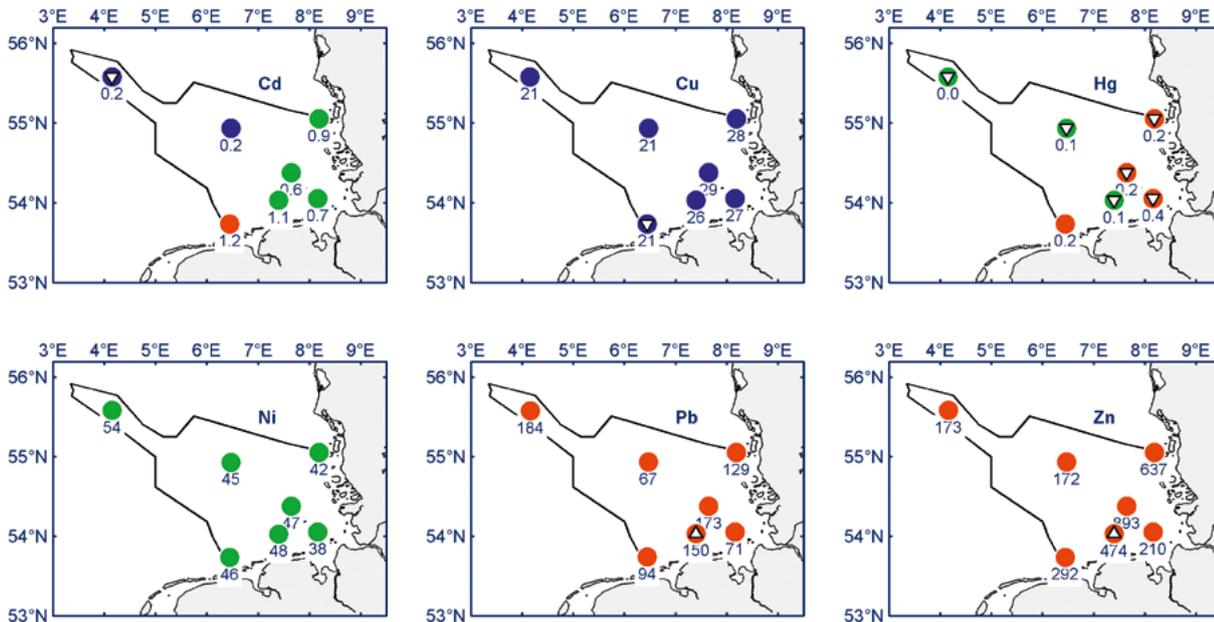


Abbildung 4-72: Bewertung der Metallbelastung der Oberflächensedimente im Jahr 2011 und Abschätzung der zeitlichen Entwicklung innerhalb der vergangenen 10 Jahre. (Rot) geringe Wahrscheinlichkeit von Effekten. (Grün) keine Effekte zu erwarten, aber Hintergrundwert überschritten. (Blau) Belastung nahe oder gleich dem Hintergrundwert (vergl. Tabelle 4-7). Ein signifikanter zeitlicher auf-/abwärts gerichteter Trend innerhalb der vergangenen 10 Jahre wird durch ein nach oben/unten gerichtetes weißes Dreieck symbolisiert. Unterhalb jedes Symbols ist der Elementgehalt im Bewertungsjahr (Median in mg/kg (TM)) angegeben.

Figure 4-72: Assessment of element burdens in surface sediment fines sampled in 2011. (Blue) less than OSPAR-BAC, (green) greater than BAC and less than effect assessment value, (red) greater than effect assessment value (refer to table 4-7). A significant temporal trend in each region during the recent ten years is indicated by an upward/downward white triangle. The median concentration (mg/kg DW) during the assessment year is given under each symbol.

Zusätzlich zur Einschätzung des aktuellen Belastungsstatus (in diesem Bericht das Jahr 2011) wurde dessen zeitliche Entwicklung innerhalb der vergangenen 10 Jahre untersucht. Trends wurden auf Basis der nicht parametrischen Spearman-Rangkorrelation ermittelt. Ausgewertet wurden die jährlichen Mediane der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments, welche für die oben beschriebenen Trendregionen separat berechnet wurden. *Abbildung 4-72* fasst die Bewertungsergebnisse in Kartendarstellungen zusammen. Neben dem als Punkt dargestellten Farbcode und dem Trendsymbol (nach oben/unten gerichtetes Dreieck) ist in jeder Bewertungsregion ebenfalls der Metallgehalt (unten) in mg/kg angegeben.

Die Kupferbelastung erreichte 2011 im Untersuchungsgebiet, von wenigen Einzelproben abgesehen, die Hintergrundwerte. Auch die Nickel und Cadmiumgehalte waren weitgehend niedrig, überstiegen jedoch den Hintergrundwert meistens. Die höchsten Kupfer-, Blei und Zinkgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments wurden im ehemaligen Dünn säureverklappungsgebiet nordwestlich von Helgoland, in der Region Ti gemessen; die höchsten Quecksilbergehalte im Elbeästuar (der Region KS) und die zweithöchsten auf der Höhe von Sylt (in der Region L). Hier zeigt sich der starke Einfluss der Elbe entlang der nordfriesischen Küste. Die Gehalte der Elemente Zink und Blei lagen im gesamten Untersuchungsgebiet über dem Effektgrenzwert, Quecksilber nur in den küstennahen Gebieten (ES, L und KS sowie im Gebiet NW von Helgoland (Ti)). Wird der Metallgehalt im Feinkornanteil (so wie er hier bestimmt wurde) auf die nicht fraktionierte Gesamtprobe bezogen, sind die Gehalte in den sandigen Gebieten allerdings eher gering. Der Feinkornanteil des Sediments vor Sylt enthält beispielsweise weniger als 5 % Feinkornanteil (vergleiche hierzu *Abbildung 4-70* rechts).

Kupfer und Cadmium zeigten in einzelnen Regionen (ES, TE) auf bereits niedrigem Niveau signifikant abnehmende zeitliche Trends.

Sehr ausgeprägt sind weiterhin die abnehmenden Trends in der Quecksilberbelastung im nahezu gesamten Untersuchungsgebiet. Vor der Emsmündung ist die grundsätzlich hohe Streuung der Messwerte dafür verantwortlich, dass hier kein signifikanter Trend nachgewiesen wurde.

Außerhalb der bisher behandelten Trendmonitoringstationen wurden nördlich Langeoog in den vergangenen Jahren leicht zunehmende zeitliche Trends der Blei- und Zinkgehalte nachgewiesen. Diese zwischen Ems und Weser liegende Station ist in *Abbildung 4-72* ebenfalls dargestellt.

4.4.4.4.1 Wie stabil ist die aktuelle Statusbewertung?

Tabelle 4-10 fasst die Ergebnisse aller jährlichen Bewertungen seit dem Jahr 2000 zusammen, die für die Deutsche Bucht nach dem oben beschriebenen Schema durchgeführt wurden. Die Spalten zeigen die räumliche Komponente, sie repräsentieren die unterschiedlichen bewerteten Regionen. Die Zeilen listen die ausgewerteten Elemente Zink, Blei, Nickel, Quecksilber, Kupfer und Cadmium auf, die weiter durch die jährlichen Bewertungen zwischen den Jahren von 2011 bis 2000 (absteigend) differenziert sind. Von links nach rechts nimmt in der Tabelle die Küstennähe der Regionen zu. Die erste Spalte repräsentiert die offene Nordsee, die dritte Spalte die Region nordwestlich Helgoland. Alle weiteren Spalten fassen die küstennahen Messungen zusammen, die sich vom westlich gelegenen Gebiet der Ems-Mündung (Spalte 4) sukzessive zum nordöstlichen Ende des Untersuchungsgebietes vor Sylt (Spalte 7) aneinander reihen.

Jedes Element in der Tabelle zeigt rechts den Median der Metallgehalte in der Feinkornfraktion der Oberflächensedimentproben, die während eines Jahres in der jeweiligen Region untersucht wurden. Das grafische Element (links) zeigt zusätzlich in einem vertikalen Balken die Lage dieses Wertes im Verhältnis zu allen anderen Messungen im gesamten Untersuchungsgebiet und Zeitraum zwischen 2011 und 2000. Für jedes Element sind alle Skalen der Einzelgrafiken einheitlich links durch den niedrigen Hintergrundwert (vergl. *Tabelle 4-7*) und rechts durch den höchsten jährlichen Median (+ 10 %) begrenzt. Sollten die Bewertungskriterien (BC und EAC vergl. *Tabelle 4-7*) in diesen Bereich fallen, sind sie ebenfalls durch feine (blaue oder rote) Linien dargestellt. Alle grafischen Elemente sind entsprechend der relativen Lage des jeweiligen Medians zu den Bewertungskriterien blau, grün oder rot eingefärbt. Sollten im Zeitraum von 10 Jahren vor dem Bewertungsjahr signifikante zeitliche Trends berechnet worden sein, sind diese durch gelbe Dreiecke gekennzeichnet.

Aus der Tabelle ergibt sich ein schneller Überblick über die Metallbelastung der vergangenen zehn Jahre, in den verschiedenen Regionen der deutschen Bucht. An den rot gefärbten Feldern lässt sich erkennen, welche Elemente in welchen Regionen zurzeit den guten Umweltzustand nicht erreichen und an den Trendsymbolen, ob ggf. eine Verbesserung der Situation zu erwarten ist.

Deutlich lässt sich erkennen, dass die Elemente Blei, Zink und Quecksilber langfristig und großräumig die Effektgrenzwerte überschritten haben. Im Gebiet der Weißen Bank (WB) übersteigen die Bleigehalte das Effektbewertungskriterium nur knapp, es ist aber über die Jahre keine Tendenz zur Verbesserung der Situation zu erkennen. Hin und wieder wurden zwischen den Jahren 2001 bis 2005 zunehmende Bleibelastungstrends im Titangebiet (Ti) nachgewiesen, diese haben sich aber nicht bestätigt. Eine echte Verbesserung der Belastungssituation

hat es im Emsmündungsbereich gegeben. Sowohl die Blei- als auch die Zinkbelastung ist in den vergangenen Jahren zurückgegangen. Die Gehalte überschreiten das Effektkriterium aber weiterhin, wenn auch nur knapp.

Sehr erfreulich ist die langjährig stetig abnehmende Quecksilberbelastung des Oberflächensediments. Seit Jahren sind in nahezu allen Regionen der Deutschen Bucht anhaltend abnehmende Belastungstrends zu beobachten. Dies führt dazu, dass in der zentralen Nordsee nahezu Hintergrundkonzentrationen gemessen werden. Im Untersuchungszeitraum werden seit 2005 vereinzelt wieder Gehalte gemessen, die das Bewertungskriterium für Hintergrundkonzentrationen unterschreiten. Aber auch in anderen Regionen gab es einen Wechsel des Status von nicht gut (rot) nach gut (grün), auf der Weißen Bank (WB) seit 2003 und vor der ostfriesischen Küste (ES, STG16) seit etwas 2007. Im weiter östlich und nördlich liegenden Teil des Küstenstreifens wurde dieser Statuswechsel noch nicht erreicht, aber auch im Elbeästuar wurde 2011 seit Jahren das erste Mal wieder ein abnehmender Trend berechnet.

Auch die Kupferbelastung ging über die Jahre weiter zurück, obwohl sie in der Deutschen Bucht bereits auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau liegt. Im Bereich der Emsmündung (ES) aber auch im Gebiet nordwestlich Helgoland (Ti) werden heute geringere Gehalte gemessen als noch vor 10 Jahren. In der zentralen Nordsee (TE) und über Jahre nachhaltig bei der Weißen Bank (WB) wurden weiter abnehmende Trends der Kupferbelastung gemessen.

	TE	WB	Ti	ES	STG18	KS	L
Zn							
11	173	172	893	292	474	210	637
10	157	141	835	167	461	218	679
09	185	130	692	158	455	209	889
08		150	946	165	448	257	301
07	187	139	718	193	475	214	807
06	151	168	588	242	431	221	508
05		140	747	189	366	256	833
04	181	150	639	294	485	217	661
03	173	146	632	322	393	216	536
02	180	148	695	286	369	233	565
01	165	153	606	293	409	226	620
00	163	153	633	324	402	311	662
Pb							
11	184	67	173	94	150	71	129
10	175	65	190	73	142	77	165
09	204	69	188	94	130	75	197
08		74	201	55	130	91	78
07	191	62	152	72	154	72	163
06	156	82	161	75	125	84	129
05		64	169	74	122	83	123
04	217	64	170	104	159	75	152
03	203	62	167	126	130	77	115
02	232	70	159	138	125	82	141
01	201	67	157	104	143	75	159
00	243	73	181	142	166	97	163
Ni							
11	53.7	45.0	46.7	46.3	48.3	38.1	42.2
10	50.9	43.8	52.2	40.5	46.1	40.8	46.7
09	59.8	46.4	51.5	44.4	52.4	37.4	50.6
08		48.6	55.2	37.5	49.6	40.7	36.9
07	52.2	43.7	50.7	42.7	54.8	40.1	49.9
06	54.2	46.1	52.2	43.5	48.5	39.0	47.1
05		46.0	51.2	42.6	48.8	39.8	54.1
04	59.0	49.0	48.8	45.8	48.1	36.1	47.6
03	55.2	48.3	49.0	46.8	51.6	36.6	46.1
02	47.2	41.6	45.5	40.4	45.8	35.2	43.1
01	48.7	44.3	46.7	41.2	48.0	37.8	44.3
00	54.1	43.2	47.5	40.0	45.2	38.5	45.7
Hg							
11	0.04	0.11	0.19	0.19	0.13	0.39	0.22
10	0.05	0.12	0.16	0.14	0.13	0.40	0.22
09	0.04	0.12	0.24	0.13	0.12	0.39	0.24
08		0.13	0.22	0.17	0.13	0.54	0.21
07	0.05	0.14	0.22	0.14	0.17	0.45	0.31
06	0.06	0.15	0.24	0.18	0.15	0.48	0.27
05		0.14	0.25	0.27	0.16	0.71	0.31
04	0.06	0.15	0.26	0.17	0.17	0.44	0.29
03	0.05	0.14	0.25	0.15	0.16	0.48	0.31
02	0.07	0.15	0.28	0.23	0.18	0.55	0.34
01	0.07	0.15	0.26	0.20	0.17	0.47	0.34
00	0.09	0.18	0.30	0.23	0.22	0.56	0.37
Cu							
11	20.9	20.9	29.0	21.1	26.0	27.1	28.4
10	19.8	18.5	28.6	16.4	21.3	22.7	23.6
09	19.9	18.8	30.1	20.2	22.3	22.5	28.4
08		20.3	44.2	26.2	25.6	27.9	21.9
07	26.6	19.3	30.2	21.7	27.7	24.0	43.7
06	19.1	22.0	36.0	32.0	34.9	27.7	26.7
05		20.4	39.3	26.2	24.3	29.4	51.3
04	34.2	21.3	28.5	23.6	25.3	23.0	28.2
03	21.7	20.1	30.8	25.6	26.6	24.5	26.1
02	26.3	21.7	29.9	27.1	28.1	25.2	29.0
01	23.5	21.6	28.2	25.6	25.4	25.0	28.8
00	26.1	22.8	31.6	27.6	28.1	29.3	30.3
Cd							
11	0.23	0.16	0.56	1.22	1.12	0.66	0.89
10	0.22	0.13	0.29	0.41	0.98	0.78	0.85
09	0.23	0.14	0.64	0.43	1.03	0.80	1.25
08		0.15	0.68	0.59	1.08	1.16	0.50
07	0.36	0.15	0.48	0.51	1.37	0.61	1.68
06	0.26	1.11	0.88	1.13	1.16	0.76	1.26
05		0.13	0.76	0.62	1.08	0.87	1.26
04	0.55	0.19	0.53	0.96	1.48	0.63	1.29
03	0.28	0.14	0.48	0.58	0.58	0.58	0.57
02	0.57	0.15	0.54	0.90	0.54	0.74	0.55
01	0.55	0.14	0.55	0.67	0.84	0.75	0.89
00	0.48	0.22	0.64	1.12	1.22	0.85	1.17

Tabelle 4-10: Metallgehalte (Median) und deren Bewertung in Trendregionen zwischen den Jahren 2000 bis 2011. Signifikante zeitliche Trends als gelbe Dreiecke.

Table 4-10: Metals burden and assessment of surface sediment fines per region and year from 2000 to 2011. Indication of significant temporal trends by yellow triangles.

4.5 Radioaktive Stoffe

Stefanie Schmied; Jürgen Herrmann

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 (^3H), ^{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 Uran-Isotope ^{235}U , ^{238}U 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 2 mg/L vor, während ^{40}K im Meersalz in sehr hohen Konzentrationen vorliegt und die Volumenaktivität des Meerwassers dominiert. Bei allen Betrachtungen der künstlichen Radioaktivität im Meer ist zu beachten, dass die natürliche Radioaktivität im Ozean insgesamt ca. 14 800 000 PBq beträgt, offensichtlich ohne dass die Natur oder der Mensch Schaden nimmt. Das hinsichtlich der Strahlenexposition des Menschen relevanteste Isotop ist der alpha-Strahler ^{210}Po (aus der Zerfallsreihe des ^{238}U), weil es in manchen Meeresorganismen stark angereichert wird. In *Tabelle 4-11* sind für eine Reihe natürlicher Radionuklide neben den Halbwertszeiten typische Hintergrundaktivitäten in Meerwasser und Sediment angegeben (BMU 2002).

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 gut 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 künstlichen Radionuklids ^{137}Cs aus dem Fallout (*AARKROG 2003*).

Alle der weit über 2000 verschiedenen künstlich erzeugten Isotope, die nicht in der Natur vorkommen, sind radioaktiv. Zu jedem Element ist heute mindestens ein radioaktives Isotop bekannt. Der Umstand, dass sich diese Isotope chemisch praktisch nicht von den stabilen (nicht radioaktiven) Isotopen des jeweiligen Elements unterscheiden, hat zur Folge, dass neben den stabilen auch radioaktive Isotope im Sediment oder in der Nahrungskette angereichert 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 Sägezähntang, aber auch in 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. 1997, NIES und KANISCH 2003*). Tritium hingegen, das von kerntechnischen Anlagen freigesetzt wird, aber auch auf natürliche Weise durch kosmische Höhenstrahlung entsteht, wird in Biota praktisch nicht angereichert.

Tafel 4-9: Radioaktivität

Radioaktivität ist die Eigenschaft von Atomkernen, sich ohne äußere Einwirkung und spontan unter Aussendung ionisierender 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 **Halbwertszeit** eines Radionuklids ist die Zeit, nach der die Hälfte aller vorhandenen Kerne zerfallen ist. Die Halbwertszeit der bekannten Radionuklide erstreckt sich über einen sehr weiten Zeitbereich von μs bis mehr als 10^{21} Jahre.

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. Weiterhin entstehen durch die bei der Kernspaltung auftretende Neutronenstrahlung in Materialien durch den Prozess der Neutronenaktivierung kurz- und langlebige Radionuklide, die sog. Aktivierungsprodukte. Beispiele hierfür sind Mn-54, Co-60 und Pu-239 (aus U-238). Eine weitere Quelle für künstliche Radionuklide stellt der medizinische Bereich dar, z. B. werden in der Diagnostik häufig die Radionuklide Tc-99m und I-131 verwendet. 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 5 mSv im Jahr. Diese Dosis stammt etwa jeweils zur Hälfte aus der natürlichen und der medizinischen Strahlenexposition, insbesondere aus der Röntgendiagnostik (KOELZER 2013). Die natürliche, innere Strahlenexposition liefert einen Beitrag von 1,4 mSv, dabei haben das eingeatmete Radon und seine Folgeprodukte den größten Anteil. Demgegenüber beträgt die Gesamtaktivität des Standardmenschen 9000 Bq und ergibt sich zu über 95 % aus den Zerfallsraten von K-40 (4200 Bq), C-14 (3800 Bq) und Rb-87 (650 Bq) (VOLKMER 2007).

Die Überwachung künstlicher Radioaktivität durch das BSH erstreckt sich in der Nordsee seit Jahren schwerpunktmäßig auf die Nuklide Tritium, ^{99}Tc , ^{137}Cs , ^{90}Sr und einige Transurane (^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$, ^{241}Am und ^{244}Cm), die im Periodensystem oberhalb des schwersten natürlichen Elements $_{92}\text{Uran}$ stehen (Nies und Herrmann 2008). 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. Aufgrund mangelnder Personalkapazität konnten in den Jahren 2008 bis 2011 Aktivitätsmessungen für ^{99}Tc nicht durchgeführt werden.

Im Jahre 2008 wurde die Deutsche Bucht mittels zweier Seefahrten im März und Oktober beprobt, seit dem Jahr 2009 nimmt das Sachgebiet Radioaktivität an der Großaufnahme der Nordsee im Sommer teil, wodurch sich neue Stationspositionen und bessere Möglichkeiten zur Beschreibung der Herkunft und des Transportweges der diversen Radionuklide ergeben.

Radio-nuclide	Half-Life yrs	Seawater Bq/m ³	Sediment Bq/kg
Tritium	12.3	20–100 [†]	–
⁷ Be	0.146	1.1–3.4	–
¹⁴ C	$5.73 \cdot 10^3$	5.5–6.7	–
³² Si	172 ± 4	$0.2\text{--}3.3 \cdot 10^{-3}$	–
⁴⁰ K	$1.28 \cdot 10^9$	11 800–12 300	100–1000
⁸⁷ Rb	$4.8 \cdot 10^{10}$	106	–
¹³¹ Th	$1.41 \cdot 10^{10}$	$0.4\text{--}30 \cdot 10^{-3}$	12–50
²¹⁸ Ra	5.76	0.8–8	–
²²⁸ Th	1.91	0.004–0.3	–
²³⁵ U	$7.04 \cdot 10^8$	1.9	0.1–10
²³⁸ U	$4.47 \cdot 10^9$	40–44	2–200
²³⁴ Th	0.066	0.6–0.8	#
²³⁴ U	$2.45 \cdot 10^5$	47	#
²³⁰ Th	$8.0 \cdot 10^4$	$2.52 \cdot 10^{-3}$	#
²²⁶ Ra	1617	0.8–8	20–80
²¹⁰ Pb	22.3	0.4–2	100–300 [‡]
²¹⁰ Po	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.

Tabelle 4-11: Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser und Sediment der Nordsee.
 Table 4-11: Activity of some natural radionuclides for North Sea seawater 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 der Tafel Radioaktivität.

Die Kontamination des Meeressediments wird als spezifische Aktivität in Bq/kg angegeben, wobei sie sich in der Regel auf die Trockenmasse des Sediments bezieht.

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 Nordatlantiks 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 Wiederaufarbeitungsanlagen (KERSHAW *et al.* 1999). Das Sediment der Irischen See wurde vor allem in den 1970er Jahren hoch kontaminiert. Die Quellstärke des Sediments für ^{137}Cs wird auf 50 bis 70 TBq/Jahr geschätzt, was ungefähr dem zehnfachen 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 größtenteils sandig, was eine nur schwache Tendenz zur Anreicherung von Radionukliden beinhaltet. An den wenigen Stationen, z. B. auf der Weißen Bank in der mittleren deutschen Bucht (WB5) oder im Schlickfallgebiet südöstlich Helgolands (KS11), bei denen man überhaupt eine Anreicherung von künstlichen Radionukliden im Sediment feststellen kann, liegen die spezifischen Aktivitäten für ^{137}Cs unter 6 Bq/kg, für Transurane deutlich unter 1 Bq/kg Trockenmasse. Zum Vergleich: Die spezifische Aktivität des natürlichen ^{40}K in diesen Sedimenten liegt zwischen 300 Bq/kg und 600 Bq/kg. Das Sediment ist in den meisten Gebieten der Nordsee bis in 40 cm Tiefe weitgehend durchmischt, so dass sich keine Informationen über unterschiedliche Eintragszeiten im relevanten Zeitraum der vergangenen 50 Jahre 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 (siehe *Abbildung 4-73*) 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 allenfalls in unmittelbarer Umgebung dieser Anlagen nachweisbar. Dies gilt auch für die bis 1982 durchgeführte Versenkung schwach radioaktiver Abfälle in mehr als 4000 m Tiefe im Nordostatlantik. Auch die früheren

Versenkungen radioaktiver Abfälle durch die ehemalige UdSSR in der Barents- und Karasee, oder das 1989 gesunkene russische Atom-U-Boot ‚Komsomolets‘ in etwa 1700 m Tiefe in der Norwegensee führten zu keiner erhöhten Belastung dieser Meeresgebiete oder gar der Nordsee.

Am 11. März 2011 kam es infolge eines Tsunamis zu Freisetzungen künstlicher Radionuklide aus den Reaktoren des japanischen Kernkraftwerks Fukushima Daiichi auch in den Nordwestpazifik. Ein Stromausfall sorgte dafür, dass das Kühlwasser im Reaktor nicht mehr ausgetauscht wurde, was zur Überhitzung der Brennstäbe und einem Ansteigen der Temperatur im Reaktordruckbehälter führte. Dabei kam es zur Kernschmelze und zu Wasserstoffexplosionen, so dass künstliche Radionuklide in die Umwelt gelangten. Nach einem GAU geht die größte Gefährdung zunächst von den flüchtigeren Elementen wie Iod und Cäsium aus. Dabei sind die Isotope ^{131}I (Halbwertszeit acht Tage), ^{133}I (Halbwertszeit 20 Stunden), ^{134}Cs (Halbwertszeit zwei Jahre) und ^{137}Cs (Halbwertszeit 30 Jahre) dosisrelevant. Das hohe Gefährdungspotenzial dieser Radionuklide resultiert aus deren Bedeutung bei physiologischen Prozessen im Organismus. Cäsium verhält sich analog zu Kalium, was als wichtigstes intrazelluläres Element an physiologischen Prozessen in jeder Zelle beteiligt ist und Iod reichert sich in der Schilddrüse an. Zur Freisetzung und Verteilung der schwer flüchtigen Isotope des Strontiums, Urans und Plutoniums bedarf es großer Energiemengen um diese in die Troposphäre zu transportieren, wo der entscheidende Teil des globalen Schadstofftransports stattfindet. Die Freisetzungen aus dem Kernkraftwerk Fukushima erfolgten eher langsam und in niedrigere Höhen, was für eine vielmehr lokale Verteilung der Radionuklide sorgte.

Aufgrund der zurzeit der Reaktorkatastrophe hauptsächlich vorherrschenden westlichen Winde wurde die Kontamination vorwiegend auf See transportiert. Bis Meerwasser und damit mögliche Kontaminationen über das globale „Conveyor Belt“ den Atlantik und dessen Randmeere erreicht, vergehen Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Durch diese weiträumige Verteilung, der daraus resultierenden Verdünnung und den Zerfall der kurzlebigen radioaktiven Stoffe ist allenfalls mit radiologischen Auswirkungen zu rechnen, die nur Bruchteile der hierzulande herrschenden natürlichen Strahlenexposition ausmachen, sofern man sie überhaupt im Meerwasser nachweisen kann (BUESSELER *et al.* 2012, GRS 2013).

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 und bis heute lückenlos fortgeführt.

Die zeitliche Entwicklung der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs und ^{90}Sr seit 1961 ist in *Abbildung 4-73* 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.

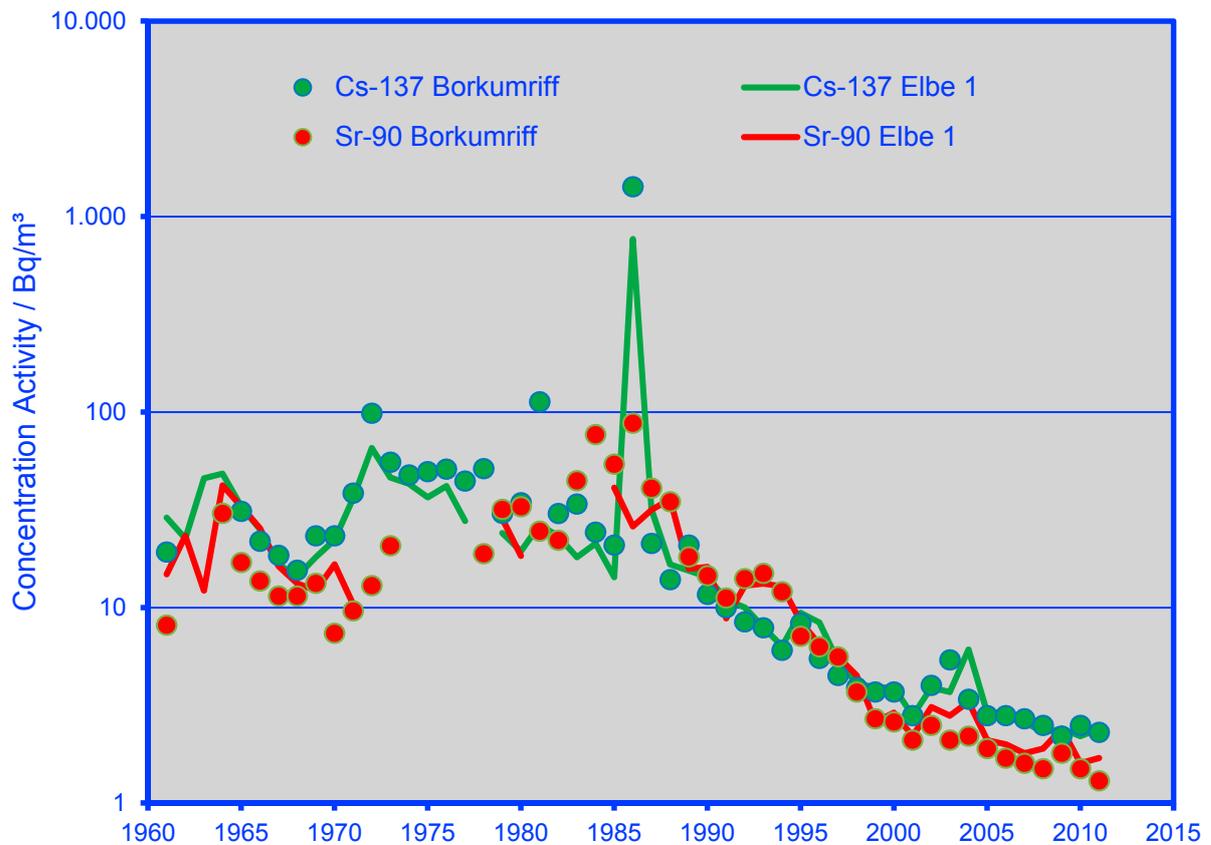


Abbildung 4-73: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr in Oberflächenwasser an den früheren Positionen der Feuerschiffe ‚Borkumriff‘ und ‚Elbe 1‘.

Figure 4-73: Time series of annual maximum concentration activities of ^{137}Cs and ^{90}Sr in surface seawater at former positions of light vessels ‚Borkumriff‘ and ‚Elbe 1‘.

Die kurzzeitige Spitzenkonzentration beim ^{137}Cs im Jahr 1981 bei der Station ‚Borkumriff‘ ist auf das Vordringen höher kontaminierter Wassermassen aus nordwestlicheren 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 zehn Jahren setzte sich diese Verringerung allerdings nicht weiter fort, wie aus den stagnierenden Volumenaktivitäten von ^{137}Cs und ^{90}Sr ersichtlich ist (Abbildung 4-73). Eine Erhöhung der Aktivitätskonzentration von ^{137}Cs oder ^{134}Cs durch den Reaktorunfall von Fukushima im Jahre 2011 ist nicht zu beobachten.

Die räumlichen Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr im Verlauf der Jahre 2008 bis 2011 sind in den Abbildungen 4-74 bis 4-83 für die Deutsche Bucht und die Nordsee zusammengefasst. Systematische jahreszeitliche Unterschiede für das Jahr 2008 sind nicht erkennbar. Gegenüber dem Fallout leicht erhöhte Konzentrationen von ^{137}Cs traten lediglich im Nordwesten auf. Diese leicht erhöhte Kontamination ist zum Großteil auf resus-

pendiertes 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 im Jahr 2008 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.

Für ^{137}Cs verhielten sich die lokalen Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen in der Nordsee in den Jahren 2009 bis 2011 ähnlich, eine leichte Erhöhung gegenüber dem Fallout ist an der Ostküste Großbritanniens aufgrund resuspendiertem Material zu erkennen und am Ausgang des Skagerraks ist der Oberflächenabfluss aus der Ostsee mit seinen geringen Salzgehalten mit den höchsten Aktivitätskonzentrationen von bis zu 10 Bq/m^3 deutlich erkennbar. Der hohe Gehalt an ^{137}Cs in der Ostsee zwischen 20 und 30 Bq/m^3 hat seinen Ursprung im Reaktorunfall von Tschernobyl und nicht, wie manchmal in der Presse falsch dargestellt, in den Ableitungen der kerntechnischen Anlagen im Ostseebereich (*HELCOM 2013, BSH 2013*).

Die räumliche Verteilung von ^{90}Sr in der Nordsee in den Jahren 2009 bis 2011 ist analog, wobei auch hier mit bis zu $3,6 \text{ Bq/m}^3$ der höchste Wert über der Norwegischen Rinne aufgrund des Ausstroms der Ostsee gemessen wurde. Zum Vergleich beträgt in der Ostsee der Gehalt an ^{90}Sr etwa 8 Bq/m^3 .

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.

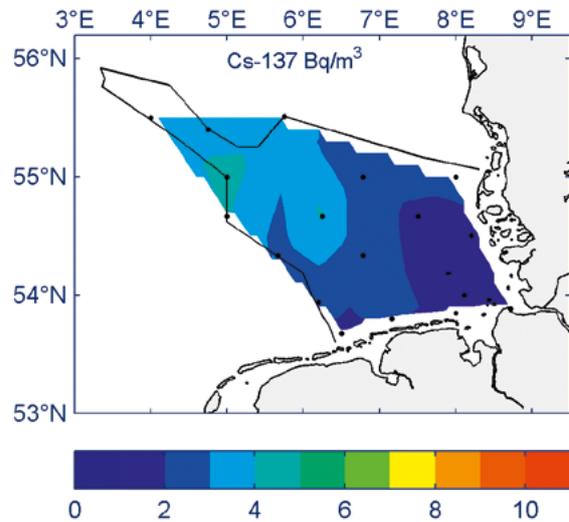


Abbildung 4-74: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2008.

Figure 4-74: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the German Bight from March 2008.

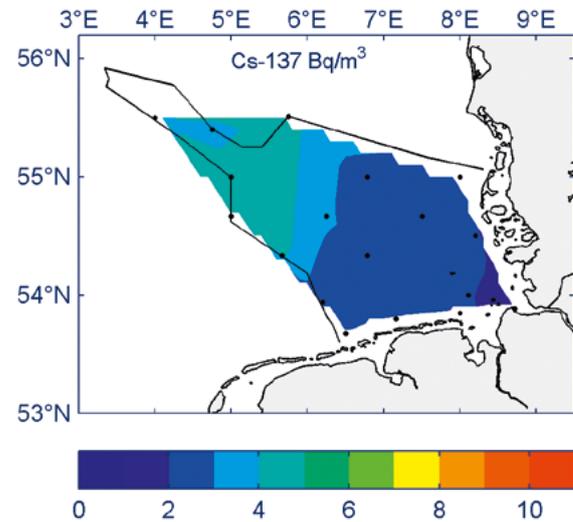


Abbildung 4-75: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2008.

Figure 4-75: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the German Bight from October 2008.

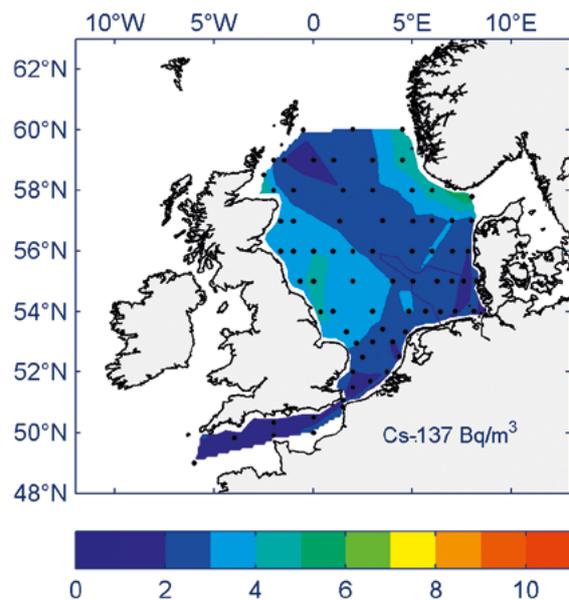


Abbildung 4-76: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.

Figure 4-76: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the North Sea from 2009.

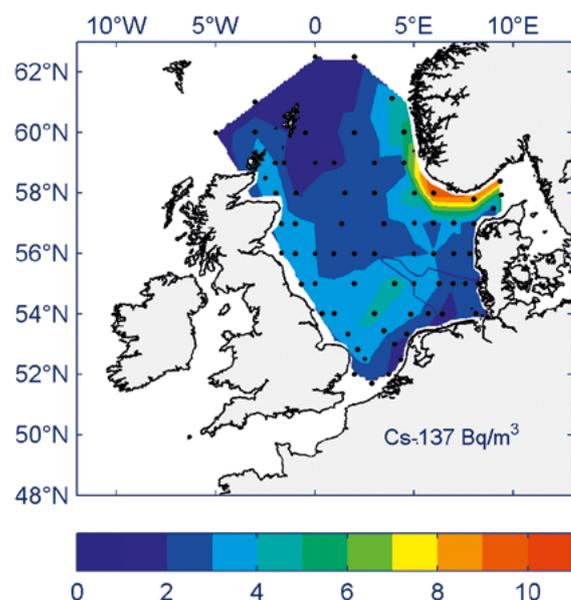


Abbildung 4-77: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.

Figure 4-77: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the North Sea from 2010.

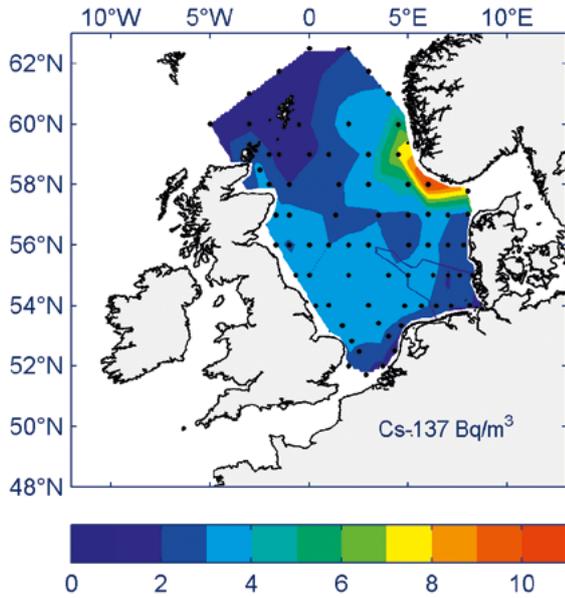


Abbildung 4-78: Verteilung von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.

Figure 4-78: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the North Sea from 2011.

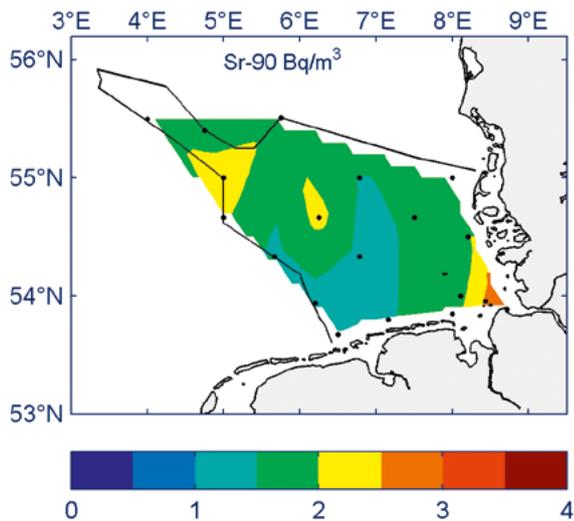


Abbildung 4-79: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2008.

Figure 4-79: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the German Bight from March 2008.

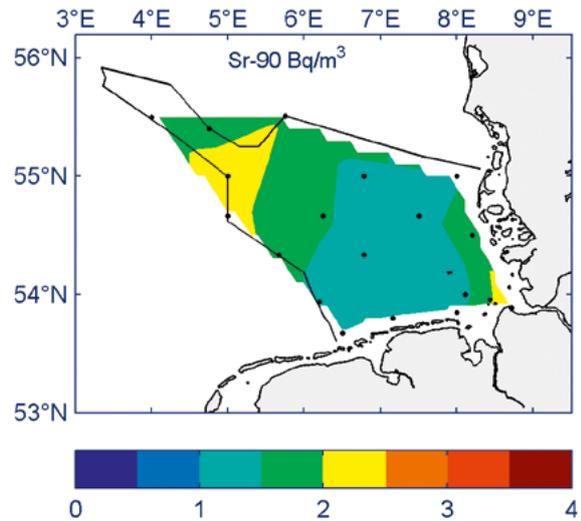


Abbildung 4-80: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2008.

Figure 4-80: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the German Bight from October 2008.

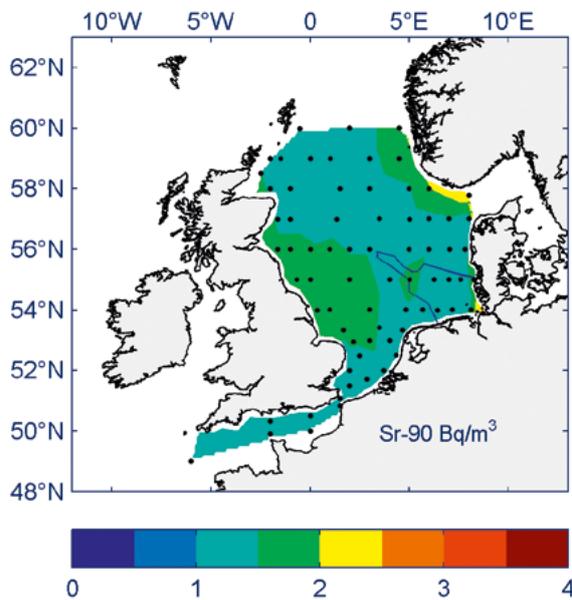


Abbildung 4-81: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.

Figure 4-81: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2009.

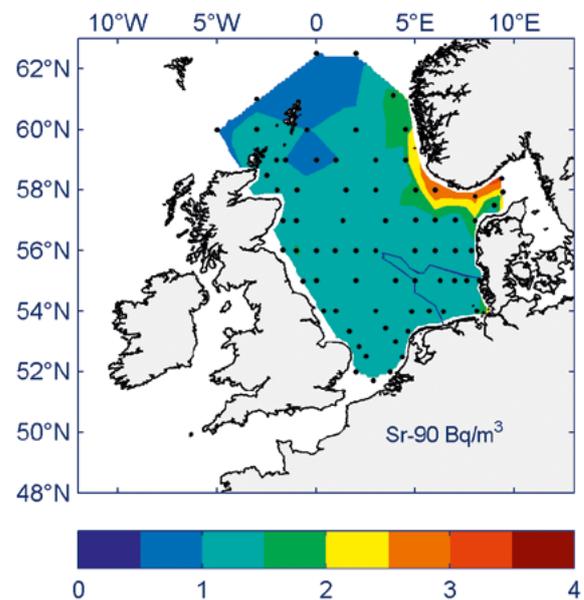


Abbildung 4-82: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.

Figure 4-82: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2010.

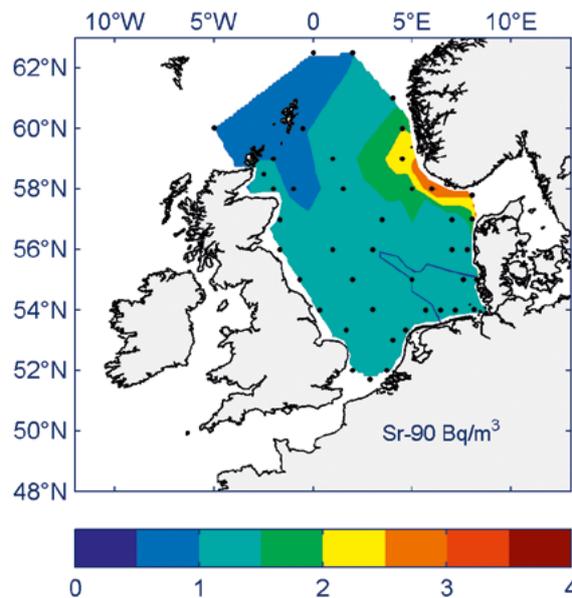


Abbildung 4-83: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.

Figure 4-83: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2011.

Die Sedimentprofile für ^{137}Cs der Stationen KS11 und WB5 in den Jahren 2008 und 2009 sind in den *Abbildungen 4-84* und *4-85* gezeigt. Die spezifische Aktivität liegt für beide Stationen unterhalb 6 Bq/kg und die Profile zeigen einen unregelmäßigen Verlauf, welcher auf starke Umlagerungen des Sediments durch Sturmereignisse hindeutet.

Die Summe der spezifischen Aktivitäten für ^{137}Cs der einzelnen Tiefen beträgt für beide Stationen in den Jahren 2008 und 2009 zwischen 50 und 62 Bq/kg. Zum Vergleich betragen die spezifischen Aktivitäten im deutschen Bereich der Ostsee bis zu 125 Bq/kg, was also gut dem Doppelten der spezifischen Aktivität der beprobten Nordseestationen entspricht.

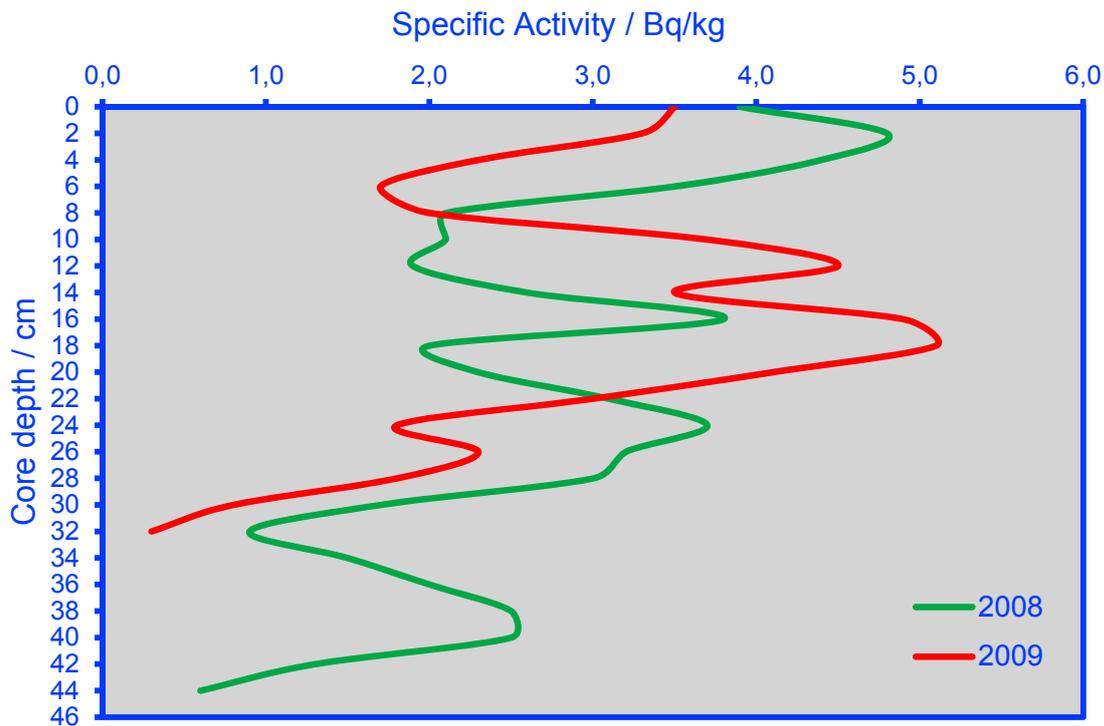


Abbildung 4-84: ^{137}Cs -Sedimentprofile der Station KS11 südöstlich Helgolands in den Jahren 2008 und 2009.

Figure 4-84: Sediment profiles of ^{137}Cs on station KS11 southeast of Helgoland in 2008 and 2009.

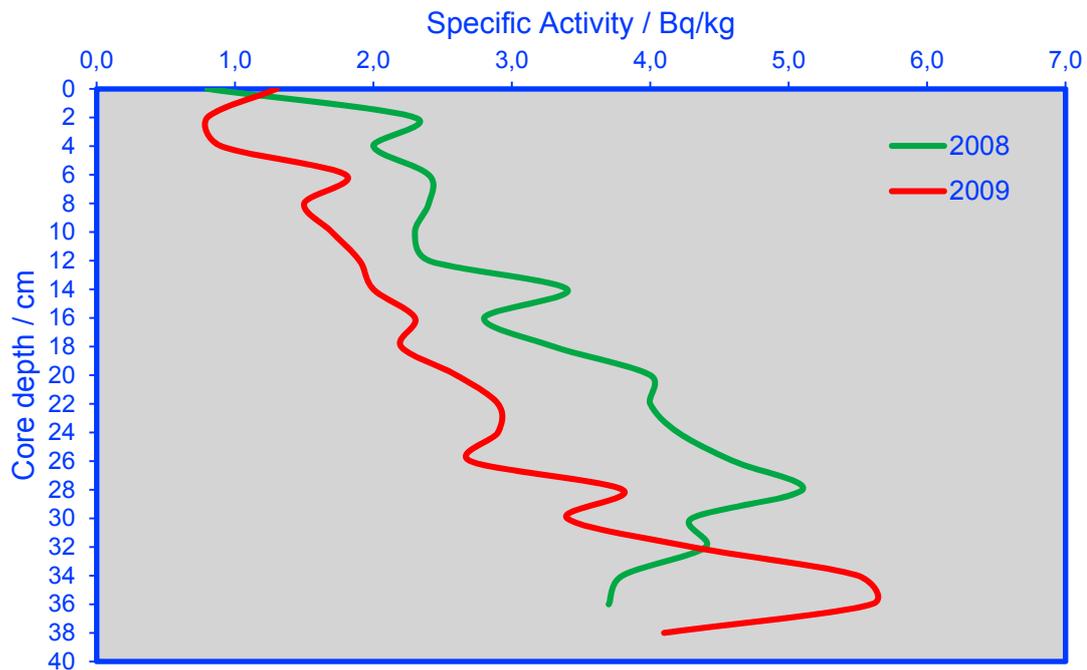


Abbildung 4-85: ^{137}Cs -Sedimentprofile der Station WB5 in den Jahren 2008 und 2009.

Figure 4-85: Sediment profiles of ^{137}Cs on station WB5 in 2008 and 2009.

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 den *Abbildungen 4-86 bis 4-89* ist die räumliche Verteilung der ^3H -Aktivitätskonzentration in der Deutschen Bucht und der Nordsee von 2008 bis 2011 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 Fünftel 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. Deutlich zu erkennen sind die Tritiumeinleitungen im Jahr 2009 der Anlage La Hague im Bereich des Ärmelkanals. Hier wurden Konzentrationen von bis zu 7,4 Bq/L gemessen.

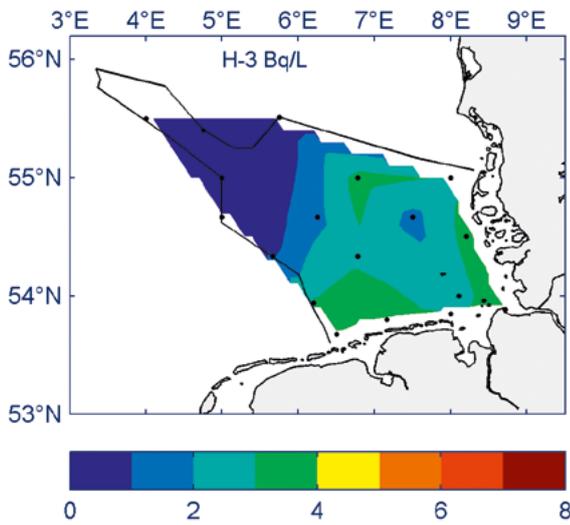


Abbildung 4-86: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2008.

Figure 4-86: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the German Bight in 2008.

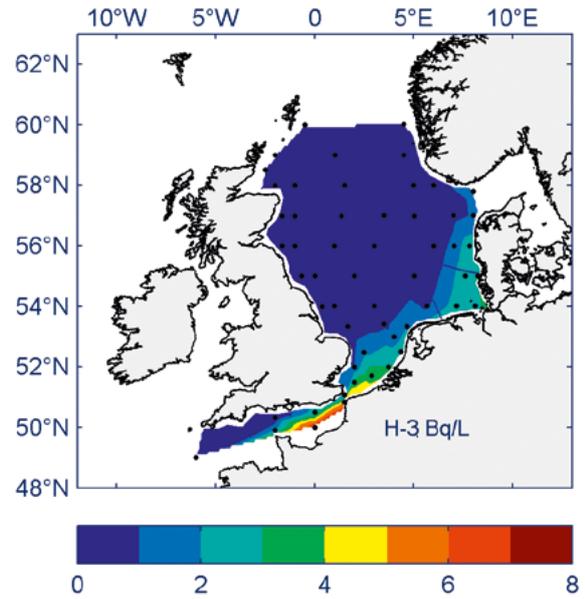


Abbildung 4-87: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.

Figure 4-87: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the North Sea in 2009.

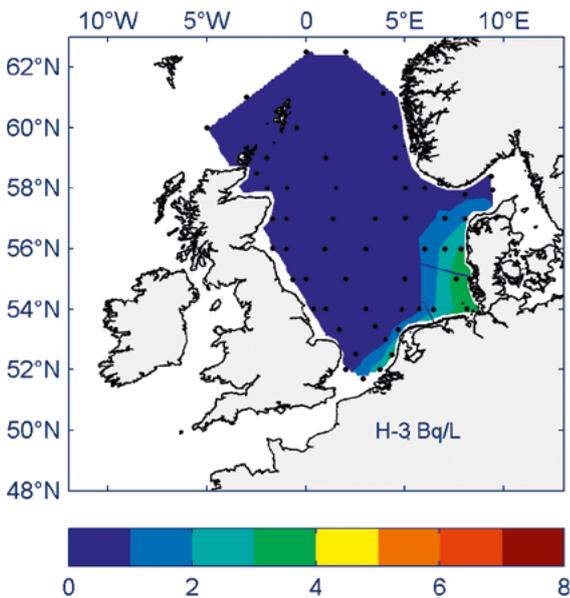


Abbildung 4-88: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.

Figure 4-88: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the North Sea in 2010.

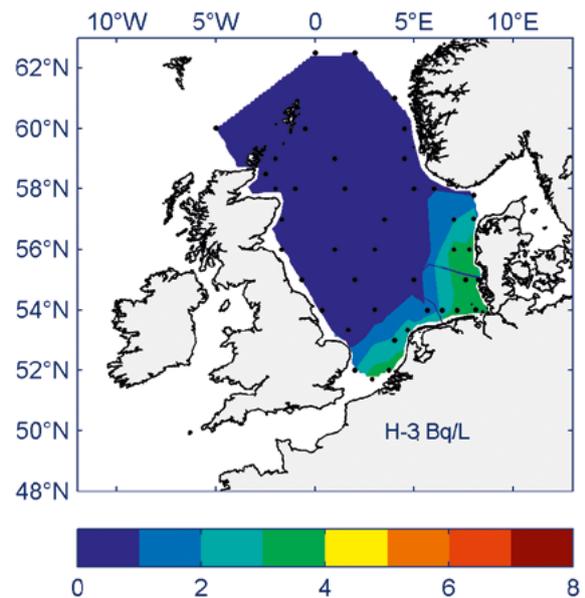


Abbildung 4-89: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.

Figure 4-89: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the North Sea in 2011.

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}Cs oder ^{90}Sr .

Räumliche Verteilungen der Aktivitätskonzentration von $(^{239+240})\text{Pu}$, ^{238}Pu und ^{241}Am in der Deutschen Bucht und Nordsee sind in den *Abbildungen 4-90 bis 4-93* für die Jahre 2008 bis 2011 dargestellt. Die Konzentrationen variierten zwischen 2 und 51 mBq/m^3 für $(^{239+240})\text{Pu}$, 1 und 14 mBq/m^3 für ^{238}Pu und 1 bis 41 mBq/m^3 für ^{241}Am . Die höchsten Konzentrationen finden sich in der Elbe und deren Ästuar und nördlich der Britischen Inseln bis zu deren Ostküste. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Elbe natürliche Anreicherungsprozesse an Schwebstoffen eine Rolle spielen. Die gemessenen 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.

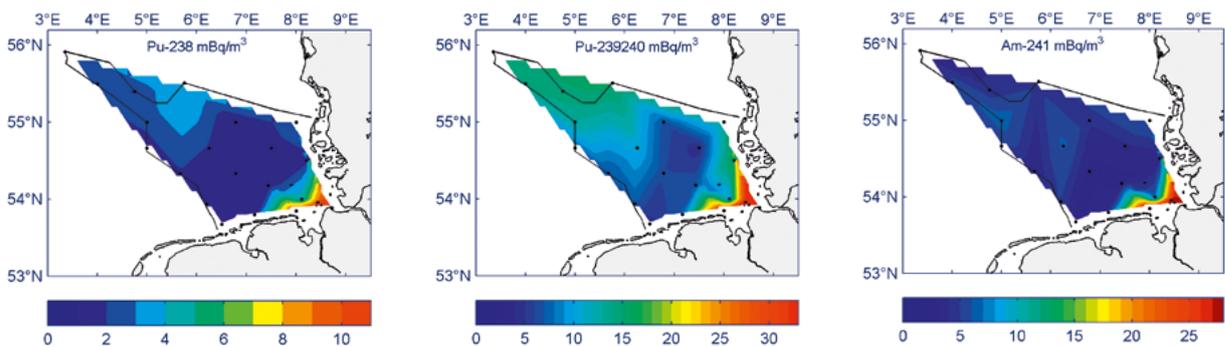


Abbildung 4-90: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $(^{239+240})\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2008.

Figure 4-90: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu , $(^{239+240})\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the German Bight in March 2008.

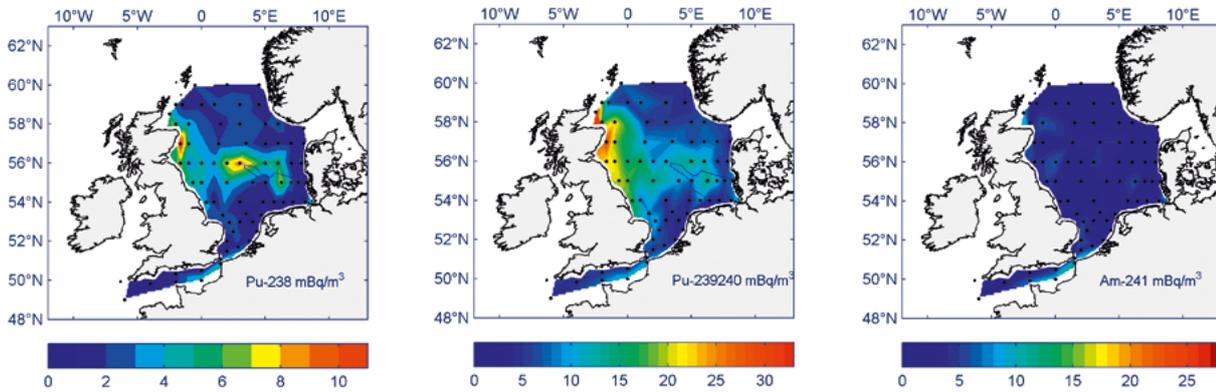


Abbildung 4-91: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.

Figure 4-91: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the North Sea in 2009.

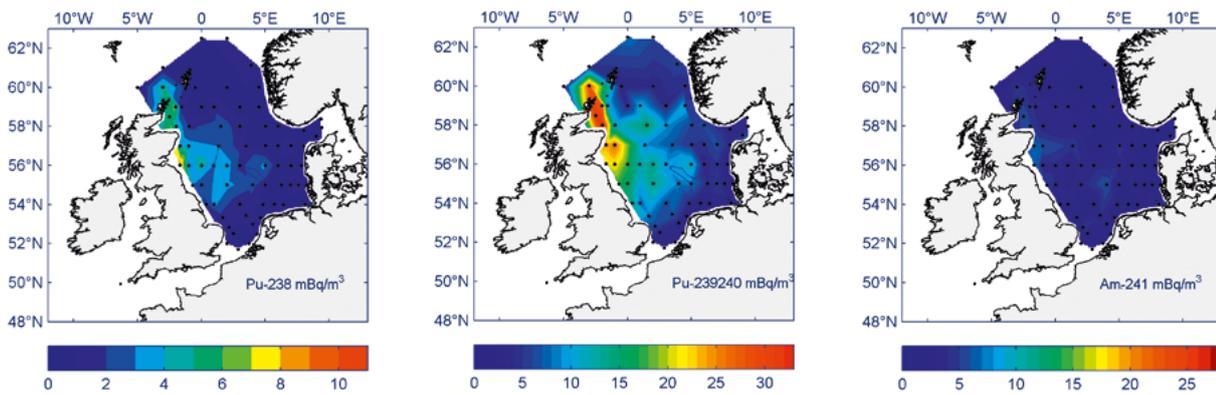


Abbildung 4-92: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.

Figure 4-92: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the North Sea in 2010.

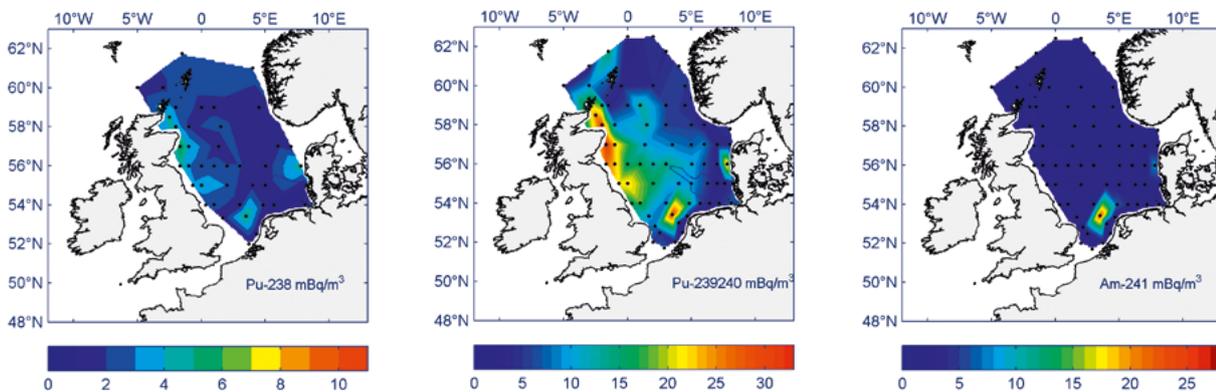


Abbildung 4-93: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.

Figure 4-93: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the North Sea in 2011.

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 0,03 bis 0,08 charakteristisch sind, liegen diese für die Einleitungen aus den Wiederaufbereitungsanlagen mit 0,15 bis 0,20 (Sellafield) und 0,4 bis 0,5 (La Hague) deutlich darüber. Die aktuellen Aktivitätsverhältnisse in der Deutschen Bucht, die im Mittel bei 0,2 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 0,53, also signifikant von Falloutverhältnissen verschieden.

Für die Nordsee lag das $^{238}\text{Pu}/(^{239+240})\text{Pu}$ -Aktivitätsverhältnis in den Jahren 2009 bis 2011 im Mittel bei 0,2, also auch deutlich geprägt von den Einleitungen der Wiederaufbereitungsanlagen, wobei das $^{241}\text{Am}/(^{239+240})\text{Pu}$ -Aktivitätsverhältnis im Mittel bei 0,4 lag und sich somit dem Falloutverhältnis angenähert hat.

Im Jahr 2009 konnte eine Anomalie des Pu-Aktivitätsverhältnisses in der zentralen Nordsee detektiert werden. Die *Abbildung 4-94* zeigt die Pu-Verhältnisse im Jahr 2009, die *Abbildung 4-95* die für das Jahr 2010. In *Abbildung 4-94* sind deutlich die ungewöhnlich hohen Aktivitätsverhältnisse in der zentralen Nordsee mit bis zu 0,87 zu erkennen. Diese zeitweilig erhöhten Pu-Verhältnisse stehen im Zusammenhang mit einer Reinigungsaktion in der Nähe der schottischen Anlage Dounreay (LEONARD 2010, RIFE 2010).

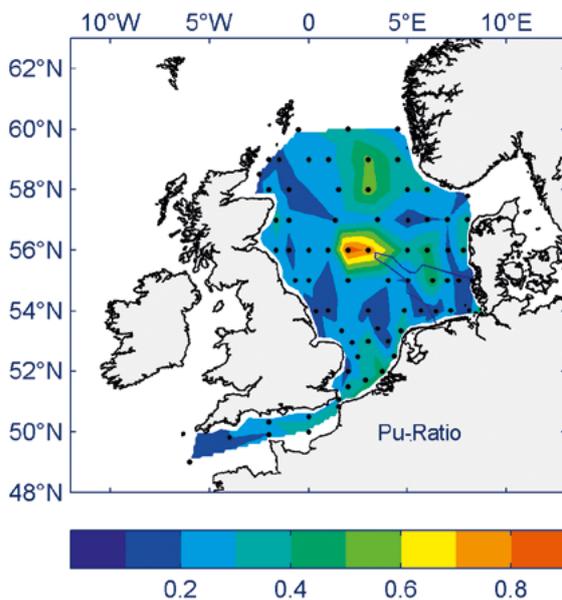


Abbildung 4-94: Verteilung der Plutoniumverhältnisse (^{238}Pu zu $^{(239+240)}\text{Pu}$) im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.

Figure 4-94 Distribution of the Plutonium ratios (^{238}Pu to $^{(239+240)}\text{Pu}$) in surface seawater of the North Sea in 2009.

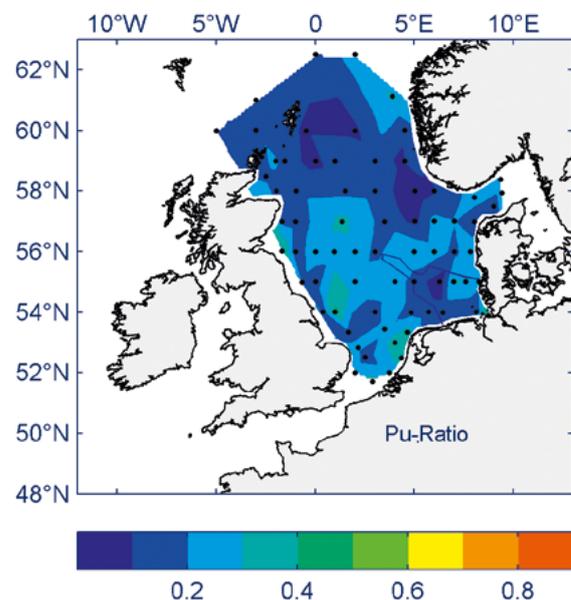


Abbildung 4-95: Verteilung der Plutoniumverhältnisse (^{238}Pu zu $^{(239+240)}\text{Pu}$) im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.

Figure 4-95: Distribution of the Plutonium ratios (^{238}Pu to $^{(239+240)}\text{Pu}$) in surface seawater of the North Sea in 2010.

Da die Einleitungen der Wiederaufbereitungsanlagen an Transuranen in den letzten Jahren glücklicherweise sehr gering geworden sind, lassen sich die hier gefundenen Aktivitätskonzentrationen nur mit Resuspension aus dem Sediment der Irischen See, aber auch der europäischen Kontinentalküste erklären.

Die Sedimentprofile für $(^{239+240}\text{Pu})$ im Jahr 2008 (siehe *Abbildung 4-96*) weisen wie die ^{137}Cs -Sedimentprofile einen unregelmäßigen Verlauf auf, was auf starke Umlagerungen des Sediments aufgrund von Sturmereignissen hindeutet. Die $^{238}\text{Pu}/(^{239+240}\text{Pu})$ -Aktivitätsverhältnisse des Sediments (siehe *Abbildung 4-97*) zeigen für die Station KS11 mit einem Wert von 0,05 im Mittel ein reines Falloutverhältnis, wobei der Mittelwert der Station WB5 bei 0,18 liegt und somit die klassische Sellafieldsignatur aufweist.

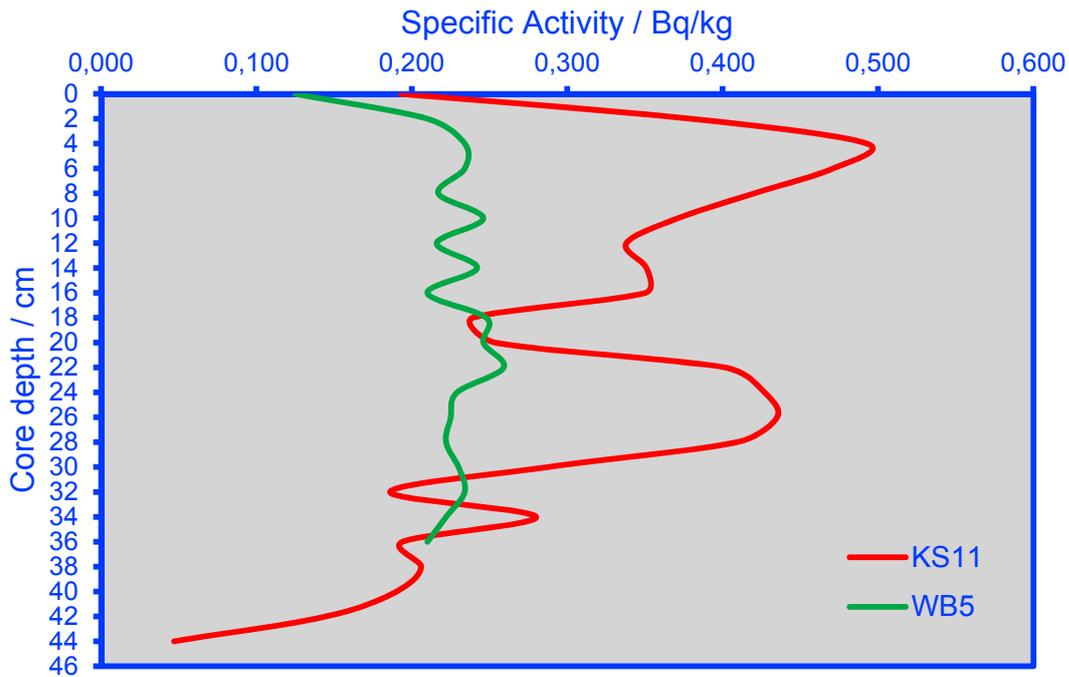


Abbildung 4-96: $(^{239+240}\text{Pu})$ -Sedimentprofile der Stationen KS11 und WB5 im Jahr 2008.
 Figure 4-96: Sediment profiles of $(^{239+240}\text{Pu})$ on stations KS11 and WB5 in 2008.

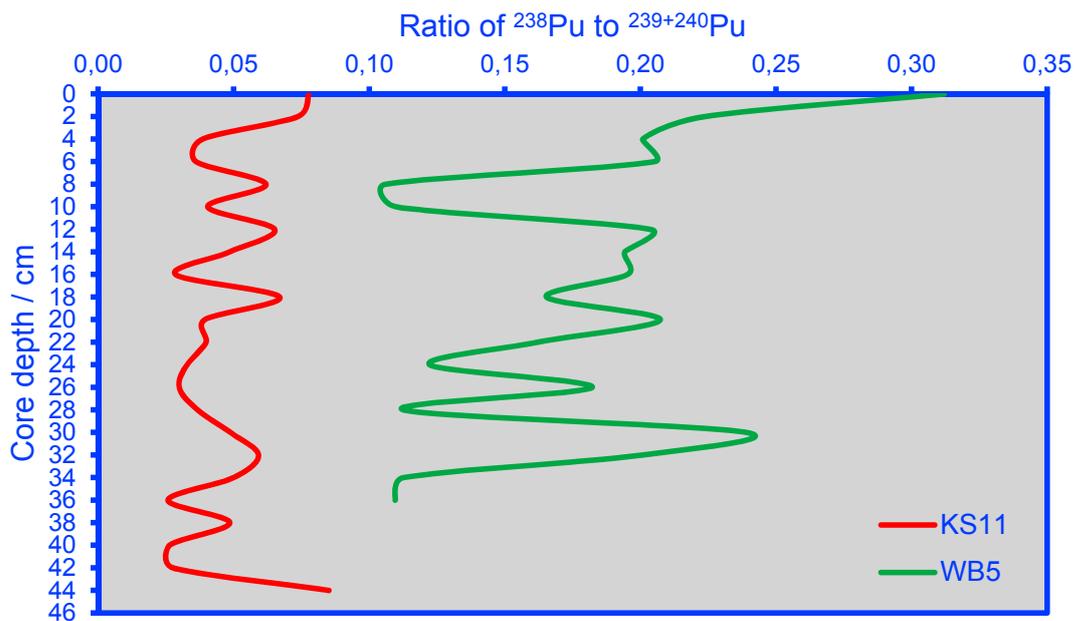


Abbildung 4-97: Sedimentprofile der Plutoniumverhältnisse (^{238}Pu zu $(^{239+240}\text{Pu})$) an den Stationen KS11 und WB5 im Jahr 2008.
 Figure 4-97: Sediment profiles of the Plutonium ratios (^{238}Pu to $(^{239+240}\text{Pu})$) on stations KS11 and WB5 in 2008.

Zusammenfassung

Nährstoffe

Während die über die Elbe eingetragenen Stickstoff- und Phosphatfrachten in die Deutsche Bucht trotz interannueller Unterschiede eine deutlich abnehmende Tendenz zeigen, erreichen die Silikatfrachten von Jahr zu Jahr sehr unterschiedliche Konzentrationen. Ein Trend ist hier nicht zu erkennen.

Die Nährstoffsituation in der Deutschen Bucht hat sich gegenüber derjenigen der Vorjahre im Rahmen der natürlichen Variabilität nur wenig verändert. Für das lösliche Phosphat wird der angestrebte Orientierungswert im Küstenbereich erreicht, nicht jedoch für Gesamtphosphor. Auch die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen liegen noch deutlich über dem Orientierungswert.

Die letzte im Jahr 2008 durchgeführte Klassifizierung (OSPAR Commission, 2008) stufte sowohl die Küstengewässer als auch die mittlere Deutsche Bucht als „problem area“ (PA) ein. In der äußeren Deutschen Bucht, die als „potential problem area“ (PPA) eingestuft wurde, liegen zwar die Nährstoffkonzentrationen im Bereich der Orientierungswerte, mit Sauerstoffmangelsituationen bzw. erhöhten Chlorophyllgehalten ist hier jedoch immer noch zu rechnen.

Bei der pH-Wert Entwicklung in der Deutschen Bucht zeichnet sich trotz jahreszeitlicher Schwankungen und interannualer Unterschiede ein abnehmender Trend ab. Die durch den Einfluss von Industrie und Verkehr steigende Kohlendioxidbelastung, die zu einem Sinken des pH-Wertes in den Weltmeeren führt, kann negative Auswirkungen auf die Meeresumwelt zur Folge haben.

Die Verteilung der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser ist vergleichbar mit den Vorjahren (80–100%). Die stärksten Untersättigungen traten im Sommer 2009 und 2011 im nordöstlichen Elbeurstromtal bzw. im Entenschnabel auf, sie lagen hier bei 66 %.

Die Chlorophyllkonzentrationen waren aufgrund der in den Sommermonaten vorherrschenden Stickstofflimitierung gering. Höchste Konzentrationen wurden im küstennahen Gewässer vor Sylt mit 6,8 µg/L erreicht.

Organische Schadstoffe

Wasser: Für die meisten Schadstoffe ist die Elbe die Haupteintragsquelle in die Deutsche Bucht. Generell nehmen daher die Schadstoffgehalte im Wasser mehr oder minder schnell von der Küste zur offenen See hin ab. Im Detail zeigten sich allerdings für die verschiedenen organischen Schadstoffe unterschiedliche räumliche Verteilungen bezüglich der absoluten Konzentrationen und der Steilheit der Konzentrationsgradienten.

Außerhalb der Elbfahne sind die Konzentrationen von unpolaren Schadstoffen gewöhnlich sehr niedrig. Ein sehr 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 im Küstenbereich stark von den Schwebstoffgehalten der Proben abhängig. In der offenen See wurden für diese lipophilen Stoffe ca. 100 bis 1000-fach niedrigere Konzentrationen im Wasser beobachtet als in der Elbe. Aufgrund der niedrigen Bestimmungsgrenzen, die im BSH-Labor erreicht werden, waren aber die meisten Stoffe auch in der äußeren Deutschen Bucht in sehr geringen Konzentrationen (0,7 bis 10 pg/L) nachweisbar.

Polare, besser wasserlösliche Stoffe zeigten meist geringere Konzentrationsgradienten. Da sie außerdem häufig größere Quellstärken in den Flüssen aufwiesen als die klassischen lipophilen Stoffe, waren sie meist in deutlich höheren Konzentrationen im Meerwasser zu beobachten. Zu diesen Stoffen zählen insbesondere ›moderne‹, eher polare Pestizide (z. B. Diuron, Simazin, Terbutylazin) aber auch neue Stoffklassen wie perfluorierte Tenside (PFOA, PFOS) oder persistente Stoffe, die in der Industrie oder auch in Haushalten in großen Mengen verwendet werden (Komplexbildner, Flammschutzmittel). Aufgrund ihrer polaren und beständigen (persistenten) 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. Diese Stoffe wurden im Küstenwasser in Konzentrationen bis zu 10 ng/L und in der offenen See im Bereich von 10 bis 500 pg/L beobachtet.

Die Gehalte der lipophilen CKW und PAK im Meerwasser lagen im Untersuchungszeitraum im Wertebereich der vorangegangenen Jahre. Ein zeitlicher Trend war auch mittelfristig (2000 bis 2011) nicht erkennbar, weil zum einen die Konzentrationsschwankungen im Meerwasser relativ groß sind zum anderen keine großen absoluten Änderungen beobachtet wurden. Diese werden momentan auch nicht erwartet, da die Stoffe seit langem geregelt sind (DDT und PCB) oder ubiquitär in der Umwelt vorkommen (PAK).

Die Konzentrationen der Hexachlorcyclohexan-Isomere α - und γ -HCH waren 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 unter 0,1 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. Eine solche war seit 2007 und in dem Untersuchungszeitraum 2008 bis 2011 nun auch für das γ -HCH zu beobachten. Somit waren in der Elbfahne keine weiter abnehmenden Trends mehr für die HCH-Isomere festzustellen. Außerhalb der Küstengewässer waren für das γ -HCH z. T. noch leicht rückläufige Tendenzen zu beobachten, allerdings waren diese nur noch sehr gering.

Die Konzentrationen der polaren Pestizide unterlagen auch in den Jahren 2008 bis 2011 recht starken jahreszeitlichen Schwankungen. Diese werden durch unterschiedliche Anwendungszeiten der verschiedenen Herbizide verursacht. Obwohl regelmäßige Analysen erst seit dem Jahr 2000 durchgeführt werden, war es möglich, erstmalig für einige Stoffe abnehmende Zeitrends nachzuweisen. Dies betraf sowohl geregelte Herbizide (Atrazin, Verbot seit Mitte der 1990er Jahre) als auch noch zugelassene Stoffe. Auch bei den seit 2002 beschränkten perfluorierten Tensiden wurden rückläufige Trends im Küstenbereich beobachtet. In der offenen See wurden hingegen kaum rückläufige Trends festgestellt.

Sediment: Obwohl lipophile Schadstoffe im Sediment stark angereichert werden und in ca. 10^4 - bis 10^6 -fach höheren Konzentrationen als im Meerwasser vorliegen, ließen sich Quellenkorrelationen in der Deutschen Bucht kaum feststellen. Vielmehr werden die räumlichen Verteilungen hauptsächlich durch die Sedimenteigenschaften (Korngrößenverteilung, TOC-Gehalte) bestimmt. Die Konzentrationen aller untersuchten Verbindungen unterlagen im Sediment hohen kleinskaligen räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Aufgrund dieser hohen Variabilitäten, die sich auch bei Normalisierung der Konzentrationen auf organischen Kohlenstoff (TOC) nicht hinreichend reduzieren ließen, konnten keine robusten zeitlichen Trends festgestellt werden.

Metalle

Wasser: Im Wasser der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) wurden in den Jahren von 2008 bis 2011 keine Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) gemessen, die negative Auswirkungen auf die belebte Natur wahrscheinlich machen würden. Grundlage dieser Einschätzung ist die Bewertung der gelöst vorliegenden Elementkonzentration von Cadmium, Blei, Quecksilber und Nickel auf Basis der WRRL-Umweltqualitätsstandards AA-EQS. Die Kupfer- und Zinkkonzentrationen wurden auf Basis der Wasserqualitätsstandards (WQS) der US-EPA bewertet, da keine entsprechenden WRRL-QS vorliegen.

Hintergrundwerte erreichten die Metallgehalte (gelöst) der Elemente Cadmium, Quecksilber, Nickel, Blei und Zink im offenen Meer (Salzgehalte >34). 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 Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion.

Zwischen 2006 und 2011 zeigte die Blei-Zeitreihe im küstenfernen Wasser einen leicht aber signifikant abnehmenden Trend, bei bereits sehr niedrigen Konzentrationen um den Hintergrundwert.

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 (<20µm) im Oberflächensediment Gehalte, die negative biologische Effekte verursachen können. Von den sechs untersuchten Elementen (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) überschreiten Quecksilber, Zink und Blei entlang der nordfriesischen Küste den Effektgrenzwert. Zink und Blei zeigen in der gesamten deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone erhöhte Werte, Quecksilber nur entlang der nordfriesischen Küste bis zur Elbemündung. Eine insgesamt niedrige Belastung wird im Gebiet der Weißen Bank festgestellt, hier erreichen die Elemente Cadmium und Kupfer in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments ihre Hintergrundwerte.

Signifikante zeitliche Trends, die im Zeitraum zwischen 2001 bis 2011 auf den Trendstationen ermittelt wurden, waren alle abnehmend (Weiße Bank (Hg), Ems (Cu), deutsche Bucht (Hg)). Quecksilber zeigte seit 2001 in nahezu der gesamten deutschen Bucht signifikant abnehmende Trends (Ausnahme Ems).

Die Umlagerung von Sedimenten aus dem Hamburger Hafen zur Tonne E3 führte im Zeitraum zwischen 2005 und 2010 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. Im Jahr 2011 wurden auch hier keine über den ortsüblichen Rahmen erhöhten Metallgehalte mehr gemessen.

Radioaktivität

Die Überwachung war in den Jahren 2008 bis 2011 auf die Radionuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr , Tritium und die Transurane ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$, und ^{241}Am in der Deutschen Bucht und der Nordsee fokussiert. Die Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen der Radionuklide wiesen in der Deutschen Bucht 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 Süßwassereintrag aus der Elbe erkennbar. Die höheren Konzentrationen über der Norwegischen Rinne für ^{137}Cs und ^{90}Sr erklären sich durch den Ostseeausstrom, welcher aufgrund des Reaktorunfalls von Tschernobyl und dem geringen Wasseraustausch der Ostsee noch immer höhere Konzentrationen mit sich führt als das Wasser der Nordsee.

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 Anreicherung an Schwebstoffen. Die erhöhten Konzentrationen nördlich und östlich der Britischen Inseln erklärt sich durch resuspendiertes Material der Irischen See. Die zeitweilige, anomale Erhöhung der $^{238}\text{Pu}/^{(239+240)}\text{Pu}$ -Aktivitätsverhältnisse in der zentralen Nordsee im Jahr 2009 ist auf eine Reinigungsaktion in der Nähe der Anlage Dounreay zurückzuführen.

Die spezifische Aktivität der Sedimente der Deutschen Bucht ging in den letzten zehn Jahren in Bezug auf ^{137}Cs und $^{(239+240)}\text{Pu}$ kontinuierlich zurück, was auf die Resuspension dieser Radionuklide hindeutet. Das Sediment der mittleren deutschen Bucht zeigt eine klassische Sellafielddisignatur, wobei südöstlich von Helgoland ein reines Falloutverhältnis vorliegt.

Auswirkungen auf eine Konzentrationserhöhung der untersuchten Radionuklide aufgrund des Reaktorunfalls von Fukushima konnten bis 2011 in keinem Falle nachgewiesen werden. Mit radiologischen Folgen ist nach bisherigem Kenntnisstand nicht zu rechnen.

Die effektive Gesamtexposition beträgt in Deutschland durchschnittlich 5 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. Environmental Radioactivity*, 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.

BfG (2013) Abschlussbericht 2011 – Überprüfung der ökologischen Auswirkungen der Verbringung von Baggergut aus der Hamburger Delegationsstrecke der Elbe auf die Verbringungsstelle Tonne E3 nordwestlich von Scharhörn. *Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde* (BfG-1775). Koblenz

Brockmann, U., D. Topcu and M. Schütt, Assessment of the eutrophication status of the German Bight according to the OSPAR Comprehensive Procedure, 2001–2005. 54 pp., 117 figs., Appendix 200 figs., 2007.

BSH, Abfallbeseitigung auf der Hohen See. 68–78 in: *Jahresbericht des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 1990*, BSH, 1991.

BSH-Homepage, 2013

<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Radioaktivitaet/index.jsp>

Buesseler, K.O., S. R. Jayne, N.S. Fisher, I. I. Rypina, H. Baumann, Z. Baumann, C. F. Breier, E. M. Douglass, J. George, A. M. Macdonald, H. Miyamoto, J. Nishikawa, S. M. Pike und S. Yoshida, Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109 (16) 5984–5988, 2012.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 2001, Bonn, 2002.

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.

GRS, Fukushima Daiichi 11. März 2011 – Unfallablauf, radiologische Folgen, Bericht GRS-S-53, 2., überarbeitete Auflage, 2013

<http://www.grs.de/publication/GRS-S-53>

HELCOM, Thematic assessment of long-term changes in radioactivity in the Baltic Sea, 2007 – 2010, *Balt. Sea Environ. Proc.* No. 135, 4 pp., 2013

IAEA, Sediment Kds and concentration factors for radionuclides in the marine environment, *Tech. Rep. Series*, No. 247, Vienna, 1985.

Kershaw, P. J., D. McCubbin und K. S. Leonard, Continuing contamination of North Atlantic and Arctic waters by Sellafield radionuclides, *Sci. Tot. Env.*, 237/238, 119–132, 1999.

Koelzer, W., Lexikon zur Kernenergie, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, aktualisierte Fassung, 2013 <http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/service/021lexikon.pdf>

Leonhard, K., persönlicher Kommentar, 2010.

Lenhart, H.-J. and Pätsch, J., 2001. Daily nutrient loads of the European continental rivers for the years 1977–1998. *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung*; Reihe B: Ozeanographie, No 40, pp. 146. Ergänzt bis 2009.

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.

Nies, H. und G. Kanisch, European maritime areas and marine fish, 39–46 in: Henrich, E. und A. Janssens (eds.), Stakeholders' Conference on Approaches to Environmental Radioactivity, Proceedings, Luxembourg, 2–3 December 2002, 206pp., 2003.
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/conference/shc_2003_09_19_proceedings_en.pdf

Nies, H. und J. Herrmann, Radioaktive Stoffe in Nord- und Ostsee. 61–65 in: Trugenberger-Schnabel, Peter, Kanzliwius, Bernhard Ströl (Hrsgb.), Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland, *Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz*, Daten und Bewertung für 2006 und 2007, BfS, Salzgitter, 102pp., 2008, ISSN 1864-2810.

OSPAR, Integrated Assessment of Inputs to the OSPAR Convention Area 1990–1996. Outcome of INPUT Special Assessment Workshop, Den Haag 26.–27. March 1998, OSPAR Commission, Meeting Document ASMO 98/5/9, 122pp, 1998.

OSPAR, JAMP Guidelines for Monitoring Contaminants in Sediments, Agreements, OSPAR Commission, London 2002.

OSPAR, EUC 2005 Summary Record – EUC 05/13/1, Annex 5 as amended and endorsed by OSPAR 2005 Summary Record – OSPAR 05/21/1, §§ 6.2–6.5 and Annex 6. “Common Procedure for the Identification of the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area” (Reference number: 2005-3), 2005.

OSPAR, Agreement on Background Concentrations for Contaminants in Seawater, Biota and Sediments (OSPAR Agreement 2005-6), Agreements, OSPAR Commission, London, 2005

OSPAR, Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area. Second OSPAR integrated report. 108 S. OSPAR Commission. London. Publication number 372/2008.

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.

OSPAR, 2010 Quality Status Report 2010. OSPAR Commission. London. 176 pp. Zugriff unter: <http://qsr2010.ospar.org/en/index.html>

Ott, J., *Meereskunde*, UTB für Wissenschaft, 2. Auflage, 424pp., 1996.

Redfield, A. C., On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. 176–192 in: Daniel, R. J. (ed.), *James Johnstone Memorial Volume*, University Press, Liverpool, UK, 348pp, 1934.

RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik ABl. L 327 vom 22. 12. 2000

RIFE – 15, *Radioactivity in food and the Environment 2009*, October 2010.

Schmolke, S., Metalle, 232–262 in: System Nordsee. 2006 & 2007: Zustand und Entwicklung, *Berichte des BSH*, Nr. 49. P. Loewe, H. Klein und S. Weigelt-Krenz (Eds.). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 2013.

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.

UBA, 2009. Umweltbundesamt. Klimawandel und marine Ökosysteme. Meeresschutz ist Klimaschutz. 56 S.

Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. RICHTLINIE 2008/56/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt. Festlegung von Umweltzielen für die deutsche Nordsee nach Artikel 10 Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Verabschiedet vom Bund/Länder-Ausschuss Nord- und Ostsee (BLANO) in seiner 2. Sitzung am 30. Mai 2012.

Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. RICHTLINIE 2008/56/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt. Beschreibung eines guten Umweltzustands für die deutsche Nordsee nach Artikel 9 Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Verabschiedet vom Bund/Länder-Ausschuss Nord- und Ostsee (BLANO) in seiner 2. Sitzung am 30. Mai 2012.

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.*, Suppl. 51, 245–266, 1999.

Volkmer, M., Kernenergie Basiswissen, Informationskreis KernEnergie, 100pp., Berlin, 2007. www.kernfragen.de/kernfragen/documentpool/018basiswissen2007.pdf

Weigelt-Krenz, S., Nährstoffe. 170–192 in: System Nordsee. 2006 & 2007: Zustand und Entwicklung, *Berichte des BSH*, Nr. 49. P. Loewe, H. Klein und S. Weigelt-Krenz (Eds.). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 2013.

www.bioacid.de

www.ospar.org

Abbildungsverzeichnis

Atmosphärische Zirkulation

Abbildung 2-1: Luftdruckverteilung (hPa) im Meeresniveau am 31. März 2010 (Sturmtief „Kerstin“) mit Gitterpositionen zur Wetterlagenklassifizierung und Klassifizierung (zyklonal/Sturm).	42
Abbildung 2-2: Relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen für 2008 (blau) und 2009 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971–2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppelinie), 75 und 90 %.	52
Abbildung 2-3: Wie Abbildung 2-2, jedoch für monatliche absolute Häufigkeiten (Tage).	53
Abbildung 2-4: Wie Abbildung 2-2, jedoch für die Jahre 2010 und 2011.	54
Abbildung 2-6: Wetterlagenübergänge, Jahresklimatologie. Die Bogenlänge eines Ringsektors entspricht der Häufigkeit f in Tagen von Wetterlage X , d.h. der jeweiligen Randsumme der Countmatrix Φ in Tabelle 2-19. 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 . Die Graphik wurde mit dem Softwarepaket Circos erstellt (KRZYWINSKI <i>et al.</i> 2009).	57
Abbildung 2-7: Wie Abbildung 2-6, jedoch für die Jahre 2008 und 2009.	59
Abbildung 2-8: Wie Abbildung 2-6, jedoch für 2010 und 2011.	60
Abbildung 2-9: Saisonale Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (SLP, hPa). Links: NCEP/NCAR Klimatologie (1971–2000). Mitte: 2008, SLP & SLP Anomalien (farbig, Konturintervall 1 hPa). Rechts: 2009, ... Rot: Verteilungstyp (SLP bzw. SLP/SLPA) sowie Jahreszeit (JFM, AMJ, ... = Winter, Frühling ...).	61
Abbildung 2-10: Abbildung 2-9, jedoch für 2010 und 2011.	62
Abbildung 2-11: Monatliche Luftdruckverteilungen im Meeresniveau (SLP, hPa) für das Jahr 2008 mit Abweichungen von der NCEP/NCAR Klimatologie des Zeitraums 1971–2000 (SLPA, farbig, Konturabstand 1 hPa). Rot: Verteilungstyp (SLP/SLPA) und Monat (J, F, ... = Jan., Feb., ...).	63
Abbildung 2-12: Wie Abbildung 2-11, jedoch für das Jahr 2009.	64
Abbildung 2-13: Wie Abbildung 2-11, jedoch für das Jahr 2010.	65
Abbildung 2-14: Wie Abbildung 2-11, jedoch für das Jahr 2011.	66
Abbildung 2-15: Saisonale 50 %-Wahrscheinlichkeitsellipsen des „Nordseewindes“ (1 = Winter = JFM, 2 = Frühling, etc.); oben: 2008, unten: 2009.	67
Abbildung 2-16: Abbildung 2-15, jedoch für die Jahre 2010 und 2011.	68
Abbildung 2-17: Virtuelle Trajektorien des „Nordseewindes“ mit Ensemble und Klimatologie. Zeitmarken kennzeichnen Monatsanfänge, Jahreszahlen die Endpunkte der Ensemblemitglieder. Alle Trajektorien starten bei $1 = (0,0)$, ihr Verlauf ergibt sich durch Addition täglicher Windvektoren. Division der Trajektorienlänge und der geradlinigen Distanz zwischen 2 beliebigen Marken durch das zugehörige Zeitintervall in Tagen liefert die mittlere skalare bzw. vektorielle Windgeschwindigkeit für diesen Zeitraum in m/s.	71
Abbildung 2-18: Wie Abbildung 2-17, jedoch für die Jahre 2010 und 2011.	72

Abbildung 2-19: Sturmhäufigkeiten für 2007/08 (blau) und 2008/09 (rot) mit empirischen Verteilungen für 1971–2000 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Min bis Max, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, durchgezogene Treppenlinie), 75 und 90 %.	75
Abbildung 2-20: Wie Abbildung 2-19, jedoch für 2009/10 und 2010/11.	75
Abbildung 2-21: Jahresgänge der monatlich gemittelten Tagessummen der Globalstrahlung auf Norderney mit intramonatlichen Extrema sowie klimatologische Monatsmittel (1971–2000) mit 95 %-Band (± 1.96 zwischenjährliche Standardabweichungen). 1 kJcm^{-2} entspricht einer Strahlungsflussdichte von 116 Wm^{-2} . Rohdaten: Deutscher Wetterdienst.	76
Abbildung 2-22: Monatliche Lufttemperaturen auf Norderney mit Klimatologie (1971–2000) und 95 %-Band (Klima ± 1.96 zwischenjährliche Standardabweichungen). Rohdaten: DWD.	77
Abbildung 2-23: Jahresgänge für 2008 bis 2011 der über die Deutsche Bucht (Seegebiet S-lich 55.5° N und E-lich 6.5° E) gemittelten monatlichen Oberflächentemperaturen mit Klimatologie (1971–2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).	78

Meeresphysik

Abbildung 3-1: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2008. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	85
Abbildung 3-2: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2008. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	86
Abbildung 3-3: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2009. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	87
Abbildung 3-4: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2009. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	88
Abbildung 3-5: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2010. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	89
Abbildung 3-6: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2010. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	90
Abbildung 3-7: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 1. Halbjahr 2011. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	91
Abbildung 3-8: Monatliche Oberflächenzirkulation der Nordsee im 2. Halbjahr 2011. Vektormittel aus Strömungsfeldern des „BSHcmod“. Die Stabilität der Zirkulation (in %, farbig) ist definiert als Verhältnis von Vektormittel zu Betragsmittel.	92
Abbildung 3-9: Wassertransport in den Jahren 2008 bis 2011 (BSHcmod) durch die Straße von Dover; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$	93

Abbildung 3-10: Wassertransport in den Jahren 2008 bis 2011 (BSHcmod) durch den Westrand der Deutschen Bucht von 53° 15' bis 55° N entlang 6° 20' E; 1 Sv = 10 ⁶ m ³ /s.	94
Abbildung 3-11: Wassertransport in den Jahren 2008 bis 2011 (BSHcmod) durch das Kattegat; 1 Sv = 10 ⁶ m ³ /s.	94
Abbildung 3-12: Saisonale und jährliche Häufigkeiten der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht für die Jahre 2008/2009 (links) und 2010/2011 (rechts) mit Perzentilen der empirischen Verteilungen für 2000–2009 (Stapelsäulen). Perzentilbereich Minimum bis Maximum, Intervallgrenzen bei 10, 25, 50 (Median, Treppenlinie), 75 und 90%.	99
Abbildung 3-13: Saisonale geographische Verteilung von Wellenhöhe, Windsee und Dünnung des Jahres 2008; JFM = Januar, Februar, März etc. Abweichungen der Wellenhöhen vom saisonalen Mittel des Zeitraums 2000–2011 als Isohypsen in dm. Gelb unterlegte Zahlen in der Winterdarstellung (JFM) kennzeichnen die Positionen der Stationen „Brent“ (1), „Ekofisk“ (2), „Euro-Plattform“ (3) und „Deutsche_Bucht“ (4).	102
Abbildung 3-14: Wie Abbildung 3-13, jedoch für das Jahr 2009.	103
Abbildung 3-15: Wie Abbildung 3-13, jedoch für das Jahr 2010.	104
Abbildung 3-16: Wie Abbildung 3-13, jedoch für das Jahr 2011.	105
Abbildung 3-17: Zeitreihen der jährlichen Mittelwerte, P90-Zentile und Maxima bei den Stationen Euro, DB, Ekofisk und Brent. Zur Lage der Stationen vgl. Abbildung 3-13. Gedruckte Werte für Mean und P90 sind Mittelwerte über alle Jahre. Gedruckter Max-Wert ist der Maximalwert aller Jahre. Das Zentil P90 unterteilt die Menge der nach aufsteigendem Wert sortierten Wellenhöhen im Verhältnis 9:1.	107
Abbildung 3-18: Monatliche Wasserstandsmittelwerte (rote Kurve) am Pegel Cuxhaven 1918–2013 und geglättete Kurve (dunkelblau) sowie Beschleunigung des Anstiegs (hellblau), abgeleitet aus der geglätteten Kurve.	109
Abbildung 3-19: Jahreszyklen für 2008 bis 2011 der über die Nordsee gemittelten wöchentlichen Oberflächentemperaturen mit Ensemble seit 1969 sowie langjährigen Monatsmitteln (1971–1993) und zwischenjährlichen Standardabweichungen (Kreisradius).	116
Abbildung 3-20: Anomalien der Oberflächentemperaturverteilung in der Nordsee im Jahr 2008 als Abweichungen von der 1971–1993 Klimatologie. Konturintervall 0.5 K. Kürzel, oben rechts, bezeichnen atmosphärische Zirkulationsanomalien (Abbildung 2-11).	117
Abbildung 3-21: Wie Abbildung 3-20, jedoch für 2009.	118
Abbildung 3-22: Wie Abbildung 3-20, jedoch für 2010.	119
Abbildung 3-23: Wie Abbildung 3-20, jedoch für 2011.	120
Abbildung 3-24: Zeitserie der jährlichen (Dez. bis Nov.) Nordseeoberflächentemperatur mit linearem Trend sowie Regimes. Jahreswerte in blau, falls < 9.86 °C (Mittelwert der Basisperiode 1971–1993), rot sonst. Rechte Achse: Standardisierte Abweichungen ($\sigma = 0.46$ K).	121
Abbildung 3-25: Dekadisches Mittel der thermischen Sprungschichttiefe 2000–2010, aber ohne 2002 (links) und Standardabweichung (rechts) aus den Daten der BSH Nordsee Sommeraufnahmen.	122
Abbildung 3-26: Gesamter Wärmeinhalt der Nordsee im Sommer in 10 ²¹ J von 1999 bis 2014. Gestrichelte Linie: Mittelwert der Referenzperiode 2000–2010 ($1.631 \pm 0.086 \times 10^{21}$ J) basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen.	124

Abbildung 3-27: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2008 (FS Pelagia 293a).	125
Abbildung 3-28: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2009 (FS Pelagia 311a).	126
Abbildung 3-29: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2010 (FS Pelagia 323a).	127
Abbildung 3-30: Temperaturschichtung (°C) im Sommer 2011 (FS Celtic Explorer 11010a).	128
Abbildung 3-31: Temperaturverlauf am an der MARNET-Station Deutsche Bucht in 3, 6, 10, 20 und 30 m Tiefe. Im unteren Bereich ist die Temperaturdifferenz ΔT Oberfläche minus Boden dargestellt. Die gestrichelten Linien geben die Lage des saisonalen klimatologischen Mini- und Maximums in die Oberflächenschicht nach <i>JANSSEN et al. (1999)</i>	129
Abbildung 3-32: Akkumuliertes flächenbezogenes Eisvolumen an der deutschen Nordseeküste in den Wintern 2009/10 und 2010/11.	131
Abbildung 3-33: Eisverhältnisse an der deutschen Nordseeküste im Winter 2010/11 zum Zeitpunkt der maximalen Eisentwicklung.	132
Abbildung 3-34: Verteilung der flächenbezogenen Eisvolumensumme an der deutschen Nordseeküste seit 1897.	133
Abbildung 3-35: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2008.	136
Abbildung 3-36: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2008 (FS Pelagia 293a).	137
Abbildung 3-37: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2009.	138
Abbildung 3-38: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2009 (FS Pelagia 311a).	139
Abbildung 3-39: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2010.	140
Abbildung 3-40: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2010 (FS Pelagia 323a).	141
Abbildung 3-41: Saisonale Salzgehaltsverteilungen in Oberflächen- und Bodennähe im Jahr 2011.	142
Abbildung 3-42: Salzgehaltsschichtung im Sommer 2011 (FS Celtic Explorer 11010a).	143
Abbildung 3-43: Gesamter Salzinhalt der Nordsee im Sommer in 10^{12} t 1999 bis 2014. Gestrichelte Linie: Mittelwert der Referenzperiode 2000–2010 ($1.134 \pm 0.018 \times 10^{12}$ t) basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen.	144
Abbildung 3-44: 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.)	145
Abbildung 3-45: Links: Monatsmittel und maximale Abflussraten der Elbe am Wehr Neu-Darchau mit Klimatologie (1971–2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen). Rechts: Jahresgänge des monatlich gemittelten Oberflächensalzgehalts und monatliche Extrema bei Helgoland Reede mit Klimatologie (1971–2000) und 95%-Band (Klima ± 1.96 Standardabweichungen).	146

Chemie

Abbildung 4-1: BSH-Stationsnetz zur Nährstoff- und Schadstoffüberwachung der Deutschen Bucht und Nordsee.	154
Abbildung 4-2: Salzgehaltsverteilung während der November-Monitoringfahrt 2010. . .	156
Abbildung 4-3: Statistik der Salzgehalte an den einzelnen Stationen während der Untersuchungsfahrten.	157
Abbildung 4-4: Konzentrationen des Salzgehalts an Monitoringstationen in der Deutschen Bucht.	157
Abbildung 4-5: Konzentrationen des Schwebstoffgehalts an Monitoringstationen in der Deutschen Bucht.	159
Abbildung 4-6: Eutrophierungsstatus in der Deutschen Bucht und der deutschen AWZ gemäß OSPAR COMPP. PPG = Potentielles Problemgebiet, PG = Problemgebiet (BROCKMANN <i>et al.</i> , 2007).	160
Abbildung 4-7: Stickstoff- und Phosphor-Gesamtfracht der Elbe. Die Daten basieren auf Messungen von FGG Elbe.	161
Abbildung 4-8: Silikat-Fracht von der Elbe. Die Daten basieren auf Messungen von FGG Elbe.	162
Abbildung 4-9: Temperaturen im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht; Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011.	163
Abbildung 4-10: Salzgehaltsverteilung im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht; Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011.	163
Abbildung 4-11: pH-Wert im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht; Februar 2008, Januar 2009, 2010 und 2011.	164
Abbildung 4-12: DIN- und Gesamt-N-Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht Februar 2008 bis Januar 2011.	165
Abbildung 4-13: DIP (gelöstes anorganisches Phosphat) und Gesamt-P-Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht Februar 2008 bis Januar 2011.	167
Abbildung 4-14: Silikat-Verteilungsmuster ($\mu\text{mol/L}$) im bodennahen Wasser der Deutschen Bucht Februar 2008 bis Januar 2011.	168
Abbildung 4-15: Redfield-Verhältnis ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) im Bodenwasser der Deutschen Bucht im Februar 2008 bis Januar 2011.	169
Abbildung 4-16: DIN-Konzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2010.	170
Abbildung 4-17: Phosphatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2010.	170
Abbildung 4-18: Silikatkonzentration ($\mu\text{mol/L}$) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2010.	171
Abbildung 4-19: Zeitlich hochaufgelöste Nährstoff-Messungen an der BSH-Messnetzstation UFS Deutsche Bucht im Jahr 2011.	173
Abbildung 4-20: Zeitserien der berechneten winterlichen DIN- und TN-Konzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall).	176
Abbildung 4-21: Zeitserien der berechneten winterlichen DIP- und TP-Konzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Vergleichswerten von 1936.	177

Abbildung 4-22: Zeitserien der berechneten winterlichen Silikat-Konzentrationen mit 95 %-Vertrauensbereich (Vorhersageintervall) und Vergleichswerten von 1936.	178
Abbildung 4-23: Jahreszeitlicher Verlauf der pH-Werte in der Deutschen Bucht zwischen Januar 1990 und August 2011.	180
Abbildung 4-24: Mittlere pH-Konzentrationen von 1990 bis 2011 im Meerwasser der Deutschen Bucht. Die schwarze gestrichelte Linie gibt den abnehmenden Trend an.	181
Abbildung 4-25: Sauerstoffsättigung (%) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2009.	182
Abbildung 4-26: Sauerstoffsättigung (%) im Bodenwasser der Nordsee im Sommer 2010 und 2011.	182
Abbildung 4-27: Jahresgänge der Chlorophyll-a Konzentration an der Station HELGO für die Jahre 2008–2011; Satellitendatenauswertungen (grün) im Vergleich zu in situ Daten (rot).	184
Abbildung 4-28: Chlorophyll-a Konzentration im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2008 und 2009.	185
Abbildung 4-29: Chlorophyll-a Konzentration im Oberflächenwasser der Nordsee im Sommer 2010 und 2011.	186
Abbildung 4-30: Geographische Verteilung des TOC-Gehalts im Oberflächensediment der Deutschen Bucht (Mittelwerte von Mai 2008 und Mai 2011).	188
Abbildung 4-31: Konzentrationsverteilung der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) in der Elbe bei Stade und Cuxhaven für den Zeitraum 2008 bis 2011; (Box Plot: der Kasten (Box) umfasst die mittleren 50% der Daten, der Medianwert ist als horizontale Linie dargestellt, die vertikalen Spitzen repräsentieren den 1,5 Interquartil-Bereich der unteren bzw. oberen Quartile).	190
Abbildung 4-32: Konzentrationsverteilung der HCH-Isomere in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008 bis 2011.	191
Abbildung 4-33: HCH-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) der DB im Mai 2011.	192
Abbildung 4-34: HCH-Konzentrationen [ng/L] des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im August/September 2011. (α HCH oben, links; β HCH oben, rechts; γ HCH unten, links)	193
Abbildung 4-35: Zeitliche Entwicklung der α -, β - und γ -HCH-Konzentrationen bei Stade (Elbe) seit 1995.	194
Abbildung 4-36: Zeitliche Entwicklung der α - und γ -HCH-Konzentrationen an Station Eider seit 1989.	195
Abbildung 4-37: Konzentrationstrends für α - und γ -HCH in der äußeren Deutschen Bucht (Station NSB2).	196
Abbildung 4-38: Konzentrationsverteilung der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008–2011.	197
Abbildung 4-39: CB153-Konzentrationen [ng/L] des Oberflächenwassers (5 m) der Nordsee im Aug/Sept 2011.	199
Abbildung 4-40: Mittelwerte (2008–2011) der CKW-Konzentrationen auf Station KS11 in [μ g/kg] Trockenmasse.	200

Abbildung 4-41: HCH-, HCB-, DDD- und CB153-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment (0–2cm) der Deutschen Bucht im Mai 2010.	201
Abbildung 4-42: Konzentrationsverteilung der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) in Sedimenten der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008 bis 2011.	202
Abbildung 4-43: Beobachtete Wasserverunreinigungen in der Deutschen Bucht in den Jahren 2008 bis 2011.	204
Abbildung 4-44: Median-Werte (2008–2011) der PAK-Konzentrationen in der Elbe bei Stade und küstennahen und küstenfernen Stationen (Oberflächenwasser, 5 m).	207
Abbildung 4-45: Konzentrationsverteilung ausgewählter PAK [ng/L] und Schwebstoff [mg/L] (grau) im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht für den Zeitraum 2008 bis 2011.	209
Abbildung 4-46: Konzentrationen ausgesuchter PAK [ng/L] im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Aug/Sept. 2011. (NAPH: oben, links; FL: oben, Mitte; PHEN: oben, rechts; FLU: unten, links; BAP: unten, Mitte; BghiP: unten, rechts)	210
Abbildung 4-47: Saisonale Verteilung ausgewählter PAK im Küstenwasser (Salzgehalt < 32, links) und in der hohen See (rechts, Salzgehalt > 34), Q2: Mai, Juli; Q3: Aug., Sept.; Q4: Okt., Nov. im Zeitraum 2008–2011.	211
Abbildung 4-48: Mittelwerte (2008–2011) der PAK-Konzentrationen auf Station KS11 in µg/kg Trockenmasse.	212
Abbildung 4-49: PAK-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2010.	213
Abbildung 4-50: Alkyl-PAK-Konzentrationen bezogen auf Trockenmasse (oben) und organischen Kohlenstoff (unten) im Oberflächensediment der Deutschen Bucht im Mai 2010.	214
Abbildung 4-51: Herbizid-Konzentrationen in der Elbe bei Stade (2008 bis 2011).	217
Abbildung 4-52: Herbizid-Konzentrationen im Küstengewässer (Salzgehalt < 32, oben) und in der äußeren Deutschen Bucht (Salzgehalt > 34, unten) (2008 bis 2011).	218
Abbildung 4-53: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Triazin-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Aug/Sept 2011. (ATRAZ: oben, links; SIMAZ: oben, rechts; IRGAROL: unten, links; TERBAZ: unten, rechts)	219
Abbildung 4-54: Konzentrationen (ng/L) ausgewählter Phenylharnstoff-Herbizide im Oberflächenwasser der Nordsee im Aug/Sept 2011.	220
Abbildung 4-55: Konzentrationsmittelwerte (2008 bis 2011) ausgewählter Herbizide im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht.	221
Abbildung 4-56: Herbizid-Konzentrationen in der Deutschen Bucht als %-Anteil der Stade Konzentrationen im Mai 2011.	222
Abbildung 4-57: Saisonale Konzentrationsverteilung ausgewählter Herbizide in der Elbe, in Küstengewässern und in der hohen See; Q1: Mai/Juni, Q2: Aug./Sept., Q3: Okt./Nov. im Zeitraum 2008–2011.	225
Abbildung 4-58: Zeitlicher Verlauf der Atrazin- und Terbutylazin-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) an drei Stationen der Deutschen Bucht.	226
Abbildung 4-59: Zeitlicher Verlauf der Diuron- und Mecoprop-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) an drei Stationen der Deutschen Bucht.	227

Abbildung 4-60: PFC-Konzentrationen [ng/L] im Oberflächenwasser (5 m) der Nordsee im Aug/Sept 2011. (PFBS: links; PFOA: Mitte; PFOS: rechts)	229
Abbildung 4-61: Konzentrationsmittelwerte (2008 bis 2011) von PFOA und PFOS im Oberflächenwasser (5 m) der Deutschen Bucht.	229
Abbildung 4-62: PFC-Konzentrationen in der Deutschen Bucht als %-Anteil der Stadelkonzentrationen im Mai 2011.	230
Abbildung 4-63: Zeitlicher Verlauf der PFOA und PFOS-Konzentrationen im Oberflächenwasser (5 m) an drei Stationen der Deutschen Bucht.	231
Abbildung 4-64: Prozent-Verteilungsstatistik der gelöst vorliegenden Metallgehalte bezogen auf den Gesamtmetallgehalt der untersuchten Meerwasserproben in einer Boxdarstellung. Jede Box stellt die Streuung aller Wintermesswerte (JFM) eines Elements im Zeitraum von 2000 bis 2011 dar, wobei Wasserkörper unterschiedlicher Salzgehalte (28–30, 30–32, 32–34, >34) in eigenen Teilgrafiken zusammengefasst sind.	238
Abbildung 4-65: Räumliche Verteilung der Elemente Kupfer, Quecksilber und Nickel (Spalten) im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (Zeilen).	241
Abbildung 4-66: Räumliche Verteilung der Elemente Mangan, Blei und Zink (Spalten) im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (Zeilen).	242
Abbildung 4-67: Räumliche Struktur der gelösten Elementgehalte (Kupfer, Quecksilber, Nickel, Mangan, Blei, Zink) im filtrierten Oberflächenwasser im Sommer 2010.	243
Abbildung 4-68: Zeitreihe der jährlichen Verteilungsstatistiken der gelösten Metallgehalte (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) im Winter (Jan./Feb./Mrz.) im filtrierten küstennahen (Salzgehalt 30–32) Oberflächenwasser bei 10 m Wassertiefe in einer Boxdarstellung. OSPAR-Hintergrundwerte sind als grauer Balken eingefügt.	244
Abbildung 4-69: Zusammenfassende Bewertung der Metallbelastung im filtrierten Oberflächenwasser (10 m) der Nordsee. Verteilungsstatistiken der Metallgehalte im küstennahen Wasser (Salzgehalte 30–32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (Salzgehalte >34, Entenschnabel) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) der Jahre 2010 und 2011 in einer Boxdarstellung. An der Ordinate sind den Bewertungskriterien entsprechende Farbcodes aufgetragen: Blau: Gehalt < OSPAR-BRC; Grün: BRC < Gehalt < Effekt; Rot: Gehalt > Effekt. (vergleiche Kapitel 4.4.2.1; 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 2011 wieder. Ein signifikanter Trend (95%) innerhalb der vergangenen fünf Jahre wird durch einen aufwärts/abwärts gerichteten Pfeil angezeigt.	246
Abbildung 4-70: Sedimentprobenahmestationen Deutsche Bucht (links) im Zeitraum von 2008 bis 2011 (grauer Kreis). Alle bisher bearbeiteten Proben sind durch einen zusätzlichen blauen Punkt gekennzeichnet. Einzelne Trendstationen sind zu Gruppen zusammengefasst (rote Ellipse). Metallgehalte und Trends werden in diesen „Trendregionen“ bewertet. Rechts: Räumliche Verteilung des Anteils der Feinkornfraktion (< 20 µm) am Gesamtsediment 1985–2007.	248
Abbildung 4-71: 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 (rote Kreise). BSH-Hintergrundwerte sind als graue Balken hinzugefügt. (Vergleiche hierzu Tabelle 4-7).	251

Abbildung 4-72: Bewertung der Metallbelastung der Oberflächensedimente im Jahr 2011 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 (vergl. Tabelle 4-7). Ein signifikanter zeitlicher auf-/abwärts gerichteter Trend innerhalb der vergangenen 10 Jahre wird durch ein nach oben/unten gerichtetes weißes Dreieck symbolisiert. Unterhalb jedes Symbols ist der Elementgehalt im Bewertungsjahr (Median in mg/kg (TM)) angegeben.	254
Abbildung 4-73: Zeitserien der maximalen jährlichen Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs und ^{90}Sr in Oberflächenwasser an den früheren Positionen der Feuerschiffe ‚Borkumriff‘ und ‚Elbe 1‘.	263
Abbildung 4-74: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2008.	265
Abbildung 4-75: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2008.	265
Abbildung 4-76: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.	265
Abbildung 4-77: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.	265
Abbildung 4-78: Verteilung von ^{137}Cs im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.	266
Abbildung 4-79: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2008.	266
Abbildung 4-80: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Oktober 2008.	266
Abbildung 4-81: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.	267
Abbildung 4-82: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.	267
Abbildung 4-83: Verteilung der Aktivitätskonzentrationen von ^{90}Sr im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.	267
Abbildung 4-84: ^{137}Cs -Sedimentprofile der Station KS11 südöstlich Helgolands in den Jahren 2008 und 2009.	268
Abbildung 4-85: ^{137}Cs -Sedimentprofile der Station WB5 in den Jahren 2008 und 2009.	269
Abbildung 4-86: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im Jahr 2008.	270
Abbildung 4-87: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.	270
Abbildung 4-88: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.	270
Abbildung 4-89: Verteilung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.	270
Abbildung 4-90: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Deutschen Bucht im März 2008.	271

Abbildung 4-91: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.	272
Abbildung 4-92: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.	272
Abbildung 4-93: Verteilungen der Aktivitätskonzentrationen von ^{238}Pu , $^{(239+240)}\text{Pu}$ und ^{241}Am im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2011.	272
Abbildung 4-94: Verteilung der Plutoniumverhältnisse (^{238}Pu zu $^{(239+240)}\text{Pu}$) im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2009.	273
Abbildung 4-95: Verteilung der Plutoniumverhältnisse (^{238}Pu zu $^{(239+240)}\text{Pu}$) im Oberflächenwasser der Nordsee im Jahr 2010.	273
Abbildung 4-96: $^{(239+240)}\text{Pu}$ -Sedimentprofile der Stationen KS11 und WB5 im Jahr 2008.	274
Abbildung 4-97: Sedimentprofile der Plutoniumverhältnisse (^{238}Pu zu $^{(239+240)}\text{Pu}$) an den Stationen KS11 und WB5 im Jahr 2008.	274

Tabellenverzeichnis

Atmosphärische Zirkulation

Tabelle 2-1: Produktübersicht. Die meisten Graphiken enthalten zur Einschätzung rezenter Zustände und Entwicklungen klimatologische Informationen des Referenzzeitraums 1971–2000 zur Veränderlichkeit der Variablen auf der jeweiligen Zeitskala (dd, mm, ...). Die Graphik- und Tabellenverweise sind in der PDF-Version des Dokuments als Sprungziele angelegt.	40
Tabelle 2-2: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2008. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	43
Tabelle 2-3: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2008 (%).	43
Tabelle 2-4: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2009. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	44
Tabelle 2-5: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2009 (%).	44
Tabelle 2-6: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2010. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	45
Tabelle 2-7: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2010 (%).	45
Tabelle 2-8: Kalender der täglichen Wetterlagen im Jahr 2011. Rot: C & CDIR; Blau: A & ADIR; Fett (+, ++): Sturm (stark, sehr stark).	46
Tabelle 2-9: Kontingenztafel der Wetterlagen im Jahr 2011 (%).	46
Tabelle 2-10: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2008.	47
Tabelle 2-11: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2008.	47
Tabelle 2-12: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2009.	48
Tabelle 2-13: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2009.	48
Tabelle 2-14: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2010.	49
Tabelle 2-15: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2010.	49
Tabelle 2-16: Kalender der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2011.	50
Tabelle 2-17: Monatliche Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen im Jahr 2011.	50
Tabelle 2-18: Saisonale und jährliche relative Häufigkeiten der reduzierten Wetterlagen in den Jahren 2008 bis 2011.	51
Tabelle 2-19: Wetterlagenübergänge für Basisperiode 1971–2000 (NCEP). Φ : Übergangshäufigkeiten (gerundet) für das klimatologische Jahr. P: Übergangswahrscheinlichkeiten für Markovkette 1. O. (aus Φ via ϕ_{ij}/RS_i); π : Eigenvektor ($\pi = \pi P$), stationäre (unbedingte, klimatologische) Grenzverteilung. E: ÜW für eingebettete Markovkette ohne Verweilzeiten (aus Φ wie P für $\phi_{ii} = 0$).	56
Tabelle 2-20: Wie <i>Tabelle 2-19</i> , jedoch für die Jahre 2008 (oben) bis 2011 (unten).	58
Tabelle 2-21: Nordseewind. Saisonale- und Jahresstatistiken: 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). Den Richtungsbezeichnungen liegen ein 16-Punkt Kompass bzw. Intervalle von 22.5° zugrunde; die Richtungsklassifizierung der saisonalen Luftdruckfelder (z. B. <i>Abbildung 2-9</i>) beruht zwar auf numerisch identischen Daten, aber einem 8-Punkte-Kompass.	69

Tabelle 2-22: Nordseewind. Monatsstatistik: Windrichtung, vektorielle (V) und skalare (Vel) Windgeschwindigkeit (m/s) und Persistenz (V/Vel in %). Die Ausführungen zur Richtungsbezeichnung in der Legende zu <i>Tabelle 2-21</i> gelten sinngemäß.	70
Tabelle 2-23: Anzahl der Tage mit starkem bzw. sehr starkem Sturm (SG VSG).	73
Tabelle 2-24: Anzahl Sturmtage (G+SG+VSG).	74

Meeresphysik

Tabelle 3-1: Kalender der täglichen Zirkulationstypen in der Deutschen Bucht für die Jahre 2008–2011.	96
Tabelle 3-2: Jahreshäufigkeiten der täglichen Zirkulationsmuster in der Deutschen Bucht mit standardisierten Abweichungen vom 10-Jahresmittel (2000–2009). Abweichungen von mehr als einer Standardabweichung sind fett gedruckt.	97
Tabelle 3-3: Häufigkeitsverteilungen des Windstaus 2008 bis 2011 am Pegel Cuxhaven.	110
Tabelle 3-4: Sturmfluten (Wasserstand höher als 150 cm über MHW) in den Jahren 1951–2011.	111
Tabelle 3-5: Gesamt-Wärmeinhalt (THC) und mittlere Volumentemperatur (VT) der Nordsee basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen, sowie Nordsee SST gemittelt über die Dauer der Messreisen. ΔH = Standardisierte Anomalie (Differenz zum Mittelwert der Referenzperiode in Standardabweichungen).	124
Tabelle 3-6: Gesamter Salzinhalt der Nordsee TSC, basierend auf den Daten der Nordsee-Sommeraufnahmen des BSH. ΔS = Normierte Anomalie (Differenz zum Mittelwert der Referenzperiode in Standardabweichungen).	144

Chemie

Tabelle 4-1: 2008/11 durchgeführte Überwachungsfahrten und im NORDSEEZUSTANDSBERICHT 2008/11 verwendete Daten (x).	155
Tabelle 4-2: Zusammenstellung der Mittelwerte, Mediane und Variationskoeffizienten der Salzgehalte an den Monitoringstationen.	158
Tabelle 4-3: CKW-Konzentrationen bei Stade (Elbe) im Zeitraum 2008–2011 in [pg/L].	199
Tabelle 4-4: Anzahl der in der Deutschen Bucht beobachteten Öl-Verschmutzungen.	204
Tabelle 4-5: PAK-Konzentrationen in der Elbe und der Deutschen Bucht.	208
Tabelle 4-6: Kriterien zur Bewertung der Metallgehalte in der Wassersäule. EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), OSPAR Konvention zum Schutz des Nord-Ost-Atlantik, US-Environmental Protection Agency (US-EPA).	235
Tabelle 4-7: Kriterien 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).	236

Tabelle 4-8: Metallgehalte im küstennahen Wasser (Salzgehalte: 30–32) der Deutschen Bucht und in der offenen Nordsee (Salzgehalte: >34) im ersten Quartal (Jan., Feb., Mrz.) 2011 in 10 m Wassertiefe. Angegeben sind die Anzahl der Proben (n) und die 25 %, 50 % (Median) und 75 % Perzentile der gemessenen Metallgehalte in ng/L (Hg in pg/L). Alle Konzentrationsangaben sind entsprechend dem OSPAR-Bewertungssystem eingefärbt.	247
Tabelle 4-9: Mittelwert und Standardabweichung der Metallgehalte in der Feinkornfraktion des Oberflächensediments in den Jahren 2010 und 2011 (<20 µm Fraktion, Al, Fe in (%) alle anderen Elemente in (mg/kg DW). In Klammern ist die Anzahl der gemittelten Messwerte angegeben.	249
Tabelle 4-10: Metallgehalte (Median) und deren Bewertung in Trendregionen zwischen den Jahren 2000 bis 2011. Signifikante zeitliche Trends als gelbe Dreiecke.	257
Tabelle 4-11: Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Meerwasser und Sediment der Nordsee.	260

Chemie

Tafel 4-1: Nährstoff-Glossar	160
Tafel 4-2 HCH-Isomere	189
Tafel 4-3: Lipophile Chlorkohlenwasserstoffe (CKW)	198
Tafel 4-4: Kohlenwasserstoffe	203
Tafel 4-5: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	206
Tafel 4-6: Herbizide	215
Tafel 4-7: Perfluorierte Chemikalien	228
Tafel 4-8: Metalle mit toxischem Potential in der Meeresumwelt	233
Tafel 4-9: Radioaktivität	259

List of Plates**Chemistry**

Plate 4-1: Nutrient glossary	160
Plate 4-2 HCH-Isomere	189
Plate 4-3: Lipophile chlorine hydrocarbons (CKW)	198
Plate 4-4: Hydrocarbons	203
Plate 4-5: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAK)	206
Plate 4-6: Herbicides	215
Plate 4-7: Perfluorinated chemicals	228
Plate 4-8: Metals with toxic potential in the marine environment	233
Plate 4-9: Radioactivity	259

List of Figures

Atmospheric Physics

Figure 2-1: Sea level pressure (hPa) for the gale “Kerstin” of March, 31 2010 together with grid positions of weather-typing scheme and classification (Cyclonic/Gale). . . .	42
Figure 2-2: Percent frequencies of reduced weather types for 2008 (blue) and 2009 (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
Figure 2-3: As Figure 2-2, except for monthly absolute frequencies (days).	53
Figure 2-4: As Figure 2-2, except for 2010 and 2011.	54
Figure 2-5: As Figure 2-2, except for monthly absolute frequencies (days) in 2010 and 2011.	55
Figure 2-6: 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 Φ in Table 2-19). 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 . The figure was created with the software package <i>Circos</i> (KRZYWINSKI et al. 2009).	57
Figure 2-7: Same as Figure 2-6, except for 2008 and 2009.	59
Figure 2-8: As Figure 2-6, except for 2010 and 2011.	60
Figure 2-9: Seasonal sea level pressure distributions (SLP, hPa). Left: NCEP/NCAR climatology (1971–2000). Middle: 2008, SLP & SLP anomalies (colored, contour spacing 1 hPa). Right: 2009, . . . Red: Distribution type (SLP or SLP/SLPA) and season (JFM, AMJ, . . . = winter, spring . . .).	61
Figure 2-10: As Figure 2-9, except for 2010 and 2011.	62
Figure 2-11: Monthly sea level pressure distributions (SLP, hPa) in 2008 together with departures from the NCEP/NCAR climatology for 1971–2000 (SLPA, colored, contour spacing 1 hPa). Red: Distribution type (SLP/SLPA) and month (J, F, . . . = January, February . . .).	63
Figure 2-12: As Figure 2-11, except for 2009	64
Figure 2-13: As Figure 2-11, except for 2010.	65
Figure 2-14: As Figure 2-11, except for 2011.	66
Figure 2-15: Seasonal 50% probability ellipses for the „North Sea Wind“ (1 = winter = JFM, 2 = spring, etc.); top: 2008, bottom: 2009.	67
Figure 2-16: As Figure 2-15, except for 2010 and 2011.	68
Figure 2-17: 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. All trajectories start at $1 = (0,0)$, and proceed by adding consecutive, daily wind vectors. Dividing the along-path length of a trajectory and the linear distance between any two markers by the associated time interval in days yields the scalar wind velocity and the vectorial wind speed in m/s for that period.	71
Figure 2-18: As Figure 2-17, except for 2010 and 2011.	72

Figure 2-19: Gale frequencies for 2007/08 (blue) and 2008/09 (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 %	75
Figure 2-20: As Figure 2-19, except for 2009/10 and 2010/11.	75
Figure 2-21: 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.	76
Figure 2-22: Monthly near-surface air temperatures at Norderney with 1971–2000 base period means, and 95 %-band (climatology ± 1.96 std. deviations). Raw Data: Deutscher Wetterdienst.	77
Figure 2-23: Seasonal cycles for 2008 through 2011 of areal mean monthly SST of the German Bight (area south of 55.5° N and east of 6.5° E) together with 1971–2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 std. devs.).	78

Physical Oceanography

Figure 3-1: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1 st half-year 2008. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	85
Figure 3-2: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2 nd half-year 2008. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	86
Figure 3-3: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1 st half-year 2009. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	87
Figure 3-4: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2 nd half-year 2009. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	88
Figure 3-5: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1 st half-year 2010. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	89
Figure 3-6: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2 nd half-year 2010. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	90
Figure 3-7: Monthly surface circulation of the North Sea in the 1 st half-year 2011. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	91
Figure 3-8: Monthly surface circulation of the North Sea in the 2 nd half-year 2011. Vector mean currents from “BSHcmod”. Stability (% , colored) is the ratio of vector mean current to mean magnitude.	92
Figure 3-9: Volume transport in 2008 through 2011 (BSHcmod) through Dover Strait; 1 $\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$	93
Figure 3-10: Volume transport in 2008 through 2011 (BSHcmod) through a western boundary transect of the German Bight extending from $53^\circ 15'$ to 55° N along $6^\circ 20' \text{ E}$; 1 $\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$	94

Figure 3-11: Volume transport in 2008 through 2011 (BSHcmod) through the Kattegat; $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Figure 3-12: Seasonal and annual frequencies of daily circulation patterns in the German Bight for 2008/2009 (left) and 2009/2010 (right) along with percentiles of empirical distributions for 2000–2009 (stacked columns). Percentile range minimum to maximum, internal interval limits at 10, 25, 50 (median, step-line), 75 and 90 %.	99
Figure 3-13: Seasonal geographical distributions of wave height, windsea and swell in 2008; JFM = January, February, March etc. Departures in wave height from seasonal means of the period 2000-2011 are depicted as isohypses (dm units). Numerals appearing on yellow background in the JFM frame identify the stations “Brent” (1), “Ekofisk” (2), “Euro-Platform” (3) and “Deutsche_Bucht” (4).	102
Figure 3-14: As Figure 3-13, except for 2009.	103
Figure 3-17: Time series of annual means, 90th percentile and maxima at stations Euro, GB, Ekofisk and Brent. As to location, cf. Figure 3-13. Printed values of Mean and P90 are averages over all years. Printed Max-value is the maximum value of all years. The 90 th percentile divides the waveheight distribution 9:1.	107
Figure 3-18: Monthly water levels at tide gauge Cuxhaven (red curve) 1918–2013 and smoothed curve (dark blue) as well as acceleration of the increase (light blue) calculated from smoothed curve.	109
Figure 3-19: Seasonal cycles for 2008 through 2011 of spatial mean weekly SST of the North Sea together with ensemble of corresponding cycles since 1969. Size of monthly climate bullets (radius) gives interannual standard deviation for base period 1971–1993.	116
Figure 3-20: Monthly SST anomalies in 2008 as departures from the 1971–1993 climatology. Contour interval is 0.5 K. Letter codes (upper right) refer to atmospheric circulation anomalies (Figure 2-11).	117
Figure 3-21: As Figure 3-20, except for 2009.	118
Figure 3-22: As Figure 3-20, except for 2010.	119
Figure 3-23: As Figure 3-20, except for 2011.	120
Figure 3-24: Time series of annual (Dec. through Nov.) North Sea SST together with linear trend and regimes. Annual data blue if $< 9.86 \text{ }^\circ\text{C}$ (base period mean 1971–1993), red otherwise. Right scale: standardized departures ($\sigma = 0.46 \text{ K}$).	121
Figure 3-25: Decadal mean of thermocline depth (left) and standard deviation right) basing on the BSH North Sea Summer Surveys 2000–2010 but without 2002.	122
Figure 3-26: Total heat content in 10^{21} J from 1999 to 2014. Broken line: average of reference period 2000 to 2010 ($1.631 \pm 0.086 \times 10^{21} \text{ J}$) basing on summer cruise data.	124
Figure 3-27: Temperature stratification ($^\circ\text{C}$) during summer 2008 (RV Pelagia 293a). . .	125
Figure 3-28: Temperature stratification ($^\circ\text{C}$) during summer 2009 (RV Pelagia 311a). . .	126
Figure 3-29: Temperature stratification ($^\circ\text{C}$) during summer 2010 (RV Pelagia 323a). . .	127
Figure 3-30: Temperature stratification ($^\circ\text{C}$) during summer 2011 (RV Celtic Explorer 11010a).	128
Figure 3-31: Temperature time series at MARNET station German Bight in 3, 6, 10, 20 and 30 m depth. The lower part of the diagram shows the temperature difference ΔT surface minus bottom. The broken lines give the climatological seasonal mini- and maximum for the surface layer according to JANSSEN et al. (1999).	129

<i>Figure 3-32: Accumulated areal ice volume on the German North Sea coast in the winters of 2009/10 and 2010/11.</i>	131
<i>Figure 3-33: Ice conditions on the German North Sea coast in the winter of 2010/11 at the time of maximum ice development.</i>	132
<i>Figure 3-34: Distribution of accumulated areal ice volume on the German North Sea coast since 1897.</i>	133
<i>Figure 3-35: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2008.</i>	136
<i>Figure 3-36: Salinity stratification in summer 2008 (RV Pelagia 293a).</i>	137
<i>Figure 3-37: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2009.</i>	138
<i>Figure 3-38: Salinity stratification in summer 2009 (RV Pelagia 311a).</i>	139
<i>Figure 3-39: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2010.</i>	140
<i>Figure 3-40: Salinity stratification in summer 2010 (RV Pelagia 323a).</i>	141
<i>Figure 3-41: Seasonal near-surface and -bottom salinity distributions in 2011.</i>	142
<i>Figure 3-42: Salinity stratification in summer 2011 (RV Celtic Explorer 11010a).</i>	143
<i>Figure 3-43: Total salt content in 10^{12} t from 1999 to 2014. Broken line: Mean of reference period 2000–2010 ($1.134 \pm 0.018 \times 10^{12}$ t) basing on summer cruise data.</i>	144
<i>Figure 3-44: Annual runoff of Elbe River at Neu-Darchau weir with long-term mean (1971–2000) and 95 %-limits. 1 km³/a is equivalent to 31.7 m³/s. (Raw data courtesy WSA Lauenburg.)</i>	145
<i>Figure 3-45: Left: Monthly mean and maximum runoff of Elbe River at the weir Neu-Darchau with 1971–2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations). Right: Seasonal cycles of monthly mean SSS at Helgoland Roads with monthly extremes, 1971–2000 base period monthly means and 95%-band (climatology ± 1.96 standard deviations).</i>	146

Marine Chemistry

<i>Figure 4-1: BSH-Observational network for nutrient and contaminant monitoring in the German Bight and North Sea.</i>	154
<i>Figure 4-2: Geographical distribution of salinity during November cruise 2010.</i>	156
<i>Figure 4-3: Statistic of salinities at individual stations during the monitoring cruises.</i>	157
<i>Figure 4-4: Salinity concentrations at monitoring stations in the German Bight.</i>	157
<i>Figure 4-5: Particulate matter concentrations at monitoring stations in the German Bight.</i>	159
<i>Figure 4-6: Eutrophication status in the German Bight and the German exclusive economic zone under OSPAR COMPP. PPG = Potential Problem Area, PG = Problem Area (BROCKMANN et al., 2007).</i>	160
<i>Figure 4-7: Total nitrogen and phosphorus loads of Elbe. The data are based on measurements of FG Elbe.</i>	161
<i>Figure 4-8: Silicate load of Elbe. The data are based on measurements of FG Elbe.</i>	162
<i>Figure 4-9: Temperatures in bottom sea water of the German Bight in February 2008, January 2009, 2010 and 2011.</i>	163
<i>Figure 4-10: Geographical distributions of salinity in bottom sea water of the German Bight in February 2008, January 2009, 2010 and 2011.</i>	163

<i>Figure 4-11: pH in bottom sea water of the German Bight in February 2008, January 2009, 2010 and 2011.</i>	<i>164</i>
<i>Figure 4-12: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of DIN and total-nitrogen in bottom sea water of the German Bight in February 2008 to January 2011.</i>	<i>165</i>
<i>Figure 4-13: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of DIP (dissolved anorganic phosphate) and total-phosphorus in bottom sea water of the German Bight in February 2008 to January 2011.</i>	<i>167</i>
<i>Figure 4-14: Geographical distributions ($\mu\text{mol/L}$) of silicate in bottom sea water of the German Bight in February 2008 to January 2011.</i>	<i>168</i>
<i>Figure 4-15: Redfield ratio ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$) in the bottom water of the German Bight in February 2008 to January 2011.</i>	<i>169</i>
<i>Figure 4-16: DIN concentration ($\mu\text{mol/L}$) in bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2010.</i>	<i>170</i>
<i>Figure 4-17: Phosphate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2010.</i>	<i>170</i>
<i>Figure 4-18: Silicate concentration ($\mu\text{mol/L}$) in near-bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2010.</i>	<i>171</i>
<i>Figure 4-19: High-resolution time series of nutrients at the BSH network station UFS German Bight in 2011.</i>	<i>173</i>
<i>Figure 4-20: Time series of wintry DIN and TN concentrations. Prediction limits are depicted as 95 % bars.</i>	<i>176</i>
<i>Figure 4-21: Time series of wintry DIP and TP concentrations. Prediction limits are depicted as 95 % bars. Reference concentrations from 1936.</i>	<i>177</i>
<i>Figure 4-22: Time series of wintry silicate concentrations. Prediction limits are depicted as 95 % bars. Reference concentrations from 1936.</i>	<i>178</i>
<i>Figure 4-23: Seasonal pH-data in the German Bight from January 1990 to August 2011.</i>	<i>180</i>
<i>Figure 4-24: Mean pH-concentrations from 1990 to 2011 in seawater of the German Bight. The black dotted line shows the declining trend.</i>	<i>181</i>
<i>Figure 4-25: Oxygen saturation (%) in near-bottom water of the North Sea in summer 2008 and 2009.</i>	<i>182</i>
<i>Figure 4-26: Oxygen saturation (%) in near-bottom water of the North Sea in summer 2010 and 2011.</i>	<i>182</i>
<i>Figure 4-27: Annual chlorophyll-a concentration at the station HELGO from 2008–2011; satellite data evaluation (green) in comparison to in situ data (red).</i>	<i>184</i>
<i>Figure 4-28: Chlorophyll-a concentration in sea-surface water of the North Sea in summer 2008 and 2009.</i>	<i>185</i>
<i>Figure 4-29: Chlorophyll-a concentration in sea-surface water of the North Sea in summer 2010 and 2011.</i>	<i>186</i>
<i>Figure 4-30: Geographical distribution of TOC contents of surface sediments in the German Bight (mean values of May 2008 and May 2011).</i>	<i>188</i>
<i>Figure 4-31: Concentration of chlorinated hydrocarbons (CKW) in the river Elbe at Stade and Cuxhaven from 2008 to 2011; (Box plot: the box represents the middle 50 % of the data; the horizontal line shows the median; the vertical lines represent the 1.5 interquartil ranges of the lower and upper quartils).</i>	<i>190</i>
<i>Figure: 4-32: Concentrations of HCH isomers in the German Bight from 2008–2011. . .</i>	<i>191</i>

Figure 4-33: HCH concentrations in near-surface sea water (5 m) of the German Bight in May 2011.	192
Figure 4-34: HCH concentrations [ng/L] for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in August/September 2011. (α HCH top, left; β HCH top, right; γ HCH bottom, left)	193
Figure 4-35: Temporal evolution since 1995 of α -, β -, and γ -HCH concentrations near Stade (Elbe River).	194
Figure 4-36: Temporal evolution since 1989 of α - and γ -HCH concentrations at station Eider.	195
Figure 4-37: Trends in α - and γ -HCH concentrations in the outer German Bight (station NSB2).	196
Figure 4-38: Concentration of chlorinated hydrocarbons (CKW) in the German Bight from 2008–2011.	197
Figure 4-39: CB153 concentrations [ng/L] for near-surface sea water (5 m) of the North Sea in Aug/Sept 2011.	199
Figure: 4-40: Mean values (2008–2011) of CHC concentrations at station KS11 in [μ g/kg] dry weight (DW).	200
Figure 4-41: HCH-, HCB-, DDD-, and CB153 concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment (0–2 cm) of the German Bight in May 2010.	201
Figure 4-42: Concentration of chlorinated hydrocarbons (CKW) in sediments of the German Bight from 2008–2011.	202
Figure 4-43: Pollution sightings in the German Bight from 2008 to 2011.	204
Figure 4-44: Median water concentrations (2008–2011) of PAHs in the river Elbe (Stade), in coastal areas and in the open sea (surface water, 5 m).	207
Figure 4-45: Concentrations of selected PAHs [ng/L] and particulate matter [mg/L] (grey) in surface water of the German Bight from 2008 to 2011.	209
Figure 4-46: Concentrations of some PAHs [ng/L] in near-surface water (5 m) of the German Bight in Aug/Sept 2011. (NAPH: top, left; FL: top, middle; PHEN: top, right; FLU: bottom, left; BAP: bottom, middle; BghiP: bottom, right)	210
Figure 4-47: Seasonal distribution of selected PAHs in coastal waters (left: salinity < 32) and open sea (right: salinity >34); Q2: May, July; Q3: Aug., Sept.; Q4: Oct., Nov. from 2008–2011.	211
Figure 4-48: Mean values (2008–2011) of PAHs concentrations at station KS11 in μ g/kg dry weight (DW).	212
Figure 4-49: PAH concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2010.	213
Figure 4-50: Alkyl-PAH concentrations relative to dry weight (top) and total organic carbon (bottom) in surface sediment of the German Bight in May 2010.	214
Figure 4-51: Herbicide concentrations in the river Elbe at Stade (2008 to 2011).	217
Figure 4-52: Herbicide concentrations in coastal waters (salinity < 32, upper figure) and in the open sea (salinity > 34, lower figure) (2008 to 2011).	218
Figure 4-53: Concentrations (ng/L) of selected triazine herbicides in near-surface sea water of the North Sea in Aug/Sept 2011. (ATRAZ: top, left; SIMAZ: top, right; IRGAROL: bottom, left; TERBAZ: bottom, right)	219

Figure 4-54: Concentrations (ng/L) of selected phenylurea herbicides in near-surface sea water of the North Sea in Aug/Sept 2011.	220
Figure 4-55: Mean concentrations (2008 to 2011) of herbicides in surface water (5 m) in the German Bight.	221
Figure 4-56: Concentrations of herbicides as % of concentration of Stade in May 2011.	222
Figure 4-57: Seasonal distribution of selected herbicides concentrations in the Elbe, in coastal waters and in the open sea; Q1: May/June, Q2: Aug./Sept., Q3: Oct./Nov. from 2008–2011.	225
Figure 4-58: Temporal trends of Atrazin and Terbutylazin surface water concentrations at three stations of the German Bight.	226
Figure 4-59: Temporal trends of Diuron- and Mecoprop surface water concentrations at three stations of the German Bight.	227
Figure 4-60: PFC concentrations [ng/L] in near-surface sea water (5 m) of the North Sea in Aug/Sept 2011. (PFBS: left; PFOA: middle; PFOS: right)	229
Figure 4-61: Mean concentrations (2008 to 2011) of PFOA und PFOS in surface water (5 m) in the German Bight.	229
Figure 4-62: Concentrations of PFC as % of concentration of Stade in May 2011.	230
Figure 4-63: Temporal trends of PFOA and PFOS surface water concentrations at three stations of the German Bight.	231
Figure 4-64: Distribution statistics of the percent fraction of dissolved to total metal concentrations in sea water as box and whisker plots. All box statistics are based on winter samples (JFM) from 2000–2011 and are separated in four figures by increasing salinity ranges (upper left to lower right: 28–30, 30–32, 32–34, >34).	238
Figure 4-65: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions (Copper, Mercury and Nickel (columns) in filtrated water in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (rows).	241
Figure 4-66: Spatial near surface (10 m) element concentration distributions (Manganese, Lead and Zink (columns) in filtrated water in 02/2008, 01/2009, 01/2010, 01/2011 (rows).	242
Figure 4-67: Spatial structure of solved element concentrations in near surface water during the summer 2010 surveillance cruise.	243
Figure 4-68: 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.	244
Figure 4-69: Assessment of element burden in filtered near surface water (10 m). 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 2010 and 2011 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 then effect assessment value, (red) greater then effect assessment value (refer to 4.4.2.1). The right hand coloured dot relates to the assessment result of 2011. An additional upward/downward arrow indicates a significant temporal trend during the recent five years.	246

Figure 4-70: Sediment sampling sites (left) German Bight from 2008 to 2011. Trend monitoring stations are indicated by blue dots. For any subsequent assessment of temporal trend and concentration level in sediment, these sites are combined to regional site groups, which are indicated by red circles. Right: Spatial distribution of percent fraction of sediment fines (<math>< 20 \mu\text{m}</math>) measured during the period 1985 to 2007.	248
Figure 4-71: 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, (red circles). BSH-background values are displayed as grey bars (compare to Table 4-7).	251
Figure 4-72: Assessment of element burden in surface sediment fines sampled in 2011. (Blue) less than OSPAR-BAC, (green) greater than BAC and less than effect assessment value, (red) greater than effect assessment value (refer to table 4-7). A significant temporal trend in each region during the recent ten years is indicated by an upward/downward white triangle. The median concentration (mg/kg DW) during the assessment year is given under each symbol.	254
Figure 4-73: Time series of annual maximum concentration activities of ^{137}Cs and ^{90}Sr in surface seawater at former positions of light vessels 'Borkumriff' and 'Elbe 1'.	263
Figure 4-74: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the German Bight in March 2008.	265
Figure 4-75: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the German Bight in October 2008.	265
Figure 4-76: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2009.	265
Figure 4-77: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2010.	265
Figure 4-78: Distribution of ^{137}Cs concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2011.	266
Figure 4-79: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the German Bight in March 2008.	266
Figure 4-80: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the German Bight in October 2008.	266
Figure 4-81: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2009.	267
Figure 4-82: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2010.	267
Figure 4-83: Distribution of ^{90}Sr concentration activities in surface seawater of the North Sea in 2011.	267
Figure 4-84: Sediment profiles of ^{137}Cs on station KS11 southeast of Helgoland in 2008 and 2009.	268
Figure 4-85: Sediment profiles of ^{137}Cs on station WB5 in 2008 and 2009.	269
Figure 4-86: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the German Bight during 2008.	270
Figure 4-87: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the North Sea during 2009.	270
Figure 4-88: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the North Sea during 2010.	270

<i>Figure 4-89: Distribution of ^3H concentration activity in surface seawater of the North Sea during 2011.</i>	<i>270</i>
<i>Figure 4-90: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu, $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the German Bight in March 2008.</i>	<i>271</i>
<i>Figure 4-91: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu, $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the North Sea in 2009.</i>	<i>272</i>
<i>Figure 4-92: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu, $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the North Sea in 2010.</i>	<i>272</i>
<i>Figure 4-93: Distributions of concentration activities of ^{238}Pu, $^{(239+240)}\text{Pu}$ and ^{241}Am in surface seawater of the North Sea in 2011.</i>	<i>272</i>
<i>Figure 4-94 Distribution of the Plutonium ratios (^{238}Pu to $^{(239+240)}\text{Pu}$) in surface seawater of the North Sea in 2009.</i>	<i>273</i>
<i>Figure 4-95: Distribution of the Plutonium ratios (^{238}Pu to $^{(239+240)}\text{Pu}$) in surface seawater of the North Sea in 2010.</i>	<i>273</i>
<i>Figure 4-96: Sediment profiles of $^{(239+240)}\text{Pu}$ on stations KS11 and WB5 in 2008.</i>	<i>274</i>
<i>Figure 4-97: Sediment profiles of the Plutonium ratios (^{238}Pu to $^{(239+240)}\text{Pu}$) on stations KS11 and WB5 in 2008.</i>	<i>274</i>

List of Tables

Atmospheric Circulation

<i>Table 2-1: Product survey. As to support assessments of recent states and evolutions, most figures include climatological information (from the base period 1971–2000) on the variables' changeability on individual time scales (dd, mm, ...). References to figures and tables are clickable targets in the pdf-version of this document.</i>	40
<i>Table 2-2: Calendar of daily weather types in 2008. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).</i>	43
<i>Table 2-3: Contingency table of weather types in 2008 (%).</i>	43
<i>Table 2-4: Calendar of daily weather types in 2009. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).</i>	44
<i>Table 2-5: Contingency table of weather types in 2009 (%).</i>	44
<i>Table 2-6: Calendar of daily weather types in 2010. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).</i>	45
<i>Table 2-7: Contingency table of weather types in 2010 (%).</i>	45
<i>Table 2-8: Calendar of daily weather types in 2011. Red: C & CDIR; Blue: A & ADIR; Bold (+, ++): Gale (severe, very severe).</i>	46
<i>Table 2-9: Contingency table of weather types in 2011 (%).</i>	46
<i>Table 2-10: Calendar of reduced weather types in 2008.</i>	47
<i>Table 2-11: Monthly frequencies of reduced weather types in 2008.</i>	47
<i>Table 2-12: Calendar of reduced weather types in 2009.</i>	48
<i>Table 2-13: Monthly frequencies of reduced weather types in 2009.</i>	48
<i>Table 2-14: Calendar of reduced weather types in 2010.</i>	49
<i>Table 2-15: Monthly frequencies of reduced weather types in 2010.</i>	49
<i>Table 2-16: Calendar of reduced weather types in 2011.</i>	50
<i>Table 2-17: Monthly frequencies of reduced weather types in 2011.</i>	50
<i>Table 2-18: Seasonal and annual relative frequencies of reduced weather types from 2008 through 2011.</i>	51
<i>Table 2-19: Weather-type transitions for base period 1971–2000 (NCEP). \mathbb{C}: Count matrix of rounded transition frequencies for the climatological year. P: Transition matrix of 1. order Markov chain, obtained from \mathbb{C} via ϕ_{ij}/RS_i; π: Eigenvector ($\pi = \pi P$), stationary (unconditional climatological) distribution. E: Embedded transition matrix (without sojourn times, from \mathbb{C} as P for $\phi_{ii} = 0$).</i>	56
<i>Table 2-20: As Table 2-19, except for the years 2008 (top) through 2011 (bottom).</i>	58
<i>Table 2-21: North Sea Wind. Seasonal and annual 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). Directional terms are based on a 16 point compass; directional classification of seasonal SLP fields (e. g. Figure 2-9) employs identical numerical data, but an 8 point compass, only.</i>	69
<i>Table 2-22: North Sea Wind. Monthly statistics: Wind direction, vector (V) and scalar (Vel) wind speed (m/s) and persistence (V/Vel in %). The comment on directional terms given in the caption of Table 2-21 applies mutatis mutandis.</i>	70
<i>Table 2-23: Number of severe and very severe gale days (SG VSG).</i>	73
<i>Table 2-24: Total number of gale days (G+SG+VSG).</i>	74

Physical Oceanography

Table 3-1: Calendar of daily circulation patterns in the German Bight for 2008–2011. . .	96
Table 3-2: Annual frequencies of daily circulation patterns in the German Bight with standardised differences from the 10-year average (2000–2009). Anomalies of more than one standard deviation are given in bold print.	97
Frequency distribution of wind set-up for 2008 to 2011 at tide gauge Cuxhaven	110
Table 3-3: Frequency distribution of wind set-up for 2008 to 2011 at tide gauge Cuxhaven.	110
Storm surge frequencies 1951–2011 and 2008–2011 with MHW trend (above tide gauge zero)	111
Table 3-4: Storm surges (water level more than 150 cm above MHW) between 1951–2011.	111
Table 3-5: Total heat content (THC) and mean volume temperature (VT) of the North Sea, data from summer cruises and North Sea SST averaged over cruise duration. ΔH = standardised anomaly (difference to reference period mean in standard deviations).	124
Table 3-6: Total North Sea salt content TSC, data from BSH North Sea summer surveys. ΔS = normalised anomaly (difference to reference period mean in standard deviations).	144

Marine Chemistry

Table 4-1: Monitoring cruises in 2008/11, and data used in this state assessment (x). .	155
Table 4-2: Compilation of mean values, medians and variation coefficients of salinities at the monitoring stations.	158
Table 4-3: Chlorinated hydrocarbons near Stade (Elbe) from 2008–2011 in [pg/L].	199
Table 4-4: Number of oil pollutants in the German Bight.	204
Table 4-5: PAK-concentrations in the river Elbe and the German Bight.	208
Table 4-6: Assessment criteria metals in water. EU Water Framework Directive (EU-WFD), OSPAR Convention, US Environmental Protection Agency (US-EPA).	235
Table 4-7: Assessment criteria 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% AI) and effect assessment criteria (US-NOAA, Effect Range Low ERL).	236
Table 4-8: Element concentration in filtered coastal water samples (salinity 30–32) and open North Sea (salinity > 34) near surface waters during the first quarter (JFM) of the year 2011. Given are the number of samples and the 25 %, 50 % and 75 % percentiles in ng/L (Hg in pg/L). All concentration values are coloured according the OSPAR-assessment scheme.	247
Table 4-9: Average and standard deviation of surface sediment fines percent fraction of total, as well as element burden in surface sediment fines (<20 μm). All 2010 and 2011 samples (<20 μm fraction, Al, Fe in (%)) and all other elements in (mg/kg DW). The number of observations is given in brackets.	249
Table 4-11: Activity of some natural radionuclides for North Sea seawater and sediment.	260

Autoren/Authors

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

Alexander Frohse	+49 (0) 40 3190-3212	alexander.frohse@bsh.de
Frank Janssen	+49 (0) 40 3190-3130	frank.janssen@bsh.de
Holger Klein	+49 (0) 40 3190-3220	holger.klein@bsh.de
Peter Loewe	+49 (0) 40 3190-3214	peter.loewe@bsh.de
Detlev Machoczek	+49 (0) 40 3190-3211	detlev.machoczek@bsh.de
Sylvin Müller-Navarra	+49 (0) 40 3190-3110	sylvin.mueller-navarra@bsh.de
Achim Schulz	+49 (0) 40 3190-3213	achim.schulz@bsh.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Labor Sülldorf
Wüstland 2
22589 Hamburg

Jürgen Herrmann	+49 (0) 40 3190-3324	juergen.herrmann@bsh.de
Stefanie Schmied	+49 (0) 40 3190-3333	stefanie.schmied@bsh.de
Stefan Schmolke	+49 (0) 40 3190-3320	stefan.schmolke@bsh.de
Norbert Theobald	+49 (0) 40 3190-3300	norbert.theobald@bsh.de
Sieglinde Weigelt-Krenz	+49 (0) 40 3190-3310	sieglinde.weigelt@bsh.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Neptunallee 5
18057 Rostock

Natalija Schmelzer	+49 (0) 381 4563-787	ice@bsh.de
--------------------	----------------------	------------

Deutscher Wetterdienst
NL Hamburg-Seewetteramt
Bernhard-Nocht-Straße 76
20359 Hamburg

Christiana Lefebvre	+49 (0) 69 8062-6230	christiana.lefebvre@dwd.de
---------------------	----------------------	----------------------------

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 CD-ROM
- 35 (2004) Gouretski, V. V., Koltermann, K. P. WOCE Global Hydrographic Climatology
- 36 (2004) Gayer, G., Dick, S., Pleskachevsky, A., Rosenthal, W. Modellierung von Schwebstofftransporten in Nord- und Ostsee
- 37 (2004) Schmelzer, N., Strübing, K., Stanisławczyk, I., Sztobryn, M. Die Eiswinter 1999/2000 bis 2003/2004 an der deutschen Nord- und Ostsee küste/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, S., 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 dreidimensionalen Ökosystemmodell
- 44 (2009) Loewe, P. (Ed.) System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen
- 45 (2009) Sztobryn, M., 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., Knüpffer, 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
- 50 (2013) Müller-Navarra, S. H. Gezeitenvorausberechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten/ On Tidal Predictions by Means of Harmonic Representation of Inequalities
- 51 (2013) Naturraum und Wirtschaftszone – Zustand und Entwicklung 2006–2007
- 52 (2014) Weigelt-Krenz, S., Theobald, N. Auswirkungen des Elbehochwassers vom Juni 2013 auf die Deutsche Bucht
- 53 (2014) Schmelzer, N., Holfort, J. Eiswinter 2009/2010 bis 2013/2014 an den deutschen Nord- und Ostseeküsten/ Ice Winters 2009/2010 to 2013/2014 on the German North and Baltic Sea Coasts
- 54 (2016) Frohse, A., Herrmann, J., Janssen, F., Klein, H., Lefebvre, C., Loewe, P., Machoczek, D., Müller-Navarra, S., Schmelzer, N., Schmied, S., Schmolke, H., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N., Weigelt-Krenz, S. Nordseezustand 2008–2011