

Meereswissenschaftliche Berichte
MARINE SCIENCE REPORTS

No. 12

**Zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen
in die Ostsee**

von

Holger Schinke

Institut für Ostseeforschung
Warnemünde
1996

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer Dissertation, die 1995 im Institut für Ostseeforschung Warnemünde und dem Institut für Meteorologie der Humboldt-Universität zu Berlin angefertigt und von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin angenommen wurde.

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 03F0091A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Salzwassereinbrüche - ihre Bedeutung für die Ostsee und ihre Erforschung	4
2.1	Die Ostsee im Überblick	4
2.2	Wasserhaushalt, Salzgehaltsverhältnisse, Salzwassereinbrüche	7
2.3	Bisherige Forschungen zu Salzwassereinbrüchen	10
2.3.1	<i>Klassische Arbeiten</i>	10
2.3.2	<i>Die grundlegenden Arbeiten von WYRTKI</i>	12
2.3.3	<i>Verhältnisse im Tiefenwasser und Salzwassereinbrüche, weitere Forschungen zum Wasseraustausch in den 50er und 60er Jahren</i>	13
2.3.4	<i>Die Hypothese von DICKSON</i>	14
2.3.5	<i>Die erste quantitative Definition von Salzwassereinbrüchen nach WOLF</i>	16
2.3.6	<i>Einzeluntersuchungen zu den Salzwassereinbrüchen im Dezember 1975/ Januar 1976</i>	17
2.3.7	<i>Die spektralanalytischen Untersuchungen von BÖRNGEN und HUPFER</i>	17
2.3.8	<i>Untersuchungen zum Wasseraustausch in den 80er Jahren</i>	20
2.3.9	<i>Die Definition von Salzwassereinbrüchen nach FRANCK und MATTHÄUS - der Beginn statistischer Untersuchungen über Salzwassereinbrüche</i>	20
2.3.10	<i>Einzeluntersuchungen zum Salzwassereinbruch im Januar 1993/ Modellierung von Salzwassereinbrüchen</i>	23
2.3.11	<i>Zusammenfassung</i>	24
2.4	Salzwassereinbrüche - Definition nach FRANCK und MATTHÄUS	25
3.	Datenbasis	29
3.1	Übersicht über die verwendeten Daten	29
3.2	Meteorologische Daten	30
3.3	Ozeanographische Daten	35
4.	Die Salzwassereinbrüche verursachende Wettersituation (notwendige Bedingung)	37
4.1	Verfahrensweise	37
4.2	Großwetterlagen und Salzwassereinbrüche	38

4.3	Das mittlere Bodendruckfeld bei Salzwassereinbrüchen	39
4.4	Das 500-hPa-Niveau bei Salzwassereinbrüchen	43
4.5	Zum Auftreten von Tiefdruckgebieten bei Salzwassereinbrüchen	44
4.6	Der Meteorologische Salzwassereinbruchs-Index (MSI)	47
4.7	Geostrophische Windverhältnisse über dem Ostsee-Eingangsbereich bei Salzwassereinbrüchen	48
4.8	Geostrophischer Wind bei Salzwassereinbrüchen und bei Salzwassereinströmen - ein Vergleich	51
4.9	Der geostrophische Wind bei Salzwassereinbrüchen im Vergleich zum realen Wind	52
4.10	MSI und Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet bei Salzwassereinbrüchen	53
4.11	Wasserstände und Salzgehaltsverhältnisse bei Salzwassereinbrüchen	54
4.12	Meteorologische und ozeanographische Größen in Monaten mit Salzwassereinbrüchen und in Monaten ohne Salzwassereinbrüche - ein Vergleich	57
4.13	Zum Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen von 1983 bis 1993	59
5.	Meteorologische und ozeanographische Größen in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche	62
5.1	Verfahrensweise	62
5.2	Bodendruckverhältnisse im nordatlantisch-europäischen Raum	63
5.3	Meteorologische und ozeanographische Größen im Ostseegebiet	65
5.3.1	<i>Meteorologische Größen</i>	65
5.3.2	<i>Ozeanographische Größen</i>	69
5.4	Zur besonderen Rolle der Flußwasserzufuhr - die wahrscheinliche Ursache für das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen von 1983 bis 1993	77
5.5	Wasserbilanz des Ostsee-Einzugsgebietes	79
5.6	Zur Flußwasserregulierung und hohen Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren	82
5.7	Zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen meteorologischen und ozeanographischen Größen mit Hilfe statistischer Modelle	85
5.7.1	<i>Allgemeines</i>	85
5.7.2	<i>Zur Varianz des Niederschlags im Ostsee-Einzugsgebiet und der Flußwasserzufuhr zur Ostsee</i>	86
5.7.3	<i>Zur Varianz der Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser</i>	88
5.7.4	<i>Zur Varianz der Salzgehaltsverhältnisse am Feuerschiff Gedser Rev</i>	92
5.7.5	<i>Gemessene und mit statistischen Modellen berechnete Wasserstände</i>	96
5.8	Übersicht über alle Faktoren, die Salzwassereinbrüche begünstigen - Schlußfolgerungen	97

6.	Fernwirkungen - begünstigen sie das Auftreten von Salzwassereinbrüchen?	102
6.1	Zur Hypothese von Dickson	102
6.2	Zur Periodizität von Salzwassereinbrüchen	103
6.3	Die Druckanomalie nach DICKSON und Meridionalindizes im Vorfeld von Salzwassereinbrüchen	104
6.4	Fernwirkungen - Anomalien im Druckfeld in Jahren vor Salzwassereinbrüchen	108
7.	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Literaturverzeichnis	120
	Danksagung	129
	Anhang	130
	Dokumentation zu den Computer-Animationen über charakteristische Zirkulationsmuster der Atmosphäre bei Salzwassereinbrüchen in die Ostsee	

1. Einleitung

Die Ostsee ist mit einer Fläche von 415 000 km² eines der größten Brackwassermeere der Erde. Sie ist mit der Nordsee nur durch schmale Zugänge im Bereich der dänischen Inseln verbunden. Die Wasserbilanz der Ostsee, die stark von der Flußwasserzufuhr bestimmt wird, führt im Mittel zu einem Ausstrom relativ salzarmen Wassers in der Oberflächenschicht und einem Einstrom salzreicheren Wassers in der Bodenschicht des Übergangsbereiches zwischen Nord- und Ostsee. Hierdurch bildet sich in der Ostsee eine sehr stabile Schichtung mit salzarmem Wasser an der Oberfläche und salzreichem Wasser am Boden aus. Durch diese Schichtungsverhältnisse sowie die Beckenstruktur der Ostsee wird die Vertikal- und Horizontalzirkulation stark behindert. Deshalb kommt es zu sogenannten Stagnationsperioden im Tiefenwasser, die vor allem durch die Abnahme des Sauerstoffgehaltes und die nachfolgende Bildung des lebensfeindlichen Schwefelwasserstoffs gekennzeichnet sind. Solche Stagnationsperioden können nur durch den Einstrom größerer Mengen salzreichen Wassers aus der Nordsee unterbrochen werden, die als Salzwassereinbrüche (SWE) bezeichnet werden. Diese können zu einer grundlegenden Erneuerung des Tiefenwassers führen, indem die eindringenden salzreicheren und damit schwereren Wassermassen die alten und stagnierenden anheben. Salzwassereinbrüche werden durch länger andauernde starke Westwinde verursacht und treten deshalb hauptsächlich im Herbst und Winter auf. Da sie sauerstoffhaltiges Wasser in die untersten Schichten der Ostsee führen, sind sie für die Tier- und Pflanzenwelt und damit für das Ökosystem "Ostsee" wichtige Ereignisse.

Die Erforschung der Ursachen von Salzwassereinbrüchen war bisher bestimmt durch die Analyse von Einzelereignissen (z. B. WYRTKI 1954a; FRANCKE und HUPFER 1980) sowie die spektralanalytische Untersuchung meteorologischer und ozeanographischer Größen im Gebiet der Ostsee bzw. des Nordatlantiks (z. B. BÖRNGEN 1978b; BÖRNGEN et al. 1990; HUPFER et al. 1994). Als günstige Vorbedingung für das Eintreten von Salzwassereinbrüchen werden dabei übereinstimmend ein niedriger Wasserstand der Ostsee* und erhöhte Salzgehalte im Tiefenwasser des Kattegats angesehen. Sich daran anschließende mehrtägige bis mehrwöchige starke Westwinde können dann zu einem Salzwassereinbruch führen. Basis der spektralanalytischen Untersuchungen war die Hypothese von DICKSON (1971, 1973), daß ein relativ beständiges und wiederkehrendes Druckmuster über dem Nordatlantik einen verstärkten Transport salzreichen Wassers in die europäischen Schelfmeere verursacht und daß es infolge solch einer Salzgehaltserhöhung - die auch im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee zu beobachten ist - zu Salzwassereinbrüchen kommt. In diesen Arbeiten konnte u. a. eine etwa dreijährige Periode bei der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik, bei der Zonalzirkulation über der Ostsee, beim Wasserstand der Ostsee sowie beim Salzgehalt des Tiefenwassers des Kattegats festgestellt werden.

* Unter dem Wasserstand der Ostsee ist die zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Ostsee befindliche Wassermenge zu verstehen, diese Größe wird deshalb auch oft als Füllungsgrad der Ostsee bezeichnet und in der Regel als Abweichung vom Mittelwert angegeben.

Die erste quantitative Definition von Salzwassereinbrüchen stammt von WOLF (1972). Darauf basierend ermittelte er für den Zeitraum 1950 bis 1968 zwanzig Salzwassereinbrüche und stellte fest, daß intensive Salzwassereinbrüche im Durchschnitt alle drei Jahre auftreten. Nach BÖRNGEN (1978b) sind die von WOLF angegebenen Salzwassereinbrüche im Zeitraum 1950 bis 1968 vorrangig im Bereich der Maxima der dreijährigen Salzgehaltsschwankung zu finden. FRANCK et al. (1987) gaben eine Definition von Salzwassereinbrüchen an, die auf den Vorstellungen von WOLF basiert. Auf Grund dieser Definition wurden aus Beobachtungsdaten alle Salzwassereinbrüche seit 1897 bestimmt. Dabei zeigte sich, daß es in den meisten Wintern Salzwassereinbrüche gegeben hat, im Mittel trat einer in jedem Winterhalbjahr auf. Eine Bestätigung für eine positive Salzgehaltsanomalie im Tiefenwasser des Kattegats als notwendige Voraussetzung für Salzwassereinbrüche konnte mit diesen Daten nicht gefunden werden (MATTHÄUS und FRANCK 1989). Es folgten weitere statistische Untersuchungen, die sich insbesondere mit den Änderungen von Wasserständen und Wasservolumina bei Salzwassereinbrüchen befaßten (MATTHÄUS und FRANCK 1990, 1992; FRANCK und MATTHÄUS 1992b). Der Salzwassereinbruch im Januar 1993, der eine zehnjährige Periode ohne solche Ereignisse beendete, gab Anlaß zu mehreren Einzelstudien (z. B. KLEINE 1993; MATTHÄUS et al. 1993; HUBER et al. 1994; LEHMANN 1994b; JAKOBSEN 1995; MATTHÄUS und LASS 1995). Damit kann man diesen Salzwassereinbruch als den am häufigsten in der Literatur beschriebenen betrachten. Das liegt zum einen am zehnjährigen Ausbleiben solcher Ereignisse und zum anderen an den großen Fortschritten, die die Modellierung in den letzten Jahren gemacht hat.

Alle bisherigen statistischen Arbeiten zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen waren spektralanalytischer Natur. Bisher gibt es aber keine Arbeiten, die sich auf statistischer Basis - von den exakten Daten von Salzwassereinbrüchen ausgehend - mit den meteorologischen Ursachen von diesen Ereignissen befaßt haben. Ausnahmen bilden Untersuchungen von MATTHÄUS und SCHINKE (1994b), deren Ergebnisse Teil dieser Arbeit sind. Ungeklärt ist bisher auch die Ursache für das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen von 1983 bis 1993, was zu einer drastischen Verschlechterung der Bedingungen im Tiefenwasser der Ostsee geführt hat (MATTHÄUS 1987, 1990; FRANCK und MATTHÄUS 1992a). Versuche der langfristigen Prognose von Salzwassereinbrüchen sind ebenfalls bisher gescheitert.

Gegenstand dieser Arbeit ist es, mit statistischen Methoden erstmals den typischen Verlauf meteorologischer und ozeanographischer Größen bei Salzwassereinbrüchen umfassend darzustellen sowie Bedingungen aufzuzeigen, die Salzwassereinbrüche begünstigen bzw. sie verhindern. Basis aller Untersuchungen ist dabei der Datensatz der Salzwassereinbrüche nach FRANCK et al. (1987) in erweiterter Form (MATTHÄUS 1995).

Im zweiten Kapitel erfolgt ein kurzer Überblick über die hydrographischen Bedingungen der Ostsee, eine ausführliche Darstellung des bisherigen Kenntnisstandes zu Salzwassereinbrüchen und zu verwandten Themen sowie eine eingehende Beschreibung der Definition von Salzwassereinbrüchen nach FRANCK et al. (1987). Das dritte Kapitel beinhaltet einen Überblick über alle verwendeten Datensätze. Im vierten Kapitel werden die meteorologischen und

ozeanographischen Bedingungen beschrieben, die unmittelbar bei einem Salzwassereintrich bzw. in den Wochen davor zu finden sind. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Druck- und Windverhältnissen. Das fünfte Kapitel gibt eine Übersicht über Unterschiede im Verhalten der meteorologischen und ozeanographischen Größen zwischen Wintern mit Salzwassereintrichen und solchen ohne. Besonders ausführlich wird hierbei die Rolle der Flußwasserzufuhr diskutiert, die möglicherweise einen entscheidenden Einfluß auf das Zustandekommen von Salzwassereintrichen hat. Außerdem wird mit Hilfe statistischer Modelle die Frage geklärt, wie sich die unterschiedlichsten Größen wechselseitig beeinflussen. Im sechsten Kapitel wird die Frage behandelt, ob es atmosphärische Fernwirkungen gibt, die für das Auftreten von Salzwassereintrichen eine Rolle spielen. An dieser Stelle wird insbesondere auf die Hypothese von DICKSON (1971, 1973) bzw. die darauf aufbauenden spektralanalytischen Untersuchungen von BÖRNGEN (1978b), BÖRNGEN et al. (1990) und HUPFER et al. (1994) eingegangen. Den Abschluß der Arbeit bilden die Zusammenfassung sowie das Literaturverzeichnis. Im Anhang ist eine Dokumentation zu den im Rahmen der Arbeit angefertigten Animationen des Bodendruckfeldes bei Salzwassereintrichen enthalten.

2. Salzwassereinbrüche - ihre Bedeutung für die Ostsee und ihre Erforschung

2.1 Die Ostsee im Überblick

Die Ostsee ist ein Nebenmeer des Atlantischen Ozeans (Abb. 2.1). Sie erstreckt sich tief in den Kontinent Europa hinein und zählt somit zu den intrakontinentalen Mittelmeeren. Bei einer Gesamtfläche von 415 000 km² und mit einem Wasservolumen von 21 700 km³ ist sie im Mittel 52 m tief. Ihr Einzugsgebiet ist mit 1 729 000 km² etwa viermal so groß. Die einzige Verbindung zur Nordsee und damit zum Ozean besteht im Bereich der dänischen Inseln durch

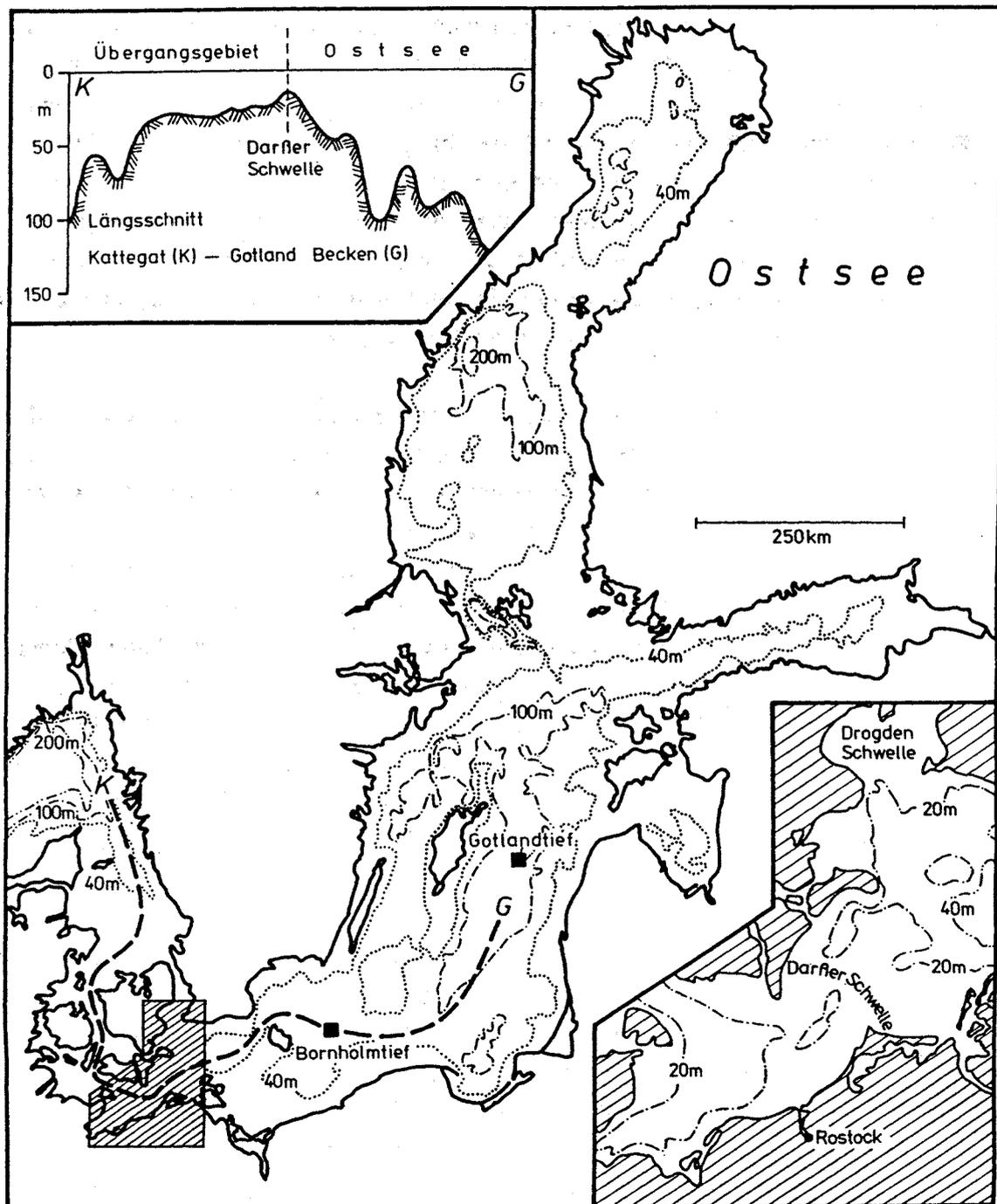


Abb. 2.1: Die Bodentopographie der Ostsee und der Schwellen zum Übergangsgebiet (aus MATTHÄUS 1992)

den Großen und den Kleinen Belt sowie den Öresund (Gesamtquerschnitt 0,35 km²). Die flachsten Stellen dieses Übergangsbereiches, die Darßer Schwelle und die Drogdenschwelle, sind nur 18 m bzw. 7 m tief. Daher betrachtet man sie auch als die ozeanographischen Grenzen der Ostsee. Dabei kommt der Darßer Schwelle eine besondere Bedeutung zu, da ca. 73 % des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee über sie erfolgen (JACOBSEN 1980). Somit ist sie von grundlegender Bedeutung für den Wasserhaushalt sowie die Beobachtung und Beurteilung der ozeanographischen Bedingungen der Ostsee und ihrer Veränderungen.

Das untermeerische Relief der Ostsee ist charakterisiert durch die Existenz mehrerer Becken, die durch Schwellen voneinander getrennt sind. Diese Gliederung des Meeresbodens zusammen mit dem Küstenverlauf führt zu einer natürlichen Einteilung der Ostsee, welche auf WATTENBERG (1949) zurückgeht. Von Nord nach Süd wird die Ostsee wie folgt unterteilt: Bottnischer Meerbusen (Bottenwiek, Bottensee, Ålandsee und Schärenmeer), Finnischer Meerbusen, Rigaer Meerbusen und eigentliche (bzw. mittlere oder zentrale) Ostsee. Die eigentliche Ostsee läßt sich weiter untergliedern in Gotlandsee (Westliche Gotlandsee, Östliche Gotlandsee), Bornholmsee und Arkonasee. Hinzu kommen noch - auch als Übergangsbereich zur Nordsee bezeichnet - die Beltsee und das Kattegat. Durch die Darßer Schwelle und die Drogdenschwelle wird die Beltsee - zu der die Belte und der Sund sowie die Kieler und Mecklenburger Bucht gerechnet werden - von der Arkonasee abgegrenzt.

Auf Grund der Entstehung der Ostsee nach der letzten Kaltzeit, die vor etwa 15 000 bis 10 000 Jahren zu Ende ging, kommt es auch heute noch in diesem Gebiet zu vertikalen Erdkrustenbewegungen. Durch die Inlandeismassen, die Dicken von über 2000 m hatten, wurde die Erdkruste nach unten gedrückt. Der Rückgang der Eismassen führte zu einer Entlastung, infolgedessen sie sich langsam wieder aufwölbte. Dieser Prozeß ist auch heute noch nicht abgeschlossen, da in Skandinavien Landhebungsprozesse von über 80 cm/100 Jahre zu beobachten sind. Im südlichen Ostseeraum hingegen tritt eine leichte Landsenkung auf (ROSSITER 1967). In jüngster Zeit nimmt man die Existenz mehrerer, sich unterschiedlich bewegender, starrer Platten an (STRIGGOW und TILL 1987). Diese isostatischen Erdkrustenbewegungen sind die hauptsächliche Ursache für die starken Veränderungen bei den Wasserständen der Ostsee (siehe Kap. 3). Ihnen überlagert ist der globale eustatische Meeresspiegelanstieg, der mit 5 - 24 cm/100 Jahre angegeben wird (DOBROVOLSKI 1992) und ebenfalls eine Folge der letzten Kaltzeit ist.

Die bedeutendsten unperiodischen Wasserstandsschwankungen in der Ostsee werden durch die Windverhältnisse hervorgerufen. Hierbei kommt es durch die Schubkraft des Windes an den Küsten zu Windstau bzw. zu einer Erniedrigung des Wasserstandes. Auch der Luftdruck trägt zu Änderungen desselben bei (theoretisch entspricht einer Druckerhöhung von 1 hPa eine Wasserstandserniedrigung von 1 cm). Druck- und Windfeld zusammen sorgen durch den Wechsel von Ein- und Ausstrom für die stärksten Schwankungen im Wasserstand der Ostsee insgesamt (HELA 1944). Niederschlag, Verdunstung und Flußwasserzufuhr verursachen nur in geringem Maße Änderungen des Wasserstandes.

Die Gezeiten sind in der Ostsee nur sehr schwach ausgeprägt. Der maximale Tidenhub (Springtidenhub) der halbtägigen Gezeiten liegt bei 12 cm in der westlichen Ostsee, derjenige der eintägigen beträgt etwa 15 cm in der westlichen Ostsee und im Finnischen Meerbusen. Im Bereich der zentralen Ostsee sind die Gezeiten ohne Bedeutung.

Weitere periodische Wasserstandsschwankungen, die allerdings nur gelegentlich auftreten und rasch abklingen, sind die Eigenschwingungen (Seiches) der Ostsee. Sie können durch das Druck- und Windfeld angeregt werden (z. B. durch Zyklonen auf bestimmten Zugbahnen). Hierbei unterscheidet man bei der eindimensionalen Betrachtung (NEUMANN 1941; KRAUSS und MAGAARD 1962) zwei Schwingungssysteme: Westliche Ostsee - Finnischer Meerbusen und Westliche Ostsee - Bottnischer Meerbusen. Die Perioden der Seiches 1. Ordnung des ersten Systems liegen bei 27,4 h, die des zweiten Systems bei 39,4 h. Seiches höherer Ordnung haben kürzere Perioden. Die zweidimensionale Betrachtungsweise führt zu ähnlichen Ergebnissen (WÜBBER und KRAUSS 1979). An den Enden der Schwingungssysteme können relativ hohe Wasserstandsschwankungen auftreten. Daher haben diese Erscheinungen große Bedeutung für das Auftreten von Sturmhoch- und -niedrigwassern.

Durch den Wasserhaushalt der Ostsee und den Wind bedingt, ist eine Schrägstellung des Meeresspiegels vorhanden. Auf eine einheitliche Niveaulfläche bezogen, steigt der Meeresspiegel der Ostsee von außen nach innen im Mittel um etwa 35 cm an. Die mittlere jährliche Schwankungsbreite der Wasserstände - die ebenfalls in engem Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt steht - beträgt ca. 20 cm.

Mit einem Breitenunterschied von etwa 12° ($65^\circ 40' N$ bis $53^\circ 45' N$) und einem Längendifferenz von etwa 21° ($9^\circ 10' E$ bis $30^\circ 15' E$) liegt die Ostsee in unterschiedlichen klimatischen Gebieten (HUPFER 1981). Mit der Analyse des Ostseeklimas befaßte sich DEFANT (1972). Demnach liegen der südliche und westliche Teil der Ostsee im Bereich des feuchttemperierten Klimas (Klimatyp C_f nach KÖPPEN 1923), welches vorwiegend ein Meeresklima ist. Diese Gebiete sind so meeresnah, daß sie von den vom Atlantik wehenden Winden stark beeinflußt werden. Einige charakteristische Eigenschaften des Klimatyps C_f sind: Regen zu allen Jahreszeiten, warm-gemäßigte Temperatur, kühle Sommer, jährliche Temperaturschwankung etwa 8 bis $15^\circ C$, Zunahme der täglichen Temperaturschwankung vom Meer zum Festland hin, überwiegend westliche Winde. Der nördliche und östliche Teil liegen im Bereich des feuchtwinterkalten Klimas (Klimatyp D_f nach KÖPPEN), das man vorwiegend über dem Festland findet. Dieser Klimatyp ist u. a. gekennzeichnet durch ausreichend Niederschlag in allen Jahreszeiten (Regen oder Schnee), kalte Winter, im Westen kühle und nach Osten zunehmend wärmere Sommer, zunehmende tägliche und jährliche Temperaturschwankung zum Festland hin, überwiegend westliche Winde. Zusammenfassend kann man sagen, daß das Ostseeklima als Übergangsklima zwischen Meeresklima im Süden und Westen und Landklima im Norden und Osten bezeichnet werden kann.

Eine Darstellung der Ostsee als Ganzes findet sich u. a. bei MAGAARD und RHEINHEIMER (1974), HUPFER (1981) und VOIPIO (1981). Ein detaillierter Überblick über den derzeitigen ozeanographischen Zustand der Ostsee wurde durch die HELCOM (1990) gegeben.

2.2 Wasserhaushalt, Salzgehaltsverhältnisse, Salzwassereinbrüche

Der Wasserhaushalt der Ostsee ist charakterisiert durch die Gewinngrößen Niederschlag (N), Flußwasserzufuhr (Z) und Einstrom aus der Nordsee (E) sowie die Verlustgrößen Ausstrom (A) und Verdunstung (V). Die Wasserhaushaltsgleichung sieht damit wie folgt aus:

$$N + Z + E - A - V = \Delta H \quad (\Delta H = \text{Differenzgröße}).$$

Geht man von einer Ausgeglichenheit des Wasserhaushalts im langzeitlichen Mittel aus, d. h., die Differenzgröße ΔH ist etwa 0 (bzw. der mittlere Wasserstand der Ostsee bleibt etwa konstant), so ergibt sich

$$N + Z + E = A + V.$$

Wenn man die Süßwasserbilanz auf die eine und die Strömungsverhältnisse im Übergangsbereich zur Nordsee auf die andere Seite bringt, läßt sie sich auch in der Form

$$(N - V) + Z = A - E$$

schreiben. Die einzelnen Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung unterliegen starken zwischenjährlichen Schwankungen und haben verschiedenartige Jahrgänge. Sie lassen sich auf unterschiedliche Weise bestimmen. Zwei Abschätzungen für die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen zeigt Tab. 2.1. Die Differenzen resultieren aus Unterschieden in der Größe der untersuchten Gebiete, verschiedenen Herangehensweisen und Untersuchungszeiträumen bei

	BROGMUS (1952)		HELCOM (1986)	
	ohne Beltsee und Kattegat 365 000 km ² (unterschiedliche Zeiträume)		ohne Beltsee und Kattegat 372 858 km ² (1931-1960)	
Niederschlag N	172 km ³	471 mm	237 km ³	636 mm
Verdunstung V	172 km ³	471 mm	184 km ³	493 mm
Flußwasserzufuhr Z	472 km ³	1290 mm	428 km ³	1147 mm
Ausstrom A	944 km ³		962 km ³	2580 mm
Einstrom E	472 km ³		481 km ³	1290 mm
(N - V) + Z = A - E	472 km ³	1290 mm	481 km ³	1290 mm

Tab. 2.1: Mittlere jährliche Wasserhaushaltsgrößen der Ostsee nach BROGMUS (1952) und HELCOM (1986)

der Bestimmung der einzelnen Größen. Man erkennt, daß Niederschlag und Verdunstung nahezu ausgeglichen sind bzw. der Niederschlag die Verdunstung etwas übersteigt. Das bedeutet, daß die Differenz zwischen Ausstrom und Einstrom, also der Nettotransport durch

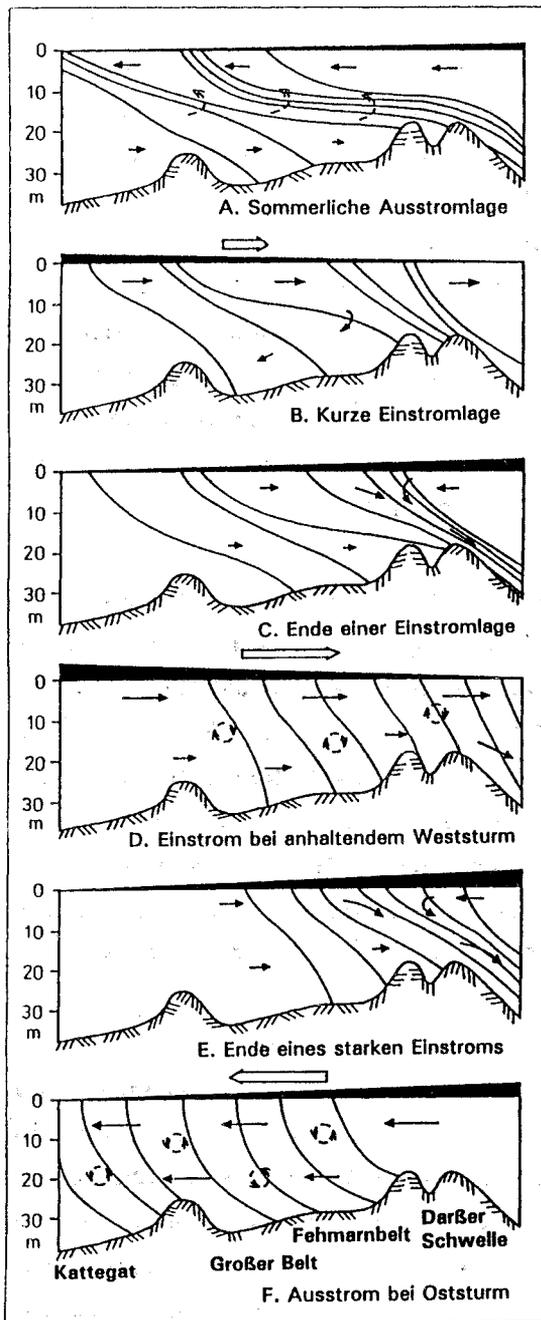


Abb. 2.2: Typische Fälle des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee (nach WYRTKI 1954b)

besonders starken Veränderungen. Abb. 2.2 zeigt typische Fälle des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee.

Durch die Niederschläge und die Flußwasserzufuhr kommt es zu einer salzarmen und damit spezifisch leichteren Oberflächenschicht, deren Salzgehalt vom Ostsee-Eingangsbereich bis zu den nördlichen Teilen des Bottnischen Meerbusens abnimmt. Das über die dänischen Meerengen eindringende salzreiche und damit schwerere Wasser breitet sich am Boden der Becken aus. Diese zwei Prozesse führen zu einer stabilen Schichtung mit salzarmem und damit

die Ostseeausgänge, nahezu gleich der Flußwasserzufuhr ist. Dieser im allgemeinen vorhandene Ausstrom erfaßt jedoch nicht die gesamte Wassersäule, sondern er ist in der Regel auf die oberen Wasserschichten beschränkt. Ohne ihn würde der Meeresspiegel der Ostsee im Jahr um ca. 1,29 m steigen. Durch den Ausstrom gelangt salzärmeres Ostseewasser - unter ständiger Vermischung - durch den Kleinen Belt, den Großen Belt und den Sund in das Kattegat. Im allgemeinen existiert zu dem Ausstrom in der Oberflächenschicht ein nur einige Meter mächtiger entgegengesetzt gerichteter Kompensationsstrom in der Tiefe der Beltsee (unterhalb 10 bis 15 m), welcher salzreiches Wasser aus dem Kattegat in die Ostsee führt. Diese Verhältnisse sind besonders für den Sommer typisch (Abb. 2.2A). Infolge der entgegengesetzten Strömungen kommt es zu einer Schräglage der isohalinen Flächen im Übergangsbereich zwischen Nordsee und Ostsee. Der Übergang vom Nordsee- zum Ostseewasser erfolgt jedoch nicht kontinuierlich, sondern an zwei hydrographischen Grenzflächen (WATTENBERG 1941): der Skagerrak-Grenzfläche, die das salzreiche Nordseewasser mit Salzgehalten von über 30 PSU* vom Mischwasser des Kattegats mit Salzgehalten von 20 bis 26 PSU abgrenzt, und der Beltsee-Grenzfläche, die die Grenze zwischen dem Mischwasser des Kattegats und dem Brackwasser der Ostsee mit Salzgehalten von 6 bis 12 PSU darstellt. Die Lage der Grenzflächen ist nicht stationär, sondern hängt sehr stark von den Wind- und Strömungsverhältnissen ab.

Dabei unterliegt die Lage der Beltsee-Grenzfläche

* 1 PSU = 1 Practical Salinity Unit \approx 1 g Salz pro 1 kg Meerwasser

leichterem Wasser in den oberen Schichten der Ostsee und salzreicherem und damit schwererem Wasser in den Tiefenschichten. Dadurch entsteht in der zentralen Ostsee in etwa 50 bis 70 m Tiefe eine Salzgehaltssprungschicht, die die Vertikalzirkulation stark einschränkt. Die Horizontalzirkulation der Ostsee wird durch die kaskadenförmige Anordnung der Becken behindert (Arkonabecken, Bornholmbecken, Gotlandbecken). Diese Verhältnisse führen zu Stagnationsperioden im Tiefenwasser der Ostsee, die durch den allmählichen Abbau des Sauerstoffs und die sich daran anschließende Entstehung des für die Pflanzen- und Tierwelt giftigen Schwefelwasserstoffs (H_2S) gekennzeichnet sind. Nur das Eindringen größerer Mengen von salz- und sauerstoffreichem Wasser aus dem Kattegat ist in der Lage, das Tiefenwasser umzuschichten und damit grundlegend zu erneuern. Kurze Einstromsituationen, die durch starke Westwinde hervorgerufen werden (Windstau im Kattegat und geringe Wasserstände in der westlichen Ostsee führen zu einem starken einwärts gerichteten Gefällestrom), reichen dazu nicht aus (Abb. 2.2B und 2.2C). Dauern die Winde aber mehrere Tage bis Wochen an, so kann es unter bestimmten Umständen zum Einstrom größerer Mengen salzreichen Wassers kommen (Abb. 2.2D und 2.2E). Solche Ereignisse werden als Salzwassereinbrüche (SWE) bezeichnet. Hierbei kommt es zu einer Auflösung der Schichtung im Ostsee-Eingangsbereich, d. h., die Isohalinen richten sich auf (siehe Abschn. 2.4). Die Ausbreitung des eindringenden salzreichen Wassers erfolgt allmählich am Boden der Ostsee von Becken zu Becken, so daß die Auswirkungen eines Salzwassereinbruchs unter Umständen erst nach mehreren Monaten in der zentralen Ostsee zu beobachten sind. Mehr oder weniger starke Salzwassereinbrüche treten in den meisten Wintern auf, ihre Auswirkungen auf die Verhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee sind aber sehr unterschiedlich und hängen nicht nur von der Menge des eingeflossenen salzreichen Wassers ab.

Im Verlauf dieses Jahrhunderts war eine mittlere Zunahme des Salzgehaltes der Ostsee in allen Tiefenschichten zu beobachten, wobei dieser Trend starke räumliche Unterschiede aufwies. Im Tiefenwasser der Ostsee nahm der Salzgehalt von 1900 bis 1975 um etwa 0,8 bis 1,5 PSU zu. Damit verbunden war ein Anstieg der Wassertemperatur um etwa 0,6 bis 1,8 K und ein Rückgang des Sauerstoffgehaltes um etwa 2 bis 4 ml/l (MATTHÄUS 1979, 1983, 1984). Seit 1976 hat es keine großen Salzwassereinbrüche mehr gegeben, von Januar 1983 bis Januar 1993 trat überhaupt kein solches Ereignis auf. Damit war das die längste je beobachtete Periode ohne Salzwassereinbrüche. Sie führte zu einer drastischen Verschlechterung der Bedingungen im Tiefenwasser der Ostsee. Die ozeanographischen Verhältnisse waren gekennzeichnet durch eine starke Abnahme des Salzgehaltes, der Temperatur und des Sauerstoffs, was zur Bildung von Schwefelwasserstoff geführt hat (MATTHÄUS 1986, 1987, 1990; FRANCK und MATTHÄUS 1992a). Der Salzwassereinbruch im Januar 1993 beendete diese größte je beobachtete Stagnationsperiode, und es kam zu einer Verbesserung der Verhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee (DAHLIN et al. 1993; MATTHÄUS et al. 1994; NAUSCH und NEHRING 1994; NEHRING et al. 1994). In den beiden darauffolgenden Wintern blieben Salzwassereinbrüche erneut aus.

2.3 Bisherige Forschungen zu Salzwassereinbrüchen

Untersuchungen über Salzwassereinbrüche sind eng mit Untersuchungen zum *Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee* sowie zur *Erneuerung des Tiefenwassers der Ostsee* verbunden. Daher wird in den folgenden Abschnitten auch verstärkt auf Arbeiten aus diesen Gebieten eingegangen. Der Schwerpunkt liegt aber bei Untersuchungen zu den *Ursachen von Salzwassereinbrüchen*.

2.3.1 Klassische Arbeiten

Schon am Ende des vorigen Jahrhunderts beschäftigte sich KRÜMMEL (1894, 1895) mit der Erneuerung des Tiefenwassers der Ostsee. KNUDSEN (1900) wies darauf hin, daß infolge länger anhaltender Einstromlagen in periodischen Abständen salzreiches Wasser in die Ostsee einströmt und dort unmittelbar absinkt, da beim anschließenden Ausstrom nur salzarmes Ostseewasser zu beobachten ist. Das einströmende Wasser hebt die salzärmeren Wassermassen in den Tiefenschichten der Ostsee und führt so zu einer Erneuerung im Tiefenwasser. KNUDSEN stellte fest, daß durch den Sund zwar salzreicheres Wasser, aber weitaus geringere Wassermassen als durch die Belte in die Ostsee einströmen. JACOBSEN (1908, 1913, 1925, 1936) führte Untersuchungen zum Wasseraustausch durch die dänischen Gewässer durch. Schwerpunkt seiner Forschungen waren dabei die Strömungsverhältnisse. Auch SCHULZ (1924, 1930) befaßte sich mit dem Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee und seiner Bedeutung für das Tiefenwasser der Ostsee.

MANEGOLD (1936) untersuchte für den Zeitraum 1901-30 die Wetterlagen und Zugbahnen von Tiefs bei über 300 Fällen von starkem Ein- und Ausstrom. Als Basis dazu dienten ihm die Strömungsmessungen der hauptsächlich dänischen Feuerschiffe und die Einteilung der Zyklonenzugbahnen nach VAN BEBBER (1891). Bei Einstromlagen ist das Auftreten von Tiefs über Nordosteuropa und von Hochs über Südwesteuropa typisch. Die meisten Einstromlagen sind nach MANEGOLD im Herbst und Winter zu beobachten, die wenigsten im Mai und Juni. Das Maximum tritt im November auf, zur *"Zeit, wo die häufigsten Winde die stärksten sind."* MANEGOLD verwies auf ein sekundäres Minimum im Dezember, für das er keine Erklärung geben konnte. Bei Ausstromlagen hingegen ist nach MANEGOLD nicht die Zugbahn der Tiefs ausschlaggebend, sondern die Position der Hochdruckgebiete. Charakteristisch ist ein Auftreten von Hochdruckgebieten über Nordosteuropa, Tiefdruckgebiete bei Ausstrom sind über Westeuropa und den Britischen Inseln gelegen. Auch hier tritt das Maximum im Winterhalbjahr auf. Zusammenfassend schrieb MANEGOLD: *"Der Einstrom richtet sich ausschließlich nach dem Tief... Der Ausstrom hängt in erster Linie vom Hoch ab, in vielen Gruppen aber außerdem sehr wesentlich vom Tief."* Weiterhin stellte er fest, daß die Strömungsrichtung u. a. bei Gedser Rev auf der Darßer Schwelle schneller umschlägt als bei Drogden.

WATTENBERG (1941) beschäftigte sich mit den Grenzen zwischen Nord- und Ostseewasser und analysierte das Wandern der Salzfronten im Ostsee-Eingangsbereich in Abhängigkeit von der Wetterlage. KALLE (1943) analysierte die große Wasserumschichtung im Gotlandtief im Jahre 1933/34, die zu einem starken Anstieg des Sauerstoff- und einer starken Abnahme des Phosphatgehaltes führte.

Mit den Schwankungen des Wasserstandes der Ostsee befaßte sich HELA (1944). Schwerpunkt seiner Arbeit ist der Wasseraustausch durch die dänischen Meerengen in Abhängigkeit von den meteorologischen Vorgängen. Hierzu untersuchte er detailliert den Wasserstand der Ostsee im Zeitraum 1926-1935 sowie einige extreme Ein- und Ausstromereignisse. Dabei kam HELA zu der Feststellung, daß die Änderungen des Wasserstandes der Ostsee in erster Linie durch die Strömungsverhältnisse in den dänischen Gewässern und damit durch die Wetterlage bedingt sind. Diese sind zum Teil sehr groß und gehen ziemlich schnell vor sich, wobei im Mittel Ausstromsituationen - bedingt durch die Wasserbilanz - länger dauern als Einstromsituationen. Als Hauptursache für die Erneuerung des Tiefenwassers vermutete HELA den *"Grossaustausch", also ... die pulsatorische, von meteorologischen Faktoren bedingte Strömung*". Die optimale Einstromsituation wird in der Arbeit wie folgt geschildert: *"Die stärkste einwärtsgerichtete Strömung herrscht in den dänischen Gewässern, wenn ein von Südwesten oder Westen heranziehendes, in einem grossen Gebiet wirkendes und kräftiges Tief in Südschweden etwa in der Mitte von Oslo und Stockholm angekommen ist. Da verursacht der kräftige südwestliche und südliche Wind vor dem Tief im Gebiet der Ostsee das Verfrachten der Wassermassen nach Norden, wodurch südlich der dänischen Gewässer eine kräftige Saugwirkung entsteht. Westlich des Tiefs verursachen die nordwestlichen Winde nördlich der dänischen Gewässer eine kräftige Druckwirkung."* Hierdurch kann die Wasserstandsdifferenz zwischen Kattegat und westlicher Ostsee extrem hohe Werte annehmen, was zu maximalem Einstrom führt.

DIETRICH (1951) untersuchte die Oberflächenströmungen im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee. Er stellte fest, daß im Mittel die Strömungsgeschwindigkeit der aus der Ostsee ausströmenden Wassermassen von Süd nach Nord zunimmt, dabei aber gleichzeitig ihre vertikale Mächtigkeit abnimmt. Diese vom Wasserhaushalt der Ostsee abhängige Strömung sowie der Gezeitenstrom sind aber im Verhältnis zu den windinduzierten Strömungen nur von untergeordneter Bedeutung. Letztere untersuchte DIETRICH intensiver an Hand von Feuerschiffsdaten. Er fand heraus, daß im Gebiet der Belte und des Sundes im allgemeinen Westwinde der Stärke 1 bis 2 Beaufort erforderlich sind, um den aus der Wasserbilanz bedingten Ausstrom zu kompensieren.

KÄNDLER (1951) befaßte sich mit dem Einfluß der Wetterlage auf die Salzgehaltsschichtung im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee, wobei er typische Ein- und Ausstromsituationen analysierte. Ein Schwerpunkt seiner Arbeit war der weite Vorstoß des Nordseewassers im Frühjahr 1937. Bedingt durch anhaltende Ostlagen im März und April, drang das Nordseewasser mit dem Tiefenkompensationsstrom im Großen Belt sehr weit vor. Im Frühjahr 1938 hingegen war kein so weites Vordringen zu beobachten. Dazu heißt es in der Arbeit: *"Es ist*

bezeichnend und stimmt durchaus mit der hier vorgetragenen Ansicht über die Zusammenhänge zwischen der Wetterlage und der Salzgehaltsschichtung überein, daß die langanhaltende West-Wetterlage in den ersten Monaten des Jahres 1938 das Vordringen des salzreichen Tiefenwassers aus dem Kattegat in die Belte nicht stärker förderte. Aber andererseits ist es doch fraglich, ob man die stürmischen Ostwindperioden im Winter und Frühjahr 1937 als ausschlaggebend für die Entwicklung des Tiefenstromes ansehen darf, der so große Mengen Nordseewasser in die westliche Ostsee brachte." Darum äußerte KÄNDLER die Vermutung, daß beim Einstrom salzreichen Wassers in die Ostsee möglicherweise starke Vorstöße atlantischer Wassermassen in die nördliche Nordsee und das Skagerrak, die dann weiter ins Kattegat eindringen, eine bedeutende Rolle spielen könnten.

2.3.2 Die grundlegenden Arbeiten von WYRTKI

Mit der Intensivierung der Meßtätigkeit und der Verbesserung der Meßmethodik in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts wurden die Kenntnisse über den Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee und die Salzwassereinbrüche wesentlich erweitert. Die umfangreiche Darstellung des großen Salzwassereinbruchs im November/Dezember 1951 durch WYRTKI (1954a) kann als Anfang von Untersuchungen über den Ablauf großer Salzwassereinbrüche und ihre Auswirkungen auf das Tiefenwasser der Ostsee gewertet werden. In der Arbeit werden ausführlich die Salzgehalts- und Strömungsverhältnisse sowie die Wasserstände im Ostsee-Eingangsbereich im Umfeld des Salzwassereinbruchs behandelt. Weiterhin wurde von WYRTKI eine Analyse der Zugbahnen der Tiefdruckgebiete, die zu dem Salzwassereinbruch geführt hatten, sowie eine Abschätzung der Menge des eingedrungenen salzreichen Wassers durchgeführt. WYRTKI gibt drei wesentliche Faktoren an, deren Zusammenwirken für die Stärke des Salzwassereinbruchs ausschlaggebend war:

1. eine länger andauernde Westlage (3 Wochen) mit starken Stürmen als *notwendige Bedingung* für den Salzwassereinbruch,
2. ein niedriger Wasserstand der Ostsee (durch vorangegangene Ostlage bedingt) als *Vorbedingung für die Größe der eingedrungenen Wassermenge* und
3. ein hoher Salzgehalt im Tiefenwasser des Kattegats und das weite Vordringen dieser Wassermasse in die Belte als *Vorbedingung für die Größe des Salzwassereinbruchs*.

Im Gegensatz zu den Ursachen der 1. und 2. Bedingung wird die Ursache der 3. nicht direkt in den meteorologischen Verhältnissen gesehen, sondern - in Übereinstimmung mit KÄNDLER (1951) - als durch eine "*mehr oder minder starke Zufuhr ozeanischen Wassers in die nördliche Nordsee und das Skagerrak*" bedingt.

Besonders intensiv wurden zu dieser Zeit von WYRTKI (1954c) auch die Wasseraustauschprozesse zwischen Nordsee und Ostsee untersucht. In der Arbeit wird ein niedriger Wasserstand der Ostsee als wesentliche Voraussetzung für stärkere Einstromperioden genannt.

WYRTKI verweist auf das Übergewicht des Wasserstandes der Ostsee gegenüber dem Einfluß des Windes beim Wasseraustausch und betont das zeitliche Nacheinander von Einstrom- und Ausstromlagen. Er stellt fest, *"daß die Schwankungen in der atmosphärischen Zirkulation eine Schwankung der Niederschläge über dem Einzugsgebiet der Ostsee hervorrufen, wodurch sich die Süßwasserzufuhr zur Ostsee ändert. Eine Abnahme der Süßwasserzufuhr bedingt dabei ein Absinken des Wasserstandes in der Ostsee und eine Abnahme des resultierenden Ausstromes. Die Abnahme des Windes bedingt aber ihrerseits ebenfalls ein Absinken des Wasserstandes, das aber in Nord- und Ostsee praktisch gleich sein wird, so daß dadurch keine Veränderung des Gefälles entsteht. Daraus ergibt sich, daß die Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation indirekt über die Süßwasserzufuhr einen beträchtlichen Einfluß auf den Wasserhaushalt der Ostsee nehmen, direkt aber nur die Intensität des Wasserumsatzes durch die dänischen Gewässer beeinflussen, nicht aber seinen resultierenden Wert. ... Die atmosphärische Zirkulation ... kann aber nur die Intensität des Wasseraustausches verändern, nicht aber den resultierenden Transport, der nur von der Süßwasserzufuhr abhängig ist."* Obwohl der Autor diesen Fakt in seiner Arbeit wiederholt betont und er allgemein bekannt ist, spielte er für die Erklärung des Zustandekommens von Salzwassereinbrüchen bisher keine Rolle. Die Flußwasserzufuhr, die Größe des Wasseraustausches, die mittlere Lage der Fronten und die Zufuhr salzreichen Wassers zum Kattegat sind nach WYRTKI die Haupteinflußgrößen für den Salzgehalt im Übergangsgebiet zwischen Nord- und Ostsee.

In weiteren grundlegenden Arbeiten wurde von WYRTKI (1953, 1954b) die Dynamik der Wasserbewegungen im Fehmarnbelt untersucht. Er stellte fest, daß im Sommer die Wasserkörper der Ostsee, des Kattegats und der Nordsee in diesem Gebiet *übereinander* lagern. Im Winter hingegen - durch anhaltende Vermischung bedingt - ist eine kontinuierliche Folge von vertikal relativ homogenen Mischwasserkörpern zwischen Ostseewasser und Nordseewasser *nebeneinander* zu beobachten. Dabei können die von ihm angegebenen Fälle des Wasseraustausches A, B und C ganzjährig vorkommen, die Fälle D, E und F hingegen sind auf den Winter beschränkt (siehe Abschn. 2.2, Abb. 2.2). Die Schichtungsauflösung im Winter - die eine Voraussetzung für einen Salzwassereinbruch darstellt - hängt nach WYRTKI nicht nur von der Stärke der atmosphärischen Zirkulation ab, sondern auch von der Größe der Süßwasserzufuhr zur Ostsee.

2.3.3 Verhältnisse im Tiefenwasser und Salzwassereinbrüche, weitere Forschungen zum Wasseraustausch in den 50er und 60er Jahren

Nach den Arbeiten von WYRTKI (1953, 1954a, b, c) erschienen zahlreiche Arbeiten, die sich hauptsächlich mit den Auswirkungen einzelner oder mehrerer Salzwassereinbrüche auf das Tiefenwasser der Ostsee befaßten (FONSELIUS 1962, 1967, 1969, 1970; FRANCKE und NEHRING 1971; HERMANN 1972; NEHRING und FRANCKE 1972). Die Ursachen wurden dabei nur am Rande oder gar nicht behandelt. SCHEMAINDA (1956/57, 1960) beschäftigte sich mit den Verhältnissen im Tiefenwasser des Bornholmbeckens in den Jahren nach dem großen Salzwassereinbruch vom November/Dezember 1951. NEHRING und FRANCKE (1974)

beschrieben die Auswirkungen eines Salzwassereinbruchs im März/April 1972 und kamen zu dem Schluß, daß *"Salzwassereinbrüche dieses Ausmaßes offenbar häufiger sind als ursprünglich angenommen wurde."* FONSELIUS und RATTANASEN (1970) identifizierten Salzwassereinbrüche an Hand des Anstiegs des Sauerstoffgehaltes im Tiefenwasser der Ostsee. Auf diese Art fanden sie von 1952 bis 1970 13 Ereignisse, wobei einige aber nur zu einer geringen Erhöhung der Sauerstoffwerte führten. FONSELIUS (1977a, b) setzte diese Analyse fort und identifizierte seit 1952 19 solche Ereignisse. Weiterhin beschrieb er die Auswirkungen eines Salzwassereinbruchs im Herbst 1976, der im Januar 1977 zu der höchsten je gemessenen Temperatur im Tiefenwasser des Gotlandtiefs führte. Auf Grund seiner Ergebnisse sagte er eine mehrjährige Stagnationsperiode voraus.

Mit dem Wasser- und Salzaustausch durch die dänischen Meerengen und den Ursachen von langjährigen Schwankungen des Salzgehaltes und der Temperaturen der Ostsee befaßten sich in den 50er und 60er Jahren auch NIKOLAJEV (1956), SOSKIN und ROZOVA (1957) und SOSKIN (1959, 1963). HUPFER (1962) untersuchte u. a. Langzeitvariationen des Oberflächen- und Tiefensalzgehaltes in der Beltsee. LISITZIN (1962) beschäftigte sich mit Variationen des Wasserstandes der Ostsee, die durch Änderungen von Luftdruckgradienten hervorgerufen werden.

2.3.4 Die Hypothese von DICKSON

Anfang der siebziger Jahre analysierte DICKSON (1971) Salzgehaltsschwankungen in den europäischen Schelfmeeren und brachte sie mit Salzwassereinbrüchen in Verbindung. Zahlreiche weitere Forschungen zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen basieren auf seiner Hypothese. DICKSON konnte zeigen, daß im Verlauf dieses Jahrhunderts in den europäischen Schelfmeeren (Nordsee, Irische See, Ärmelkanal) ein beständiger Wechsel von Zeitabschnitten hohen und niedrigen Oberflächensalzgehaltes stattgefunden hat. Dabei ist jede Periode hohen Salzgehaltes - wenn der Jahresgang außer acht gelassen wird - der Endpunkt eines Ansteigens der Salzgehaltswerte während eines 3- bis 4jährigen Zeitraums. Die Maxima des Salzgehaltes treten in allen Bereichen der europäischen Schelfmeere nahezu gleichzeitig auf.

SCHOTT (1964, 1966) untersuchte ebenfalls Änderungen des Oberflächensalzgehaltes in der Nordsee und verglich sie mit der Stärke der Zonalkomponente des Windes, dem Niederschlag und der Flußwasserzufuhr. Aus den Ergebnissen zog er den Schluß, daß die Ursachen von Änderungen - insbesondere in den Küstengebieten - hauptsächlich in Variationen der Flußwasserzufuhr zu suchen sind, die aber ebenso wie Variationen des Niederschlags durch die Zonalströmung verursacht werden. In küstenfernen Gebieten der Nordsee werden andere Gründe als Ursache angegeben: Änderungen beim Einstrom atlantischer Wassermassen und bei der Heranführung salzärmer Wassermassen aus den Küstengebieten des Festlands bzw. Variationen von Niederschlag und Verdunstung.

DICKSON, der Variationen in der Flußwasserzufuhr als einzige oder dominierende Ursache speziell in den zentralen Teilen der Nordsee ausschloß, führte die Salzgehaltsanomalien hauptsächlich auf Prozesse atlantischen Ursprungs zurück. Da sich die Größe der Anomalie mit zunehmender Entfernung vom offenen Atlantik erhöht, kam DICKSON zu folgender Feststellung: *"Während man das sicherlich dahingehend interpretieren kann, daß dies einen erhöhten Einfluß der großen europäischen Flüsse auf die innersten Gebiete der Schelfmeere widerspiegelt, könnte es buchstäblich auch so interpretiert werden, daß die bei jeder Periode erhöhten Salzgehaltes auftretenden Salzgehalte besonders 'unnormale' in Seegebieten sind, die besonders weit vom offenen Ozean entfernt sind (d. h., daß ein 'atlantischer' Prozeß beteiligt ist)." (übersetzt aus dem Englischen).* Die Gleichzeitigkeit der Anomalien in allen Gebieten der Schelfmeere bestärkte DICKSON in seinen Annahmen.

Die Ursachen für die erhöhten Salzgehalte werden in einem verstärkten Transport salzreichen Wassers aus den Subtropen nach Norden in die europäischen Schelfmeere gesehen. Er wird durch ein relativ beständiges und wiederkehrendes Druckmuster ausgelöst, das über dem Nordatlantik auftritt und von NAMIAS (1959, 1964, 1965) beschrieben wurde. Es ist gekennzeichnet durch negative Druckanomalien über dem Westatlantik und positive Druckanomalien über Nordwesteuropa. Insgesamt wird die Erhöhung der Salzgehalte in den europäischen Schelfmeeren auf vier Ursachen zurückgeführt, die durch diese Druckanomalien bedingt sind:

1. Beschleunigung des Einstromes der atlantischen Wassermassen,
2. Erhöhung des Salzgehaltes des einströmenden Wassers, da es aus südlicheren Breiten kommt,
3. Verminderung der Flußwasserzufuhr,
4. Erhöhung der Verdunstung bei persistentem Vorhandensein antizyklonaler Wetterlagen.

Die ersten beiden Ursachen sind advektiv, die anderen beiden beeinflussen den Salzgehalt durch Vermischung und sind nach DICKSON nur von geringer Bedeutung. Größeren Einfluß haben sie nur am Ende jeder Periode erhöhter Salzgehalte, wenn das blockierende Hoch besonders stark entwickelt ist, und in den innersten Regionen der Schelfgebiete, wo der Einfluß der Flüsse maximal ist. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der einströmenden atlantischen Wassermassen gab DICKSON mit 2 sm/Tag an, da die Anomalien in der Deutschen Bucht ca. 1 Jahr nach den Anomalien am Westausgang des Kanals auftreten.

Die atmosphärischen Prozesse, die zu den erhöhten Salzgehaltswerten in den europäischen Schelfmeeren führen und die auch im Tiefenwasser des Skagerraks und des Kattegats zu finden sind, führen nach DICKSON direkt oder indirekt auch zu einer Erhöhung des Tiefeneinstromes in die Ostsee. Der Autor verweist aber darauf, daß eine Erhöhung der Salzgehaltswerte nicht automatisch zu einem erhöhten Einstrom führt und daß noch andere Faktoren berücksichtigt werden müssen. Dabei sind die positiven Druckanomalien über Nordwesteuropa von besonderer Bedeutung, die neben einer Erhöhung des Salzgehaltes in den Schelfmeeren eine Verminderung des Wasserstandes der Ostsee bewirken und auf diese Weise auch zu einer Verstärkung des Tiefeneinstromes führen. DICKSON konnte eine gute Übereinstimmung der

von ihm gefundenen Perioden erhöhter Salzgehalte mit den in der Literatur beschriebenen Veränderungen im Tiefenwasser der Ostsee feststellen. Daher schlußfolgerte er zum Eintreten von Salzwassereinbrüchen: *"Obwohl es angebracht ist, ... den Schluß zu ziehen, daß Salzwassereinbrüche Begleitumstände eines verstärkten Salztransports in die Schelfmeere sind, ist es schwierig zu bestimmen, welcher Teil der Einstromstärke (wenn es irgendeiner ist) dem 'Anfangseinstrom' zugeordnet werden kann - irgendeiner Beschleunigung des atlantischen Stromes in die Nordsee - und welcher Teil bloß der atmosphärisch induzierten Zunahme des Kompensationsstromes entspricht. Zusätzlich zu diesen beiden Faktoren ist bekannt, daß lokale meteorologische Bedingungen kurzfristig die Intensität des einwärts gerichteten Tiefenstromes verstärken oder verringern können. Es scheint aber unwahrscheinlich, daß diese lokalen Bedingungen selbst in der Lage sind, einen Salzeinbruch irgendeiner Größenordnung hervorzurufen."* (übersetzt aus dem Englischen).

DICKSON (1972, 1973) beschäftigte sich weiter auf der Basis der von ihm gefundenen Zusammenhänge mit der Vorhersage von Salzwassereinbrüchen. Obwohl der Bodensalzgehalt des Feuerschiffes Anholt Nord eine fünfjährige Periode aufweist, ist ihre Stabilität für eine Vorhersage nicht ausreichend. Daher diente für die Vorhersage die Annahme, daß hohe Salzgehalte im Tiefenwasser des Skagerraks notwendig für größere Salzwassereinströme in die Ostsee sind und daß diese durch die von DICKSON (1971) beschriebenen großräumigen Anomalien in der atmosphärischen Zirkulation hervorgerufen werden. Beim Auftreten der Anomalien wäre dann eine Prognose eines Einbruchs möglich. Eine im Januar 1972 von DICKSON auf Grund dieser Hypothese aufgestellte Vorhersage für einen Salzwassereinbruch im Winter 1971/72 erwies sich dabei als richtig, da im April 1972 ein Einstrom salzreichen Wassers in die Ostsee stattfand.

Weiterhin konnte DICKSON enge Zusammenhänge zwischen dem Oberflächensalzgehalt in der Deutschen Bucht, den Tiefensalzgehalten im Skagerrak, im Kattegat und in der Beltsee sowie einem Zyklonal- und einem Meridionalindex über den Britischen Inseln zeigen (verstärkte südliche Winde und ein verringerter Zyklonalindex führen zu hohen Salzgehalten). Die Zeitverschiebung zwischen dem Auftreten der atmosphärischen Erscheinungen und den Änderungen im Salzgehalt kann dabei sehr klein sein, aber auch 1,5 bis 2 Jahre betragen.

Der entscheidende Unterschied zwischen den Arbeiten von WYRTKI (1954a) und DICKSON (1971, 1972, 1973) besteht darin, daß WYRTKI gleichberechtigt zu einem niedrigen Wasserstand der Ostsee eine Salzgehaltserhöhung im Tiefenwasser des Kattegats als günstige Vorbedingung für einen Salzwassereinbruch betrachtete, wohingegen DICKSON die Heranführung salzreicher Wassermassen als entscheidende Vorbedingung ansah.

2.3.5 Die erste quantitative Definition von Salzwassereinbrüchen nach WOLF

Gleichzeitig zu den Arbeiten von DICKSON (1971, 1972, 1973) wurde von WOLF (1972) eine erste quantitative Definition von Salzwassereinbrüchen angegeben. WOLF ging ebenfalls davon

Hierbei wurden hauptsächlich die an den Feuerschiffen Lappegrund am Nordausgang des Sundes und Gedser Rev auf der Darßer Schwelle beobachteten Salzgehalte in 0 und 15 m Tiefe sowie ihre spektrale Abhängigkeit von den verschiedensten Faktoren analysiert.

HUPFER (1975) untersuchte den Zusammenhang zwischen dem Salzgehalt an der Oberfläche und in 15 m Tiefe am Feuerschiff Lappegrund und den Windkomponenten über der mittleren Nordsee. Er stellte fest, daß der Tiefensalzgehalt mit der Ostkomponente des Windes positiv korreliert ist. Das bedeutet, daß der Tiefeneinstrom in die Ostsee bei einer erhöhten Ostkomponente des Windes über der Nordsee gut ausgebildet ist. Weiterhin korrespondieren hohe Salzgehaltswerte mit erhöhten Werten der Nord- und Ostkomponente im Periodenbereich von 3 bis 4 Jahren, was möglicherweise für das Auftreten von Salzwassereintrüben verantwortlich sein könnte.

Neben vielen anderen Periodizitäten fand BÖRNGEN (1978b) eine signifikante ca. 3jährige Schwankung in den Spektren der Tiefensalzgehalte im Ostsee-Eingangsbereich, die er mit der Hypothese von DICKSON (1971, 1972, 1973) zum Auftreten von Salzwassereintrüben in Verbindung brachte. Hierfür spricht nach BÖRNGEN auch die Aussage von WOLF (1972), daß im Durchschnitt alle drei Jahre ein starker Salzwassereintruch in die Ostsee stattfindet. Der Autor kam zu der Feststellung, daß die 3jährige Schwankung im Tiefensalzgehalt eine Folge von Änderungen der lokalen Zonalzirkulation (im Bereich der Ostsee), der regionalen Meridionalzirkulation (über dem Nordatlantik) und des Wasserstandes der Ostsee ist. Weiterhin konnte er herausfinden, daß die Maxima des Tiefensalzgehaltes zwischen 1,2 und 3,5 Monaten hinter den Minima von Zirkulation und Wasserstand hinterherhinken. Das ist nach BÖRNGEN gleichbedeutend mit einem Nachlaufen der Maxima des Salzgehaltes zwischen 19,2 und 21,5 Monaten hinter den Maxima der Einflußgrößen. Somit erklärte er die Maxima im Tiefensalzgehalt

1. mit einer Zunahme der nach Norden gerichteten Komponente der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik, die 1,5 bis 2 Jahre vor dem Maximum im Salzgehalt auftritt (optimal 20 Monate), und
2. mit einer Verstärkung der nach Westen gerichteten Komponente der Zonalzirkulation über der Ostsee, die 2 Monate vor dem Maximum im Salzgehalt zu beobachten ist und die zu einer Abnahme des Wasserstandes führt.

Die Salzgehaltsanomalien sind dabei proportional der Stärke und Dauer des Auftretens der Anomalien in der Zirkulation.

Auf Grund der gefundenen Beziehungen zwischen Zirkulation, Wasserstand der Ostsee und Tiefensalzgehalt im Ostsee-Eingangsbereich, der Übereinstimmung der Maxima des Tiefensalzgehaltes mit dem Auftreten von Salzwassereintrüben nach WOLF und der Möglichkeit der Synchronisation der Sauerstoffanreicherung im Gotlandtief mit den untersuchten Tiefen-

salzgehalten ist für BÖRNGEN "nachgewiesen, daß die Salzwassereinbrüche mit einer dreijährigen Periode auftreten.

Gegenüber verschiedenen, z. T. lückenhaften Angaben in der Literatur konnte im Ergebnis dieser Arbeit der Kausalzusammenhang zwischen der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation (regionale Meridional- und lokale Zonalzirkulation) auf der einen Seite und der Bereitstellung hinreichender Mengen salzreichen Wassers sowie dem nachfolgenden Einstrom in die Ostsee selbst auf der anderen geklärt werden. Dabei ist die Stärke eines Salzwassereinbruchs nicht nur von der Ausbildung der erwähnten Komponenten der atmosphärischen Zirkulation sondern auch von ihrem zeitlichen Auftreten (optimaler Abstand zwischen dem Maximum der nordwärts gerichteten Komponente der atmosphärischen Zirkulation im Atlantik-Gebiet und dem Maximum der westwärts gerichteten Komponente der Zirkulation der Atmosphäre im Ostseegebiet beträgt etwa 20 Monate) abhängig." Abschließend unternahm BÖRNGEN noch den Versuch einer Prognose über die nächsten Salzwassereinbrüche auf der Basis der 3jährigen Schwankung.

In einer weiteren Darstellung gab BÖRNGEN (1983) eine etwas gekürzte Übersicht seiner Ergebnisse. In dieser Arbeit stellte er auf Grund des unregelmäßigen Eintretens von Salzwassereinströmen in die Ostsee in den letzten Jahren und der schlechten Ausprägung der 3jährigen Schwingung vor 1930 fest, daß weitere Untersuchungen zur Stabilität der gefundenen Periodizitäten notwendig sind. Entsprechende Ergebnisse wurden von BÖRNGEN et al. (1990) vorgestellt. Die Autoren kamen mit Hilfe der gleitenden Maximum-Entropie-Spektralanalyse zu dem Ergebnis, daß die 3jährige Periode bei der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik und beim Tiefensalzgehalt im Ostsee-Eingangsbereich nur im Mittel vorhanden ist und daß sie beträchtlichen Schwankungen unterliegt. Daraus schlossen sie, daß eine Prognose von Salzwassereinbrüchen nur durch kontinuierliche Beobachtung der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik, des Wasserstandes der Ostsee und der Zonalzirkulation über dem Norden Zentraleuropas zusammen mit dem Tiefensalzgehalt im Ostsee-Eingangsbereich möglich ist. Das gleichzeitige Eintreten des Zusammenbrechens der 3jährigen Schwingung mit dem Ausbleiben starker Salzwassereinbrüche seit 1976 wird als Bestätigung der Hypothese von DICKSON gesehen.

Da die Hypothese von DICKSON zum Wirkungsmechanismus von Salzwassereinbrüchen die Basis für die Arbeiten von BÖRNGEN war, erfolgte keine kritische Auseinandersetzung mit ihr. So bleibt die Frage offen, warum - ohne offensichtlichen kausalen Zusammenhang - in der Regel 20 Monate nach einer Verstärkung der nach Norden gerichteten Komponente der Zirkulation über dem Nordatlantik eine Verstärkung der nach Westen gerichteten Komponente der Zirkulation über der Ostsee auftritt.

HEINB (1994) sowie HUPFER et al. (1994) untersuchten zonale Luftdruckdifferenzen (d. h. Meridionalindizes) über dem Nordatlantik zwischen Europa und Nordamerika. Hierbei fanden sie neben vielen anderen Perioden eine signifikante 3jährige Schwingung auf den Breitenkreisen 35° N, 40° N, 45° N, 50° N und 55° N. Auf den Breitenkreisen von 40° N bis 55° N konnte ab Mitte der 70er Jahre ein Abbrechen der Signifikanz dieser Periode festgestellt

werden. Gemäß der DICKSONSchen Hypothese betonen die Autoren die Übereinstimmung dieses Abbrechens mit dem Ausbleiben starker Salzwassereinbrüche seit 1976.

2.3.8 Untersuchungen zum Wasseraustausch in den 80er Jahren

Einen wichtigen Beitrag zur Erforschung des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee leistete JACOBSEN (1980). Er untersuchte im Rahmen des dänischen Belt-Projektes detailliert die Strömungsverhältnisse im Bereich der Belte und des Sundes vom 01. 07. 1975 bis zum 01. 01. 1977 ("Pilotstudien-Jahr"). Dieser Zeitraum ist durch das Auftreten sehr starker Salzwassereinbrüche gekennzeichnet. Weiterhin führte JACOBSEN umfangreiche Betrachtungen zum Wasserhaushalt der Ostsee durch und beschäftigte sich mit Möglichkeiten der barotropen Modellierung des Wasseraustausches. Dabei stellte er fest, daß der Nettostrom mit guter Genauigkeit aus Wasserstandsdaten der Ostsee in Zeiten mit hohem Ausstrom berechnet werden kann, in Zeiten mit geringem Ausstrom hierzu aber noch Daten der Flußwasserzufuhr notwendig sind. LASS et al. (1987) und MATTHÄUS et al. (1982, 1983) berichteten über Ergebnisse der Wasseraustausch-Experimente Darßer Schwelle (WEDS), bei denen über mehrere Wochen zu verschiedenen Jahreszeiten der Wasseraustausch in diesem Gebiet intensiv untersucht wurde. In diesem Zusammenhang sind auch die Ergebnisse von MATTHÄUS und FRANCK (1979) zu nennen. MÜLLER-NAVARRA (1983) beschäftigte sich mit der Modellierung der baroklinen Zirkulation im Kattegat und in der Beltsee.

Mit der theoretischen Bestimmung des barotropen Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee befaßte sich LASS (1988). Auf Grund seiner Betrachtung kam er zu dem Schluß, daß ein großer Einstrom unter barotropen Bedingungen in die Ostsee ein seltenes Ereignis ist. Weiterhin stellte er fest, daß der Einstrom salzreichen Kattegatwassers in die Ostsee nur wahrscheinlich ist, wenn der Wasserstand der Ostsee zu Beginn des Einstromes nicht über dem Mittel liegt. Ansonsten würde der mit dem Einstrom verbundene Wassertransport in die Ostsee deren Wasserstand auf unwahrscheinlich hohe Werte erhöhen. In Zeitskalen unter fünf Tagen reagiert der Wasserstand der Ostsee auf lokale meteorologische Anregungen wie ein geschlossenes Becken und kann als konstant betrachtet werden.

2.3.9 Die Definition von Salzwassereinbrüchen nach FRANCK und MATTHÄUS - der Beginn statistischer Untersuchungen über Salzwassereinbrüche

FRANCK et al. (1987) definierten auf der Basis der von WOLF (1972) vorgeschlagenen Verfahrensweise Salzwassereinbrüche quantitativ (siehe Abschn. 2.4 und Kap. 3). Als Datenbasis dienten ihnen dazu die täglichen Messungen des Salzgehaltes am Feuerschiff Gedser Rev auf der Darßer Schwelle. Der Analysezeitraum umfaßte die Zeit von 1897 bis 1976, nennenswerte Lücken in der Meßreihe gab es nur während der Weltkriege und in Eiswintern. Insgesamt identifizierten die Autoren 90 Salzwassereinbrüche, die 5 Tage (definierte Mindestdauer) bis 29 Tage - meist jedoch 7 bis 8 Tage - andauerten. Weiterhin unterteilten sie die

Einbrüche mit Hilfe eines Intensitätsindex Q - der vom Salzgehalt und der Andauer des Einbruchs abhängt - in schwache, mittlere, starke und sehr starke Ereignisse. Die Arbeit von FRANCK et al. kann man als den Beginn statistischer Untersuchungen über Salzwassereinbrüche betrachten, alle weiteren diesbezüglichen Arbeiten basieren auf dem von den Autoren erstellten und später erweiterten (FRANCK und MATTHÄUS 1992a; MATTHÄUS 1993b) Datensatz.

Mit den 90 identifizierten Salzwassereinbrüchen führten FRANCK et al. erste statistische Analysen durch. Sie fanden heraus, daß Salzwassereinbrüche meist in Gruppen und nur von August bis April auftreten, wobei die meisten und intensivsten von November bis Januar zu finden sind. Der von WYRTKI (1954a) beschriebene Salzwassereinbruch im November/Dezember 1951 konnte als der stärkste überhaupt identifiziert werden. Weiterhin stellten die Autoren fest, daß die Auswirkungen auf das Tiefenwasser nicht nur von der eingeströmten Salzmenge abhängen. Außerdem konnten sie große jahreszeitliche Unterschiede bei den Eigenschaften der einströmenden Wassermassen finden.

MATTHÄUS und FRANCK (1988) beschäftigten sich weiter speziell mit den Auswirkungen der Salzwassereinbrüche auf das Tiefenwasser der Ostsee und mit jahreszeitlichen Unterschieden bei dem Salzgehalt, der Dichte, der Temperatur und dem Sauerstoffgehalt der einströmenden Wassermassen. Während die Variationen beim Salzgehalt und bei der Dichte nur gering sind, ist ein beträchtlicher Jahresgang bei der Temperatur (Minimum im Winter) und beim Sauerstoffgehalt (Maximum im Winter) zu beobachten. Die Autoren verwiesen darauf, daß nur Gruppen von Salzwassereinbrüchen zu einer Verbesserung der Bedingungen im Tiefenwasser führen können.

Als nächstes untersuchten MATTHÄUS und FRANCK (1989) die Salzgehaltsverhältnisse im Tiefenwasser des Kattegats, da von DICKSON (1971, 1972, 1973) und BÖRNGEN (1978b, 1983) positive Salzgehaltsanomalien in diesem Gebiet als notwendige Vorbedingung für Salzwassereinbrüche angesehen werden. Dabei fanden sie im Mittel auch erhöhte Salzgehaltswerte vor Salzwassereinbrüchen, die im Kattegat von Nord nach Süd zunehmen. Die Autoren konnten ein relativ ausgewogenes Verhältnis zwischen positiven und negativen Anomalien von etwa 60 : 40 % finden. Auch vor starken Salzwassereinbrüchen treten gelegentlich negative Anomalien auf. Aus diesen Ergebnissen zogen sie den Schluß, daß positive Salzgehaltsanomalien nicht unbedingt notwendig für das Auftreten von Salzwassereinbrüchen sind. Zu den Ursachen der Anomalien finden sich in der Arbeit keine Aussagen.

Mit den bei einem Salzwassereinbruch in die Ostsee einströmenden Wasser- und Salzmassen sowie deren Ausbreitung in der Ostsee befaßten sich MATTHÄUS und FRANCK (1990). Hierbei wird der Einstromprozeß bei einem Salzwassereinbruch in zwei Phasen unterteilt: Die erste Phase, die Vorlaufphase, beginnt mit einem charakteristischen Minimum des Ostseewasserstandes und ist durch den Einstrom größerer Mengen salzärmeren Wassers gekennzeichnet. Die zweite Phase, der eigentliche Salzwassereinbruch, beginnt mit dem Einstrom salzreicher Wassermassen gemäß der Definition. Während der Vorlaufphase, die im Mittel

22 Tage dauert und bei der der Wasserstand der Ostsee durchschnittlich um 38 cm steigt, strömen ca. 120 km³ Wasser ein. Während des im Mittel 10 Tage dauernden eigentlichen Salzwassereintruchs erhöht sich der Wasserstand der Ostsee durchschnittlich um weitere 22 cm, was durch den Einstrom von 70 km³ salzreichen Wassers bedingt ist. Im Gegensatz zu der in der Vorlaufphase einströmenden Wassermenge steht die während des eigentlichen Salzwassereintruchs einströmende in engem Zusammenhang mit dem Intensitätsindex Q. Eine Übersicht über die charakteristischen Eigenschaften der bei Salzwassereintrüchen einströmenden Wassermassen ist auch bei FRANCK und MATTHÄUS (1991) zu finden.

FRANCK und MATTHÄUS (1992b) beschäftigten sich intensiv mit den Änderungen der Wasserstandsdiﬀerenz zwischen dem Kattegat und der südlichen Ostsee sowie den Änderungen des Ostseewasserstandes bei Salzwassereintrüchen. Da die letzten 15 Tage vor Beginn eines Salzwassereintruchs eine besondere Rolle spielen (bei 72 % aller Salzwassereintrüche fällt der charakteristische Anstieg des Wasserstandes in diese Periode), wurde für diesen Zeitraum der Begriff Vorperiode eingeführt. Während des gesamten Einstromprozesses konnten die Autoren eine starke Pulsation der Wasserstandsdiﬀerenz feststellen, wobei aber positive Diﬀerenzen am Ende der Vorperiode bzw. zu Beginn des eigentlichen Salzwassereintruchs überwiegen und sie hier auch am größten sind. Obwohl am Anfang der Vorperiode negative Ostseewasserstände vorherrschen, ist dies keine notwendige Vorbedingung für das Auftreten eines Salzwassereintruchs. Das gilt auch für starke und sehr starke Ereignisse. Im Mittel erreicht die Ostsee bereits während der Vorperiode fast ihren mittleren Wasserstand. Nach dem 5. Tag eines Salzwassereintruchs traten bei allen untersuchten Fällen so gut wie keine negativen Ostseewasserstände mehr auf. Eine ausführliche Zusammenfassung ihrer bisherigen Ergebnisse sowie eine Systematisierung der unterschiedlichen Herangehensweisen bei der Identifizierung von Salzwassereintrüchen gaben MATTHÄUS und FRANCK (1992). In den beiden zuletzt genannten Arbeiten sind Diagramme über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Salzwassereintrüchen auf der Basis des Ostseewasserstandes angegeben. Ein Überblick über den ozeanographischen Zustand der Ostsee in Verbindung mit Salzwassereintrüchen ist bei FRANCK und MATTHÄUS (1992a) und MATTHÄUS (1992, 1993a) zu finden.

MATTHÄUS und SCHINKE (1994a, 1994b) bzw. SCHINKE und MATTHÄUS (1994) analysierten auf statistischer Basis die Druck- und Windverhältnisse bei Salzwassereintrüchen (siehe Kap. 4).

Das Fehlen größerer Salzwassereintrüche seit 1976, das zu drastischen Veränderungen im Tiefenwasser der Ostsee geführt hat, regte Untersuchungen zu den Ursachen an. Neben BÖRNGEN et al. (1990), HEINB (1994) und HUPFER et al. (1994) (siehe Abschn. 2.3.7) beschäftigten sich LASS und MATTHÄUS (1994) mit den Ursachen dieses Ausbleibens. Dazu verglichen letztere auf der Basis von Tageswerten die Andauer des Auftretens von Winden (Station Arkona, siehe Abb. 3.1) aus östlichen Richtungen im Zeitraum 1951 bis 1976 mit dem Zeitraum 1976 - 1992. Sie fanden dabei heraus, daß die Wahrscheinlichkeit von Ostwinden mit einer Andauer von mehr als 10 Tagen im Zeitraum 1951 bis 1976 signifikant höher war. Weiterhin führten sie einen Vergleich zwischen den mittleren Windwerten und Ostsee-

wasserständen zwischen Jahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne durch. Hierbei fanden sie, daß in Jahren mit Salzwassereinbrüchen im Oktober verstärkt Wind aus östlichen Richtungen auftritt. Die anschließend einsetzenden starken Westwinde führen dann zu einem starken Salzwassereinstrom in die Ostsee. In Jahren ohne Salzwassereinbrüche hingegen führen leicht erhöhte Westwinde von Juli bis Oktober zu einem schwachen Einstrom, der von der Flußwasserzufuhr kompensiert wird, so daß es zu keinem signifikanten Salzwassereinstrom kommen kann. Das Verhalten des Windes spiegelt sich auch im Wasserstand der Ostsee wider (niedrigerer Wasserstand im Herbst in Jahren mit Salzwassereinbrüchen). Als typisch für einen Salzwassereinbruch bezeichneten die Autoren eine einmonatige Ostwindphase, die unmittelbar von einer zweimonatigen Phase starker Westwinde abgelöst wird.

2.3.10 Einzeluntersuchungen zum Salzwassereinbruch im Januar 1993/Modellierung von Salzwassereinbrüchen

Der Salzwassereinbruch im Januar 1993 beendete - wie schon mehrfach erwähnt - die längste und ernsteste Stagnationsphase im Tiefenwasser der Ostsee in diesem Jahrhundert. Bedingt durch das 10jährige Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen und die Fortschritte bei der Modellierung in den letzten Jahren, löste dieses Ereignis eine Vielzahl von Einzeluntersuchungen aus.

Mit den Ursachen des Einbruchs und der Ausbreitung der eingedrungenen Wassermassen befaßten sich MATTHÄUS et al. (1993) sowie MATTHÄUS und LASS (1995). Bei einer eingeströmten Wassermenge von etwa 310 km^3 (davon rund 135 km^3 salzreiches Wasser) und einem mittleren Salzgehalt des über die Darßer Schwelle eingeströmten salzreichen Wassers von ca. 19 PSU stuften sie diesen Einbruch als mittleren ein. Seine Auswirkungen auf die Bedingungen in den Tiefenbecken der zentralen Ostsee wurden als begrenzt charakterisiert, obwohl er zu einer deutlichen Verbesserung der Lebensbedingungen geführt hat. Mit den Änderungen der hydrographischen Verhältnisse der Ostsee nach dem Salzwassereinbruch befaßten sich auch DAHLIN et al. (1993). Die Wasser- und Salztransporte bei diesem Einbruch wurden von HAKANSSON et al. (1993) untersucht. JAKOBSEN (1995) berechnete ebenfalls die Menge der eingedrungenen Wassermassen auf der Basis von Strömungsmessungen und kam auf einen Betrag von 288 km^3 (davon 154 km^3 salzreiches Wasser). Beide stellten fest, daß ungewöhnlich viel salzreiches Wasser durch den Sund in die Ostsee transportiert wurde. Das Verhältnis des Wassertransports durch den Großen Belt zum Wassertransport durch den Sund gab JAKOBSEN mit 7:6 an. Insgesamt charakterisierte er den Einbruch als stark und zu den stärksten 20 Prozent gehörend.

Die Auswirkungen des Salzwassereinbruchs im Januar 1993 sowie weiterer schwacher Einstrome im Dezember 1993 und März 1994 wurden von MATTHÄUS et al. (1994) dargelegt. Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der Ostsee unter besonderer Berücksichtigung des Salzwassereinbruchs im Januar 1993 beschrieben NEHRING et al. (1994).

Einen Vergleich von Messungen mit den Werten des operationellen Nord-Ostsee-Modells des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg (BSH), das zur Vorhersage von Wasserständen und Strömungen entwickelt wurde, nahmen KLEINE (1993) und HUBER et al. (1994) vor. Die Autoren stellten fest, daß das Modell den Salzwassereinbruch im Januar 1993 gut wiedergibt, obwohl noch Verbesserungen bei der Modellierung von Temperatur und Salzgehalt notwendig sind. Daher kamen sie zu dem Schluß, daß das Modell ein nützliches Hilfsmittel bei der Untersuchung der atmosphärischen Ursachen von Salzwassereinbrüchen ist.

Mit der Modellierung von Salzwassereinbrüchen befaßte sich auch LEHMANN (1993, 1994a, b). Hierzu verwendete er ein dreidimensionales, wirbelauflösendes baroklines Modell der Ostsee. LEHMANN (1993) führte einige Modellexperimente aus und überprüfte sie an Hand des großen Salzwassereinbruchs im November/Dezember 1951. Aus den Ergebnissen zog er den Schluß, daß außer einem niedrigen Ostseewasserstand eine starke Schichtung in der Beltsee in der Vorperiode eines Salzwassereinbruchs von großer Bedeutung ist. LEHMANN (1994a, b) verglich Modellergebnisse des Salzgehaltes der Ostsee für den Salzwassereinbruch vom Januar 1993 und die Zeit danach mit gemessenen Werten. Aus der guten Übereinstimmung schloß er, daß die für einen Salzwassereinbruch relevanten Prozesse in der Modell-dynamik enthalten sind.

Einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu Salzwassereinbrüchen unter besonderer Berücksichtigung des Ereignisses im Januar 1993 gab MATTHÄUS (1993a, b, c).

2.3.11 Zusammenfassung

Aus der Übersicht geht hervor, daß einige Voraussetzungen für das Eintreten eines Salzwassereinbruchs in der Literatur einheitlich beschrieben, andere hingegen kontrovers diskutiert werden. Übereinstimmungen finden sich dabei in folgenden Punkten:

1. Ein niedriger Wasserstand der Ostsee in den Wochen vor einem Salzwassereinbruch schafft günstige Vorbedingungen. Dieser wird durch eine Verstärkung der nach Westen gerichteten Komponente der Zirkulation über der Ostsee hervorgerufen (u. a. WYRTKI 1954a; BÖRNGEN 1978b, 1983).
2. Ein mehrtägiges bzw. mehrwöchiges Andauern starker Westwinde ist notwendig, um letztendlich einen Salzwassereinbruch zu bewirken (u. a. WYRTKI 1954a).
3. Eine hinreichende Abnahme des Salzgehaltes in den Bodenschichten der Ostseebecken ist erforderlich, damit eine grundlegende Erneuerung des Tiefenwassers erfolgen kann (u. a. FRANCKE und HUPFER 1980). Diese Voraussetzung wird aber in der Regel nicht betrachtet, da sie für das Zustandekommen eines Salzwassereinbruchs (Einstrom salzreicher Wassermassen über die ozeanographischen Grenzen der Ostsee) keine Bedeutung besitzt und sie bereits die Auswirkungen auf das Tiefenwasser einschließt.

In folgenden Punkten gibt es unterschiedliche Aussagen:

1. Das Auftreten erhöhter Salzgehalte im Tiefenwasser des Kattegats wird von einigen Autoren als notwendige Voraussetzung für das Zustandekommen eines Salzwassereintruchs betrachtet (u. a. DICKSON 1971, 1972, 1973; BÖRNGEN 1978b, 1983). Andere Untersuchungen hingegen belegen, daß nur vor einigen Salzwassereintrüchen erhöhte Salzgehaltswerte auftreten (u. a. MATTHÄUS und FRANCK 1989). Damit kann dies keine *notwendige* Bedingung für einen Salzwassereintruch sein. Hieraus wiederum folgt, daß der von DICKSON beschriebene Anregungsmechanismus von Salzwassereintrüchen, der von einem erhöhten Transport salzreicher Wassermassen in die europäischen Schelfmeere als Voraussetzung für das Auftreten solcher Ereignisse ausgeht, in der von ihm beschriebenen Form nicht bzw. nur teilweise zutreffen kann.
2. Zur Periodizität von Salzwassereintrüchen finden sich unterschiedliche Ergebnisse. Während DICKSON (1972, 1973) von einer 5jährigen Periode bei den Salzgehaltsschwankungen im Tiefenwasser des Kattegats ausgeht, fand BÖRNGEN (1978b, 1983) eine 3jährige Periode. Spätere Untersuchungen ergaben (BÖRNGEN et al. 1990), daß diese Periode starken Schwankungen unterliegt. Betrachtet man die Zeitreihe der Salzwassereintrüche nach FRANCK et al. (1987), so liegt die Vermutung nahe, daß das Auftreten von Salzwassereintrüchen keine klaren Periodizitäten aufweist.

In den Kap. 4 und 5 dieser Arbeit werden u. a. die Ergebnisse dargestellt, die im Zusammenhang mit den einheitlich beschriebenen Punkten stehen, in Kap. 6 werden Ergebnisse zu den kontrovers diskutierten Fragestellungen vorgelegt.

2.4 Salzwassereintrüche - Definition nach FRANCK und MATTHÄUS

Zur Durchführung statistischer Analysen von Salzwassereintrüchen wurde von FRANCK et al. (1987) der Begriff Salzwassereintruch quantitativ definiert. Da ihre Definition, die im wesentlichen auf WOLF (1972) zurückgeht, die Grundlage der folgenden Untersuchungen bildet, soll hier näher auf sie eingegangen werden. Infolge der besonderen Rolle der Darßer Schwelle beim Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee basiert die Definition auf den täglichen Salzgehaltsregistrierungen des Feuerschiffes Gedser Rev auf der Darßer Schwelle. Bei den vorhandenen Meßdaten des Zeitraums 1897 - 1976 traten nur Unterbrechungen während der Weltkriege und in Eiswintern auf. Da für einen Salzwassereintruch eine Auflösung der Schichtung für mehrere Tage sowie hohe Salzgehalte am Boden notwendig sind, wurde ein Salzwassereintruch von den Autoren wie folgt definiert (siehe Abb. 2.3):

1. Der Schichtungskoeffizient $G = 1 - \frac{S_o}{S_b}$ (S_o = Oberflächensalzgehalt) am Feuerschiff Gedser Rev muß $\leq 0,2$ an mindestens 5 aufeinanderfolgenden Tagen sein.
2. Der Bodensalzgehalt S_b muß ≥ 17 PSU sein.

Zusätzlich verwendeten die Autoren noch drei ergänzende Kriterien, durch welche die Definition leicht modifiziert wird. Zur Charakterisierung der Stärke der Einbrüche wurde empirisch ein Intensitätsindex Q eingeführt:

$$Q = 50 \left(\frac{k-5}{25} + \frac{S-17}{7} \right) \quad \text{mit} \quad S = \frac{S_0 + S_b}{2}$$

Hierbei bedeuten

- k Andauer des Salzwassereintruchs in Tagen,
 S mittlerer Salzgehalt an der Darßer Schwelle in PSU.

Ein Einbruch, der genau 5 Tage dauert und durch einen mittleren Salzgehalt von 17 PSU gekennzeichnet ist, hat die Stärke 0. Ein Index der Stärke 100 charakterisiert einen extrem starken Einbruch mit einer Andauer von 30 Tagen und einem mittleren Salzgehalt von 24 PSU an der Darßer Schwelle, was in etwa dem stärksten überhaupt möglichen Salzwassereintruch entspricht. Für den Zeitraum 1897 bis 1976 wurden insgesamt 90 Salzwassereintrüche identifiziert und nach der Stärke wie folgt unterteilt (in Klammern: der für viele Betrachtungen in Kap. 4 meist maßgebliche Zeitraum von 1899 bis 1976 mit 87 Ereignissen):

$Q \leq 15$	schwacher Salzwassereintruch	48 (48) Ereignisse
$15 < Q \leq 30$	mittlerer Salzwassereintruch	27 (26) Ereignisse
$30 < Q \leq 45$	starker Salzwassereintruch	9 (7) Ereignisse
$Q > 45$	sehr starker Salzwassereintruch	6 (6) Ereignisse

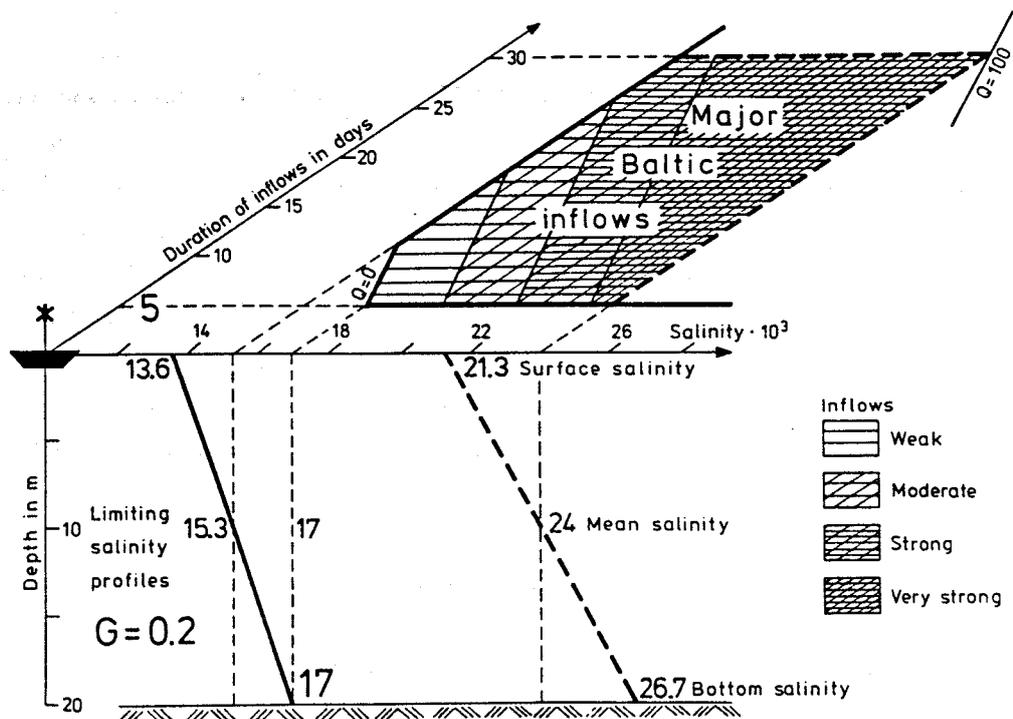


Abb. 2.3: Definition der Salzwassereintrüche auf der Basis der spezifischen Salzschichtungsverhältnisse am Feuerschiff Gedser Rev (nach MATTHÄUS und FRANCK 1988)

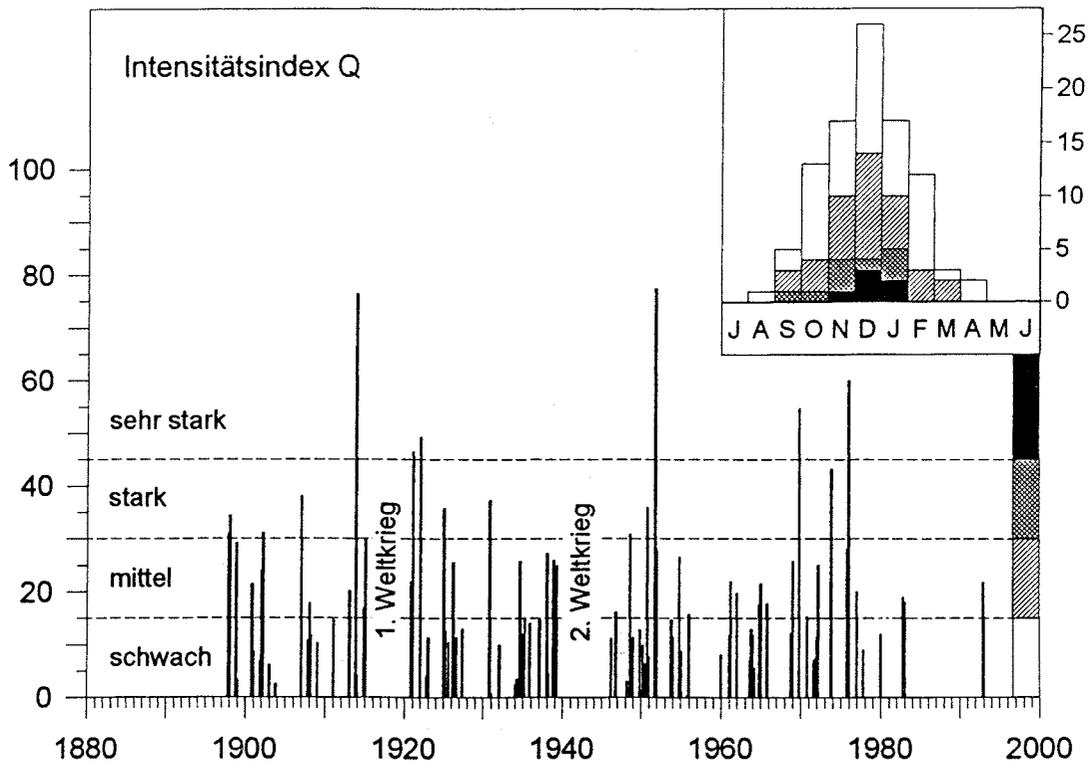


Abb. 2.4: Salzwassereinträge in die Ostsee sowie ihre Häufigkeitsverteilung zwischen 1897 und 1994 in Abhängigkeit von der Intensität (nach MATTHÄUS und FISCHER 1995)

Den zeitlichen Verlauf der Salzwassereinträge zeigt Abb. 2.4. Die Minimaldauer beträgt (gemäß der Definition) 5 Tage, der längste Einbruch dauerte 29 Tage (18. November 1913 bis 16. Dezember 1913). Die mittlere Andauer liegt bei 10 Tagen, am häufigsten sind 7 bis 8 Tage. Der stärkste Einbruch mit einem Index von 79,1 fand vom 25. November bis 19. Dezember 1951 statt. Mit dem Einzug der Feuerschiffe und der Einstellung der Messungen Ende März 1976 bricht die langjährige Meßreihe ab. Für die Jahre danach konnten bis Ende Januar 1983 fünf weitere Einträge identifiziert werden. Darauf folgt die längste Periode ohne Salzwassereinträge, die erst im Januar 1993 durch einen einzelnen Einbruch beendet wurde. Die bis dahin längsten Perioden ohne Einträge erreichten eine Andauer von weniger als 4 Jahren. Im allgemeinen treten Salzwassereinträge in Gruppen auf, wobei unter einer Gruppe alle aufeinanderfolgenden Ereignisse mit zeitlichen Abständen unter einem Jahr verstanden werden. Die bei einem Salzwassereintrage in die Ostsee einströmende Menge salzreichen Wassers beträgt bei sehr intensiven Ereignissen mehr als 100 km^3 , bei Einträgen geringerer Intensität sind es weniger als 100 km^3 . Im Mittel liegt die Wassermenge bei etwa 70 km^3 . Salzwassereinträge treten zumeist von November bis Januar auf, die maximale Häufigkeit wird im Dezember erreicht (Abb. 2.4).

Ein Salzwassereintrage besteht aus zwei grundlegenden Perioden: dem Einstrom von Wasser mit einem geringen Salzgehalt (*Vorlaufphase*) und dem Einstrom von Wasser mit einem hohen Salzgehalt (eigentlicher Salzwassereintrage oder auch *Hauptestromperiode*) (Abb. 2.5). Die Vorlaufphase beginnt mit einem charakteristischen Wasserstandsminimum der Ostsee, das einem Salzwassereintrage vorausgeht, und endet, wenn die Kriterien für einen Salzwassereintrage an der Darßer Schwelle erfüllt werden. Die Länge der Vorlaufphase variiert zwischen

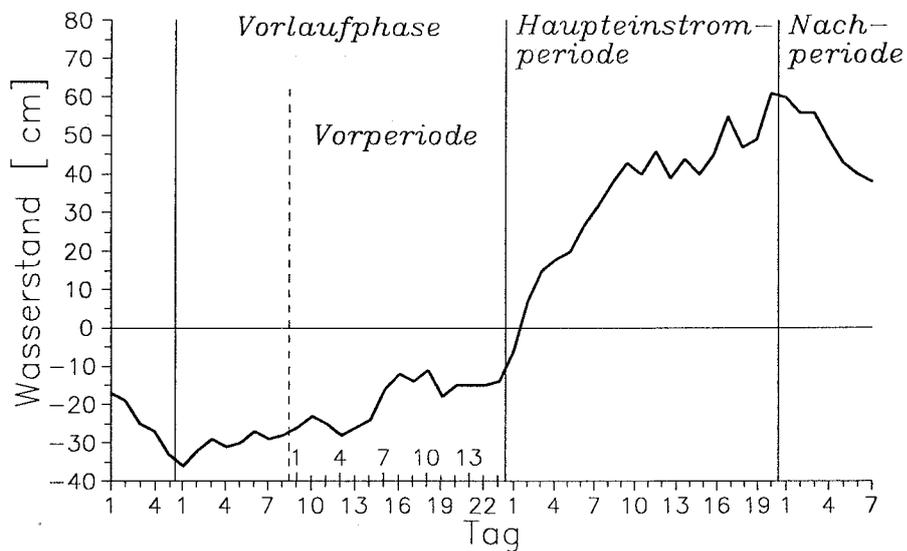


Abb. 2.5: Signifikante Perioden bei Salzwassereintrüben am Beispiel der Schwankungen des Pegels Landsort (nach MATTHÄUS 1995)

4 und 58 Tagen, gewöhnlich dauert sie 5 bis 25 Tage, im Mittel sind es 22. Es ist naheliegend, daß die letzten 15 Tage dieser Periode (bzw. die letzten 15 Tage vor dem eigentlichen Salzwassereintruch) besonders bedeutsam sind. Daher wird dieser Zeitabschnitt als *Vorperiode* bezeichnet. Die Haupteinstromperiode ist durch den Einstrom großer Mengen salzreichen Wassers und einen starken Anstieg des Wasserstandes der Ostsee gekennzeichnet. Sie dauert mindestens 5 Tage (gemäß der Definition eines Salzwassereintruchs). Darauf folgt die *Nachperiode*, die mit einem Rückgang der Salzgehaltswerte an der Darßer Schwelle beginnt. Sie ist durch starken Ausstrom gekennzeichnet, der zu einem Absinken des Ostseewasserstandes führt. Die Nachperiode gehört nicht mehr zum Salzwassereintruchsprozeß, da ein Salzwassereintruch durch sie beendet wird (FRANCK et al. 1987; MATTHÄUS und FRANCK 1988, 1990, 1992; FRANCK und MATTHÄUS 1992b; MATTHÄUS 1992, 1993b, 1995).

3. Datenbasis

3.1 Übersicht über die verwendeten Daten

Einen Überblick über alle in den Kap. 4 und 5 verwendeten Datensätze gibt Tab. 3.1. Einige speziell für Kap. 6 (Fernwirkungen) berechnete Zeitreihen werden dort erläutert. Da die Zeitreihe der Salzwassereinbrüche seit 1897 vorliegt, der Datensatz des täglichen Bodendruckes (der die Basis für einen Großteil der Untersuchungen bildet) aber nur von 1899 bis 1993, wurde die Verwendung aller Datensätze auf den Zeitraum 1899 bis 1993 beschränkt (mit Ausnahme der Großwetterlagen). Teilweise weiter zurückgehende Meßreihen wurden daher nicht berücksichtigt. Als Originaldaten werden in der Tabelle solche Daten bezeichnet, die in der Form, wie sie vorlagen, verwendet wurden. Abgeleitete Daten sind entweder aus den Originaldaten oder anderen Datensätzen berechnete Werte.

	Einheit	von	bis		fehlende Werte
METEOROLOGISCHE DATEN					
Originaldaten					
Bodendruck, 5° x 5°	hPa	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	(1) 01. 12. 1944 - 31. 12. 1945 und einzelne Tage (für 1945 sind Monatswerte vorhanden) mit (1) 1,3 %, ohne 0,2 %
Höhe der 500-hPa-Fläche	gpm	01. 01. 1946	31. 12. 1993	T	einzelne Tage (1,9 %)
Großwetterlagen nach HESS-BREZ. (nach SCHMIDT 1990)	-	01. 01. 1897	31. 12. 1976	T	keine
Starktiefs nach SCHINKE (1993)	-	01. 01. 1899	31. 12. 1993	T	keine
Wind Arkona	m/s	01. 01. 1951	31. 12. 1993	T	einzelne Tage (0,9 %)
Abgeleitete Daten					
Bodendruckanomalien, 5° x 5°	hPa	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	wie Bodendruck
Bodendruck über der Ostsee	hPa	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	wie Bodendruck
Bodendruck über dem Einzugsgebiet der Ostsee	hPa	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	wie Bodendruck
geostrophischer Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich	m/s	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	wie Bodendruck
geostrophischer Wind über der Ostsee	m/s	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	wie Bodendruck
Meteorologischer Salzwassereinbruchs-Index MSI (absolut und relativ)	-	01. 01. 1899	31. 10. 1993	T	wie Bodendruck
Niederschlagsmittel von 24 Stationen im Einzugsgebiet der Ostsee	mm	Jan. 1899	Dez. 1988 (bis auf 3 Stationen)	M	keine
Niederschlagsmittel von 13 Stationen im Einzugsgebiet der Ostsee (Süd)	mm	Jan. 1899	Dez. 1988 (bis auf eine Station)	M	keine
Niederschlagsmittel von 11 Stationen im Einzugsgebiet der Ostsee (Nord)	mm	Jan. 1899	Dez. 1988 (bis auf 2 Stationen)	M	keine
Temperatur im Einzugsgebiet der Ostsee	°C	Jan. 1899	Dez. 1987	M	keine

Tab. 3.1: (siehe nächste Seite)

	Ein- heit	von	bis		fehlende Werte
OZEANOGRAPHISCHE DATEN					
Originaldaten					
Salzwassereinträge nach FRANCK et al. (1987), MATTHÄUS (1995)	-	01. 01. 1897	31. 03. 1976 31. 12. 1993	T	wie Salzgehalt Gedser Rev
Wasserstand Landsort	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1993	TM	einzelne Tage (0,4 %)
Wasserstand Hornbaek	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1990	TM	einzelne Tage (4,0 %)
Wasserstand Gedser	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1990	TM	einzelne Tage (4,5 %)
Flußwasserzufuhr	km ³	Jan. 1921	Dez. 1990	M	keine
Salzgehalt Gedser Rev					kriegsbedingte Ausfälle: (1) 01. 11. 1915 - 18. 03. 1920 (2) 01. 10. 1939 - 12. 09. 1945 und einzelne Tage
0 m	PSU	01. 01. 1899	31. 03. 1976	T	mit (1) und (2) 16,2 %, ohne 2,8 %
5 m	PSU	01. 01. 1899	31. 03. 1976	T	mit (1) und (2) 16,4 %, ohne 3,0 %
10 m	PSU	01. 01. 1899	31. 03. 1976	T	mit (1) und (2) 16,4 %, ohne 3,0 %
15 m	PSU	19. 03. 1920	31. 03. 1976	T	mit (2) 14,6 %, ohne 3,9 %
20 m	PSU	19. 03. 1920	31. 03. 1976	T	mit (2) 15,5 %, ohne 4,9 %
max. Vereisung der Ostsee (nach SEINÄ und PALOSUO 1993)	km ²	1898/99	1991/92	J	keine
Abgeleitete Daten					
Wasserstands Differenz Hornbaek - Gedser	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1990	TM	einzelne Tage (7,8 %)
Wasserstand Landsort (Anomalien)	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1993	TM	einzelne Tage (0,4 %)
Wasserstand Hornbaek (Anomalien)	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1990	TM	einzelne Tage (4,0 %)
Wasserstand Gedser (Anomalien)	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1990	TM	einzelne Tage (4,5 %)
Wasserstands Differenz Hornbaek (Anomalien) - Gedser (Anomalien)	cm	01. 01. 1899	31. 12. 1990	TM	einzelne Tage (7,8 %)

Tab. 3.1: Übersicht über die verwendeten Datensätze

TM = Tagesmittel, T = 1 Wert pro Tag, M = Monatsmittel, J = 1 Wert pro Jahr

3.2 Meteorologische Daten

Bodendruck

Für den gesamten Zeitraum 1899 bis 1993 wurde ein 5°x5°-Gitterpunktdatensatz des täglichen Bodendruckes vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, USA, genutzt. Basis für alle Untersuchungen war ein Ausschnitt mit 300 Gitterpunkten von 60° W bis 60° E und von 30° N bis 85° N, der Europa und große Teile des Nordatlantiks einschließt (siehe hierzu auch Abb. 6.3). Die Gitterpunkte stellen das tägliche Bodendruckfeld um 13 Uhr UTC (bis Juni 1939, Genauigkeit ca. 1 hPa) bzw. 12 Uhr UTC (Juli 1939 bis November 1944, Genauigkeit ca. 1 hPa; ab Januar 1946, Genauigkeit 0,1 hPa) dar. Von einzelnen fehlenden Tagen abgesehen, waren nur von Dezember 1944 bis Dezember 1945 keine Tageswerte verfügbar, für 1945 lagen aber Monatsmittel vor. Im Zeitraum von Januar 1899 bis Juni 1939 fehlten die Werte auf dem Breitenkreis 75° N und von Januar 1899 bis November 1944 auf

dem Breitenkreis 85° N vollständig. Auch in anderen Gebieten gab es bis 1944 zeitweise Lücken. Diese Werte wurden interpoliert. Komplette fehlende Felder (alle 300 Gitterpunkte) konnten nicht ergänzt werden, so daß letztendlich für einen Tag entweder alle Werte vorhanden waren oder fehlten. Ab Mitte der 50er Jahre standen in der Regel 2 Gitterfelder pro Tag zur Verfügung, wobei aber die zusätzlichen 0-Uhr-Werte nur für die Animationen verwendet wurden (siehe Anhang).

Da für die Erstellung des Druckdatensatzes vom NCAR die verschiedensten Quellen verwendet wurden, sind gewisse Inhomogenitäten nicht auszuschließen. Hierzu wurden Analysen u. a. von TRENBERTH und PAOLINO (1980) sowie WILLIAMS und VAN LOON (1976) durchgeführt. Sie lokalisierten bestimmte Gebiete, in denen starke Diskontinuitäten im Datensatz vorhanden sind. Diese liegen aber sämtlich außerhalb des betrachteten Ausschnittes. Die Werte vor 1946 dürften dennoch über dem Nordatlantik relativ ungenau sein. Vergleiche haben aber gezeigt, daß die Genauigkeit dieser Werte ausreichend ist, um mit Hilfe des Datensatzes die statistischen Aussagen zu treffen, die in den folgenden Kapiteln gemacht werden. Weitere Angaben zu dem Datensatz sind bei JENNE (1975) und auf dem FTP-Server des NCAR zu finden.

500-hPa-Daten

Die Werte der 500-hPa-Fläche von 1946 bis 1993 stammen ebenfalls vom NCAR, es wurde derselbe Ausschnitt verwendet wie für den Bodendruck. Die Gitterfelder haben dieselbe räumliche Auflösung, und sie liegen ebenfalls für jeden Tag 12 Uhr UTC vor.

Großwetterlagen

HESS und BREZOWSKY (1952, 1969, 1977; GERSTENGARBE und WERNER 1993) teilten alle Zirkulationsformen in Mitteleuropa in Großwetterlagen ein. Anschließend ordneten die Autoren für den Zeitraum ab 1881 jedem Tag eine Großwetterlage zu. Eine Beschreibung aller Großwetterlagen sowie Häufigkeitsstatistiken über ihr Auftreten in den untersuchten Zeiträumen finden sich zum Teil in jenen Arbeiten, in dieser Untersuchung wurde nur der Zeitraum 1897 bis 1976 verwendet.

Starktiefs

Als Starktief werden alle Tiefs mit einem Kerndruck ≤ 990 hPa bezeichnet (SCHINKE 1992, 1993). Der Datensatz enthält von 1899 bis 1993 für jeden Tag die Positionen (auf 0,5° genau) und die Kerndrücke (auf 5 hPa genau) aller Starktiefs im Gebiet von 60° W bis 60° E und 30° N bis 90° N. Eine detaillierte Beschreibung des Datensatzes ist in Anhang 1 von SCHINKE (1992) zu finden.

Wind Arkona

Seit 1951 standen von Arkona (Abb. 3.1) Windregistrierungen zur Verfügung (täglich 0, 6, 12 und 18 Uhr UTC). Bis 1990 handelt es sich hierbei um Angaben der Windrichtung und -geschwindigkeit nach der Beaufort-Skala. Seit 1991 liegen Meßwerte vor. In dieser Arbeit wurden nur die 12-Uhr-Werte verwendet.

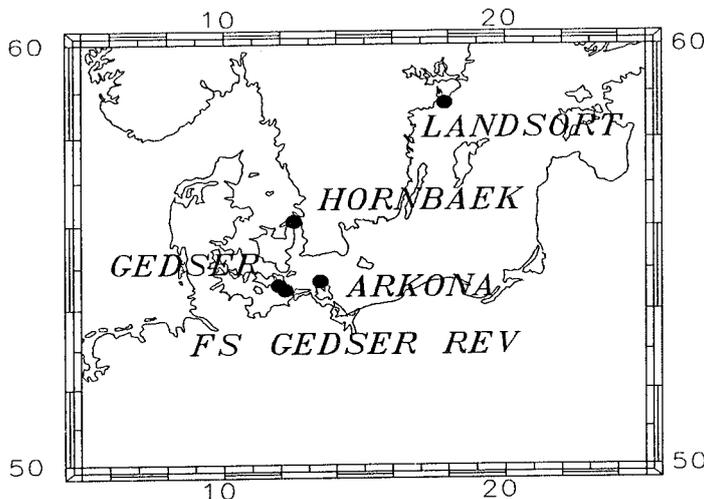


Abb. 3.1: Lage der Beobachtungsstationen

Bodendruckanomalien

Da in vielen Fällen nicht nur die Analyse des Bodendruckfeldes, sondern vor allem auch die Betrachtung von Anomalien notwendig ist, wurde ein Datensatz der Bodendruckanomalien gebildet. Dies diente gleichzeitig der Eliminierung des Jahresganges in den Druckdaten. Dazu wurde zunächst aus dem Datensatz des Bodendruckes für alle 366 Tage eines Jahres der mittlere Druck an jedem Gitterpunkt im Zeit-

raum 1899 bis 1992 bestimmt (im allgemeinen aus 93 Werten pro Gitterpunkt). Anschließend erfolgte die Berechnung der Differenz zwischen dem Druckfeld eines jeden Tages des Datensatzes und dem mittleren Druckfeld des entsprechenden Tages.

Bodendruck über der Ostsee bzw. über dem Einzugsgebiet der Ostsee

Aus dem Datensatz des täglichen Bodendruckes wurde der Druck $p(o)$ über der Ostsee (Mittel aus den 3 über der zentralen Ostsee gelegenen Gitterpunkten) sowie der Druck über ihrem Einzugsgebiet $p(e)$ (Mittel aus den 15 über der Ostsee und ihrem Einzugsgebiet gelegenen Gitterpunkten) berechnet (Abb. 3.3). Auf Grund ihrer Berechnungsweise haben die zwei Zeitreihen einen sehr ähnlichen Verlauf.

Geostrophischer Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich bzw. über der Ostsee

Der geostrophische Wind verläuft parallel zu den Isobaren und kann als erste Näherung des realen Windes betrachtet werden. Vom Betrag her ist er im Mittel etwas höher als der reale Wind, der je nach Beschaffenheit der Unterlage um bis zu 45° in Richtung des niedrigeren Druckes vom geostrophischen Wind abweicht. Die Berechnung des geostrophischen Windes erfolgte nach der Formel

$$\mathbf{v}_g = \frac{1}{\rho f} \mathbf{k} \times \nabla_h p \quad (\mathbf{k} \text{ Einheitsvektor, } \nabla_h p \text{ horizontaler Druckgradient}).$$

Hieraus ergibt sich für die Komponenten u und v mit $\mathbf{k} = (0, 0, 1)$ und $\nabla_h p = \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, 0 \right)$

$$u = -\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad v = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Dabei ist

$$f = 2\omega \sin(\varphi).$$

Es bedeuten

ρ	Dichte der Luft ($1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
f	Coriolis-Parameter,
ω	Winkelgeschwindigkeit der Erde ($7,29212 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),
φ	geographische Breite in Grad,
$\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}$	Druckgradienten in Richtung der x - bzw. y -Koordinate.

Für die Berechnung des täglichen geostrophischen Windes wurden je 3 Gitterpunkte aus dem Datensatz des Bodendruckes gewählt (Abb. 3.2). Die Druckdifferenz zwischen den Punkten 2 und 1 ist ∂p in Richtung der x -Koordinate, die Druckdifferenz zwischen den Punkten 3 und 1 ist ∂p in Richtung der y -Koordinate. Auf Grund der geringeren Genauigkeit der Druckwerte vor 1946 ergaben sich mit diesem Verfahren Verzerrungen in den Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen und -geschwindigkeiten. Deshalb wurden je 4 Hilfspunkte (2 für die u - und 2 für die v -Komponente) eingeführt. Unter Einbeziehung dieser Hilfspunkte erfolgte die gewichtete Berechnung der Druckdifferenz ∂p in Richtung der x -Koordinate letztendlich wie folgt:

$$\partial p = \frac{1}{12} \left((p(1) - p(1a)) + 10(p(2) - p(1)) + (p(2a) - p(2)) \right).$$

Die 3 anderen Druckdifferenzen wurden analog berechnet. Mit dieser leichten Modifikation konnten die Verzerrungen in den Häufigkeitsverteilungen der ursprünglichen Druckdifferenzen beseitigt werden. Entsprechend der Definition bedeuten positive Werte der u -Komponente Wind aus westlichen Richtungen und positive Werte der v -Komponente Wind aus südlichen Richtungen.

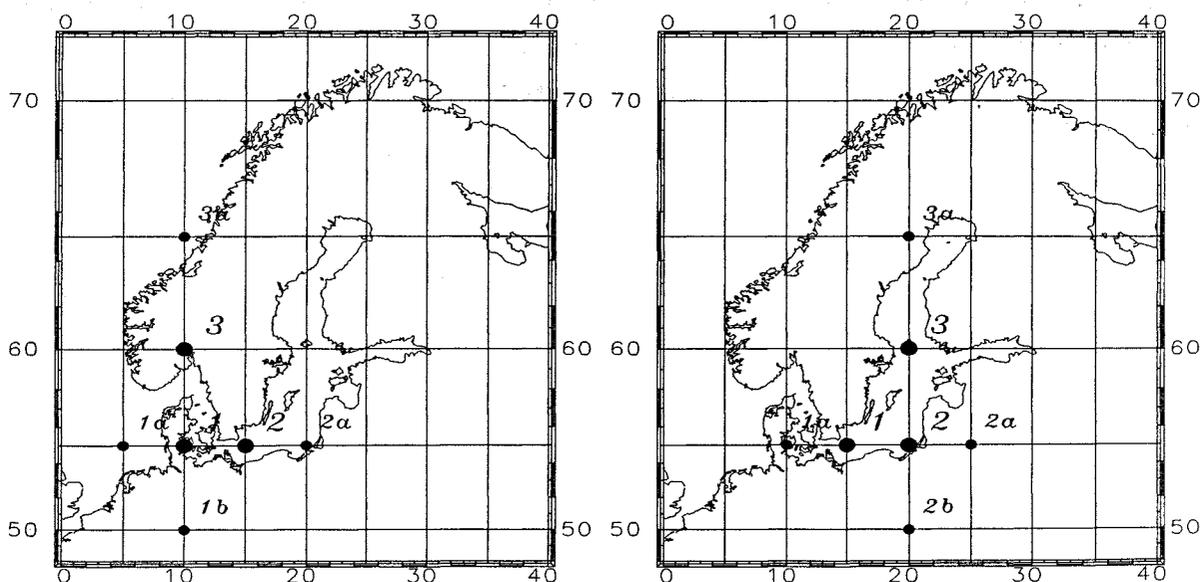


Abb. 3.2: Lage der Gitterpunkte, die zur Berechnung des geostrophischen Windes verwendet wurden

Meteorologischer Salzwassereinbruchs-Index (MSI)

Der meteorologische Salzwassereinbruchs-Index MSI basiert auf dem Datensatz des Bodendruckes und der mittleren Druckverteilung bzw. den mittleren Druckanomalien am 1. Tag der Haupteinstromperiode eines Salzwassereinbruchs (siehe Abb. 4.2 und 4.4). Der absolute MSI ist für jeden Tag der Kovarianzkoeffizient zwischen den 300 Druckwerten des entsprechenden Tages und den 300 Druckwerten der mittleren Druckverteilung am 1. Tag der Haupteinstromperiode. Analog dazu ist der relative MSI der Kovarianzkoeffizient zwischen den Druckanomalien eines jeden Tages und den Druckanomalien am 1. Tag der Haupteinstromperiode.

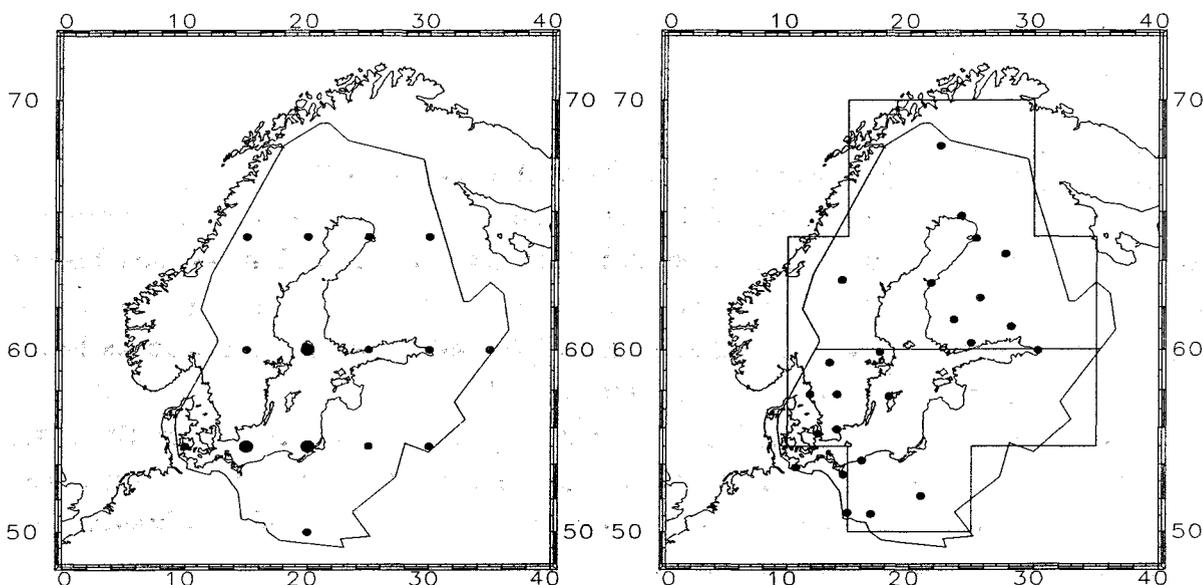


Abb. 3.3: Lage der Gitterpunkte im Einzugsgebiet der Ostsee, die zur Berechnung des Bodendruckes über der Ostsee bzw. über dem Einzugsgebiet der Ostsee verwendet wurden (linke Abb.)

Abb. 3.4: Lage der Niederschlagsstationen im Einzugsgebiet der Ostsee, die zur Berechnung des Niederschlags verwendet wurden; die Linie bei 60° N stellt die Grenze zwischen südlichem und nördlichem Einzugsgebiet dar; die kastenförmige Linie umgibt das Gebiet, das zur Berechnung der Temperatur im Einzugsgebiet der Ostsee verwendet wurde (rechte Abb.)

Niederschlag im Einzugsgebiet der Ostsee

Zur Berechnung des Niederschlags im Einzugsgebiet der Ostsee standen Monatsmittel von 24 Stationen (Abb. 3.4) zur Verfügung (Daten nach SCHÖNWIESE, siehe hierzu SCHÖNWIESE et al. 1993). Aus den Monatsmitteln dieser 24 Stationen wurde für jeden Monat der mittlere Niederschlag im Ostsee-Einzugsgebiet berechnet. Auch wenn in Abb. 3.4 zwei größere Gebiete mit geringerer Stationsdichte auffallen, erschien für eine Abschätzung der mittleren monatlichen Niederschlagsmenge eine unterschiedliche Wichtung der einzelnen Stationen nicht zweckmäßig. Hierfür wäre auch eine genauere Kenntnis lokaler* Effekte erforderlich. Da es aber innerhalb des Ostsee-Einzugsgebietes größere Unterschiede bezüglich der Niederschlagsmenge gibt (siehe hierzu SCHÖNWIESE et al. 1993), wurde eine Unterteilung in südliches und nördliches Ostsee-Einzugsgebiet vorgenommen. Aus den 13 Stationen südlich des

* Mit "lokal" werden nachfolgend relativ kleine Gebiete bezeichnet, dabei kann es sich sowohl um die Umgebung eines Ortes als auch um ein etwas größeres Gebiet - wie z. B. das Einzugsgebiet der Ostsee - handeln. Welches Gebiet im konkreten Fall gemeint ist, geht aus dem Zusammenhang hervor. Mit "regional" wird der nordatlantisch-europäische Raum bezeichnet.

60. Breitenkreises wurde ein Gebietsmittel für das südliche Gebiet berechnet, aus den anderen 11 Stationen eines für das nördliche Gebiet. Ein Vergleich zeigt, daß im südlichen Gebiet im allgemeinen höhere Niederschläge auftreten.

Temperatur im Einzugsgebiet der Ostsee

Aus Monatsmitteln der bodennahen Lufttemperatur in 5°x5°-Gitterfeldern (CHADWYCK-HEALEY LTD. 1992) wurde zunächst ein Ausschnitt selektiert, der ungefähr dem Einzugsgebiet der Ostsee entspricht (Abb. 3.4). Im Anschluß daran wurde für jeden Monat das Temperaturmittel aus diesen 15 Gitterfeldern gebildet.

3.3 Ozeanographische Daten

Salzwassereinbrüche nach FRANCK et al. (1987) bzw. MATTHÄUS (1995)

Die Erstellung dieses Datensatzes ist bereits in den Abschn. 2.3.9 und 2.4 ausführlich beschrieben worden. Er enthält die Daten aller Salzwassereinbrüche: Anfangs- und Endtag, Nummer des Einbruchs, Stärkeindex (Q) und jeweilige Andauer des Einbruchs (in Tagen). Da die Bestimmung der Salzwassereinbrüche ab April 1976 - bedingt durch den Einzug der Feuerschiffe - nicht mehr exakt erfolgen konnte, wurden die Salzwassereinbrüche ab April 1976 für die statistischen Untersuchungen auf der Basis von Tageswerten nicht verwendet. Die Daten dieser Ereignisse wurden aus Salzgehaltsmessungen in der westlichen und zentralen Ostsee sowie Wasserstandsbeobachtungen so genau wie möglich rekonstruiert (FRANCK und MATTHÄUS 1992a).

Wasserstand Landsort

Dieser Datensatz besteht aus den Tagesmitteln des Wasserstandes am Pegel Landsort (Abb. 3.1) und wurde vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) zur Verfügung gestellt. Die Werte können als repräsentativ für den Wasserstand (Füllungsgrad) der Ostsee angesehen werden (FRANCK und MATTHÄUS 1992b). Im Jahr 1969 erfolgte eine Pegelumstellung, welche eine Umrechnung der Werte bis 1968 notwendig machte. Weiterhin hat diese Zeitreihe - bedingt durch Landhebungsprozesse im nördlichen Ostseegebiet (ROSSITER 1967; STRIGGOW und TILL 1987) - einen sehr starken abnehmenden Trend. Er beträgt etwa -30,8 cm/100 Jahre (Zeitraum 1899 bis 1993), ist von Oktober bis Januar schwächer und in den anderen Monaten stärker ausgeprägt. Dieser Trend wurde von den Originaldaten abgezogen. Im folgenden wird nur noch mit den trendfreien Werten gearbeitet, die als Anomalien des mittleren Wasserstandes der Ostsee interpretiert werden können.

Wasserstände von Hornbaek und Gedser sowie Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser

Von den Pegeln Hornbaek und Gedser (Abb. 3.1) standen die Tagesmittel zur Verfügung. Daraus wurde die Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser berechnet. Da auf Grund von Landhebungs- und Senkungsprozessen der Pegel von Gedser einen zunehmenden Trend aufweist (+8,9 cm/100 Jahre im Zeitraum 1899 bis 1990, am stärksten von November bis

Januar), wurde hier analog wie bei Landsort der Trend abgezogen. Der Pegel Hornbaek hingegen ist auf Grund seiner Lage an der Grenze zweier Platten (STRIGGOW und TILL 1987) nahezu trendfrei (-0,1 cm/100 Jahre). Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit erfolgte aber auch hier ein Abzug des Trends. Mit der Wasserstands Differenz wurde analog verfahren, alle nachfolgenden Untersuchungen erfolgen nur mit den trendfreien Werten.

Flußwasserzufuhr zur Ostsee

Die Werte der Flußwasserzufuhr setzen sich zusammen aus den Daten von MIKULSKI (1982) für den Zeitraum 1921 - 1975 und den Daten vom SMHI für den Zeitraum 1950 - 1990 (BERGSTRÖM und CARLSSON 1994). Der verwendete Datensatz enthält für jeden Monat die Gesamtflußwasserzufuhr zur Ostsee ohne Beltsee und Kattegat. Für den Zeitraum 1950 - 1975, der in beiden Datensätzen vorkommt, wurden die Werte von BERGSTRÖM und CARLSSON verwendet.

Salzgehalt Gedser Rev

Der Datensatz besteht aus den täglichen Salzgehaltsmessungen am Feuerschiff Gedser Rev (Abb. 3.1) an der Oberfläche, in 5 m (bis 1902 8 m) und 10 m (bis 1915 11 m) sowie ab 1920 zusätzlich in 15 m und 20 m Tiefe. Er weist zwei größere kriegsbedingte Lücken auf und endet 1976 mit dem Einzug der Feuerschiffe.

Maximale Vereisung der Ostsee

Die Daten über die maximale Vereisung der Ostsee (pro Winter ein Wert) stammen von SEINÄ und PALOSUO (1993). Eine genauere Beschreibung erfolgt bei SEINÄ (1993).

4. Die Salzwassereinbrüche verursachende Wettersituation (notwendige Bedingung)

4.1 Verfahrensweise

Um den typischen Verlauf meteorologischer und ozeanographischer Größen bei Salzwassereinbrüchen zu untersuchen, wurden zunächst die 15tägige Vorperiode, die Haupteinstromperiode (5 bis maximal 29 Tage) sowie die ersten 5 Tage der Nachperiode betrachtet (Abb. 4.1). Da alle Salzwassereinbrüche mit ihren exakten Daten vorlagen, konnte für jeden Tag dieser drei charakteristischen Perioden das Mittel der entsprechenden Größe - soweit Tageswerte vorhanden waren - gebildet werden. Obwohl die Nachperiode nicht direkt zum Salzwassereinbruchsprozeß dazugehört, wird sie hier mit in die Betrachtungen einbezogen, um das Verhalten aller untersuchten Größen unmittelbar nach einem Salzwassereinbruch zu studieren (siehe hierzu auch Abschn. 2.4). Der zeitliche Verlauf der Mittel gibt somit das typische Verhalten einer bestimmten Größe bei einem Salzwassereinbruch wieder. Von besonderem Interesse bei der Haupteinstromperiode sind die ersten 5 Tage (entsprechend der

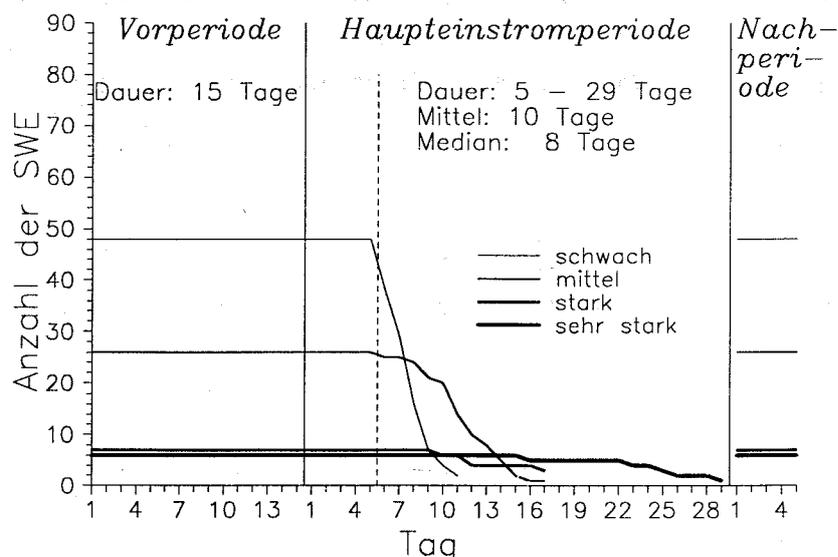


Abb. 4.1: Anzahl der betrachteten Salzwassereinbrüche im Zeitraum 1899 - 1976 in den drei Perioden (nach der Stärke unterteilt; Gesamtzahl: 87)

definierten Mindestdauer), da die Anzahl der Ereignisse mit zunehmender Dauer stark abnimmt. Werte nach dem 5. Tag sind deshalb nur bedingt aussagefähig und nur für lange andauernde (starke und sehr starke) Salzwassereinbrüche relevant. Für viele weitergehende Betrachtungen erwies es sich als günstig, eine längere Zeitspanne vor Beginn der Haupteinstromperiode in die Betrachtungen einzubeziehen. Für diese Untersuchungen wurden insgesamt 100 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode verwendet und als erweiterte Vorlaufphase bezeichnet.

Bei der Analyse des zeitlichen Verlaufs einer Größe bei Salzwassereinbrüchen stellt sich die Frage, ob die gefundenen Abweichungen bzw. Tendenzen im Zusammenhang mit Salzwassereinbrüchen stehen oder ob sie vielleicht nur zufällig bzw. durch den Jahresgang bedingt sind. Die übliche Methode zur Überprüfung dieses Sachverhaltes besteht in der Durchführung von

Signifikanztests. Hierbei taucht aber das Problem auf, daß die Mittel für die einzelnen Tage (z. B. den ersten Tag der Haupteinstromperiode) aus Werten zusammengesetzt sind, die aus unterschiedlichen Jahreszeiten stammen. Ein vernünftiger Signifikanztest kann aber nur zu Mitteln erfolgen, die einen vergleichbaren Jahresgang haben. Deshalb wurde zur Durchführung von Signifikanztests von allen betrachteten Größen der Jahresgang abgezogen und danach zusätzlich das mittlere Verhalten dieser Anomalien bei Salzwassereinbrüchen berechnet. Mit den Ergebnissen wurde dann ein t-Test mit der Fragestellung durchgeführt, ob die Anomalien signifikant von 0 verschieden sind (SCHÖNWIESE 1992). In den entsprechenden Abbildungen sind nicht die Anomalien, sondern die absoluten Werte dargestellt. Die Aussage der Signifikanztests hingegen besteht darin, ob das Verhalten der Größen von dem zu der Jahreszeit normalen Verhalten signifikant abweicht oder nicht.

Zum besseren Vergleich mit Werten, die unabhängig vom Auftreten von Salzwassereinbrüchen sind, wurde zusätzlich eine Art Plausibilitätsanalyse mit Hilfe zweier sogenannter "Zufallsreihen" von Salzwassereinbrüchen durchgeführt. Diese Zufallsreihen haben exakt denselben Jahresgang wie die Zeitreihe der Salzwassereinbrüche, haben aber mit dem Auftreten von realen Salzwassereinbrüchen nichts zu tun. Sie sind wie folgt gebildet worden: Von jedem Salzwassereinbruch wurden der Tag und der Monat in die neuen Reihen übernommen, aber das Jahr wurde durch ein anderes ersetzt. In der Zufallsreihe 1 wurde es durch das vorhergehende ersetzt, in der Zufallsreihe 2 wurde die Jahreszahl um 3 erhöht. Das Prinzip verdeutlicht Tab. 4.1. In den nachfolgenden Abbildungen werden des öfteren die Ergebnisse, die mit der Zeitreihe der realen Salzwassereinbrüche gewonnen wurden, gleichzeitig mit den Ergebnissen dargestellt, die mit den 2 Zufallsreihen gewonnen wurden. Dies gibt anschaulich das normale jahreszeitliche Verhalten der entsprechenden Größe - unabhängig vom Auftreten von Salzwassereinbrüchen - wieder.

Zeitreihe SWE	Status	Zufallsreihe 1	Zufallsreihe 2
...
20. 12. 1975	VP	20. 12. 1974	20. 12. 1978
21. 12. 1975	VP	21. 12. 1974	21. 12. 1978
22. 12. 1975	HEP	22. 12. 1974	22. 12. 1978
23. 12. 1975	HEP	23. 12. 1974	23. 12. 1978
...
13. 01. 1976	HEP	13. 01. 1975	13. 01. 1979
14. 01. 1976	HEP	14. 01. 1975	14. 01. 1979
15. 01. 1976	NP	15. 01. 1975	15. 01. 1979
16. 01. 1976	NP	16. 01. 1975	16. 01. 1979
...

Tab. 4.1: Prinzip der Bildung der Zufallsreihen am Beispiel des drittstärksten in diesem Jahrhundert beobachteten Salzwassereinbruchs vom 22. 12. 1975 bis 14. 01. 1976 (VP = Vorperiode, HEP = Haupteinstromperiode, NP = Nachperiode)

4.2 Großwetterlagen und Salzwassereinbrüche

Zur Auffindung typischer Großwetterlagen (GWL), welche zu Salzwassereinbrüchen führen können, wurde die Häufigkeit aller Großwetterlagen bei Salzwassereinbrüchen im Zeitraum

1897 bis 1976 bestimmt. Hierbei zeigt sich, daß die Häufigkeit der vier Großwetterlagen Westlage antizyklonal bzw. zyklonal (WA, WZ) und Nordwestlage antizyklonal bzw. zyklonal (NWA, NWZ) im Verlauf der Vorperiode eines Salzwassereintruchs zunimmt und daß diese während der ersten Tage der Haupteinstromperiode verstärkt auftreten (Tab. 4.2). Bei 71 der 90 Salzwassereintrüche war eine der vier Großwetterlagen am ersten Tag der Haupteinstromperiode zu beobachten. Da diese vier GWL - insbesondere WZ - im allgemeinen auch sehr oft auftreten (ohne zu Salzwassereintrüchen zu führen), wurden zusätzlich ihre relativen Häufigkeiten (Häufigkeit des Auftretens bei Salzwassereintrüchen im Verhältnis zur mittleren Häufigkeit in der Einstromsaison von August bis April) bestimmt. Dabei ergibt sich für die relativen Häufigkeiten folgendes Bild am ersten Tag der Haupteinstromperiode:

WA	3,9	WZ	2,3
NWA	3,4	NWZ	2,4

Hieraus wird ersichtlich, daß die entsprechenden Wetterlagen besonderen Anteil am Zustandekommen von Salzwassereintrüchen haben, auffallend ist die etwas höhere relative Häufigkeit der antizyklonalen GWL im Vergleich zu den zyklonalen GWL. Andere als die vier genannten Großwetterlagen weisen keine wesentlichen Variationen in der Häufigkeit ihres Auftretens bei Salzwassereintrüchen auf. In der Regel ist bei ihnen aber eine leichte Abnahme in der Häufigkeit während der Vorperiode zugunsten der vier genannten GWL zu beobachten.

GWL	Vorperiode															Haupteinstromper.					Nachperiode				
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
WA	4	9	9	9	11	8	7	7	7	9	10	14	14	13	19	20	16	17	13	10	1	4	6	7	8
WZ	12	12	13	14	16	18	16	18	22	24	28	25	31	34	33	31	26	27	24	17	11	12	12	14	13
NWA	6	6	5	4	2	3	4	3	5	4	5	8	9	8	9	11	11	11	10	9	2	3	3	3	3
NWZ	4	2	0	0	2	5	6	7	5	5	4	3	5	8	9	9	13	16	10	11	5	3	3	6	5
Σ	26	29	27	27	31	34	33	35	39	42	47	50	59	63	70	71	66	71	57	47	19	22	24	30	29

Tab. 4.2: Absolute Häufigkeit der vier GWL während der drei Perioden der 90 Salzwassereintrüche im Zeitraum 1897 - 1976

4.3 Das mittlere Bodendruckfeld bei Salzwassereintrüchen

Die mittleren Bodendruckverhältnisse über Europa und dem Nordatlantik an ausgewählten Tagen eines Salzwassereintruchs zeigt Abb. 4.2. Zu ihrer Berechnung wurden die täglichen Druckfelder während der 87 Salzwassereintrüche im Zeitraum 1899 - 1976 verwendet. Das Druckfeld am ersten Tag der Vorperiode entspricht in etwa der mittleren Druckverteilung im Winter. Im Verlauf der Vorperiode verlagert sich das Azorenhoch unter gleichzeitiger Verstärkung nach Nordosten. Am ersten Tag der Haupteinstromperiode hat es sein Zentrum über Nordspanien. Das Zentrum des niedrigsten Druckes bewegt sich gleichzeitig vom grönländisch-isländischen Raum nach Nordnorwegen. Die damit einhergehende Druckabnahme deutet auf verstärkte Tiefdrucktätigkeit in diesem Gebiet hin (siehe Abschn. 4.5). Dadurch tritt über der Nordsee und dem Ostsee-Eingangsbereich ein relativ hoher Druckgradient auf. Mit der Verlagerung der Druckzentren ist eine Drehung der Isobarenrichtung über dem Ostsee-

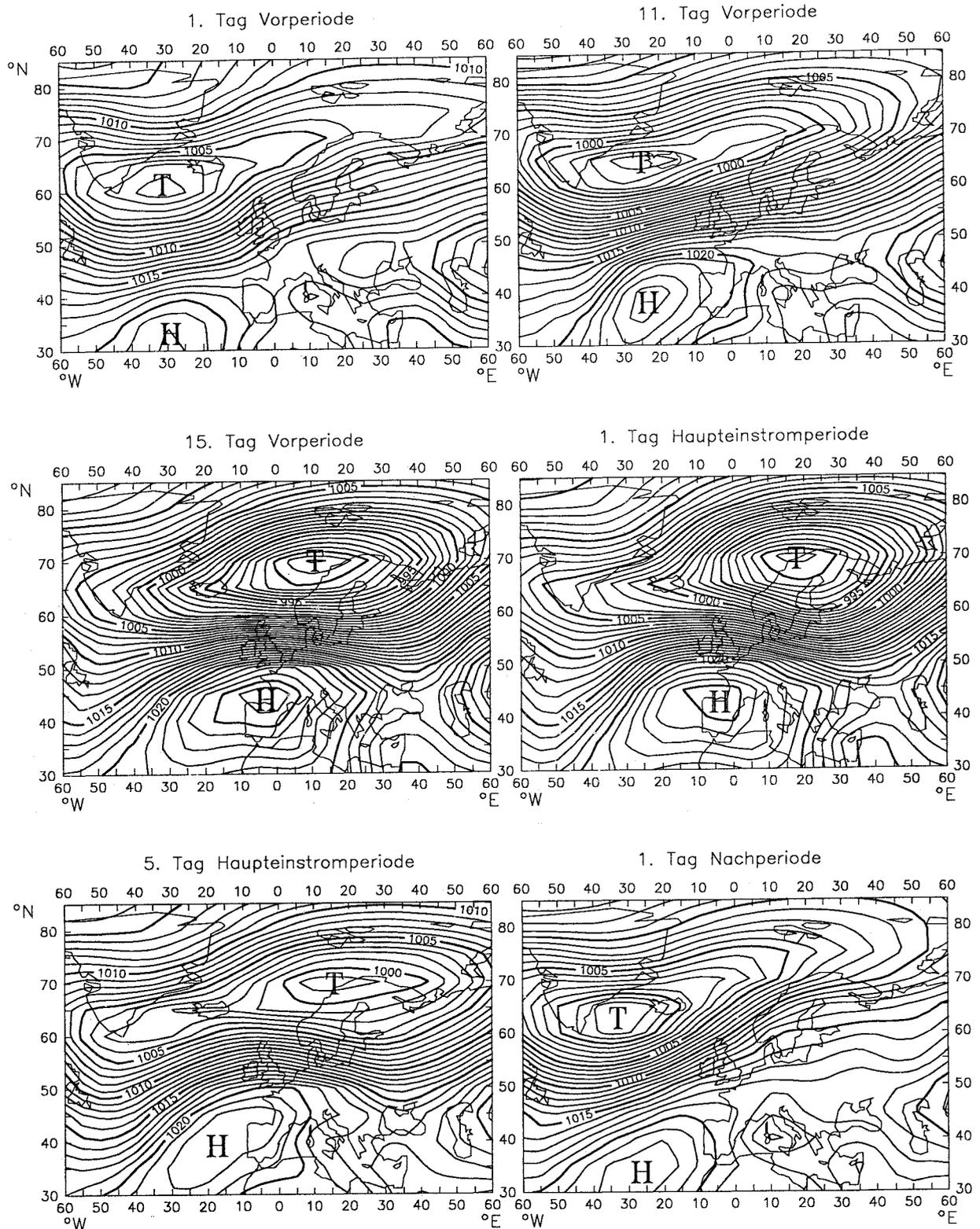


Abb. 4.2: Mittleres Bodendruckfeld an ausgewählten Tagen der Vorperiode, der Haupteinstromperiode und am ersten Tag der Nachperiode; Isobarenabstand: 1 hPa

Eingangsbereich von Westsüdwest auf Westnordwest verbunden, die ca. 2 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode beginnt. Während der Haupteinstromperiode nimmt die Intensität der Druckzentren ab, was mit einem Nachlassen des Druckgradienten verbunden ist. Das

typische Druckmuster bleibt aber erhalten. Am ersten Tag der Nachperiode entspricht die Druckverteilung wieder in etwa den normalen winterlichen Verhältnissen, wobei aber relativ schwache Druckgradienten über der Ostsee vorhanden sind.

Für sehr starke Salzwassereinbrüche ist dasselbe Druckmuster wie für schwache verantwortlich, hierbei treten aber stärkere Druckgradienten auf als bei schwachen Ereignissen (Abb. 4.3 und Tab. 4.3). Während die Druckdifferenz zwischen den beiden Druckzentren bei schwachen Salzwassereinbrüchen ca. 35 hPa beträgt, sind es bei starken und sehr starken über 46 hPa. Zur besseren Veranschaulichung der Druckverhältnisse, die für Salzwassereinbrüche charakteristisch sind, wurden Computer-Animationen angefertigt, die das typische Verhalten des Druckfeldes bei allen sowie bei sehr starken Ereignissen zeigen (siehe Anhang).

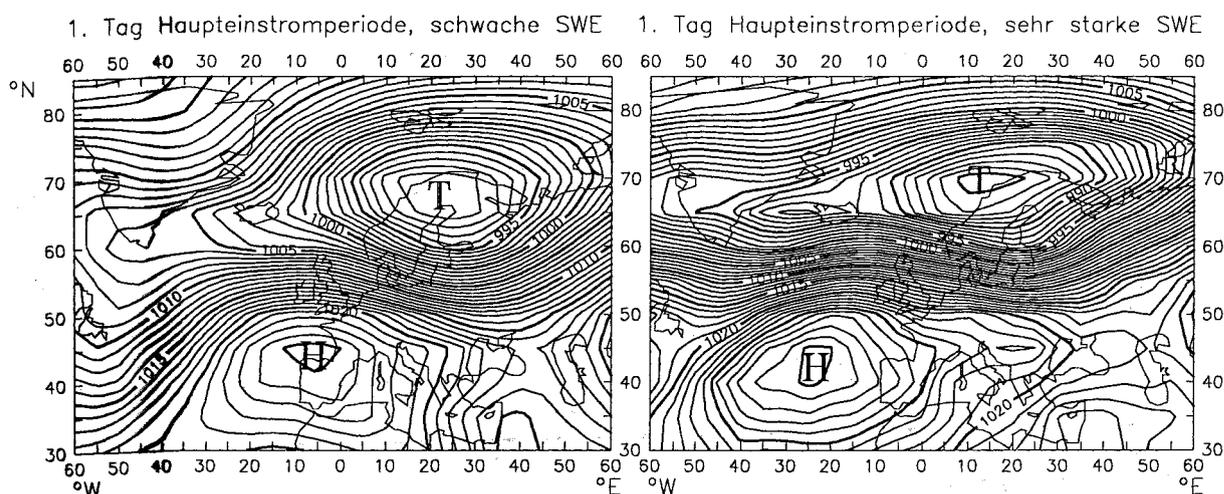


Abb. 4.3: Mittleres Bodendruckfeld am ersten Tag der Haupteinstromperiode bei schwachen und bei sehr starken Salzwassereinbrüchen; Isobarenabstand: 1 hPa

Stärke des SWE	schwach	mittel	stark	sehr stark	alle SWE
Anzahl der Fälle	48	26	7	6	87
Min. Druck	990,2	988,2	981,0	984,2	988,6
Max. Druck	1025,6	1025,7	1027,6	1030,3	1025,7
Druckdifferenz	35,4	37,5	46,6	46,1	37,1
neg. Anomalie	-19,8	-17,3	-25,4	-22,4	-19,5
pos. Anomalie	+7,6	+8,2	+9,7	+14,8	+7,5
Druckdifferenz	27,4	25,5	35,1	37,2	27,0

Tab. 4.3: Mittlere Werte des Bodendruckes der zwei Druckzentren bzw. mittlere Werte der Druckanomalien der zwei Anomaliezentren am ersten Tag der Haupteinstromperiode in Abhängigkeit von der Stärke der Salzwassereinbrüche (alle Angaben in hPa)

Noch deutlicher wird das charakteristische Druckmuster, das Salzwassereinbrüche hervorruft, wenn man anstelle der absoluten Druckfelder die Druckanomalien betrachtet (Abb. 4.4). Der erste Tag, an dem signifikante Anomalien auftreten (d. h., die Druckanomalien sind in größeren Gebieten mindestens auf dem Signifikanzniveau 95 % von 0 verschieden), ist der 7. Tag der Vorperiode, an dem über Nordskandinavien negative und über Südwesteuropa positive Druckanomalien zu erkennen sind. Im Laufe der Vorperiode verstärken sie sich und sind am Tag vor Beginn bzw. am ersten Tag der Haupteinstromperiode am größten. An diesem Tag

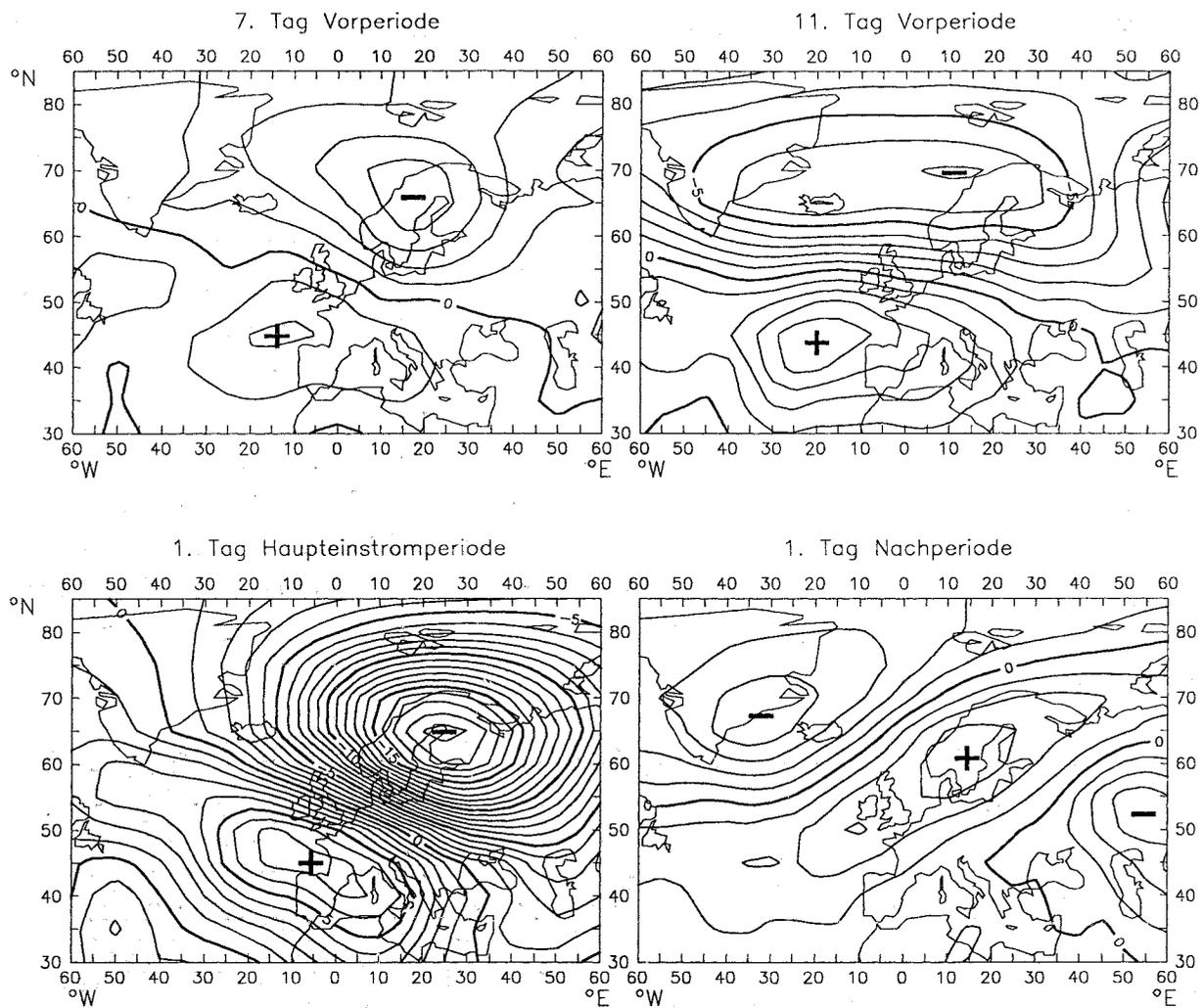


Abb. 4.4: Mittlere Anomalien des Bodendruckfeldes an ausgewählten Tagen der Vorperiode, am ersten Tag der Haupteinstromperiode und am ersten Tag der Nachperiode; Isobarenabstand: 1 hPa

betragen sie $-19,5$ hPa bzw. $+7,5$ hPa. Die Anomalien führen zu den bereits oben erwähnten starken Druckgradienten, die im Gebiet zwischen der Nordsee und der zentralen Ostsee ihr Maximum erreichen und von Nordnordost nach Südsüdwest gerichtet sind. Die Druckanomalien am 1. Tag der Haupteinstromperiode stimmen qualitativ sehr gut mit den Ergebnissen von HEYEN et al. (1994, 1995) überein, die mit Hilfe der Kanonischen Korrelation dieses Druckmuster als dasjenige erkannten, das zu Änderungen des Wasserstandes der Ostsee führt. Das bedeutet, daß zum Zustandekommen eines Salzwassereintruchs im Mittel über mehrere Tage *optimale* Einstrombedingungen vorherrschen müssen. Im Laufe der Haupteinstromperiode nehmen die Anomalien wieder ab. Am ersten Tag der Nachperiode sind positive Anomalien über dem Ostseegebiet erkennbar, was zu einer Verringerung des Wasserstandes der Ostsee beiträgt.

Da Salzwassereintrüche von August bis April auftreten, ist die Frage nach jahreszeitlichen Unterschieden in der Stärke oder der Lage der Druckzentren bzw. -anomalien zu klären, die zu diesen Ereignissen führen. Es zeigt sich, daß in allen Monaten dieselben charakteristischen Druckmuster zu Salzwassereintrüchen führen. In der Lage der Druckzentren gibt es nur unbedeutende Variationen. Dies gilt aber nicht für ihre Stärke. In Tab. 4.4 sind für alle 81

Einbrüche, bei denen der erste Tag der Haupteinstromperiode in den Zeitraum September bis Februar fiel, die mittleren Werte des Bodendruckes der zwei Druckzentren bzw. die mittleren Werte der Druckanomalien der zwei Anomaliezentren angegeben. Vom September abgesehen (nur 8 Fälle), kann man eine Tendenz zur Zunahme der Druckdifferenzen von Oktober bis Februar insbesondere bei den Anomalien erkennen. Im Oktober sind die geringsten Druckdifferenzen für das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen notwendig. Es fällt auf, daß ihre Höhe nicht mit dem Jahresgang der Häufigkeit der Salzwassereinbrüche übereinstimmt. Im Januar und Februar sind ausgesprochen hohe absolute Druckdifferenzen notwendig, um so ein Ereignis hervorzurufen. Im Gegensatz dazu steht die Tatsache, daß Salzwassereinbrüche ihre größte Häufigkeit unabhängig von ihrer Stärke im Dezember haben und demzufolge im Januar und Februar auch nicht die stärksten Ereignisse beobachtet werden. Wenn die Stärke der Salzwassereinbrüche hauptsächlich von der Stärke der Zonalzirkulation abhängen würde, so wäre mit einem Maximum im Januar und - wegen der zeitlichen Verschiebung zwischen atmosphärischer Anregung und Reaktion der Ostsee - auch im Februar zu rechnen. Eine Erklärung dieses scheinbaren Widerspruchs erfolgt in Kap. 5 (siehe hierzu auch Abschn. 4.12 und 4.13).

Monat	September	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar
Anzahl der Fälle	8	13	17	18	13	12
Min. Druck	991,0	994,1	989,1	987,2	982,7	983,0
Max. Druck	1025,4	1024,3	1027,3	1025,3	1029,2	1028,0
Druckdifferenz	34,4	30,2	38,2	38,1	46,5	45,0
neg. Anomalie	-21,5	-19,2	-18,7	-19,1	-21,8	-23,8
pos. Anomalie	+9,5	+8,1	+9,2	+9,2	+8,5	+9,9
Druckdifferenz	31,0	27,3	27,9	28,3	30,3	33,7

Tab. 4.4: Mittlere Werte des Bodendruckes der zwei Druckzentren bzw. mittlere Werte der Druckanomalien der zwei Anomaliezentren am ersten Tag der Haupteinstromperiode unterteilt nach dem Monat, in den dieser Tag fällt (alle Angaben in hPa)

4.4 Das 500-hPa-Niveau bei Salzwassereinbrüchen

Entscheidend für das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen sind die Druck- und Windverhältnisse am Boden, weil sie unmittelbar auf die Meeresoberfläche wirken. Da diese aber durch die Verhältnisse in höheren Atmosphärenschichten bestimmt werden, ist für die Erklärung von Salzwassereinbrüchen auch eine Analyse der dortigen Verhältnisse notwendig. Dazu standen ab 1946 Daten des 500-hPa-Niveaus zur Verfügung. Auf Grund des kürzeren Zeitraums konnten hierbei nur die 43 Salzwassereinbrüche von Januar 1946 bis Januar 1976 berücksichtigt werden. Das Verhalten des 500-hPa-Niveaus ähnelt generell den Verhältnissen, die im Bodendruckfeld gefunden wurden (Abb. 4.5). Am ersten Tag der Vorperiode ist eine starke zonale Strömung erkennbar, die über dem Nordatlantik etwas stärker ausgeprägt und typisch für winterliche Verhältnisse ist. Im Verlauf der Vorperiode verstärkt sich diese zonale Strömung, deren Maximum am ersten Tag der Haupteinstromperiode im Gebiet zwischen den Britischen Inseln und der westlichen Ostsee liegt. Gleichzeitig erfolgt - wie auch im Bodendruckfeld bei den Isobaren - eine Drehung der Isohypsen in westnordwestliche Richtung. Über

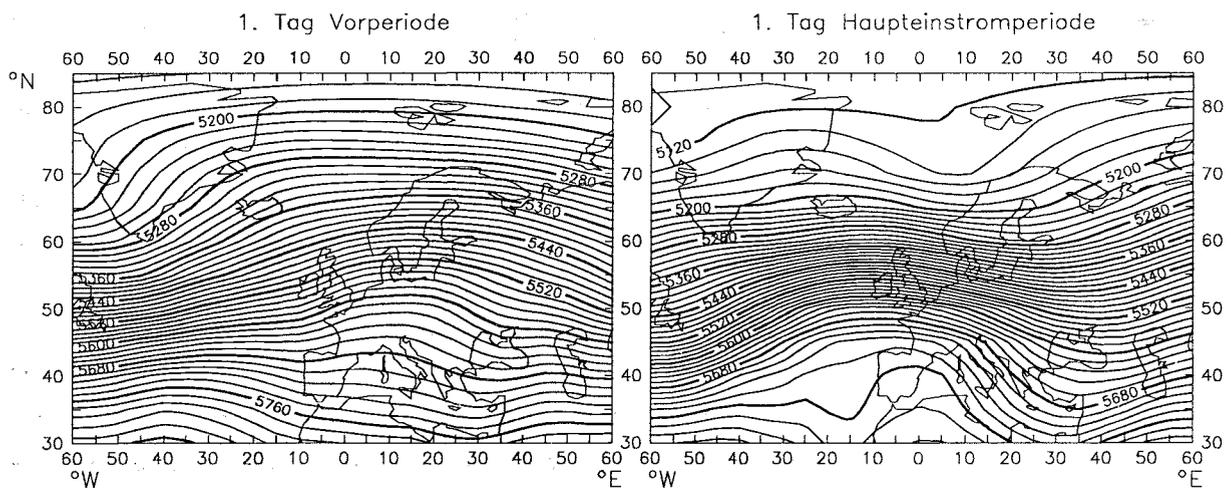


Abb. 4.5: Mittleres Niveau der 500-hPa-Fläche am ersten Tag der Vorperiode sowie am ersten Tag der Haupteinstromperiode; Isohypsenabstand: 16 gpm

dem Europäischen Nordmeer sind ein Trog und über Südwesteuropa ein Keil erkennbar, die sich im Bodendruckfeld als Tief bzw. Hoch widerspiegeln (siehe Abb. 4.2).

4.5 Zum Auftreten von Tiefdruckgebieten bei Salzwassereinbrüchen

Aus Abb. 4.2 kann man schließen, daß die Tiefdruckgebiete, die zu Salzwassereinbrüchen führen, entsprechend der Verlagerung des Zentrums des niedrigsten Druckes vom grönländisch-isländischen Raum über Island und das Europäische Nordmeer nach Nordskandinavien wandern. Dort verweilen sie dann einige Tage und füllen sich anschließend auf. Auch wenn dies nur für das Mittel gilt, so kann man doch in den Einzelfällen ein mehr oder weniger ähnliches Verhalten der Tiefdruckgebiete erwarten. In Abb. 4.6 sind die Positionen aller Starktiefs (Kerndruck ≤ 990 hPa) bei den 87 Salzwassereinbrüchen des Zeitraums 1899 - 1976 dargestellt. Am ersten Tag der Vorperiode entspricht die Verteilung etwa den normalen winterlichen Verhältnissen (SCHINKE 1992, 1993). Am ersten Tag der Haupteinstromperiode

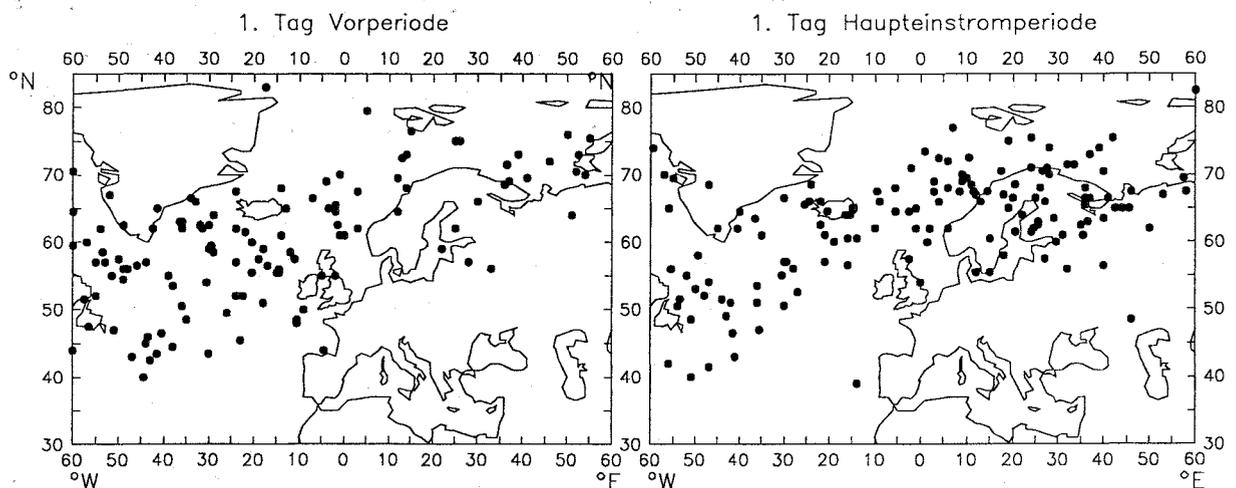


Abb. 4.6: Verteilung aller Starktiefs (Kerndruck ≤ 990 hPa) am ersten Tag der Vorperiode sowie am ersten Tag der Haupteinstromperiode bei den 87 Salzwassereinbrüchen im Zeitraum 1899 - 1976

hingegen ist eine deutliche Zyklonenhäufung über Nordskandinavien erkennbar. Das erhöhte Auftreten von stark ausgeprägten Zyklonen in diesem Gebiet und die Nordostverlagerung des Azorenhochs verursachen die für Salzwassereinbrüche charakteristische Druckverteilung (siehe Abb. 4.2). Diese Ergebnisse stimmen gut mit den von MANEGOLD (1936) ermittelten Positionen von Hoch- und Tiefdruckgebieten bei starkem Einstrom überein (siehe Abschn. 2.3.1). Am ersten Tag der Nachperiode sind über Nordskandinavien nur vereinzelt Tiefdruckgebiete zu beobachten.

Als eine mögliche Ursache für das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen im Zeitraum 1983 bis 1993 werden u. a. Änderungen in den Zugbahnen von Tiefdruckgebieten vermutet. Das bedeutet aber, daß von einer relativ plötzlichen und dauerhaften Änderung in der atmosphärischen Zirkulation ausgegangen wird, da bei einer allmählichen Änderung weiterhin vereinzelt mit Salzwassereinbrüchen zu rechnen wäre bzw. weiterhin schwache Salzwassereinbrüche auftreten müßten. Außerdem wird dabei der Umstand vernachlässigt, daß ein Tief nicht nur durch seine Zugbahn, sondern u. a. auch durch seine räumliche Ausdehnung sowie die Stärke der auftretenden Winde gekennzeichnet ist. Letztere sind auch abhängig von der Lage und Ausprägung der Hochdruckgebiete. Daher können Tiefdruckgebiete auf unterschiedlichen (z. B. parallelen) Zugbahnen ähnliche Effekte in einem bestimmten Gebiet hervorrufen. Aussagen, die sich aus dem gesamten Druckfeld ableiten, müssen deshalb allgemeingültigeren Charakter besitzen. Aus den angeführten Gründen wird hier auf eine Einzelanalyse von Zyklonenzugbahnen bei Salzwassereinbrüchen verzichtet.

Ein weiteres Problem bei der Hypothese von veränderten Zyklonenzugbahnen ist, daß man sie genauso schwer beweisen wie widerlegen kann, ausführliche Untersuchungen dieser Art selten sind und oft sehr kontrovers diskutiert werden. RIEMANN (1994) bestimmte für den Zeitraum 1964 bis 1993 die Zugbahnen aller Tiefdruckgebiete im atlantisch-europäischen Raum auf der Basis von Wetterkarten mit einer zeitlichen Auflösung von 12 Stunden. Anschließend teilte er alle Zugbahnen nach einem Schema ein, das im wesentlichen auf VAN BEBBER (1891) zurückgeht. Schon hierbei zeigt sich, daß für jeden Zugbahnbereich nur eine äußerst geringe Werteanzahl übrigbleibt, die für eine statistisch gesicherte Aussage nicht ausreichend ist. Der Autor konnte bei keiner der Zugbahnen deutliche Änderungen in der Häufigkeit bzw. Trends feststellen. Geht man nach dieser Arbeit, so liegt der Schluß nahe, daß eine Veränderung von Zyklonenzugbahnen nicht die Ursache für das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen in den 80er Jahren sein kann.

Salzwassereinbrüche sind - was die Phase verstärkter Westwinde anbelangt - Ereignisse im zeitlichen Scale von etwa 2 bis 4 Wochen. Der räumliche Scale liegt entsprechend in der Größenordnung von 10^3 km. Hieraus folgt, daß kleinere und kurzlebige Tiefdruckgebiete nicht entscheidend für das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen sein können. Das verdeutlichen auch sehr anschaulich die Computer-Animationen des Bodendruckfeldes, die von den Salzwassereinbrüchen im Dezember 1975/Januar 1976 und Januar 1993 angefertigt wurden (siehe Anhang). Bei der von HELA (1944) geschilderten optimalen Einstromsituation mit einem Tief über Südschweden (siehe Abschn. 2.3.1), die von der hier gefundenen abweicht,

handelt es sich um eine relativ kleinräumige Erscheinung, die demnach nur entsprechend kurze Zeit andauert und keinen Salzwassereinbruch bewirken kann. Auf Grund dieser Betrachtung liegt der Schluß nahe, daß in dem vorliegenden Datensatz des Bodendruckes mit einer Auflösung von $5^\circ \times 5^\circ$ im Abstand von 24 (bzw. 12) Stunden alle zum Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen relevanten Informationen zum Auftreten von Tiefdruckgebieten enthalten sind.

Bisher wurden mittlere Druckverteilungen und die Positionen von Zyklonen bei Salzwassereinbrüchen betrachtet. Aus diesen Mittelungen geht nicht hervor, ob Tiefdruckgebiete mit einer bestimmten Frequenz über das betrachtete Gebiet ziehen müssen (gemäß der oben beschriebenen "mittleren Zugbahn") oder ob ein mehrtägiges konstantes Andauern der mittleren Druckverteilung mit möglichst geringen Variationen bedeutsamer für das Eintreten eines Salzwassereinbruchs ist. Eine Analyse einzelner Ereignisse zeigt, daß stets mehr oder weniger starke Variationen in der Windrichtung und Windstärke über dem Ostsee-Eingangsbereich auftreten (siehe hierzu auch die Computer-Animationen). Eine positive Rückwirkung auf den Einstrom großer Wassermassen wäre allerdings nur durch einen Resonanzeffekt zwischen atmosphärischer Anregung und Reaktion der Ostsee denkbar. So können schnelle Druckänderungen die Ostsee zu Eigenschwingungen anregen, wie sie in der Literatur beschrieben wurden (NEUMANN 1941; KRAUSS und MAGAARD 1962; WÜBBER und KRAUSS 1979). Diese Frage ließ sich mit dem vorliegenden Datenmaterial nicht ausreichend beantworten, zumal die Wasserstände alle nur als Tagesmittel vorlagen. Hierzu wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Es hat sich in der Praxis als äußerst schwierig erwiesen, die theoretisch berechneten Eigenschwingungen der Ostsee aus Pegelregistrierungen herauszufiltern. Dies liegt u. a. daran, daß eine Eigenschwingung sehr stark gedämpft ist und von vielen anderen Wasserstandsänderungen überlagert wird. Weiterhin kommt es sicher nur äußerst selten vor, daß eine einmal angeregte Eigenschwingung durch nachfolgende Tiefdruckgebiete über mehrere Tage erhalten wird. Daher erscheint es sehr unwahrscheinlich, daß bei einem so großräumigen Phänomen wie einem Salzwassereinbruch Resonanzeffekte zwischen Atmosphäre und Ostsee von Bedeutung sind. Bei kleinräumigeren Phänomenen hingegen, wie es z. B. Sturmhoch- und -niedrigwasser an der deutschen Küste sind, dürften Eigenschwingungen der Ostsee eine größere Rolle spielen. Bei einer Maximum-Entropie-Spektralanalyse (OLBERG und RÁKÓCZI 1984) des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich wurde bei Salzwassereinbrüchen kein verändertes Spektrum im Periodenbereich oberhalb von 2 Tagen festgestellt. Dies liegt allerdings oberhalb der Perioden der Eigenschwingungen der Ostsee, deren größte nach der eindimensionalen Betrachtung bei 39,4 und 27,4 Stunden liegen (KRAUSS und MAGAARD 1962) (siehe hierzu auch Abschn. 2.1).

4.6 Der Meteorologische Salzwassereinbruchs-Index (MSI)

Zur quantitativen Beschreibung der Wetterlage, die zu Salzwassereinbrüchen führt, ist es nahelegend, ein Maß zu definieren, in das das gesamte Bodendruckfeld im Untersuchungsgebiet eingeht. Die Windverhältnisse über dem Ostsee-Eingangsbereich sind mehr lokaler Natur und unterliegen größeren täglichen Schwankungen als das komplette Druckfeld. Daher sind sie für ein solches Maß weniger geeignet. Aus diesem Grund wurde ein Meteorologischer Salzwassereinbruchs-Index (MSI) wie folgt definiert und für jeden Tag berechnet (siehe hierzu auch Abschn. 3.2):

Der *absolute MSI* ist der Kovarianzkoeffizient zwischen dem Druckfeld, das für den ersten Tag der Haupteinstromperiode eines Salzwassereinbruchs charakteristisch ist (siehe Abb. 4.2), und dem Druckfeld eines jeden Tages des Datensatzes.

Der *relative MSI* ist der Kovarianzkoeffizient zwischen den Druckanomalien, die für den ersten Tag der Haupteinstromperiode eines Salzwassereinbruchs charakteristisch sind (siehe Abb. 4.4), und den Druckanomalien eines jeden Tages des Datensatzes.

Der absolute MSI ist im Mittel fast im gesamten Jahr positiv und hat einen Jahresgang, wie er für Zirkulationsgrößen typisch ist (Maximum im Winter, Minimum im Sommer). Der relative MSI hat - auf Grund seiner Berechnungsweise - keinen Jahresgang, im Mittel ist er 0. Hohe positive Werte des MSI stehen für sehr stark ausgeprägte Einstromsituationen in die Ostsee. In Abb. 4.7 sind der Verlauf des absoluten MSI und des Wasserstandes der Ostsee im Jahr 1969, in dem mehrere Salzwassereinbrüche erfolgten, dargestellt. Man kann deutlich erkennen, daß der Wasserstand - mit einigen Tagen Verzögerung - einen ähnlichen Verlauf wie der MSI zeigt. Der MSI ist demzufolge ein gutes Maß zur Beschreibung der Wasserstandsänderungen der Ostsee.

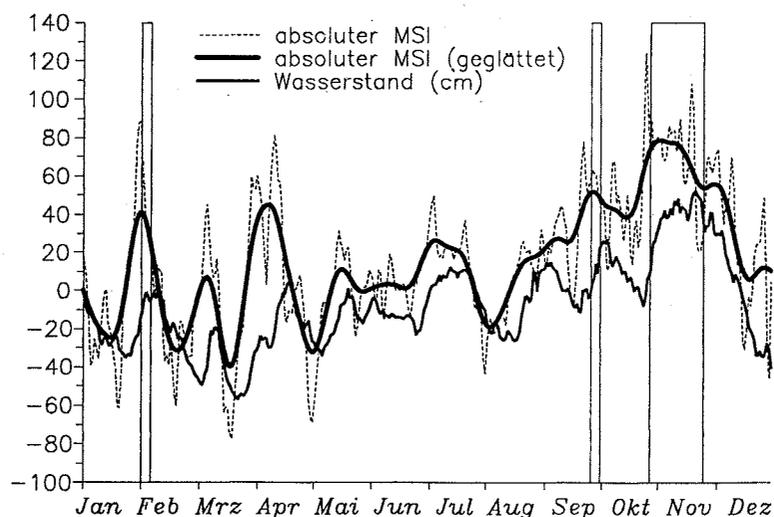


Abb. 4.7: Absoluter MSI (Originalwerte bzw. mit Gauß-Tiefpaßfilter der Grenzperiode 30 Tage geglättet) und Wasserstand der Ostsee im Jahr 1969; die Kästen markieren die Haupteinstromperioden der Salzwassereinbrüche dieses Jahres

4.7 Geostrophische Windverhältnisse über dem Ostsee-Eingangsbereich bei Salzwassereinbrüchen

Zur Beschreibung der Windverhältnisse, die zu Salzwassereinbrüchen führen, wurde der geostrophische Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich verwendet (siehe Abschn. 3.2). Da er aus Druckdaten im Abstand von 5° berechnet wurde, sind die Werte frei von lokalen Einflüssen und stellen praktisch das räumliche Mittel der Windgeschwindigkeit über einem größeren Gebiet dar.

In Abb. 4.8 sind die mittleren geostrophischen Windkomponenten u und v über dem Ostsee-Eingangsbereich bei Salzwassereinbrüchen dargestellt. Man erkennt sehr deutlich eine Zunahme der mittleren u -Komponente im Verlauf der Vorperiode von etwa 3 bis 4 m/s auf Werte von fast 14 m/s am letzten Tag der Vorperiode (d. h. Zunahme der Zonalströmung). An den darauffolgenden Tagen, also während der Haupteinstromperiode, nimmt der mittlere Wert dieser Komponente wieder ab, es treten aber weiterhin relativ hohe Werte auf. Die v -Komponente - bei einem mittleren Wert von 1 m/s (d. h. vorwiegend südliche Strömungsanteile) - ändert sich erst 2 Tage vor dem Beginn der Haupteinstromperiode und erreicht dann

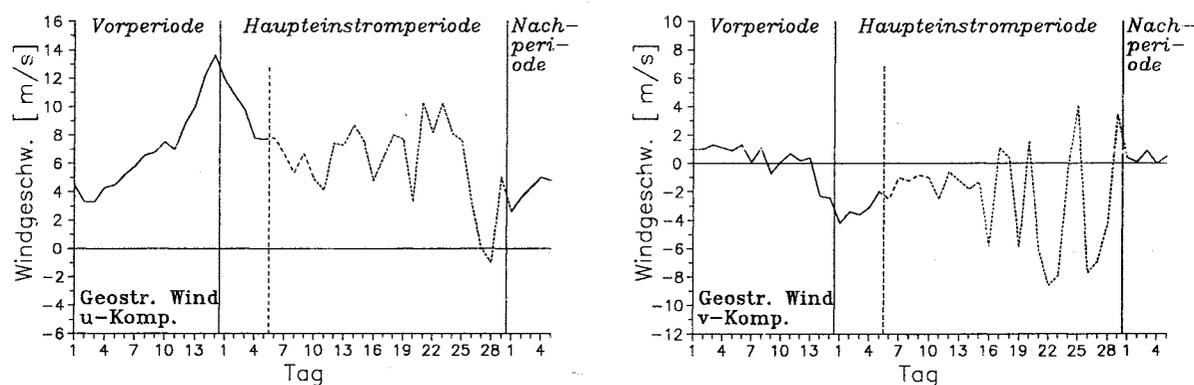


Abb. 4.8: Mittlere u - bzw. v -Komponente des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs

Werte um -3 bis -4 m/s, d. h., während dieser Periode dominieren nördliche Strömungsanteile. In den ersten Tagen der Haupteinstromperiode bleibt der Wert der v -Komponente bei -2 bis -3 m/s. Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild: Vor einem Salzwassereinbruch nimmt die westliche Strömung stark zu, wobei im allgemeinen eine schwache südliche Komponente vorhanden ist, die kurz vor Beginn der Haupteinstromperiode in eine nördliche übergeht (Änderung der geostrophischen Windrichtung von Westsüdwest auf Westnordwest). Berücksichtigt man die im Mittel vorhandene Abweichung des geostrophischen Windes vom realen Wind, so ergibt sich für den realen Wind eine Drehung der Windrichtung von etwa Südsüdwest auf Westsüdwest. Der Betrag der mittleren geostrophischen Windgeschwindigkeit erreicht mit ca. 15 - 16 m/s am letzten Tag der Vorperiode sein Maximum (vgl. hierzu auch Abb. 4.2).

Unterteilt man die Salzwassereinbrüche nach ihrer Stärke, so zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten des geostrophischen Windes in Abhängigkeit von der Stärke der Ereignisse. Bei

schwachen (48 Fälle), mittleren (26 Fälle) und starken (7 Fälle) Salzwassereinbrüchen tritt das Maximum der u-Komponente am letzten Tag der Vorperiode auf (Abb. 4.9), wobei bei mittleren und starken Ereignissen die hohen Windgeschwindigkeiten länger anhalten. Bei starken Einbrüchen liegt das Maximum höher, und am ersten Tag der Haupteinstromperiode sind ebenfalls noch sehr hohe Windgeschwindigkeiten vorhanden. Sehr starke Einbrüche (6 Fälle) zeichnen sich durch ein mehrwöchiges Andauern sehr hoher Windgeschwindigkeiten während der Haupteinstromperiode aus, wobei das Windmaximum erst im Verlauf dieser Periode auftritt. Bei der v-Komponente hingegen zeigen sich nicht solche deutlichen Variationen im Verhalten des Windes in Abhängigkeit von der Intensität der Salzwassereinbrüche. Generell läßt sich feststellen: Je länger ein Salzwassereinbruch dauert, desto stärkere Westwinde treten während der Haupteinstromperiode auf, und desto länger dauern diese hohen Geschwindigkeiten an. Im Gegensatz dazu lassen sich in der Vorperiode keine deutlichen Unterschiede im Verhalten des Windes in Abhängigkeit von der Stärke des Salzwassereinbruchs feststellen.

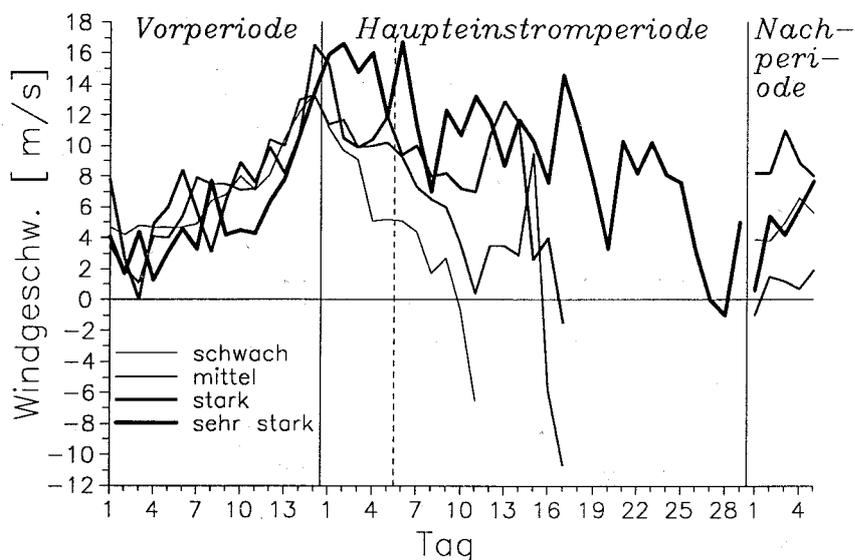


Abb. 4.9: Mittlere u-Komponente des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs in Abhängigkeit von der Stärke der Ereignisse

Zur Klärung der Frage, ob die im Mittel vorhandenen Windgeschwindigkeiten aus westlichen bzw. nördlichen Richtungen am ersten Tag der Haupteinstromperiode auch im Einzelfall zu beobachten sind, wurde die Anzahl der Tage mit Wind aus westlichen Richtungen (positive u-Komponente) bzw. nördlichen Richtungen (negative v-Komponente) bei Salzwassereinbrüchen untersucht (Abb. 4.10). Dabei wird deutlich, daß im Verlauf der Vorperiode die Anzahl der Salzwassereinbrüche mit Wind aus westlichen Richtungen von ca. 60 kontinuierlich ansteigt und daß am Tag vor Beginn der Haupteinstromperiode praktisch bei allen 87 untersuchten Fällen eine westliche Windkomponente vorliegt. Auch bei der Anzahl der Tage mit Wind aus nördlichen Richtungen ist während der Vorperiode eine Zunahme der Häufigkeit von ca. 40 auf etwa 60 Fälle zu verzeichnen. Dies bedeutet, daß eine nördliche Windkomponente nur bei ca. 2/3 aller Salzwassereinbrüche vorhanden ist. Nennenswerte Unterschiede, die sich aus der Intensität der Salzwassereinbrüche ergeben, sind nicht zu erkennen. Zusammenfassend

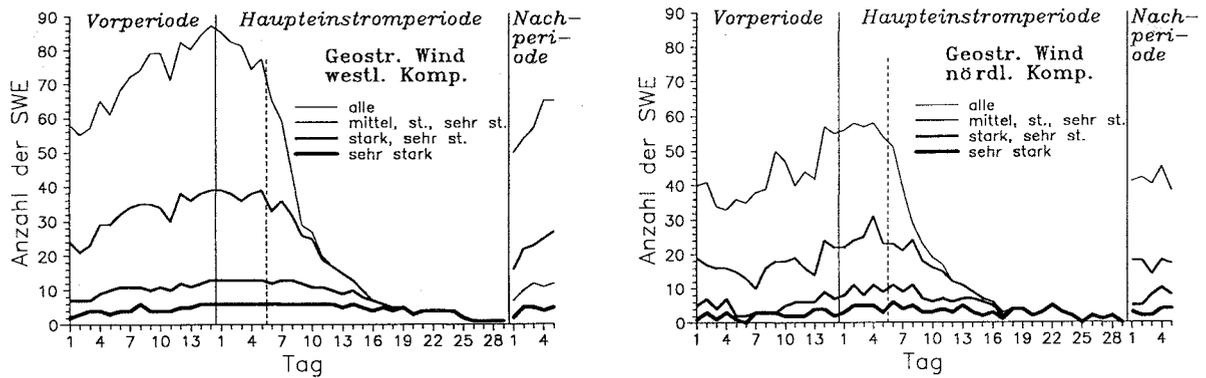


Abb. 4.10: Anzahl der Tage mit westlicher bzw. nördlicher Komponente des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich während der drei Perioden eines Salzwassereintruchs insgesamt und nach der Stärke der Ereignisse unterteilt

kann man sagen, daß das Vorhandensein einer westlichen Windkomponente notwendig für das Zustandekommen eines Salzwassereintruchs ist, das Auftreten einer nördlichen Windkomponente hingegen nicht.

Abschließend bleibt noch die Frage zu klären, ob aus meteorologischer Sicht die Betrachtung der letzten 15 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode zur vollständigen Charakterisierung eines Salzwassereintruchs ausreicht. Hierfür wurden 100 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode in die Rechnung einbezogen. In Abb. 4.11 ist das Ergebnis dieser Untersuchung im Vergleich zu den Werten dargestellt, die mit den zwei Zufallsreihen gewonnen wurden. Daraus kann man schließen, daß für die Untersuchung der dynamischen Prozesse, die zu einem Salzwassereintruch führen, eine 15tägige Vorperiode ausreichend ist. Weiterhin wird erkennbar, daß die festgestellten Variationen im Wind - auch bei der v-Komponente - mit dem Auftreten von Salzwassereintrüchen korrespondieren. Es fällt auf, daß etwa vom 50. bis 80.

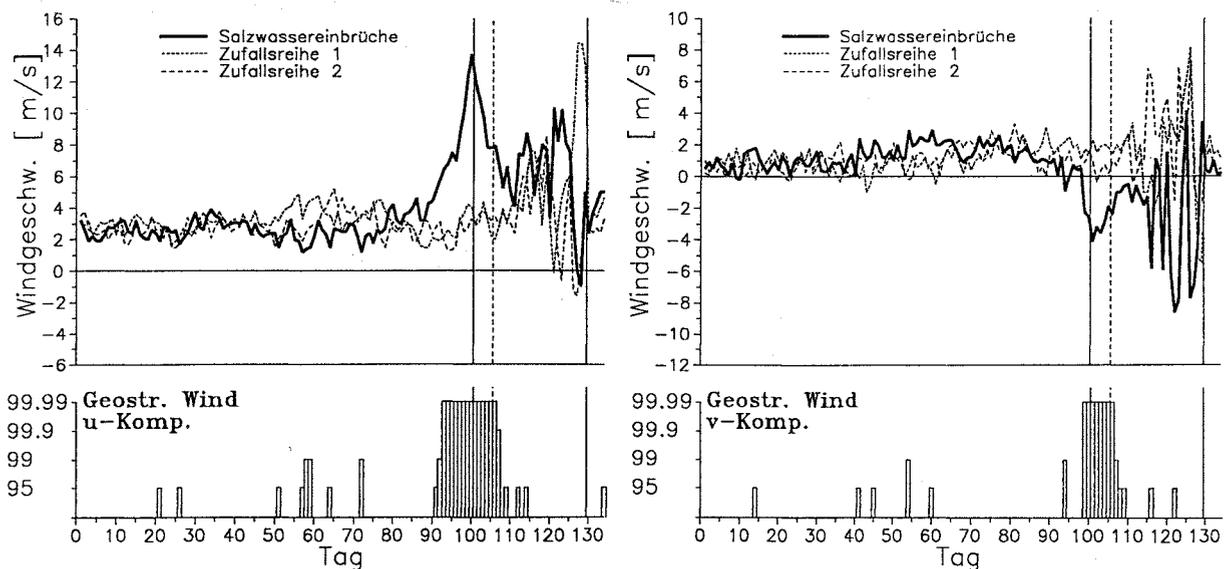


Abb. 4.11: Mittlere u- bzw. v-Komponente des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich vor und während der drei Perioden eines Salzwassereintruchs im Vergleich zu den Werten, die aus den zwei Zufallsreihen gewonnen wurden; die Kurven ab Tag 86 bei den Salzwassereintrüchen entsprechen den Kurven in Abb. 4.8; die Säulen geben das Niveau an, auf dem die Anomalien der Windkomponenten bei Salzwassereintrüchen signifikant sind

Tag der erweiterten Vorlaufphase (50 bis 20 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode) eine leichte (z. T. signifikante) Abnahme der Westkomponente auftritt, die teilweise mit einer Zunahme der Südkomponente verbunden ist. Weitere Erläuterungen dazu finden sich in Abschn. 4.10, 4.11 und 4.13, eine Erklärung dafür erfolgt in Kap. 5.

4.8 Geostrophischer Wind bei Salzwassereinbrüchen und bei Salzwassereinstromen - ein Vergleich

Salzwassereinstrome sind Einstrome kleinerer Mengen salzreichen Wassers, bei denen an der Darßer Schwelle ein hoher Salzgehalt in der ganzen Schicht für weniger als 5 Tage auftritt (gemäß den Kriterien in Abschn. 2.4). Im untersuchten Zeitraum von 1899 bis 1976 gab es mehr als 300 von diesen Einstromen, wovon ca. 2/3 nur einen Tag andauerten. Auch bei Salzwassereinstromen gilt wie bei Salzwassereinbrüchen: Je länger die Dauer, desto seltener ist so ein Ereignis. Die mittleren geostrophischen Windkomponenten u und v über dem Ostsee-Eingangsbereich bei einem Salzwassereinbruch und bei einem Salzwassereinstrom sind in Abb. 4.12 dargestellt. Es zeigt sich, daß das Verhalten der u -Komponente des geostrophischen Windes bei Salzwassereinstromen bis zum 12. Tag der Vorperiode (4 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode) dem bei Salzwassereinbrüchen sehr ähnlich ist. Der Übergang der südlichen Windkomponente (positive v -Komponente) in eine nördliche vollzieht sich allerdings innerhalb der gesamten 15-tägigen Vorperiode und nicht so schlagartig wie bei Salzwassereinbrüchen. Der größte Unterschied besteht jedoch darin, daß nach dem 12. Tag der Vorperiode bei Salzwassereinstromen keine nennenswerte Zunahme der u -Komponente des Windes mehr erfolgt. Sie erreicht maximale Werte von etwa 9 m/s (bei Salzwassereinbrüchen sind es 14 m/s). Zusätzlich kann man unmittelbar zu Beginn des Salzwassereinstromes wieder eine starke Abnahme der Westkomponente des Windes erkennen. Auch die nördliche Windkomponente geht nach einigen Tagen wieder in eine südliche über. Dieser Rückgang vollzieht sich um so schneller, je kürzer die Einstromdauer ist. Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß Salzwassereinstrome als abgebrochene Salzwassereinbrüche betrachtet werden können, bei denen sowohl die Windgeschwindigkeit als auch deren Andauer zu gering waren, um letztendlich zu einem Salzwassereinbruch zu führen.

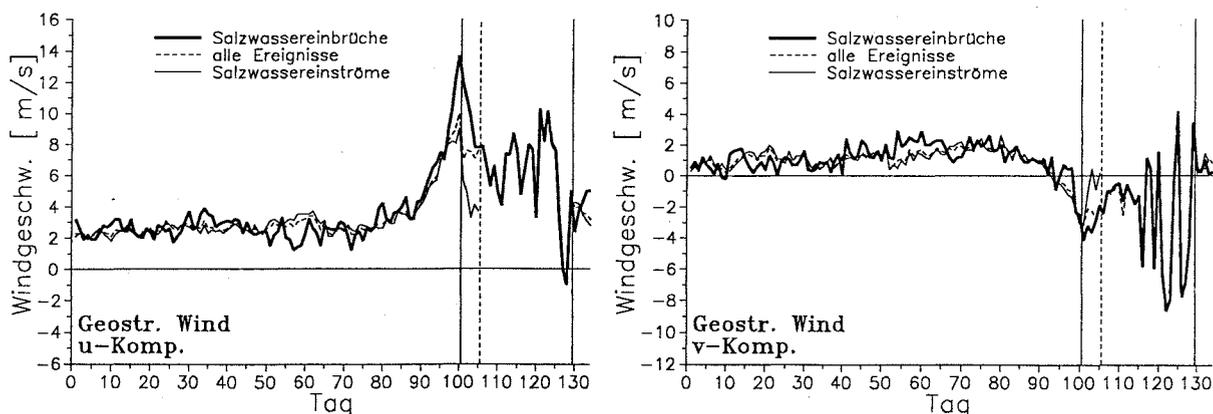


Abb. 4.12: Mittlere u - bzw. v -Komponente des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich vor und während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs im Vergleich zu einem Salzwassereinstrom

4.9 Der geostrophische Wind bei Salzwassereinbrüchen im Vergleich zum realen Wind

Da es sich bei dem geostrophischen Wind - trotz der vielen Vorteile, die er bietet - nicht um den realen Wind handelt, ist ein Vergleich der in den letzten Abschnitten dargelegten Ergebnisse mit dem realen Wind angebracht. Hierfür standen die Windwerte von Arkona ab 1951 zur Verfügung, so daß der Vergleich nur für die 31 Salzwassereinbrüche von 1951 bis 1976 erfolgen konnte. Einschränkend muß man sagen, daß die Windwerte der Station Arkona auf Grund ihrer exponierten Lage Abweichungen gegenüber dem mittleren Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich aufweisen können. Für einen besseren Vergleich wäre ohnehin die Berechnung eines mittleren Windes aus möglichst vielen Stationsdaten notwendig. Dafür standen aber keine Werte zur Verfügung.

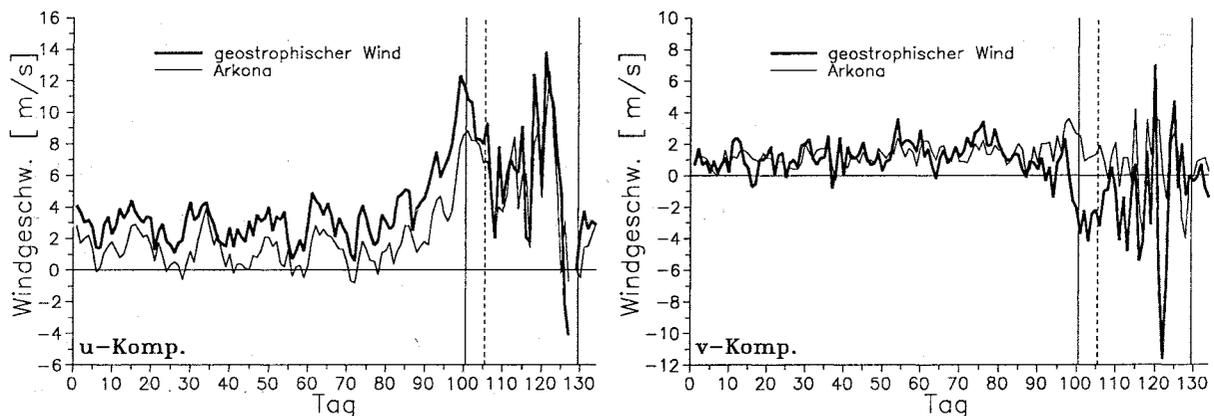


Abb. 4.13: Mittlere u- bzw. v-Komponenten des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich und des Windes von Arkona vor und während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs

Die mittleren Komponenten u und v des geostrophischen Windes über dem Ostsee-Eingangsbereich bzw. des Windes von Arkona bei Salzwassereinbrüchen sind in Abb. 4.13 dargestellt. Im allgemeinen liegt die u-Komponente des geostrophischen Windes 1 bis 2 m/s über den Werten von Arkona, unmittelbar vor Beginn der Haupteinstromperiode liegt die Differenz bei 3 bis 4 m/s. Von diesem grundsätzlichen Unterschied abgesehen, der durch die Eigenschaften des geostrophischen Windes (reibungsfrei, keine Isobarenkrümmung) verursacht wird, ist der Verlauf der beiden u-Komponenten analog. Die v-Komponenten hingegen, die bis kurz vor Beginn der Haupteinstromperiode einen ähnlichen Verlauf haben, weisen größere Unterschiede auf. Während bei dieser Komponente bei dem geostrophischen Wind die Richtung von Süd auf Nord wechselt, ist bei dem Wind von Arkona keinerlei Änderung erkennbar, eher noch eine Verstärkung der Südkomponente. Das entspricht der bereits in Abschn. 4.7 erwähnten Drehung des realen Windes von Südsüdwest auf Westsüdwest zu Beginn der Haupteinstromperiode. Das Maximum der Windgeschwindigkeit des geostrophischen Windes liegt bei 14 bis 15 m/s (etwas niedriger als das Mittel über alle 87 Einbrüche), der Wind von Arkona erreicht maximale Werte von 10 bis 11 m/s, was einer Windstärke von 5 bis 6 entspricht. Es zeigt sich, daß der geostrophische Wind - wenn man sich der Einschränkungen bewußt ist - zur Auffindung von Zusammenhängen zwischen der Zirkulation und dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen gut geeignet ist.

4.10 MSI und Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet bei Salzwassereinbrüchen

Eine dem geostrophischen Wind verwandte meteorologische Größe ist der MSI. Sein Verhalten bei Salzwassereinbrüchen ist dem Verhalten der u-Komponente des geostrophischen Windes sehr ähnlich (Abb. 4.14). Ungefähr 10 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode steigen die Werte, die sonst beim relativen MSI um 0 schwanken, deutlich an. Hierbei wird das Maximum am letzten Tag der Vorperiode erreicht. Ebenfalls analog zum Wind gilt: Je stärker der Einbruch, desto höhere MSI-Werte treten während der Haupteinstromperiode auf (nicht in der Vorperiode), und desto länger bleiben sie auf hohem Niveau. Weiterhin fällt in Abb. 4.14 eine Besonderheit ähnlich wie bei der u-Komponente des geostrophischen Windes auf: Ungefähr vom 40. bis 80. Tag der erweiterten Vorlaufphase (60 bis 20 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode) sind durchgehend negative Werte des relativen MSI zu verzeichnen, die aber meist nicht signifikant sind.

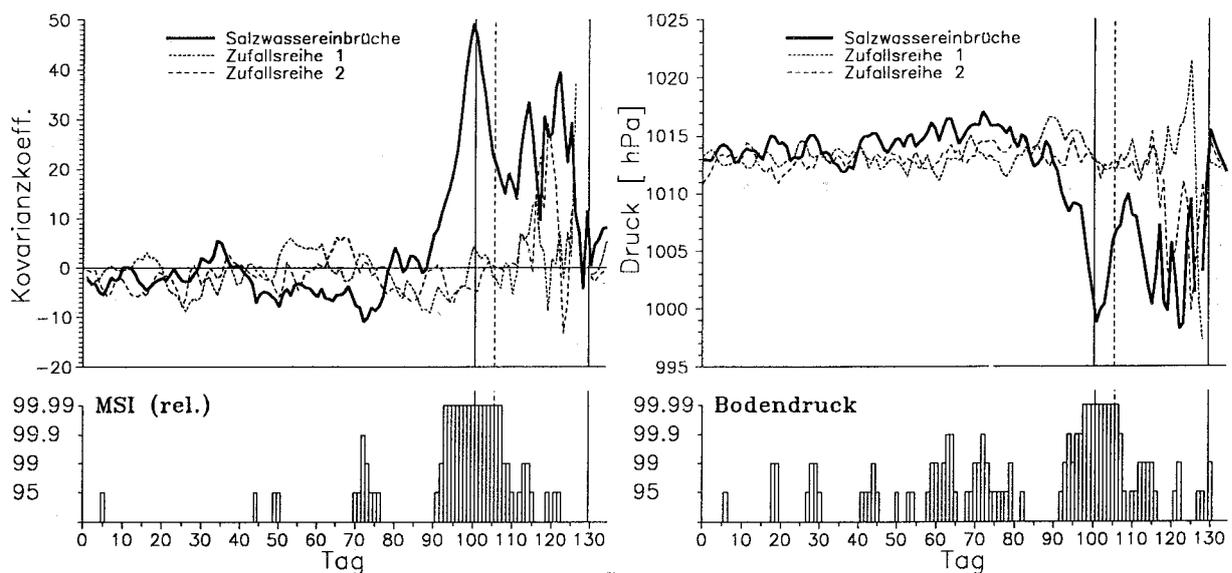


Abb. 4.14: Relativer MSI vor und während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs im Vergleich zu den Werten, die aus den zwei Zufallsreihen gewonnen wurden; die Säulen geben das Niveau an, auf dem die Anomalien des MSI bei Salzwassereinbrüchen signifikant sind (linke Abb.)

Abb. 4.15: Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet vor und während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs im Vergleich zu den Werten, die aus den zwei Zufallsreihen gewonnen wurden; die Säulen geben das Niveau an, auf dem die Anomalien des Bodendruckes bei Salzwassereinbrüchen signifikant sind (rechte Abb.)

In Abb. 4.15 ist der Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet bei Salzwassereinbrüchen dargestellt. Auch hier fallen ca. vom 50. bis 80. Tag der erweiterten Vorlaufphase (50 bis 20 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode) positive Druckanomalien auf, die in diesem Zeitraum zumeist signifikant auf den Niveaus 95 % und 99 % sind. Ansonsten setzt ca. 10 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode ein starker Druckabfall ein, welcher auf die erhöhte Tiefdruckaktivität (siehe Abschn. 4.3 bis 4.5) zurückzuführen ist. Auch bei einer Differenzierung nach der Stärke zeigen sich die aus den vorangegangenen Abschnitten bekannten Verhaltensmuster.

4.11 Wasserstände und Salzgehaltsverhältnisse bei Salzwassereinbrüchen

Das Verhalten des Wasserstandes von Landsort sowie der Wasserstandsdifferenz Kattegat-westliche Ostsee bei Salzwassereinbrüchen wurde bereits an anderer Stelle ausführlich diskutiert (FRANCK und MATTHÄUS 1992b; MATTHÄUS und FRANCK 1992). Der Salzgehalt am Feuerschiff Gedser Rev diente der Definition von Salzwassereinbrüchen (FRANCK et al. 1987). Trotzdem wäre diese Arbeit unvollständig, wenn die Wasserstands- und Salzgehaltsverhältnisse nicht auch hier Beachtung fänden. Deshalb wird nachfolgend ein Überblick über das Verhalten der Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser sowie das Verhalten des Salzgehaltes am Feuerschiff Gedser Rev bei Salzwassereinbrüchen in analoger Form wie in den vorangegangenen Abschnitten gegeben.

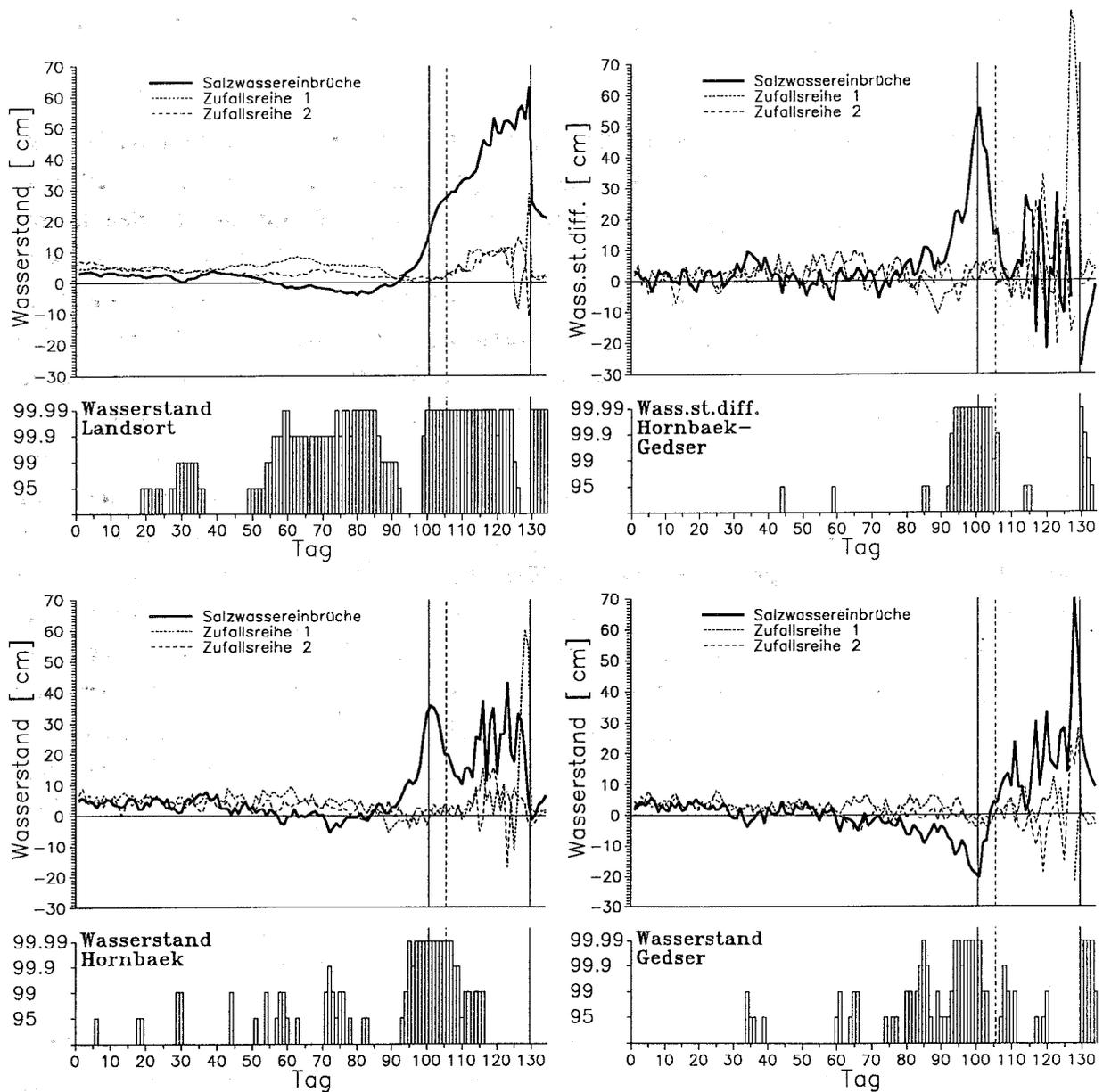


Abb. 4.16: Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser sowie Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser vor und während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs im Vergleich zu den Werten, die aus den zwei Zufallsreihen gewonnen wurden; die Säulen geben das Niveau an, auf dem die Anomalien der Wasserstände bzw. der Wasserstandsdifferenz bei Salzwassereinbrüchen signifikant sind

Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser

Das Verhalten des Wasserstandes der Ostsee (Landsort) bei Salzwassereinbrüchen zeigt Abb. 4.16. Etwa vom 40. bis 90. Tag der erweiterten Vorlaufphase (60 bis 10 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode) sind deutlich niedrigere Wasserstände erkennbar als bei den Werten, die mit den Zufallsreihen gewonnen wurden. Die Anomalien sind durchgehend hochsignifikant (Signifikanzniveau meist 99,9 % oder 99,99 %) und werden hauptsächlich durch den erhöhten Bodendruck in diesem Gebiet (in Zusammenhang mit einer Abschwächung der Zonalströmung) hervorgerufen. Der minimale Wasserstand ist ca. 3 Wochen vor Beginn der Haupteinstromperiode zu verzeichnen (siehe hierzu auch FRANCK und MATTHÄUS 1992b). Danach steigt er zunächst - durch die Abnahme des Hochdruckeinflusses - langsam und anschließend - durch die Zunahme der Zonalströmung - in den letzten Tagen der Vorperiode stark an. Während der Haupteinstromperiode setzt sich der starke Anstieg fort - bedingt durch den intensiven Einstrom. Der Wasserstand steigt um so länger und erreicht um so höhere Werte, je stärker der Einbruch ist.

Durch den Hochdruckeinfluß über dem Ostsee-Einzugsgebiet bedingt, weist auch der Wasserstand von Hornbaek etwa vom 50. bis 80. Tag der erweiterten Vorlaufphase (50 bis 20 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode) durchgehend niedrigere Werte auf. In den letzten 10 Tagen der Vorperiode steigt er als Folge des Windstaus im Skagerrak und Kattegat stark an und erreicht sein Maximum am ersten Tag der Haupteinstromperiode. Analog dazu führt das Verhalten des Windes zu einem Absinken des Wasserstandes in der westlichen Ostsee, welches am Pegel Gedser gut erkennbar ist. Es setzt ca. 2 bis 3 Wochen vor Beginn der Haupteinstromperiode ein, der minimale Wasserstand ist am ersten Tag dieser Periode zu beobachten. Das Verhalten der Wasserstände von Hornbaek und Gedser führt zu einer Erhöhung der Wasserstandsdifferenz zwischen den zwei Pegeln, was optimale Einstrombedingungen mit sich bringt. Das Maximum liegt dabei am ersten Tag der Haupteinstromperiode, danach geht die Wasserstandsdifferenz kontinuierlich zurück. Das ist hauptsächlich auf die höhere Wasserfüllung der Ostsee und das Nachlassen des Westwindes zurückzuführen, was zu einem Anstieg des Wasserstandes von Gedser führt. Nach einigen Tagen des Einstromes werden bei Gedser im Mittel positive Wasserstände registriert. Die nachlassenden Westwinde führen aber auch zu einem Rückgang des Windstaus am Pegel von Hornbaek und tragen damit ebenfalls zu einer Erniedrigung der Wasserstandsdifferenz bei. Auch für diese gilt: Je länger und intensiver der Salzwassereinbruch, desto größer ist sie, und desto länger bleibt sie relativ hoch.

Salzgehaltsverhältnisse am Feuerschiff Gedser Rev

Die Salzgehalte an der Oberfläche, in 5 m und 10 m Tiefe (salzarme Oberschicht) weisen im wesentlichen dasselbe Verhalten bei Salzwassereinbrüchen auf. Der einzige Unterschied besteht darin, daß der Salzgehalt an der Oberfläche geringer und in 10 m Tiefe höher ist (Abb. 4.17). Im Vergleich zu den aus den Zufallsreihen gewonnenen Daten treten Unterschiede beim Oberflächensalzgehalt erstmals in der Vorperiode auf. Von Beginn dieser Periode an nimmt der Salzgehalt langsam zu (da durch die zunehmenden Westwinde verstärkter Einstrom einsetzt), um kurz vor Beginn der Haupteinstromperiode sprunghaft anzusteigen (Durchgang

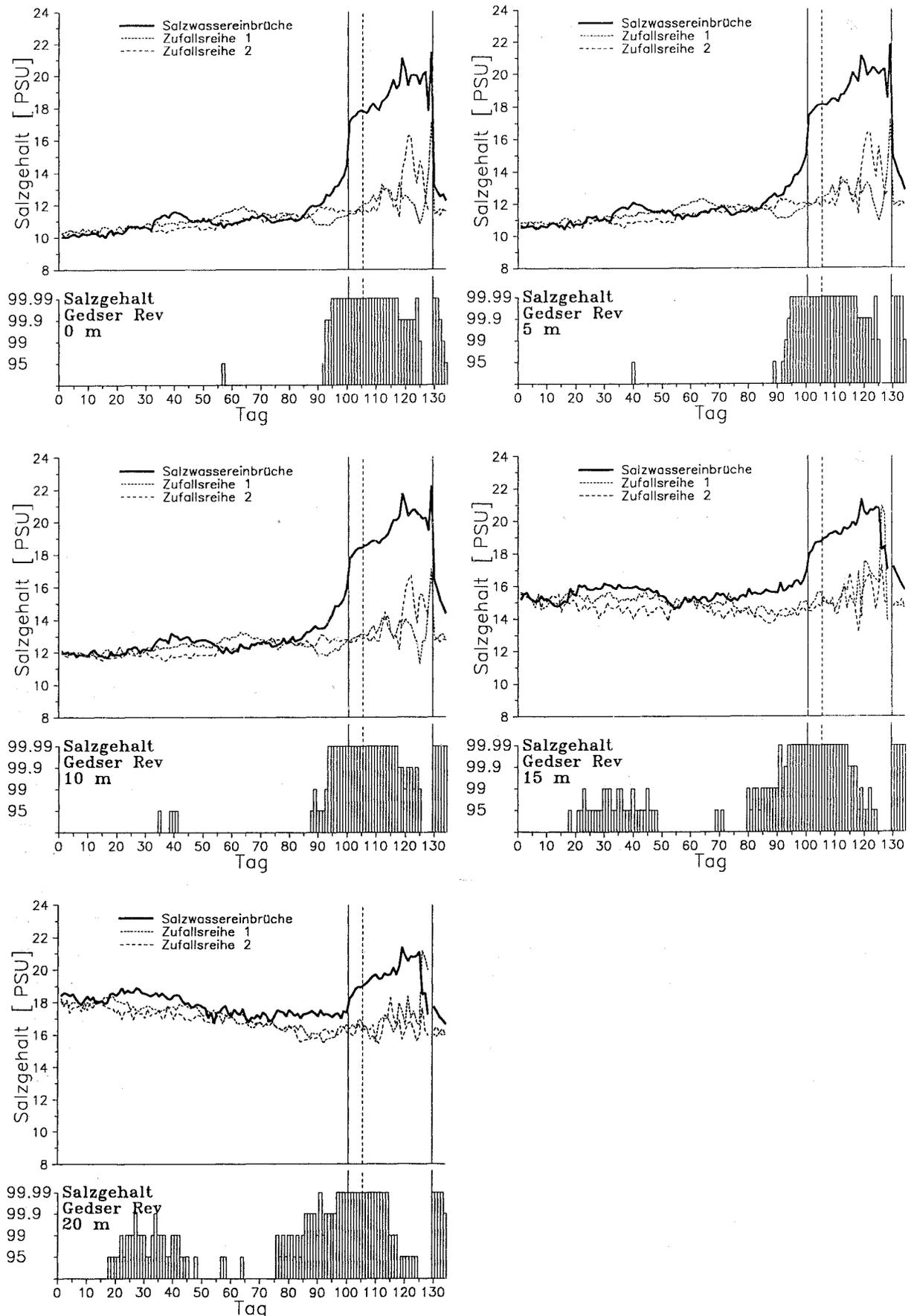


Abb. 4.17: Salzgehalte am Feuerschiff Gedser Rev an der Oberfläche (0 m), in 5 m, 10 m, 15 m und 20 m Tiefe vor und während der drei Perioden eines Salzwassereinbruchs im Vergleich zu den Werten, die aus den zwei Zufallsreihen gewonnen wurden; die Säulen geben das Niveau an, auf dem die Anomalien der Salzgehalte bei Salzwassereinbrüchen signifikant sind

der Salzfront). Während der Haupteinstromperiode sind durchgehend (definitionsgemäß) hohe Salzgehalte vorhanden. Unterschiede bei der Stärke zeigen sich nur in dieser Periode: Je stärker der Salzwassereinbruch, desto höhere Salzgehalte treten auf. Die allgemeine Zunahme des Salzgehaltes an der Oberfläche im dargestellten Zeitraum entspricht dem normalen Jahresgang.

Die Salzgehaltsverhältnisse in 15 m bzw. 20 m Tiefe (salzreiche Tiefenschicht) weisen teilweise ein anderes Verhalten auf. Auch in diesen zwei Horizonten steigt der Salzgehalt kurz vor (15 m) bzw. am Anfang der Haupteinstromperiode (20 m) stark an. Etwa vom 20. bis 50. Tag der erweiterten Vorlaufphase sowie vom 70. Tag bis zum Ende der Vorperiode (80 bis 50 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode bzw. die letzten 30 Tage vor ihrem Beginn) sind in 15 m und 20 m Tiefe signifikant erhöhte Salzgehalte festzustellen. Daraus wird ersichtlich, daß die Tiefensalzgehalte vor Salzwassereinbrüchen nicht durchgehend höhere Werte aufweisen. Die zwei Phasen erhöhter Salzgehaltswerte lassen sich mit dem bisher Dargelegten (Druck- und Windverhältnisse) nicht begründen, eine Erklärung für sie erfolgt in Kap. 5. Es zeigt sich desweiteren, daß diese zwei Phasen insbesondere für starke und sehr starke Ereignisse typisch sind. Je stärker der Salzwassereinbruch, desto höhere Salzgehalte treten auch in der Tiefenschicht während der Haupteinstromperiode auf. Die allgemeine Salzgehaltsabnahme entspricht dem normalen Jahresgang.

4.12 Meteorologische und ozeanographische Größen in Monaten mit Salzwassereinbrüchen und in Monaten ohne Salzwassereinbrüche - ein Vergleich

Die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte lassen vermuten, daß es in Monaten mit Salzwassereinbrüchen deutliche Anomalien im Verhalten der verschiedenen meteorologischen und daraus resultierend auch ozeanographischen Größen gibt. In Tab. 4.5 sind die Differenzen der Mittel meteorologischer bzw. ozeanographischer Größen zwischen Monaten mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne dargestellt. Basis dieser Analyse war der Zeitraum 1899 bis 1993 (mit Ausnahme der kriegsbedingten Lücken, in denen nichts über das Auftreten von Salzwassereinbrüchen bekannt ist) bzw. - durch das Datenmaterial bedingt - der maximal mögliche Zeitraum. Hierbei wurde jeder Monat des Untersuchungszeitraums, von dem mindestens ein Tag zu einem Salzwassereinbruch gehört, als Monat mit einem Salzwassereinbruch gewertet. Alle anderen wurden als Monate ohne solches Ereignis betrachtet. Nach dieser Einteilung gab es z. B. von 1899 bis 1993 in 24 November-Monaten und 25 Dezember-Monaten Tage, die zu einem Salzwassereinbruch gehörten. Die geringere Anzahl von Monaten mit Salzwassereinbrüchen im September und Februar im Vergleich zu Tab. 4.4 erklärt sich mit dem gelegentlichen Auftreten mehrerer Ereignisse in einem Monat. Ähnliche Einteilungen in Zeiträume mit Salzwassereinbrüchen und solche ohne führen zu qualitativ gleichen Ergebnissen.

Zunächst fällt auf, daß die Monate mit Salzwassereinbrüchen durch niedrigere Werte des Bodendruckes über dem Ostsee-Einzugsgebiet gekennzeichnet sind (zumeist signifikant). Das ist durch die verstärkte Tiefdruckaktivität in diesem Gebiet bedingt (siehe hierzu Abschn. 4.3

	September	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar
Monate mit SWE (max.)	7	13	24	25	18	11
Meteorolog. Größen						
Bodendruck [hPa]	-4,3 <i>99</i>	-1,5	-4,4 <i>99,9</i>	-3,7 <i>99</i>	-4,4 <i>99</i>	-5,5 <i>99</i>
Geostr. Wind [m/s]	1,4 <i>99</i>	0,9	1,0 <i>95</i>	1,3 <i>99</i>	1,7 <i>99,9</i>	2,2 <i>99</i>
u-Komponente [m/s]	2,9 <i>99</i>	2,9 <i>99</i>	2,1 <i>99</i>	2,4 <i>99</i>	3,7 <i>99,9</i>	2,7 <i>95</i>
v-Komponente [m/s]	-0,4	-0,8	-0,9	-1,3	-2,5 <i>99</i>	-1,2
MSI	12,4 <i>95</i>	10,3 <i>95</i>	14,3 <i>99</i>	13,3 <i>95</i>	21,8 <i>99</i>	20,7 <i>95</i>
Niederschlag [mm]	9,3	8,1	9,2 <i>95</i>	8,1 <i>95</i>	7,8 <i>95</i>	6,5
Niederschlag S [mm]	5,7	7,1	10,7 <i>95</i>	9,2	7,3	7,1
Niederschlag N [mm]	13,6	9,4	7,4 <i>95</i>	6,8 <i>95</i>	8,5 <i>95</i>	5,6
Temperatur [K]	0,4	0,5	0,0	0,8	1,3 <i>95</i>	1,7 <i>95</i>
Wasserstände [cm]						
Landsort	6,1	11,8 <i>99</i>	3,2	8,8 <i>95</i>	14,6 <i>99</i>	15,2 <i>95</i>
Hornbaek	8,9 <i>99</i>	7,6 <i>95</i>	5,8 <i>95</i>	9,3 <i>99</i>	11,9 <i>99,9</i>	10,4 <i>95</i>
Gedser	-4,3	1,5	-6,8 <i>95</i>	-1,6	3,0	5,0
Hornbaek-Gedser	11,1 <i>99</i>	5,8	12,9 <i>99,99</i>	9,3 <i>99</i>	7,5 <i>95</i>	5,5
Salzgeh. G. Rev [PSU]						
0 m	2,6 <i>99,99</i>	2,6 <i>99,99</i>	2,7 <i>99,99</i>	2,6 <i>99,99</i>	2,6 <i>99,99</i>	2,3 <i>99,99</i>
5 m	2,8 <i>99,99</i>	2,8 <i>99,99</i>	2,8 <i>99,99</i>	2,7 <i>99,99</i>	2,8 <i>99,99</i>	2,4 <i>99,99</i>
10 m	3,1 <i>99,99</i>	3,0 <i>99,99</i>	2,9 <i>99,99</i>	2,8 <i>99,99</i>	2,9 <i>99,99</i>	2,5 <i>99,99</i>
15 m	3,1 <i>95</i>	2,2 <i>99</i>	2,8 <i>99,9</i>	2,7 <i>99,99</i>	2,9 <i>99,99</i>	2,4 <i>99,9</i>
20 m	2,8	1,6	2,9 <i>99</i>	2,5 <i>99</i>	2,6 <i>99,9</i>	2,3 <i>99</i>
Flußwasserzuf. [km ³]	-2,1	-2,6	-4,1	-2,1	-3,3	-2,8

Tab. 4.5: Differenzen der Mittel meteorologischer bzw. ozeanographischer Größen zwischen Monaten mit Salzwassereintrüben und Monaten ohne Salzwassereintrübe; die kursiven Zahlen geben das Signifikanzniveau an (95 %, 99 %, 99,9 % oder 99,99 %), auf dem sich die zwei Mittel voneinander unterscheiden (t-Test, SCHÖNWIESE 1992)

und 4.5), die auch zu meist signifikant höheren Windgeschwindigkeiten führt. Die u-Komponente des Windes ist in Monaten mit Salzwassereintrüben signifikant höher, was einer Verstärkung der Zonalströmung entspricht. Die v-Komponente hingegen ist in allen Monaten durchgehend geringer, was eine Abschwächung der südlichen Strömung bzw. häufigeres Auftreten nördlicher Strömungsanteile bedeutet. Korrespondierend zum Druck- und Windfeld zeigt der MSI deutlich positive Abweichungen, d. h., in Monaten mit Salzwassereintrüben ist die Einstromwetterlage besonders häufig bzw. stark ausgeprägt vorhanden. Das gilt insbesondere für die Monate Januar und Februar. Mit der verstärkten Westzirkulation bei Salzwassereintrüben ist eine erhöhte Niederschlagstätigkeit im Ostsee-Einzugsgebiet verbunden, die in den Monaten maximaler Salzwassereintrübenhäufigkeit (November bis Januar) signifikant ist. Bei den Temperaturen zeigen sich signifikante Abweichungen nur im Januar und Februar, in diesem Zeitraum treten in Monaten mit Salzwassereintrüben höhere Temperaturen auf. Dies dürfte seine Ursache ebenfalls in der verstärkten Tiefdrucktätigkeit haben, durch die mildere Luftmassen vom Nordatlantik in das Ostsee-Einzugsgebiet gebracht werden und mit der eine Abschwächung winterlicher Hochdruckgebiete einhergeht.

Durch die verstärkte Zonalströmung und alle damit gekoppelten Prozesse ist in Monaten mit Salzwassereintrüben der Wasserstand der Ostsee (meistens signifikant) höher als in Monaten ohne solche Ereignisse. Dasselbe gilt für den Wasserstand von Hornbaek, der durch den Windstau im Skagerrak und Kattegat in Monaten mit Salzwassereintrüben durchgehend signifikant höher ist. Der Wasserstand von Gedser hingegen zeigt kein systematisch anderes Verhalten in Monaten mit Salzwassereintrüben im Vergleich zu solchen ohne, nur im November ist ein signifikant niedrigerer Wert vorhanden. Es fällt aber auf, daß die Werte von Gedser nahezu konstant um etwa 10 cm unter denen von Landsort liegen. Das dürfte dadurch bedingt sein, daß der Wasserstand von Gedser im Mittel vom Wasserstand der Ostsee abhängt, was folglich auch für die Differenzen gilt. Die Wasserstands-differenz zwischen Hornbaek und Gedser zeichnet sich erwartungsgemäß durch positive Werte aus, die meist auch signifikant sind (starker Einstrom in Monaten mit Salzwassereintrüben). Der Unterschied beim Salzgehalt am Feuerschiff Gedser Rev liegt durchgehend bei etwa 2,5 bis 3,0 PSU, ist fast immer hochsignifikant und wird durch das mit hohem Salzgehalt einströmende Wasser in Monaten mit Salzwassereintrüben verursacht. Bedingt durch den kontinuierlichen Einstrom salzreicheren Wassers in der Tiefenschicht der Darßer Schwelle, sind die Unterschiede dort nicht so ausgeprägt. Die Flußwasserzufuhr ist in allen Monaten mit Salzwassereintrüben niedriger als in Monaten ohne Salzwassereintrübe, allerdings in keinem Monat signifikant. Eine verringerte Flußwasserzufuhr ist demnach typisch für Monate, in denen Salzwassereintrübe auftreten.

Beachtenswert ist die Tatsache, daß im November die größten (negativen) Differenzen zwischen Monaten mit Salzwassereintrüben und solchen ohne am Pegel Gedser auftreten und daß die geringsten Unterschiede beim Pegel Hornbaek (sowie beim Wasserstand der Ostsee) ebenfalls im November zu finden sind. Weiterhin tritt in diesem Monat der maximale Unterschied bei der Wasserstands-differenz zwischen Hornbaek und Gedser auf, was auf besonders optimale Einstrombedingungen in diesem Monat hinweist. Andererseits sind aber im November die geringsten Unterschiede bei der u-Komponente des Windes zu finden. Die größte (negative) Differenz bei der Flußwasserzufuhr tritt ebenfalls im November auf. Auf die Ursachen der optimalen Einstrombedingungen bei Salzwassereintrüben im November, die aber zu keiner deutlichen Erhöhung des Wasserstandes der Ostsee führen, wird in Kap. 5 eingegangen. Weiterhin treten die größten Unterschiede bei den Zirkulationsparametern (Bodendruck, Windgeschwindigkeit, u-Komponente des Windes, MSI) häufig im Januar und Februar auf (siehe hierzu auch Abschn. 4.3). Das wird auch an den erhöhten Unterschieden bei den Wasserständen von Landsort, Hornbaek und Gedser deutlich. Im Oktober hingegen sind die geringsten Unterschiede beim Bodendruck, bei der Windgeschwindigkeit und beim MSI zu finden.

4.13 Zum Ausbleiben von Salzwassereintrüben von 1983 bis 1993

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ausführlich dargelegt, welche meteorologischen Bedingungen zum Auftreten von Salzwassereintrüben führen und wie sie auf die verschiedensten ozeanographischen Größen wirken. Es wurde gezeigt, welche Druckverteilung optimal

für das Zustandekommen dieser Ereignisse ist und daß eine Zunahme der Zonalströmung bei Salzwassereinbrüchen notwendig für deren Auftreten ist. Es deutet sich an, daß in den Wochen vor einem Salzwassereinbruch hauptsächlich durch erhöhten Bodendruck (verbunden mit einer Abnahme der Zonalströmung) der Ostseewasserstand erniedrigt wird. Weiterhin scheint der Tiefenkompensationsstrom in die Ostsee vor Salzwassereinbrüchen verstärkt zu sein, was sich mit dem bisher Dargelegten nicht erklären läßt. Dies stimmt mit anderen Untersuchungen zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen überein (siehe Abschn. 2.3).

Aus den bisherigen Ergebnissen ließe sich schlußfolgern, daß eine Abnahme der Zonalströmung in den Wintermonaten zu einer Abnahme in der Häufigkeit der Salzwassereinbrüche führt, was das Ausbleiben dieser Ereignisse von 1983 bis 1993 erklären würde. In Abb. 4.18 sind die Zeitreihen der u-Komponente des geostrophischen Windes, des Bodendruckes über dem Ostsee-Einzugsgebiet, des MSI und des Wasserstandes von Landsort dargestellt (Mittel der Monate mit häufigem Auftreten von Salzwassereinbrüchen, d. h. von September bis Februar). Bei der u-Komponente des Windes und beim MSI sind in den 70er und 80er Jahren starke Variationen zu beobachten, generell ist aber in diesen zwei Jahrzehnten ein leichter Trend zur Zunahme vorhanden. Damit verbunden ist eine Erhöhung des Wasserstandes der Ostsee. Beim Bodendruck ist ein leicht abnehmender Trend erkennbar. Grundsätzlich läßt sich aber bei keiner der Zirkulationsgrößen ein durchgehend anderes Verhalten in den 80er Jahren im Vergleich zu den 70er Jahren feststellen. Die offenbar stärker ausgeprägten länger-

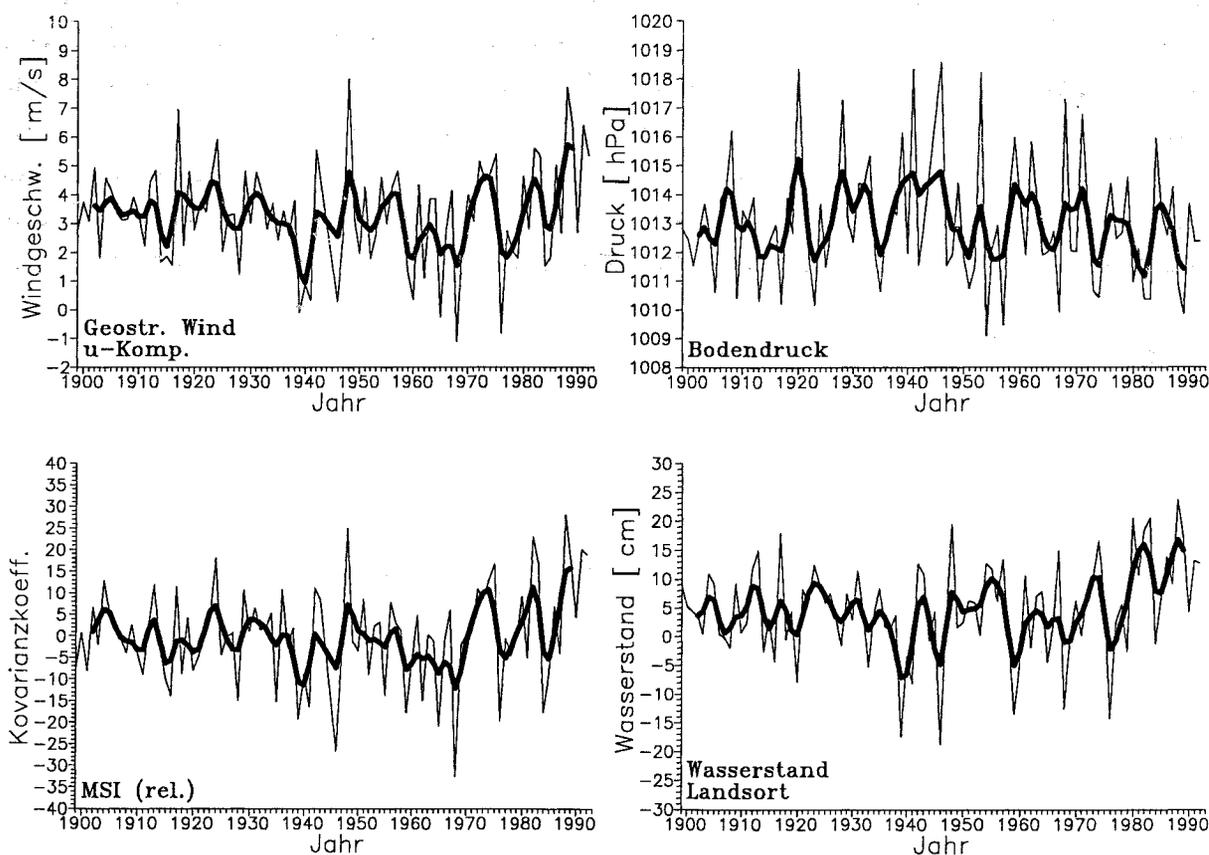


Abb. 4.18: u-Komponente des geostrophischen Windes, Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet, relativer MSI und Wasserstand von Landsort (Mittel der Monate September bis Februar) im Zeitraum 1899/1900 bis 1992/93; die Jahreszahl bezieht sich auf das Jahr, in dem der September liegt; dicke Linie: Glättung mit Gaußschem Tiefpaßfilter der Grenzperiode 6 Jahre

periodischen Schwankungen in den 80er Jahren treten auch in den 70er Jahren auf, in denen es häufig Salzwassereinbrüche gab. Allerdings fällt in den 80er Jahren ein nahezu durchgehend hoher Wasserstand der Ostsee auf. Somit läßt sich der Schluß ziehen, daß das *Ausbleiben der Salzwassereinbrüche von 1983 bis 1993 nicht auf eine Abnahme der Zonalströmung zurückzuführen* ist, da diese in den 80er Jahren eher etwas stärker war. Der ähnliche zeitliche Verlauf des regionalen MSI und des lokalen geostrophischen Windes, der auch in den 80er Jahren charakteristisch ist, machen deutlich, daß das Ausbleiben der Salzwassereinbrüche - was die Dynamik des eigentlichen Einstromes betrifft - kein lokaler Effekt ist. Vielmehr sind hierfür großräumige Prozesse verantwortlich, was auch der Hypothese einer geringfügigen Änderung von Zyklonenzugbahnen widerspricht. Auch der unterschiedliche Jahregang von Salzwassereinbrüchen und Westwindzirkulation läßt sich mit dem bisher Dargelegten nicht erklären. Aus diesen Überlegungen folgt, daß die *Ursache für das Ausbleiben der Salzwassereinbrüche nicht die Abnahme der Häufigkeit bzw. Intensität der die Salzwassereinbrüche verursachenden Wettersituation ist, sondern daß dafür andere Gründe verantwortlich* sind (siehe Kap. 5).

Aus den vorangegangenen Abschnitten geht hervor, daß sich Salzwassereinbrüche auch aus meteorologischer Sicht möglicherweise in *zwei unabhängige Phasen* teilen lassen. Die *erste Phase* ist durch einen etwas höheren Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet gekennzeichnet, was mit einer Abschwächung der Zonalströmung verbunden ist und u. a. zu einem Absinken des Wasserstandes der Ostsee führt. Diese Phase beginnt ca. zwei bis anderthalb Monate vor Anfang der Haupteinstromperiode und endet 3 bis 2 Wochen vor ihrem Anfang. Danach folgen einige Tage ohne Anomalien in der Zirkulation. In der *zweiten Phase*, die ein bis zwei Wochen vor der Haupteinstromperiode anfängt, nimmt die Zonalströmung stark zu und verursacht letztendlich den Salzwassereinbruch. Während alle betrachteten Größen in der zweiten Phase deutliche Anomalien zeigen, sind diese in der ersten Phase teilweise nur schwach ausgeprägt. Nachdem die zweite Phase in diesem Kapitel ausführlich beschrieben wurde, soll nachfolgend die erste Phase näher betrachtet werden.

5. Meteorologische und ozeanographische Größen in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche

5.1 Verfahrensweise

FRANCK et al. (1987) wiesen schon bei der Definition von Salzwassereinbrüchen darauf hin, daß diese selten als Einzelereignisse, sondern meist in Gruppen auftreten. Dabei werden alle Ereignisse zu einer Gruppe zusammengefaßt, zwischen deren Auftreten eine Zeitspanne von weniger als einem Jahr liegt. Betrachtet man jede Einstromsaison (August bis April) isoliert, so ergibt sich, daß unter den 50 Einstromsaisons im Zeitraum 1897/98 bis 1975/76, in denen nachweisbar Salzwassereinbrüche stattfanden, 21 sind, in denen der Einbruch ein Einzelereignis war. Die anderen 29 Saisons sind dadurch charakterisiert, daß die insgesamt 69 in ihnen aufgetretenen Einbrüche in Gruppen von zwei, drei oder auch vier Einbrüchen vorkamen (der Begriff "Gruppe" ist hier nicht im oben genannten Sinne zu verstehen). Die Tatsache, daß also mehr als 3/4 aller Salzwassereinbrüche nicht als Einzelereignisse auftreten, führt zu der Vermutung, daß es generelle Unterschiede im Verhalten meteorologischer bzw. ozeanographischer Größen zwischen Saisons mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne gibt.

Zur Klärung dieser Frage wurde zunächst der Zeitraum Juli 1899 bis Juni 1993 in Einstromjahre (Juli bis Juni) mit Salzwassereinbrüchen und Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche unterteilt. Das Schema verdeutlicht Tab. 5.1 für die 5 Einstromjahre 1990/91 bis 1994/95, von denen nur das Einstromjahr 1992/93 durch einen Salzwassereinbruch (im Januar 1993) gekennzeichnet ist. Insgesamt gab es von 1899/1900 bis 1992/1993 53 Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen und 30 ohne solche Ereignisse, für 11 fehlten kriegsbedingt die Daten. Anschließend erfolgte für alle 12 Monate die Berechnung der Monatsmittel aller interessierenden Größen aus den je 53 einzelnen Monatsmitteln der Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen. Mit den Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche wurde analog verfahren. Diese je 12 Monatsmittel, die als typisch für ein Einstromjahr mit bzw. ohne Salzwassereinbruch angesehen werden können, wurden daraufhin mittels t-Test auf signifikante Unterschiede getestet (SCHÖNWIESE 1992).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Einstromjahr 1992/93
1990							0	0	0	0	0	0	
1991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Vorjahr
1992	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	Anfangsjahr
1993	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	Endjahr
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1995	0	0	0	0	0	0							

Tab. 5.1: Schema der Zuordnung der einzelnen Monate zu einem Einstromjahr für die Einstromjahre 1990/91 bis 1994/95

0 = Monat, der zu einem Einstromjahr ohne Salzwassereinbrüche gehört

1 = Monat, der zu einem Einstromjahr mit Salzwassereinbrüchen gehört
(bedingt durch den Salzwassereinbruch im Januar 1993)

fettgedruckt: dreijähriger Untersuchungszeitraum, der sich für das Einstromjahr 1992/93 ergibt

Um mögliche frühzeitig erkennbare Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne aufzudecken, erschien es angebracht, das Jahr vor einem Einstromjahr zusätzlich in die Untersuchungen einzubeziehen. Außerdem wurde noch am Anfang und am Ende je ein halbes Jahr mit erfaßt, so daß der Vergleich der Monatsmittel über den Zeitraum dreier Kalenderjahre erfolgen konnte. Die einzelnen Jahre dieses Zeitraums erhielten folgende Bezeichnung:

- Vorjahr Jahr vor dem Jahr, in dem das Einstromjahr beginnt,
- Anfangsjahr im Juli dieses Jahres beginnt das Einstromjahr,
- Endjahr im Juni dieses Jahres endet das Einstromjahr.

Beim Einstromjahr 1992/93 (Tab. 5.1) ist 1991 das Vorjahr, 1992 das Anfangsjahr und 1993 das Endjahr, beim Einstromjahr 1993/94 (ohne Salzwassereinbruch) ist 1992 das Vorjahr, 1993 das Anfangsjahr und 1994 das Endjahr. Mit Hilfe dieser Einteilung lassen sich generelle Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne bereits 18 Monate vor Beginn und noch 6 Monate nach Ende des Einstromjahres erkennen.

Durch die Ausdehnung des untersuchten Zeitraums auf drei Jahre gehen in die Berechnung noch Informationen über das Auftreten von Salzwassereinbrüchen in den Einstromjahren 1898/99 und 1993/94 ein. Auf Grund von Lücken im Datenmaterial und der etwas unterschiedlichen Zeiträume, die den Mitteln der drei Jahre zugrundeliegen, kommen bei den einzelnen Größen Unterschiede in der Anzahl der in den Vergleich eingehenden Werte vor. Das gilt hauptsächlich für den Salzgehalt von Gedser Rev in 15 und 20 m Tiefe, teilweise auch für die Salzgehalte in den drei anderen Tiefen sowie die Flußwasserzufuhr.

5.2 Bodendruckverhältnisse im nordatlantisch-europäischen Raum

In Abb. 5.1 sind die mittleren Anomalien des Bodendruckfeldes im Zeitraum von August bis Oktober in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und in solchen ohne dargestellt. Am auffälligsten sind die hohen, großräumigen Anomalien über dem Ostseegebiet im Oktober (positiv in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen, negativ in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche). Sie sind aber auch schon im September und August vorhanden und deuten sich bereits im Juli an, ohne aber signifikant zu sein. Während das Anomaliezentrum bis August östlich von Skandinavien zu finden ist, liegt es im September und Oktober direkt über Südschweden. Zeitgleich zu den Luftdruckanomalien über dem Ostseegebiet treten im September im grönländisch-isländischen Raum und im Oktober über dem zentralen Nordatlantik Anomalien mit entgegengesetztem Vorzeichen auf. Die positiven Anomalien über dem Ostseegebiet erreichen im Oktober der Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen Werte bis zu +1,3 hPa, dem stehen im Oktober der Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche Werte von bis zu -3,3 hPa gegenüber. Daraus folgt, daß es *für das Auftreten von Salzwassereinbrüchen sehr günstig ist, wenn vom Spätsommer bis zum Herbst das Ostseegebiet unter Hochdruckeinfluß steht*. Analog dazu sind Salzwassereinbrüche nur selten zu erwarten, wenn in diesem Zeitraum

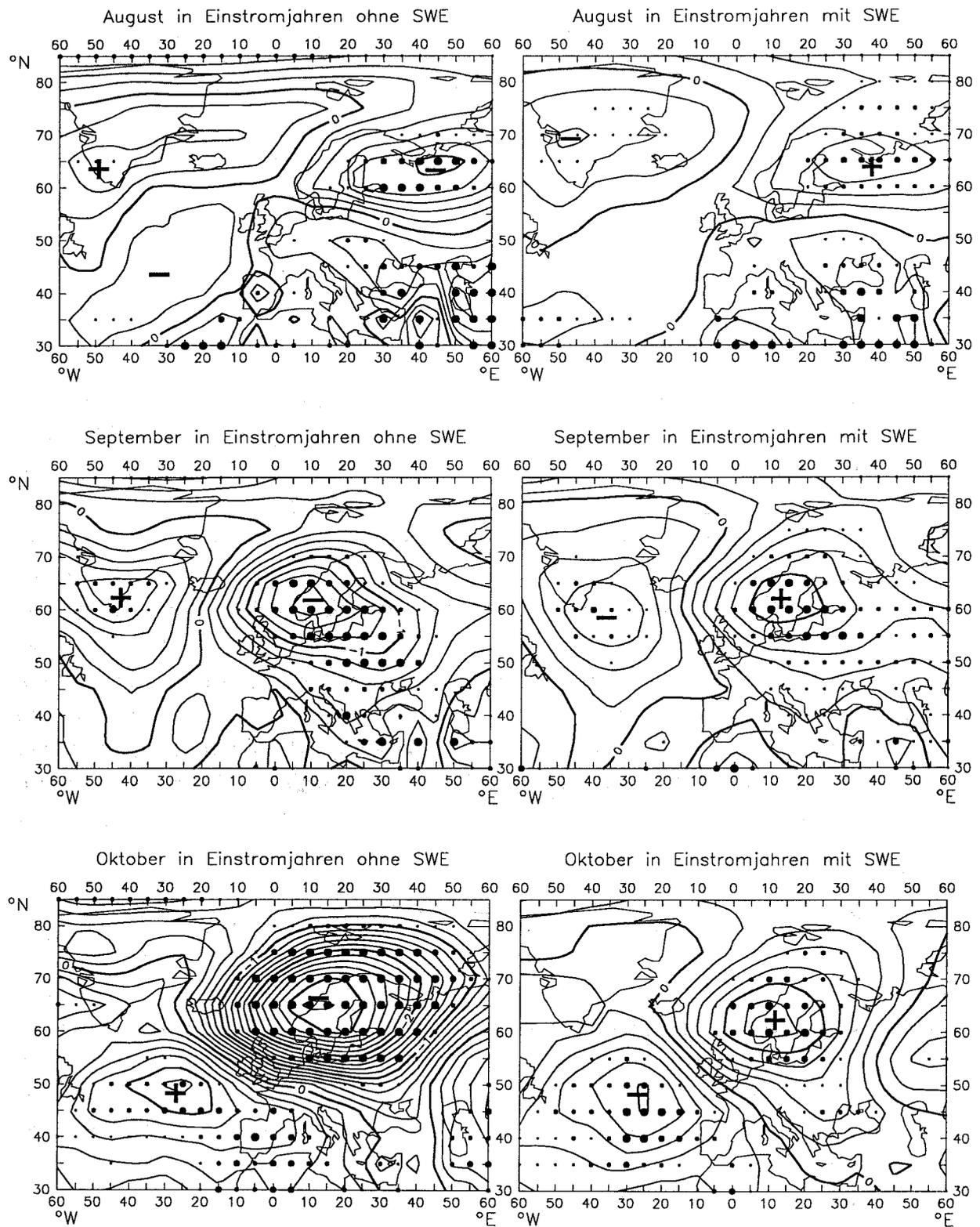


Abb. 5.1: Mittlere Anomalien des Bodendruckfeldes von August bis Oktober in Einstromjahren ohne Salzwassereintrüche und in Einstromjahren mit Salzwassereintrüchen; die Kreise stellen das Niveau dar (95 % - kleinster Kreis, 99 %, 99,9 % und 99,99 % - größter Kreis), auf dem die Anomalien signifikant von 0 verschieden sind (t-Test, SCHÖNWIESE 1992); Isobarenabstand: 0,2 hPa

verstärkt Tiefdruckgebiete über dem Ostseegebiet auftreten. Die mittleren Anomalien in Einstromjahren ohne Salzwassereintrüche sind betragsmäßig meist höher, was in erster Linie damit zusammenhängt, daß sie aus weniger Werten gebildet wurden.

Während die Bodendruckanomalien von Juli bis Oktober eine ähnliche Struktur aufweisen, sehen die Verhältnisse für die restlichen Monate, in denen gehäuft Salzwassereinbrüche auftreten (November bis Februar), gänzlich anders aus. Da die Anomalien in diesem Zeitraum von Monat zu Monat starken Variationen unterliegen, sie meist nur im Bereich weniger Gitterpunkte signifikant sind und das Signifikanzniveau ohnehin nur relativ niedrig ist, kann man sie als unrelevant für Salzwassereinbrüche einschätzen. Außerdem ist es naheliegend, daß wesentliche Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne vor oder zu Beginn der Einstromsaison zu suchen sind. Unterschiede im Bodendruckfeld, die längerfristige Variationen noch vor Beginn des Einstromjahres berücksichtigen (Fernwirkungen, insbesondere über dem Nordatlantik), werden in Kap. 6 behandelt.

Generell zeigt dieser Vergleich, daß von einem gehäuften Auftreten der typischen Einstromwetterlage (siehe Abschn. 4.3) in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen nicht die Rede sein kann. Ganz im Gegenteil ist es so, daß in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen diese Situation im Spätherbst und Winter genauso häufig auftritt und im Spätsommer und Herbst eher seltener vorhanden ist. Diesen Schluß kann man ziehen, da die Druckanomalien am ersten Tag eines Salzwassereinbruchs (siehe Abb. 4.4) starke Ähnlichkeit mit den Druckanomalien im Oktober der Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche haben. Aus dem Dargelegten folgt (wie auch schon in Abschn. 4.13 erwähnt), daß ein vermehrtes Auftreten der Einstromwetterlage nicht zu einem gehäuften Auftreten von Salzwassereinbrüchen führt. Analog dazu kann ein vermindertes Auftreten der Einstromwetterlage nicht die alleinige Ursache des Ausbleibens von Salzwassereinbrüchen sein, da gerade in Einstromjahren mit vermindertem Auftreten dieser Wetterlage Salzwassereinbrüche vorkommen. Es zeigt sich auch hier, daß die Häufigkeit, mit der die Einstromwetterlage auftritt, nicht das entscheidende Kriterium für das Zustandekommen eines Salzwassereinbruchs ist.

5.3 Meteorologische und ozeanographische Größen im Ostseegebiet

In den Abb. 5.2 und 5.3 ist der Verlauf verschiedener meteorologischer bzw. ozeanographischer Größen im Vor-, Anfangs- und Endjahr im Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne dargestellt. In den folgenden Abschnitten soll näher auf die Unterschiede in beiden Kurven eingegangen werden, wobei mit den meteorologischen Größen (Abb. 5.2) als primäre Ursache der Änderungen in den ozeanographischen Größen begonnen wird.

5.3.1 Meteorologische Größen

Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet

Der Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet variiert von Monat zu Monat sehr stark, auch sonst sind teilweise große Unterschiede zwischen den beiden Kurven vorhanden. Im wesentlichen sind aber bei beiden in allen drei Jahren drei Maxima beim Jahresgang vorhanden: von

Januar bis März, im Mai und im September/Oktober. In Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche ist kein Herbstmaximum erkennbar, während es in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen ausgesprochen hoch ist. Auf diese signifikanten Unterschiede im Bodendruckfeld im September und Oktober (bis ca. 3 hPa) wurde bereits im vorigen Abschnitt hingewiesen. Auch im Juni vor dem Einstromjahr sind signifikant höhere Druckwerte in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen zu verzeichnen. In den Monaten Juli und August gibt es keine signifikanten Unterschiede. Da aber in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen auch in diesen zwei Monaten höhere Druckwerte auftreten, kann man die Unterschiede ebenfalls mit dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen in Verbindung bringen. Zusammenfassend ergibt sich übereinstimmend mit den Aussagen aus Abschn. 5.2, daß ein hoher Luftdruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet von Juni bis Oktober begünstigend für Salzwassereinbrüche wirkt.

Geostrophischer Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich

Bei der u-Komponente des geostrophischen Windes zeigen sich ebenfalls von Juni bis Oktober des Anfangsjahres meistens signifikante Unterschiede. Vor bzw. in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen ist sie in diesem Zeitraum um ca. 0,6 bis 1,7 m/s niedriger (d. h. Abschwächung der Westwinde bzw. häufigeres Auftreten von Ostwinden). Auch hier sind die maximalen Differenzen im Oktober zu finden. Unterschiede in anderen Monaten - teilweise in derselben Größenordnung - sind nicht signifikant. Die v-Komponente des geostrophischen Windes zeichnet sich durch keinerlei signifikante Unterschiede aus, die im Zusammenhang mit Salzwassereinbrüchen stehen könnten. Allerdings sind hier von November bis Januar durchgehend höhere Werte in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen zu erkennen, was für eine Verstärkung der Südkomponente in diesen Monaten spricht. Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant, und eine Betrachtung der Druckanomalien zeigt, daß sie in den einzelnen Monaten durch unterschiedliche Druckmuster hervorgerufen werden. Der Betrag des geostrophischen Windes weist nur vereinzelt signifikante Unterschiede auf, die offensichtlich mit Salzwassereinbrüchen zusammenhängen (Juli, Oktober). Die größten Differenzen finden sich im Oktober mit ca. 0,9 m/s.

MSI

Die Differenzen zwischen den beiden Kurven beim absoluten und beim relativen MSI sind dieselben, ersterem ist noch der Jahresgang überlagert. Signifikante Unterschiede gibt es nur im Oktober des Einstromjahres, in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen treten hier niedrigere Werte auf (siehe auch Abschn. 5.2). Die Unterschiede im Zeitraum Juni bis September sind nur gering und nicht signifikant.

Niederschlag im Ostsee-Einzugsgebiet

Bedingt durch den Hochdruckeinfluß im Ostsee-Einzugsgebiet im Herbst der Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen, kommt es durchgehend von August bis Oktober zu geringeren Niederschlägen. Diese Unterschiede im Vergleich zu Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche sind im Oktober signifikant und erreichen hier Werte von ca. 15 mm. Die Unterteilung in ein nördliches und ein südliches Ostsee-Einzugsgebiet zeigt, daß die Unterschiede im südlichen Teil nur im September und Oktober auftreten. Im nördlichen Teil hingegen sind sie von Juni bis

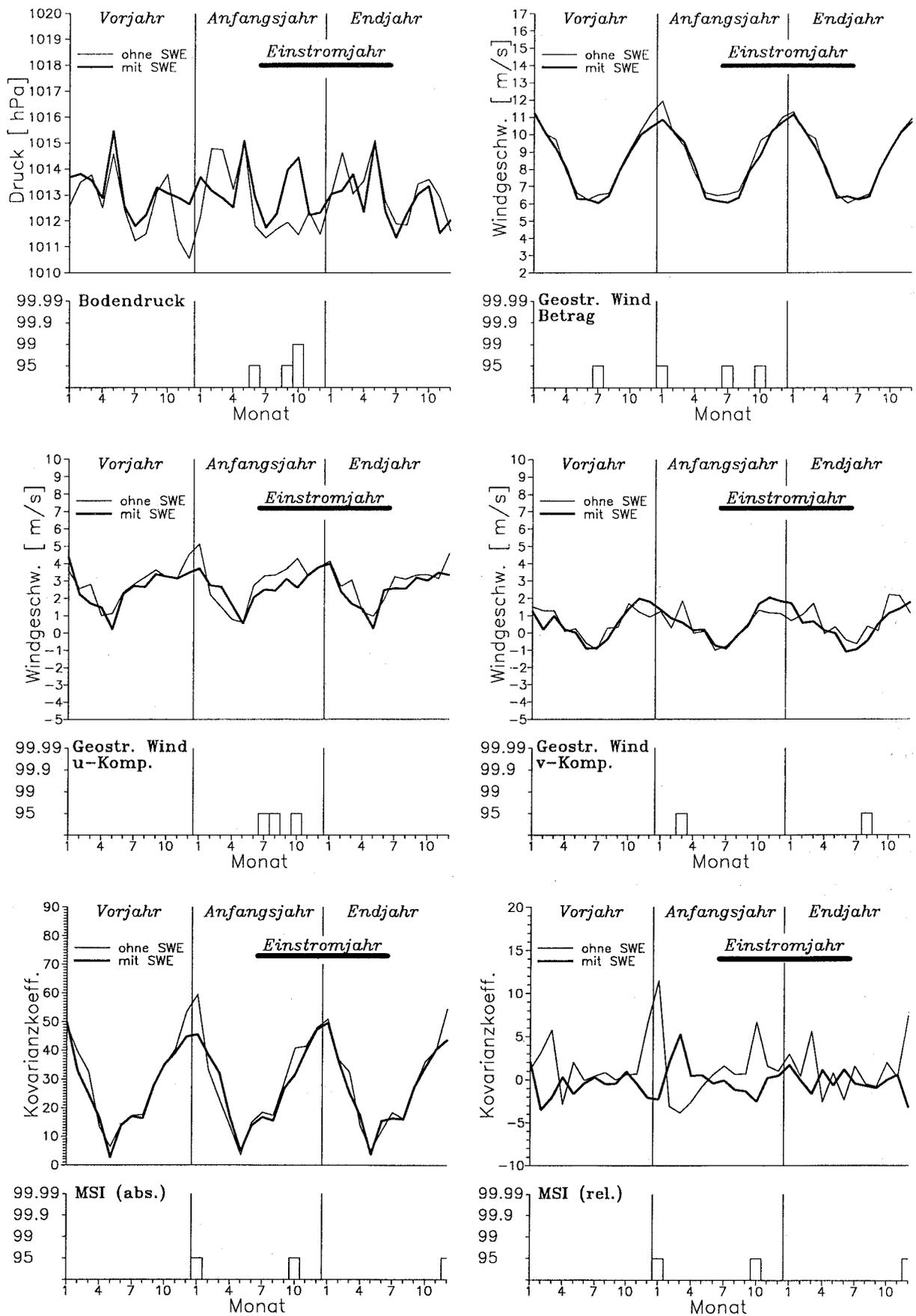


Abb. 5.2: Mittlerer Verlauf einiger meteorologischer Größen im Vor-, Anfangs- und Endjahr im Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne Salzwassereinbrüche; die Säulen geben das Signifikanzniveau an, auf dem sich die Monatsmittel voneinander unterscheiden

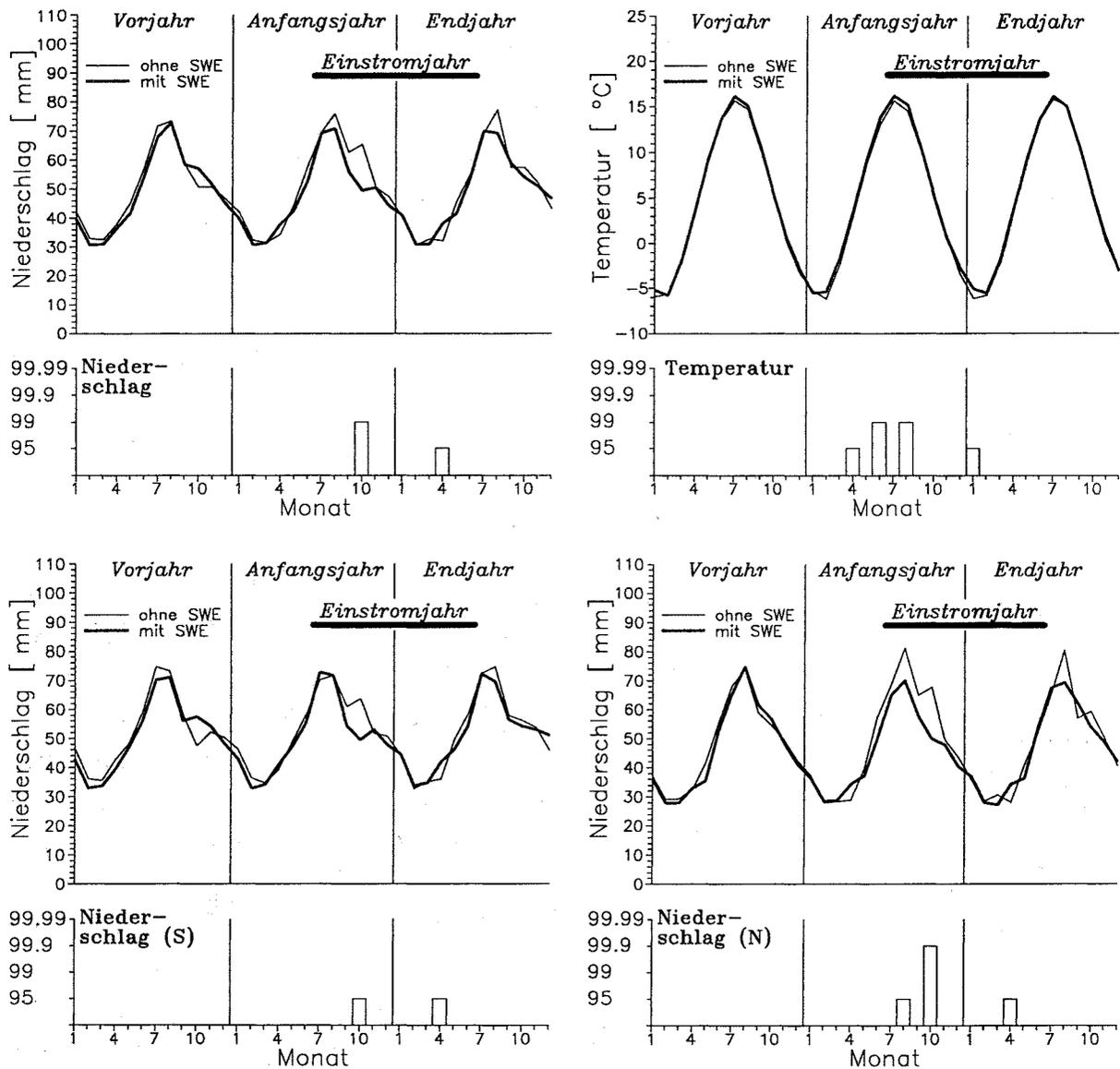


Abb. 5.2: (Fortsetzung)

Oktober festzustellen, im Juni und Juli sind sie aber nur gering. Die größten Unterschiede sind im August und Oktober zu verzeichnen.

Temperatur im Ostsee-Einzugsgebiet

Auch bei der Lufttemperatur im Ostsee-Einzugsgebiet sind geringfügige Unterschiede feststellbar. In den Sommermonaten vor bzw. zu Beginn des Einstromjahres sind offenbar höhere Temperaturen günstig für das Eintreten von Salzwassereintrüben im darauffolgenden Herbst bzw. Winter. Diese Unterschiede fallen zwar im Vergleich zum Jahresgang sehr gering aus (max. 0,8 K), sind aber im Juni und August signifikant.

5.3.2 Ozeanographische Größen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereintrüben und solchen ohne Salzwassereintrübe bei meteorologischen Größen dargelegt wurden, soll nun deren Wirkung auf verschiedene ozeanographischen Größen gezeigt werden (Abb. 5.3).

Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser

Durch den Hochdruckeinfluß im Ostsee-Einzugsgebiet sowie die Abschwächung der Westkomponente des Windes ist der Wasserstand der Ostsee vor bzw. in Einstromjahren mit Salzwassereintrüben von Juni bis Dezember deutlich niedriger (signifikant im Juni, September und Oktober). Besonders groß sind die Differenzen auch hier im Oktober mit ca. 10 cm.

An den Pegeln Hornbaek und Gedser sind niedrigere Wasserstände von August bis Dezember/Januar in Einstromjahren mit Salzwassereintrüben zu beobachten. Dies ist einerseits eine Folge der Abschwächung der Westkomponente des Windes, die mit einem geringeren Windstau im Skagerrak und Kattegat einhergeht. Andererseits führt die geringere Westkomponente zusammen mit dem erhöhten Luftdruck zu einem niedrigeren Wasserstand der Ostsee und damit auch zu niedrigeren Wasserständen in der westlichen Ostsee. Beachtenswert sind die signifikanten Unterschiede am Pegel Gedser noch im November, in dem der maximale Unterschied mit mehr als 7 cm auftritt, und im Dezember. Auch beim Wasserstand der Ostsee und beim Pegel Hornbaek sind in diesen Monaten noch deutliche (aber nicht signifikante) Unterschiede erkennbar, obwohl die meteorologischen Größen ab November keine Unterschiede mehr aufweisen. Das scheint - nach den bisher behandelten Größen zu urteilen - eine Folge der im Herbst der Einstromjahre ohne Salzwassereintrübe verstärkt in die Ostsee gelangten Wassermassen zu sein, die im Winter nun allmählich zurückfließen und so zu einem Stau in der westlichen Ostsee führen. Da in den Wintern dieser Einstromjahre aber keine verstärkten Ostwinde zu beobachten sind, erfolgt der Ausstrom der Wassermassen langsamer als ihr Einstrom. Eine andere (wahrscheinlichere) Erklärung erfolgt weiter unten im Abschnitt zur Flußwasserzufuhr.

Bei der Wasserstandsdifferenz zwischen Hornbaek und Gedser zeigen sich im Mittel keinerlei signifikante bzw. systematische Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereintrüben und solchen ohne. Hieraus kann man schließen, daß die mittlere Wasserstandsdifferenz keine Aussagen über günstige oder ungünstige Verhältnisse für das Auftreten von Salzwassereintrüben liefert. Für günstige Verhältnisse sind allein niedrige Wasserstände von Hornbaek und Gedser notwendig. Dies stellt allerdings nicht die Tatsache in Frage, daß ein Salzwassereintrübe prinzipiell nur bei einer mehrtägigen Andauer einer positiven Differenz erfolgen kann, die aber offensichtlich mit einem generell niedrigen Pegelstand verbunden sein muß.

Salzgehaltsverhältnisse am Feuerschiff Gedser Rev

Am auffälligsten bei den Salzverhältnissen an der Oberfläche (0 m), in 5 m und 10 m Tiefe sind die signifikant höheren Werte von November bis Januar in Einstromjahren mit Salzwasser-

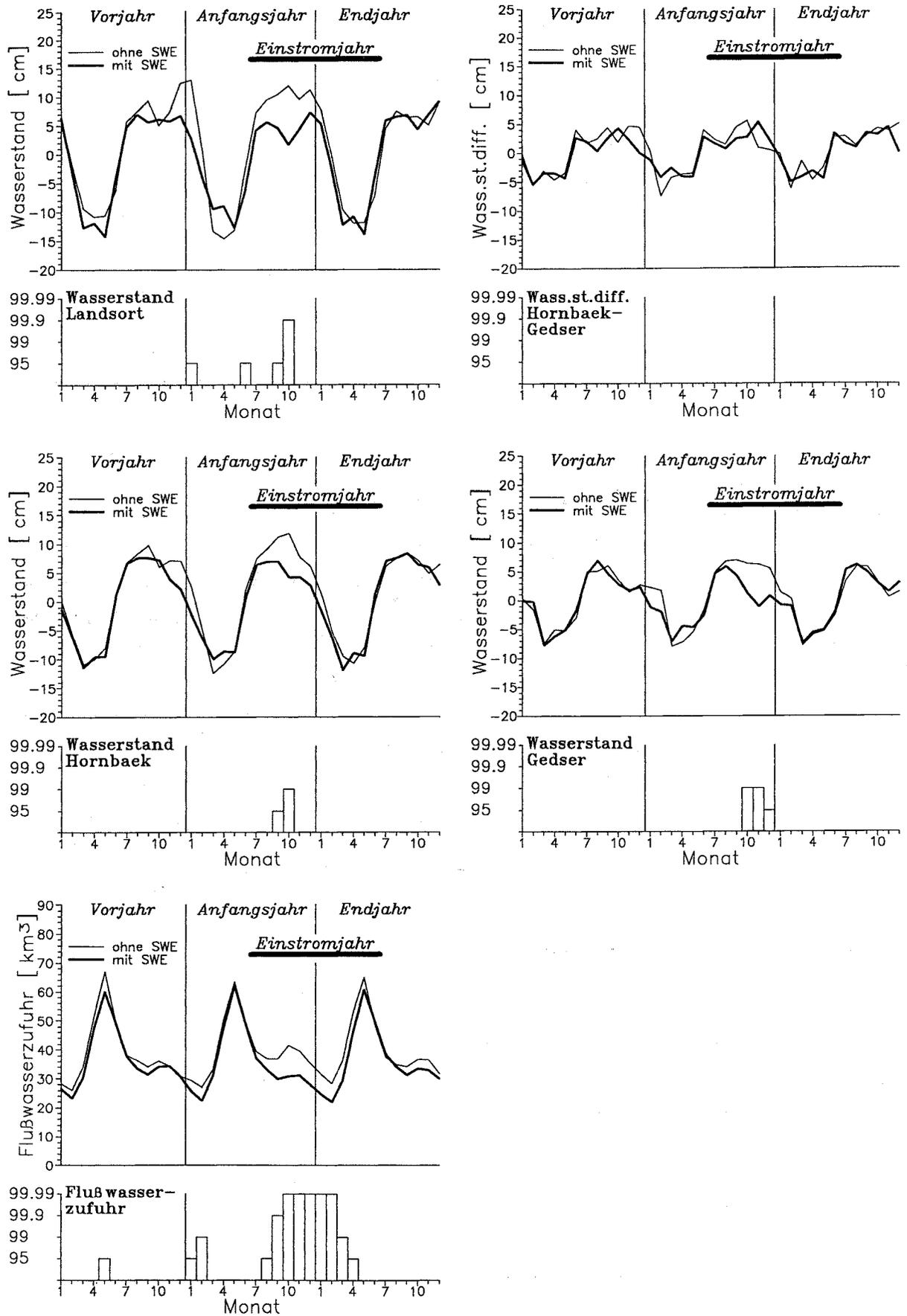
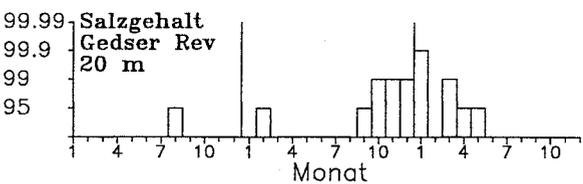
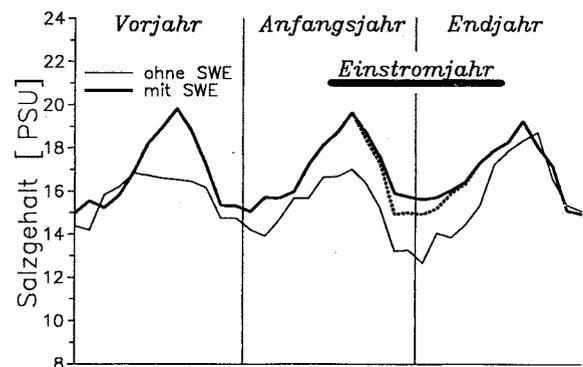
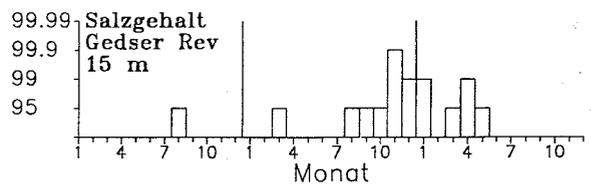
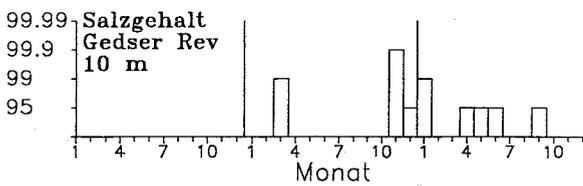
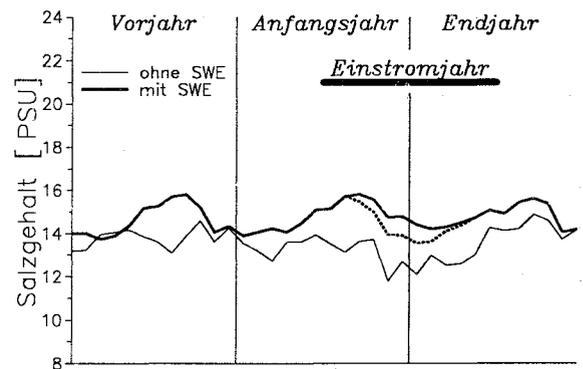
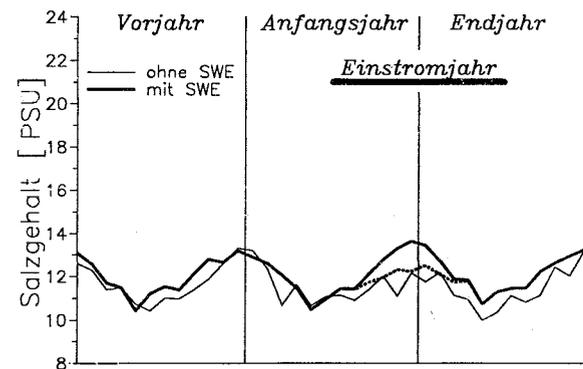
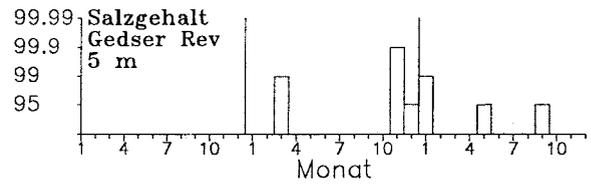
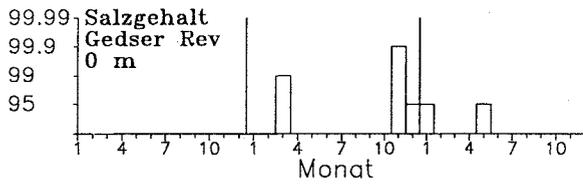
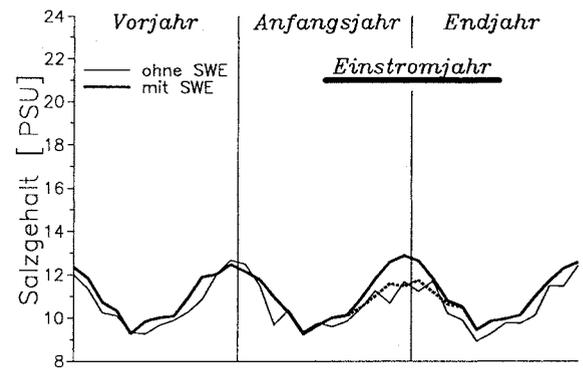
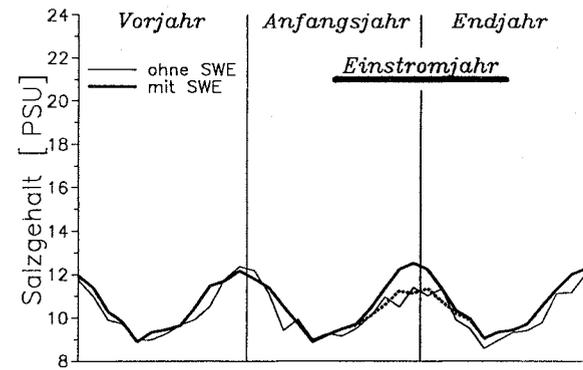


Abb. 5.3: Mittlerer Verlauf einiger ozeanographischer Größen im Vor-, Anfangs- und Endjahr im Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereintrüben und solchen ohne Salzwassereintrübe; die gepunktete Linie beim Salzgehalt stellt das Mittel der Einstromjahren mit Salzwassereintrüben dar,



das nur aus den Monaten ohne Salzwassereinträge (nach Abschn. 4.12) berechnet wurde; die Säulen geben das Signifikanzniveau an, auf dem sich die Monatsmittel voneinander unterscheiden

einbrüchen. Diese Unterschiede haben ihr Maximum im November (1,7 bis 2,2 PSU) und nehmen mit der Tiefe zu. Hierfür bieten sich zwei Erklärungsmöglichkeiten:

1. Die höheren Werte in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen werden durch die Einbrüche an sich hervorgerufen, da im Zeitraum November bis Januar die meisten Einbrüche stattfinden und während solcher Ereignisse der Salzgehalt in diesen Tiefen wesentlich höher als gewöhnlich ist.
2. Die niedrigeren Werte in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche werden durch das verstärkt aus der Ostsee ausströmende Wasser verursacht, das quantitativ dem von Juli bis Oktober zusätzlich in die Ostsee gelangten entspricht. Im Zeitraum von Oktober bis Januar verringern sich - ohne atmosphärisch angeregte Prozesse - die Unterschiede im Wasserstand der Ostsee zwischen Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und solchen mit Salzwassereinbrüchen (Tab. 5.2). Das weist ebenfalls auf den verstärkten Ausstrom in diesen Monaten in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche hin, was zu einer Abnahme im Salzgehalt führen könnte.

Monat	Differenz [cm]	Änderung zum Vormonat [cm]
Juli	3,0	
August	3,9	+0,9
September	5,8	+1,9
Oktober	10,2	+4,4
November	5,2	-5,0
Dezember	3,9	-1,3
Januar	2,5	-1,4
Februar	2,3	-0,2
März	2,6	+0,3

Tab. 5.2: Differenz zwischen dem Wasserstand der Ostsee in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen sowie Änderung dieser Differenz zum Vormonat; positive Werte bedeuten verstärkten Einstrom, negative bedeuten verstärkten Ausstrom in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche

Eine Antwort auf diese Frage gibt ein Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne Salzwassereinbrüche, wobei in ersteren die Monate ausgeschlossen werden, in denen mindestens ein Tag zu einem Salzwassereinbruch gehört (gepunktete Kurve, vergleiche Abschn. 4.12). Ein solcher Vergleich zeigt, daß die Unterschiede im Salzgehalt fast ausschließlich auf die höheren Salzgehalte, die bei Salzwassereinbrüchen auftreten, zurückzuführen sind (These 1). Nur im November, dem Monat des stärksten zusätzlichen Ausstromes in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche, sind in allen drei Tiefen noch größere Unterschiede erkennbar, die aber nur in 10 m Tiefe signifikant sind (ca. 1,2 PSU). Ein Vergleich mit den Nachbarmonaten zeigt, daß dieser Unterschied hauptsächlich durch besonders niedrige Werte in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche verursacht wird. Dies würde - wenn auch nur in geringem Umfang - für These 2 sprechen.

Die Salzverhältnisse in 15 m und 20 m Tiefe weisen ein weitaus komplexeres Verhalten auf als die in 0 m, 5 m und 10 m Tiefe. Hier sind von August bzw. September bis Januar durchgehend signifikant höhere Salzgehalte in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen zu finden, ebenso von März bis Mai. Generell treten diese deutlichen Unterschiede im gesamten Einstromjahr auf. Auch wenn man in der Betrachtung analog zu den drei anderen Schichten die Monate mit Salzwassereinbrüchen ausläßt (gepunktete Kurve), zeigen sich diese Unterschiede, die dann zwar seltener, aber doch noch relativ häufig signifikant sind. Hieraus kann man den Schluß ziehen, daß die Unterschiede nicht in erster Linie durch die Salzwassereinbrüche zustande kommen, sondern durch andere Faktoren mitbestimmt werden. Auffällig sind auch die großen Unterschiede im Sommer (insbesondere im August), die sogar im Vorjahr auftreten, aber sowohl in diesem als auch im Anfangsjahr nur selten signifikant sind. Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse muß allerdings einschränkend berücksichtigt werden, daß die Datenbasis für die Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen bei ca. 35 Werten lag, wohingegen sie für die Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche nur bei ca. 13 Werten lag. Deshalb sollte man die letzteren Mittel nur mit Vorbehalt betrachten. Trotzdem haben die Differenzen in allen Monaten des "Voreinstromjahres" (Juli des Vorjahres bis Juni des Anfangsjahres) und des Einstromjahres dasselbe Vorzeichen, was wiederum für ihre Realität spricht.

Im Gegensatz zu den Verhältnissen in den drei oberen Schichten wird das in den zwei tiefen Niveaus einströmende Wasser von den Salzverhältnissen im Kattegat geprägt, so daß sich die Salzverhältnisse in der Tiefenschicht nicht ohne weiteres aus den bisher dargelegten Ergebnissen erklären lassen. Höhere Salzgehalte im Tiefenwasser des Kattegats und ihr weites Vordringen in die Belte wurden bereits von verschiedenen Autoren als günstig für Salzwassereinbrüche betrachtet und teilweise mit Änderungen in der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik in Verbindung gebracht (u. a. WYRTKI 1954a; DICKSON 1971, 1973; BÖRNGEN 1978b, 1983; siehe hierzu Abschn. 2.3).

Zunächst kann man die hohen Unterschiede im Salzgehalt im Sommer als unabhängig vom Auftreten von Salzwassereinbrüchen betrachten, da sie in etwa gleicher Größenordnung sowohl im Vorjahr als auch im Anfangsjahr auftreten und nur selten signifikant sind. Dies liegt hauptsächlich daran, daß die Variabilität des Bodensalzgehaltes im Sommer ziemlich groß ist. Weiterhin haben die Unterschiede im Winter zwischen dem Vor- und dem Anfangsjahr zwar dasselbe Vorzeichen, sind aber von der Größe her unbedeutend und auch nicht signifikant. Letztendlich bleiben die Ursachen der erhöhten Salzwerte in den Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen zu klären. Geht man davon aus, daß zum Auftreten von Salzwassereinbrüchen Fernwirkungen nach DICKSON (1971, 1973) bzw. BÖRNGEN (1978b, 1983) notwendig sind, so müßte in den Monaten vor Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen eine höhere Südkomponente der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik feststellbar sein. In Kap. 6 wird gezeigt, daß dem nicht so ist bzw. dies nur sehr eingeschränkt gilt. Weiterhin muß man bedenken, daß die von DICKSON und BÖRNGEN beschriebenen Variationen im Tiefenwasser des Kattegats geringer sind als die hier dargelegten und deshalb nur schwerlich diese erhöhten Werte verursachen können. Möglicherweise gehen diese erhöhten Salzgehalte aber auf ein verändertes Ein- und Ausstromverhalten zurück, ohne daß im Tiefenwasser des

Kattegats nennenswerte Variationen auftreten. So ist es denkbar, daß sich durch einen durchgehend verstärkten Ausstrom in der Oberschicht in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche (erhöhte Flußwasserzufuhr, siehe dazu nächster Abschnitt) im Mittel der Kompensationsstrom im Tiefenwasser abschwächt bzw. seine vertikale Mächtigkeit oder sein Salzgehalt abnimmt. Rechnungen mit statistischen Modellen (siehe hierzu Abschn. 5.7) ergeben, daß der Niederschlag und die Flußwasserzufuhr im Herbst ca. 30 bis 40 % der Varianz des Tiefensalzgehaltes erklären, der generell eine hohe Persistenz aufweist (50 % der Varianz können im Herbst mit dem Salzgehalt der zwei Vormonate erklärt werden). Diese Modelle zeigen auch, daß eine höhere Flußwasserzufuhr einen niedrigeren Salzgehalt in der Tiefenschicht der Darßer Schwelle zur Folge hat.

Flußwasserzufuhr

Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen zeichnen sich durch eine geringere Flußwasserzufuhr in nahezu allen Monaten aus. Besonders auffällig ist, daß diese Unterschiede von August bis April durchgehend signifikant und von Oktober bis Februar sogar hochsignifikant sind (Signifikanzniveau 99,99 %). Damit ist die Flußwasserzufuhr die einzige Größe, die in allen Monaten, in denen Salzwassereinbrüche auftreten, signifikante Unterschiede aufweist. Die erhöhte Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche ist bei den Salzgehaltsverhältnissen der Oberschicht (0 m bis 10 m) an der Darßer Schwelle nicht erkennbar, möglicherweise aber im Tiefenwasser (siehe voriger Abschnitt). Sie wird daher wahrscheinlich auch nicht durch eine Verschiebung der Salzfronten an der Oberfläche wirksam, sondern kann nur über einen verstärkten Ausstrom und die damit verbundene Abschwächung des Tiefeneinstromes und/oder eine zusätzliche Erhöhung des Wasserstandes der Ostsee das Auftreten von Salzwassereinbrüchen behindern.

Zunächst bleibt die Frage zu klären, warum die unterschiedlichen Werte der Flußwasserzufuhr keine Unterschiede im Oberflächensalzgehalt am Feuerschiff Gedser Rev bewirken. Der Salzgehalt in den oberen Schichten von Gedser Rev hat eine mittlere jährliche Variationsbreite von etwa 3 PSU, die Flußwasserzufuhr schwankt im Mittel zwischen 24 km³ (Februar) und 62 km³ (Mai), was einer Differenz von 38 km³ entspricht. Ein Unterschied in der Flußwasserzufuhr von 1 km³ bringt also eine mittlere maximale Änderung des Oberflächensalzgehaltes von Gedser Rev von 0,08 PSU mit sich. Die größten Unterschiede in der Flußwasserzufuhr zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne treten im Oktober (10,7 km³) und November (8,4 km³) auf und liegen sonst von September bis April bei 6 bis 7 km³. Dies würde maximale Unterschiede im Oberflächensalzgehalt von Gedser Rev in der Größenordnung 0,65 bis 0,85 PSU verursachen, in den anderen Monaten würden sie bei 0,5 PSU liegen. Da die Salzgehaltsverhältnisse von Gedser Rev aber auch sehr stark von den Windverhältnissen abhängen und nicht nur durch die Flußwasserzufuhr geprägt werden, ist es erklärlich, daß diese deutlichen Unterschiede in der Flußwasserzufuhr nicht im Salzgehalt erkennbar sind. Das gilt um so mehr, da in den Herbstmonaten ohne Salzwassereinbrüche durch die verstärkten Westwinde die Salzfronten etwas in Richtung Ostsee verschoben sein dürften.

Das Druck- und Windfeld sowie die Flußwasserzufuhr bestimmen das Ein- und Ausstromverhalten im Übergangsgebiet zur Nordsee. In der Wasserbilanz der Ostsee sind Niederschlag und Verdunstung relativ ausgeglichen, daher wird die Süßwasserbilanz (Niederschlag - Verdunstung + Flußwasserzufuhr = 481 km³, siehe hierzu Abschn. 2.2) hauptsächlich von der Flußwasserzufuhr bestimmt. Deshalb kann man davon ausgehen, daß der Nettoausstrom im Mittel in etwa der Flußwasserzufuhr entspricht. Dies muß auch für die Mittel der Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen und die Mittel der Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche gelten. Hieraus folgt, daß der Nettoausstrom in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen deutlich geringer sein muß als in Einstromjahren ohne solche Ereignisse. Insbesondere für den Zeitraum von November bis April, in dem sich bei den meteorologischen Größen keine Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne zeigen, kann man davon ausgehen, daß die Atmosphäre direkt kein verändertes Ein- und Ausstromverhalten verursacht. Zu diesem normalen Wechsel von Ein- und Ausstromsituationen kommt die höhere Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche hinzu, die den Wasseraustausch in den Belten und im Sund in Richtung eines erhöhten Ausstromes modifiziert. In Tab. 5.3 ist das Verhältnis der Flußwasserzufuhr zwischen Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen dargestellt. In Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche ist die Flußwasserzufuhr und damit der Nettoausstrom von September bis März um den Faktor 1,2 bis 1,3 erhöht. Es kann keinen Zweifel darüber geben, daß diese Erhöhung des Nettoausstromes und damit auch der mittleren Ausstromgeschwindigkeit die hydrographischen Verhältnisse in den Belten und im Sund modifiziert. So ist es denkbar, daß in solchen Einstromjahren z. B. ein kurzes Nachlassen in der Stärke des Windes bewirkt, daß das salzärmere Ostseewasser die Salzfronten schneller wieder in Richtung Skagerrak zurückdrängt, was einen Salzwassereinbruch unwahrscheinlicher macht. Die Wirkung auf den Tiefeneinstrom wurde bereits erwähnt.

Monat	NOSWE-SWE [km ³]	NOSWE-SWE [cm]	NOSWE/SWE
Juli	2,2	0,6	1,06
August	3,8	1,0	1,12
September	6,9	1,8	1,23
Oktober	10,7	2,8	1,35
November	8,4	2,2	1,27
Dezember	7,3	1,9	1,26
Januar	6,9	1,8	1,28
Februar	6,3	1,7	1,29
März	6,9	1,8	1,24
April	6,7	1,8	1,15
Mai	4,2	1,1	1,07
Juni	-1,1	-0,3	0,98

1 km³ = 0,265 cm

Tab. 5.3: Differenz und Quotient zwischen der Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche (NOSWE) und der Flußwasserzufuhr in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen (SWE); die Differenz wurde als Absolutwert (km³) und umgerechnet auf den Wasserstand der Ostsee (cm) angegeben

Betrachtet man die Differenzen beim Wasserstand der Ostsee zwischen Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und solchen mit Salzwassereinbrüchen in Tab. 5.2, so stellt man fest, daß

die Erhöhung der Wasserstands-differenz von Juli bis Oktober (7,2 cm) in etwa der zusätzlichen Flußwasserzufuhr (erhöht den Wasserstand der Ostsee im selben Zeitraum theoretisch um 6,2 cm) entspricht. Hieraus ergibt sich die Hypothese, daß die erhöhten Wasserstände in der Ostsee in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche zwar durch eine verstärkte Tiefdruck-tätigkeit mit einer erhöhten Westkomponente des Windes verursacht werden, der *erhöhte Wasserstand* aber nicht durch vermehrten Einstrom, sondern *durch den Anstau der höheren Flußwasserzufuhr verursacht* wird. Dies bedeutet, daß eine verstärkte Zonalströmung vom Hochsommer bis zum Herbst der Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche die Ein- und Ausstromverhältnisse kaum modifiziert, so daß es im Mittel in diesem Zeitraum weder zu erhöhtem Ein- noch zu erhöhtem Ausstrom kommt, dafür aber der Wasserstand der Ostsee durch die erhöhte Flußwasserzufuhr steigt. Von November an erfolgt dann durch den Abbau des höheren Wasserstandes der Ostsee, hauptsächlich aber auch wieder durch die Flußwasser-zufuhr, ein wesentlich stärkerer Ausstrom. Diese zwei Prozesse wirken dem Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen entgegen.

Eisverhältnisse

Zwischen der maximalen winterlichen Eisausdehnung der Ostsee und dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Dies steht in Überein-stimmung mit der Tatsache, daß es keine Unterschiede bei der Lufttemperatur im Ostsee-Einzugsgebiet zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne gibt.

Schlußfolgerungen zur Dynamik von Ein- und Ausstrom

Die Tatsache, daß im Zeitraum des häufigsten Auftretens von Salzwassereinbrüchen (November bis Januar) keine Unterschiede im Druck- und Windfeld sowie bei der Wasser-stands-differenz Hornbaek-Gedser auftreten, führt zu der Annahme, daß es auch in der Dynamik von Ein- und Ausstrom in diesem Zeitraum keine bzw. nur unbedeutende Unter-schiede gibt, die von der Atmosphäre angeregt werden. Vielmehr liegt die Vermutung nahe, daß andere Faktoren die Dynamik von Ein- und Ausstrom modifizieren. Als erster wären hier die *höheren Wasserstände* zu nennen, die hauptsächlich von August bis Dezember in Einstrom-jahren ohne Salzwassereinbrüche auftreten und wahrscheinlich durch die erhöhte Flußwasser-zufuhr - in Zusammenhang mit einer verstärkten Westkomponente des Windes im Herbst - verursacht werden. Sie wirken schon an sich einem größeren Einstrom entgegen. Weiterhin ergibt sich der Schluß, daß die Dynamik von Ein- und Ausstrom von November bis Januar in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche durch einen verstärkten Ausstrom dieses zusätzlich vorhandenen Wassers sowie - während der gesamten Einstromsaison - durch die *erhöhte Flußwasserzufuhr* (zweiter Faktor) geprägt wird. Dies führt dazu, daß bei sonst gleichen atmosphärisch bedingten Verhältnissen keine Salzwassereinbrüche auftreten, da durch den verstärkten Ausstrom in der Oberschicht eine größere Kraft dem Einstrom entgegenwirkt und in der Tiefenschicht der Kompensationsstrom abgeschwächt wird. Es ist auch denkbar, daß sich durch den erhöhten Ausstrom relativ salzarmen Wassers in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche die Lage der Salzfronten in Richtung Skagerrak verschiebt - auch wenn dies an der Station Gedser Rev nicht erkennbar ist. Dies dürfte insbesondere für die Beltseefront gelten.

5.4 Zur besonderen Rolle der Flußwasserzufuhr - die wahrscheinliche Ursache für das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen von 1983 bis 1993

In Abschn. 5.3 wurde festgestellt, daß die Flußwasserzufuhr die einzige Größe ist, die von August bis April signifikante Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne aufweist. Es wurde auf das durchgehend hohe Signifikanzniveau bei diesen Unterschieden hingewiesen, das sonst bei keiner anderen Größe auch nur annähernd erreicht wird. Weiterhin erfolgte der Versuch, die Wirkungsweise dieser Unterschiede auf das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen zu klären. Da die Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren relativ hoch ist (Abb. 5.4), liegt es nahe, in ihr den Grund für das Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen in diesem Zeitraum zu suchen. Keine andere Zeitreihe zeigt in dem Jahrzehnt ein derart auffälliges Verhalten. Weil es aber möglich ist, daß die hohe Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren nur zufällig mit dem Ausbleiben der Salzwassereinbrüche zusammenfällt, wurde

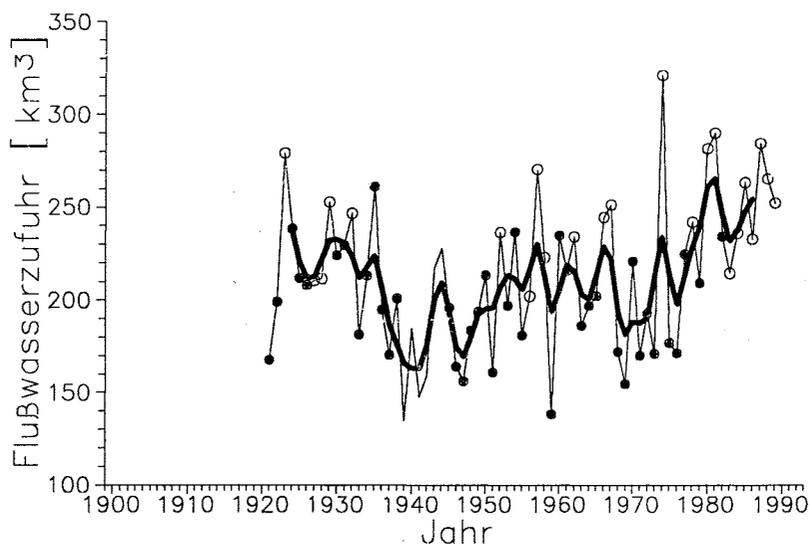


Abb. 5.4: Flußwasserzufuhr von 1921/22 bis 1989/90 (Gesamtabflußmenge von September bis März); die Jahreszahl bezieht sich auf das Jahr, in dem der September liegt; dicke Linie: Glättung mit Gaußschem Tiefpaßfilter der Grenzperiode 6 Jahre; ausgefüllte Kreise: Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen, leere Kreise: Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche

ein zweiter Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne für diese Größe für die Einstromjahre 1921/22 bis 1975/76 vorgenommen. Die Ergebnisse im Vergleich mit denen für den gesamten Zeitraum, für den Daten der Flußwasserzufuhr vorliegen, sind in Tab. 5.4 dargestellt. Die Unterschiede in je zwei gleichen Monaten sind sehr ähnlich, und von August bis März sind auch in dem verkürzten Zeitraum durchgehend signifikante Unterschiede erkennbar. Lediglich das Signifikanzniveau ist etwas niedriger. Dies ist eine Folge der deutlich reduzierten Anzahl von Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche im Zeitraum 1921/22 bis 1975/76. In der verkürzten Periode sind die Unterschiede von Juni bis Dezember etwas größer, von Januar bis April ist es genau umgekehrt. Dies dürfte eine Folge der zunehmenden Regulierung der Flußwasserzufuhr sein (siehe Abschn. 5.6).

	1921/22 bis 1989/90	Sig.	1921/22 bis 1975/76	Sig.
Juli	2,2		5,5	
August	3,8	95	5,5	95
September	6,9	99,9	7,2	99
Oktober	10,7	99,99	10,9	99,99
November	8,4	99,99	9,2	99,9
Dezember	7,3	99,99	8,2	99,9
Januar	6,9	99,99	5,8	99
Februar	6,3	99,99	4,8	99
März	6,9	99	5,0	95
April	6,7	95	5,6	
Mai	4,2		4,7	
Juni	-1,1		2,1	

Tab. 5.4: Unterschiede in der Flußwasserzufuhr zwischen Einstromjahren ohne Salzwassereintrüche und Einstromjahren mit Salzwassereintrüchen im Zeitraum 1921/22 bis 1989/90 bzw. 1921/22 bis 1975/76 (Angaben in km³) sowie Niveau (95 %, 99 %, 99,9 % oder 99,99 %), auf dem die Unterschiede signifikant sind

Für die Bedeutung einer niedrigen Flußwasserzufuhr beim Auftreten von Salzwassereintrüchen spricht auch die Tatsache, daß diese in Gruppen vorkommen, d. h., pro Einstromjahr mit Salzwassereintrüchen gibt es meist nicht nur einen, sondern es treten mehrere auf. Meteorologische Größen zeigen im allgemeinen keine Persistenz über mehrere Monate, anders sieht es bei der Flußwasserzufuhr aus. Sie ist durch eine hohe Autokorrelation (Persistenzneigung) gekennzeichnet (siehe Abschn. 5.7).

Ein Vergleich der Rangfolge der Flußwasserzufuhr in den 69 Einstromjahren 1921/22 bis 1989/90 - nach der Gesamtabflußmenge von September bis März in aufsteigender Folge geordnet - mit der jeweiligen Anzahl von Salzwassereintrüchen verdeutlicht noch einmal den engen Zusammenhang zwischen der Flußwasserzufuhr und dem Auftreten von Salzwassereintrüchen (Abb. 5.5). So liegt der stärkste beobachtete Salzwassereintruch im

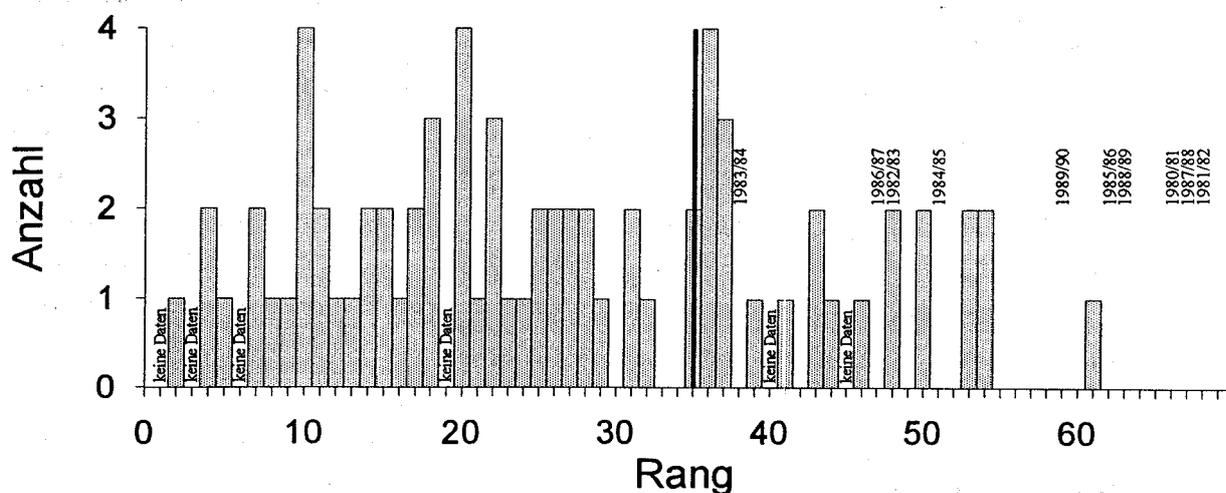


Abb. 5.5: Salzwassereintrüche pro Einstromjahr dargestellt über dem Rang der nach der Gesamtabflußmenge von September bis März in aufsteigender Folge geordneten Flußwasserzufuhr in den 69 Einstromjahren 1921/22 bis 1989/90; die Linie markiert den Median; beschriftet sind die Säulen der Einstromjahre in den 80er Jahren (1980/81 bis 1989/90)

November/Dezember 1951 an 7. Stelle bei der Flußwasserzufuhr, der zweitstärkste im betrachteten Zeitraum im Dezember 1975/Januar 1976 an 15. Stelle und der drittstärkste im Oktober/November 1969 an 4. Stelle. Der viertstärkste und damit letzte sehr starke Einbruch im Zeitraum 1921/22 bis 1989/90 im Dezember 1921/Januar 1922 liegt an 9. Stelle. Damit treten sehr starke Salzwassereinbrüche nur in Einstromjahren mit einer sehr geringen Flußwasserzufuhr auf (unterstes Quartil). In den 29 Einstromjahren mit der geringsten Flußwasserzufuhr gab es - soweit Daten vorlagen - jeweils mindestens einen Einbruch. Darunter ist keines aus dem Zeitraum 1980/81 bis 1989/90. Unter diesen 10 Einstromjahren war 1983/84 das mit der geringsten Flußwasserzufuhr, es liegt an 38. Stelle und damit über dem Median. Vom 30. bis 54. Rang bei der Flußwasserzufuhr finden sich Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen und solche ohne, in diesem Bereich liegen 3 Einstromjahre aus den 80er Jahren ohne Salzwassereinbrüche und das einzige mit einem Salzwassereinbruch (1982/83). In den 15 Einstromjahren mit der höchsten Flußwasserzufuhr (Rang 55 bis 69) gab es nur einen einzigen Salzwassereinbruch, der zudem nur ein schwacher war. In diesen Zeitraum fallen die restlichen 6 Einstromjahre aus den 80er Jahren.

Eine analoge Betrachtung anderer Größen (Bodendruck, geostrophischer Wind, Niederschlag, Wasserstand der Ostsee) für die Monate, in denen die größten Unterschiede auftreten, liefert ähnliche Resultate. Sie sind derart, daß die niedrigsten (geostrophischer Wind, Niederschlag, Wasserstand der Ostsee) bzw. höchsten Werte (Bodendruck) der entsprechenden Größe im allgemeinen mit den meisten Salzwassereinbrüchen verbunden sind. Allerdings ist dieses Verhalten bei den anderen Größen bei weitem nicht so deutlich ausgeprägt wie bei der Flußwasserzufuhr.

5.5 Wasserbilanz des Ostsee-Einzugsgebietes

Aus dem bisher Dargelegten ergibt sich, daß nahezu im gesamten Einstromjahr der Einstromsaisons ohne Salzwassereinbrüche eine signifikant höhere Flußwasserzufuhr zu beobachten ist, obwohl signifikante Unterschiede im Niederschlagsverhalten nur im Oktober auftreten. Daher stellt sich die Frage, woher diese Unterschiede kommen. Die Flußwasserzufuhr wird von atmosphärischen Prozessen (Niederschlag, Verdunstung), Änderungen in der Kryosphäre (Schwankungen in der akkumulierten Schnee- und Eismenge), biologischen Vorgängen (Wachstum von Pflanzen) und menschlichen Eingriffen (Flußwasserregulierung, Versiegelung, Land- und Forstwirtschaft) bestimmt, die den Wasserkreislauf betreffen. Deshalb kann man sich zur Erklärung der Flußwasserzufuhr nicht allein auf bestimmte atmosphärische Prozesse beschränken.

Als Wassergewinngröße tritt im Ostsee-Einzugsgebiet nur der Niederschlag N auf, Wasserverlustgrößen sind die Verdunstung V und die Flußwasserzufuhr Z . Damit lautet die Wasserhaushaltsgleichung des Ostsee-Einzugsgebietes

$$N - V - Z = \Delta H \quad (\Delta H = \text{Differenzgröße}). \quad (1)$$

Zunächst kann man von einem ausgeglichenen Wasserhaushalt des Ostsee-Einzugsgebietes über einen längeren Zeitraum ausgehen ($\Delta H \approx 0$). Daraus folgt für die Wasserhaushaltsgleichung

$$N = Z + V. \quad (2)$$

Diese Gleichung muß sowohl in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen als auch in solchen ohne erfüllt sein. Für den Niederschlag als auch die Flußwasserzufuhr lagen Monatswerte vor. Über die Verdunstung, deren Bestimmung komplizierter ist, standen keine Angaben zur Verfügung. Geht man von der Gültigkeit der Wasserhaushaltsgleichung (2) aus, so lassen sich für längere Zeiträume annähernd die Werte der Verdunstung bestimmen. Da man diese Abschätzung nicht ohne weiteres für einzelne Monate machen kann, wurde die Verdunstung aus der Differenz $N - Z$ für jedes Einstromjahr berechnet. Auch diese Methode ist fehlerbehaftet, weil Niederschläge aus dem dem Einstromjahr vorhergehenden Jahr auf die Flußwasserzufuhr des Einstromjahres wirken sowie Niederschläge aus dem Einstromjahr im folgenden Jahr abfließen. Da diese Beträge sich aber teilweise aufheben und der Beginn des Einstromjahres im Juli liegt, also nach Monaten verringerter Niederschlagstätigkeit und nach dem Maximum der Flußwasserzufuhr, liefert diese Abschätzung doch recht brauchbare Werte. Weil die Daten der Flußwasserzufuhr für das Ostsee-Einzugsgebiet ohne das Einzugsgebiet der Beltsee und des Kattegats vorlagen, wurde zur Berechnung der Niederschlagsmenge dementsprechend eine Fläche des Einzugsgebietes von 1 628 000 km² zugrunde gelegt.

Für alle Einstromjahre von 1922/23 bis 1987/88, für die Daten über das Auftreten von Salzwassereinbrüchen vorhanden waren, erhält man mittlere jährliche Werte von 964,9 km³ für den Niederschlag, 448,7 km³ für die Flußwasserzufuhr und 516,2 km³ für die Verdunstung (Tab. 5.5). Das Verhältnis von Verdunstung zu Niederschlag liegt bei 53,5 %. Dies bedeutet, daß Niederschläge etwa zur einen Hälfte verdunsten und zur anderen Hälfte abfließen, wobei die Verdunstung meist leicht überwiegt. Unterteilt man die Einstromjahre analog den anderen Größen nach solchen mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne, so sind bei der Verdunstung in dem dem Einstromjahr vorhergehenden Jahr keine Unterschiede feststellbar. Auch im Einstromjahr sind keine signifikanten Unterschiede bei der Verdunstung zu erkennen, obwohl sie in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen höher ist. Anders sieht es beim Verhältnis Verdunstung/Niederschlag aus. In Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen ist dieses Verhältnis um 5,0 % höher als in solchen ohne. Dieser Unterschied ist hochsignifikant (Signifikanzniveau 99,99 %). In Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen ist also nicht unbedingt die Verdunstung an sich höher, aber von den insgesamt fallenden (geringeren) Niederschlägen verdunstet ein größerer Teil. Das könnte einerseits durch die erhöhten Temperaturen im Sommer des Anfangsjahres bedingt sein sowie andererseits durch die mit dem Hochdruckeinfluß einhergehende Abschwächung der Zonalströmung, was dazu führt, daß seltener feuchte atlantische Luftmassen über dem Ostsee-Einzugsgebiet anzutreffen sind. Die vorherrschenden trockeneren Luftmassen, die mehr kontinentaler Natur sind, könnten so ebenfalls zu der erhöhten Verdunstung beitragen.

	Einstromjahre insgesamt (I)	Einstromjahre ohne SWE (NOSWE)	Einstromjahre mit SWE (SWE)	Differenz NOSWE-SWE	Var.breite NOSWE- SWE /I
Niederschlag N	964,9 km ³	996,9 km ³	947,6 km ³	+49,3 km ³	5,1 %
Flußwasserzufuhr Z	448,7 km ³	495,0 km ³	423,8 km ³	+71,2 km ³	15,9 %
Verd. V = N - Z	516,2 km ³	501,9 km ³	523,8 km ³	-21,9 km ³	4,2 %
Verhältnis V/N	53,5 %	50,3 %	55,3 %	-5,0 %	9,3 %

Tab. 5.5: Mittlere Werte von Niederschlag, Flußwasserzufuhr, Verdunstung und dem Verhältnis Verdunstung/Niederschlag in allen Einstromjahren von 1922/23 bis 1987/88, in denen Daten über das Auftreten von Salzwassereinbrüchen vorlagen

Betrachtet man die Unterschiede in der Wasserbilanz zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne, so ergibt sich bei letzteren für die Gesamtbilanz ein um 49,3 km³ erhöhter Niederschlag, eine um 71,2 km³ erhöhte Flußwasserzufuhr und eine um 21,9 km³ verringerte Verdunstung. Da man aber davon ausgehen muß, daß die zusätzlich fallenden Niederschläge in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche auch etwa zur Hälfte verdunsten, ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

1. Aus dem um 49,3 km³ erhöhten Niederschlag in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche im Vergleich zu Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen gehen 53,5 % (langjähriges Mittel) in die Verdunstung, demnach tragen 46,5 % direkt zur Flußwasserzufuhr bei.
 ⇒ Der erhöhte Niederschlag trägt zur zusätzlichen Flußwasserzufuhr mit 22,9 km³ bei.
 ⇒ 32 % der höheren Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche kommen direkt aus dem erhöhten Niederschlag.
2. In Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen verdunsten 5,0 % mehr Niederschlag (des mittleren Niederschlags von 964,9 km³) als in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche.
 ⇒ In Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen verdunsten 48,3 km³ mehr als in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche.
 ⇒ 68 % der höheren Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche resultieren aus einer verringerten Verdunstung.

Die höheren Niederschläge in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche tragen also nur zu ca. 1/3 zu der Erhöhung der Flußwasserzufuhr bei, die restlichen 2/3 werden durch eine etwas geringere Verdunstung verursacht. Die Ursachen dieser Variationen in der Verdunstung sind komplexerer Natur. Die einzigen offensichtlichen meteorologischen Ursachen der höheren Verdunstung in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen wurden bereits oben erwähnt (erhöhte Temperaturen im Sommer, Vorherrschen trockenerer Luftmassen).

Einschränkend muß man sagen, daß die Differenzgröße ΔH in diesen Betrachtungen als annähernd 0 in jedem Einstromjahr angenommen wurde. Dies kann man sicher in erster Näherung machen. Genaugenommen gelten alle hier getroffenen Aussagen über die Verdunstung aber nur für die Summe aus der Verdunstung und der Differenzgröße ($V + \Delta H$). So ist es z. B. denkbar, daß in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen nicht nur die Verdunstung höher ist, sondern die Speicher (z. B. Erdboden) verstärkt mit Wasser aufgefüllt

werden (ΔH positiv). Hierzu zählt auch eine Zunahme der akkumulierten Schnee- und Eismenge. Nicht zu vernachlässigen ist auch der Einfluß der Flußwasserregulierung durch den Anstau von Wasser (siehe Abschn. 5.6). Analog dazu wäre $V + \Delta H$ in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche so gering, weil die Speicher (Erdboden, Schnee und Eis, Rückhaltebecken) überdurchschnittlich entleert werden (ΔH negativ). Außerdem ist es möglich, daß über Variationen von ΔH Änderungen im Wasserhaushalt eines Einstromjahres ins nächste wirken.

Erwähnenswert ist noch die hohe Variationsbreite (Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne im Verhältnis zum Jahresmittel) bei der Flußwasserzufuhr, die dreimal so hoch ist wie die vom Niederschlag und von der Verdunstung. Dies bestätigt, daß die Flußwasserzufuhr - außer durch Niederschlag und Verdunstung - noch von anderen Größen beeinflusst wird. Eine entscheidende weitere Einflußgröße ist dabei der Mensch, der den Jahregang der Flußwasserzufuhr deutlich modifiziert. Dies soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

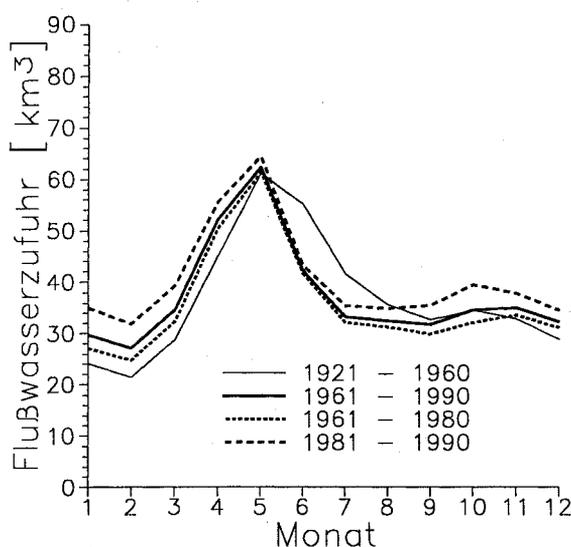
5.6 Zur Flußwasserregulierung und hohen Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren

BERGSTROM und CARLSSON (1993, 1994) haben sich ausführlich mit der Flußwasserzufuhr zur Ostsee im Zeitraum 1950 - 1990 beschäftigt. In diesen Arbeiten wurde bereits auf die starken Auswirkungen der Flußwasserregulierung auf die Flußwasserzufuhr zur Ostsee hingewiesen. In einer weiteren Arbeit (CARLSSON und SANNER 1994) erfolgte eine detailliertere Untersuchung der Auswirkungen der Flußwasserregulierung auf den Bottnischen Meerbusen. Das Gesamtvolumen aller Wasserreservoirs in Schweden und in Finnland, die in der Arbeit betrachtet wurden, beträgt über 40 km^3 , was in etwa 80 bzw. 90 % des Volumens aller Reservoirs entspricht, deren Wassermassen in den Bottnischen Meerbusen fließen. Der Arbeit läßt sich entnehmen, daß das Gesamtvolumen der schwedischen Reservoirs von 1935 (ca. 2 km^3) kontinuierlich bis etwa zum Beginn der 80er Jahre zugenommen hat. Seitdem ist es relativ konstant und liegt bei etwa 33 bis 34 km^3 . Mit Hilfe eines Modells berechneten die Autoren die natürliche Flußwasserzufuhr und schätzten die Unterschiede zwischen ihr und der gemessenen regulierten Flußwasserzufuhr ab. Durch die Regulierung ergeben sich von Oktober bis April (hoher Energiebedarf) deutlich höhere Werte sowie von Mai bis September niedrigere Werte. Die größten Unterschiede sind dabei in den Monaten Januar bis März (durch die Regulierung ist die Flußwasserzufuhr im Winter um etwa 70 % erhöht) sowie Mai bis Juli zu erkennen. Die zusätzliche Flußwasserzufuhr durch die Regulierung beträgt von November bis April pro Monat ca. 2 bis 6 km^3 , die dadurch verursachte theoretische Erhöhung des Wasserstandes des Bottnischen Meerbusens liegt ebenfalls bei ca. 2 bis 6 cm pro Monat. Die Autoren kommen zu dem Schluß, daß dieses veränderte Verhalten nicht ohne Einfluß auf gelöste Stoffe im Meerwasser bleiben kann. Auch wenn der Ein- bzw. Ausstrom in den bzw. aus dem Bottnischen Meerbusen hauptsächlich durch meteorologische Kräfte bedingt ist (1200 km^3 Ein- und Ausstrom pro Jahr) und der jährliche Flußwasserausstrom "nur" bei 200 km^3 liegt, so wird von

den Autoren auf die Wirkung dieses vermehrten Ausstromes aus dem Bottnischen Meerbusen hingewiesen, der nicht ohne Einfluß auf die Salzverhältnisse bleiben kann.

Was für den Bottnischen Meerbusen im Kleinen gilt, muß auch für die Ostsee im Großen gelten. Ein vermehrter Ausstrom im Winter muß sich gerade in einem so kleinen Gebiet wie den dänischen Straßen stark auf die Strömungsverhältnisse auswirken. Hier liegt der jährliche meteorologisch angetriebene Ein- und Ausstrom ebenfalls weit über dem durch die Süßwasserbilanz der Ostsee - dabei hauptsächlich durch die Flußwasserzufuhr - bedingten Ausstrom von 481 km^3 pro Jahr (siehe dazu auch die Angaben zur Wasserbilanz der Ostsee in Abschn. 2.2).

Abb. 5.6 zeigt den Jahresgang der Flußwasserzufuhr in verschiedenen Zeitabschnitten. Die Unterschiede im Jahresgang zwischen dem Zeitraum 1921-1960 und 1961-90 sind deutlich zu erkennen. Im zweiten Zeitraum treten von November bis April höhere Werte auf, von Juni bis September sind diese niedriger. Die größten Unterschiede sind im Juni zu finden und mit ca. 13 km^3 recht beachtlich (Tab. 5.6). Von Januar bis April liegen sie mit ca. 6 km^3 in dem Bereich der Unterschiede, die zwischen Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und Einstromjahren mit solchen Ereignissen auftreten. Von den Werten für April und Mai abgesehen, stimmen die Unterschiede im Jahresgang mit den Werten überein, die CARLSSON und SANNER (1994) als Änderungen durch die Flußwasserregulierung für den Bottnischen Meerbusen berechnet haben. Diese im wesentlichen auch quantitative Übereinstimmung führt zu der Vermutung, daß die schwedische und finnische Flußwasserregulierung alle anderen bei weitem übertreffen. Anders als bei CARLSSON und SANNER werden hier zwar zwei unterschiedliche Zeiträume miteinander verglichen, man kann aber den Zeitraum 1921-60 als durch Flußwasserregulierung relativ unverfälscht im Vergleich zu 1961-90 betrachten, zumal sich die Jahreswerte beider Zeiträume nur um 6 km^3 (nicht signifikant) unterscheiden, die Gesamtmenge der Flußwasserzufuhr also in beiden Zeiträumen etwa gleich war. Außerdem sind die



	Differenz (1961-90) - (1921-60)	Sig.
Januar	+5,7 km ³	99,9
Februar	+5,7 km ³	99,99
März	+5,9 km ³	99
April	+7,2 km ³	99
Mai	+1,2 km ³	
Juni	-12,9 km ³	99,99
Juli	-8,3 km ³	99,99
August	-3,2 km ³	
September	-0,9 km ³	
Oktober	+0,1 km ³	
November	+2,1 km ³	
Dezember	+3,4 km ³	
Jahr	+6,0 km ³	

Abb. 5.6: Jahresgang der Flußwasserzufuhr in verschiedenen Zeiträumen

Tab. 5.6: Jahresgang der Unterschiede in der Flußwasserzufuhr zwischen den Zeiträumen 1961-90 und 1921-60 sowie Niveau (95 %, 99 %, 99,9 % oder 99,99 %), auf dem die Unterschiede signifikant sind (t-Test, SCHÖNWIESE 1992)

Daten relativ homogen, und von BERGSTRÖM und CARLSSON (1993) wurde eine gute Übereinstimmung zwischen ihren Daten und den Werten von MIKULSKI (1982) festgestellt.

Solche großen Unterschiede zeigen sich bei keiner meteorologischen Größe. Die einzigen erwähnenswerten Unterschiede zwischen den beiden Zeiträumen sind ein mit 0,6 K etwas kühlerer Juli in der zweiten Periode (Signifikanzniveau 95 %) sowie durchgehend höhere Werte der u-Komponente des geostrophischen Windes (0,6 bis 0,8 m/s) von Juli bis Februar, die aber nur im Juli signifikant sind. Dadurch treten auch beim Betrag des geostrophischen Windes Differenzen auf. Im Niederschlagsverhalten und beim MSI gibt es in keinem Monat signifikante Unterschiede. Beim Wasserstand der Ostsee sind in der zweiten Periode von April bis Juni (aber nur im Juni signifikant) niedrigere sowie im November und Dezember signifikant höhere Werte zu beobachten. Ein ähnliches Verhalten ist am Pegel von Gedser festzustellen (Mai bis Oktober niedrigere, November und Dezember höhere Werte, oft signifikant). Die unterschiedlichen Wasserstände im Sommerhalbjahr könnten eine Folge der veränderten Flußwasserzufuhr sein.

Aus dem Dargelegten wird deutlich, daß die Verschiebung im Jahrgang der Flußwasserzufuhr zur Ostsee nur durch die Flußwasserregulierung zustande kommt. Aufschlußreich ist auch ein Vergleich der 60er und 70er Jahre mit den 80er Jahren, die durch eine ungewöhnlich hohe Flußwasserzufuhr gekennzeichnet sind (siehe Abb. 5.6). Es zeigt sich, daß die Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren im Mai und Juni mit den Werten der 60er und 70er Jahre in etwa übereinstimmt, dafür aber durchgehend in allen anderen Monaten höher ist. Dies ist insbesondere im Herbst und im Winter der Fall. BERGSTRÖM und CARLSSON (1993) stellten fest, daß diese Erhöhung in allen Ostseebecken auftritt, möglicherweise mit Ausnahme des Finnischen Meerbusens. Als Ursachen nennen sie die milden Winter mit geringer oder gar keiner Akkumulation von Schnee im Süden und für die nördlichen Becken (den Bottnischen Meerbusen) zusätzlich den Effekt der Flußwasserregulierung. Mit dem zur Verfügung stehenden Gitterfelddatensatz der Temperatur, der bereits 1987 endet, konnten allerdings keine Temperaturunterschiede in den Wintermonaten im Vergleich zwischen den 60er und 70er Jahren mit den 80er Jahren festgestellt werden. Im Juni traten in den 80er Jahren um ca. 15 mm signifikant höhere Niederschläge auf. Die u-Komponente des geostrophischen Windes war in den 80er Jahren in fast allen Monaten durchgehend höher als im Zeitraum 1961-80 (im Mittel ca. 1 m/s), aber nur im August sind die Unterschiede signifikant. Andere Unterschiede waren bei den meteorologischen Größen nicht feststellbar. Die erhöhten Niederschläge im Juni reichen bei weitem nicht zur Erklärung der erhöhten Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren aus. Neben der Beeinflussung des Wasserhaushaltes durch die Flußwasserregulierung ist es aber denkbar, daß durch die verstärkte Zonalströmung häufiger feuchte nordatlantische Luftmassen nach Europa geführt werden, die die Verdunstung verringern und dadurch zu der erhöhten Flußwasserzufuhr beitragen (siehe Abschn. 5.5).

Die erhöhten Werte der u-Komponente des geostrophischen Windes in den 80er Jahren, in denen nur in einem Einstromjahr Salzwassereinbrüche auftraten, bestätigen die Aussage, daß erhöhte Werte dieser Größe negativ auf das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen

wirken. Der Wasserstand der Ostsee ist als Folge dieser verstärkten Zonalströmung sowie der erhöhten Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren - insbesondere im Herbst und Winter - ebenfalls deutlich (aber nur im Januar signifikant) höher als in den 60er und 70er Jahren (siehe Abschn. 4.13).

5.7 Zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen meteorologischen und ozeanographischen Größen mit Hilfe statistischer Modelle

5.7.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Abschnitten wurde des öfteren auf kausale Zusammenhänge verwiesen, ohne sie mit statistischen Abschätzungen zu untermauern. Auch wenn diese offensichtlich sind (z. B. führt verstärkte Tiefdrucktätigkeit zu höheren Niederschlägen, was wiederum zu einer erhöhten Flußwasserzufuhr beiträgt; verstärkte Westwinde führen zu einem höheren Wasserstand der Ostsee), so ist doch eine statistische Bewertung der Beziehungen zwischen den einzelnen Größen notwendig. Außerdem sind in einigen Fällen - z. B. beim Tiefensalzgehalt - die Wechselwirkungen nicht ohne weiteres erkennbar.

Zur Aufdeckung der Ursachen von Variationen beim Niederschlag und bei den ozeanographischen Größen (Flußwasserzufuhr, Wasserstände, Salzgehalte) wurden deshalb Rechnungen mit statistischen Modellen der Art

$$ZG = k_0 + k_1 EG_1 + \dots + k_n EG_n$$

durchgeführt (Mehrfachregression). Hierbei ist ZG die Zielgröße, EG_1 bis EG_n sind die Einflußgrößen und k_0 bis k_n die Regressionskoeffizienten. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe des Programmpaketes "Statgraphics" der Statistical Graphics Corporation. Dabei wurden zunächst für die Zielgröße (Monatsmittel einer Größe) alle möglichen Einflußgrößen (Monatsmittel einer oder mehrerer Größen, vom selben Monat und/oder von vorhergehenden Monaten) in das Modell eingegeben und die Regressionskoeffizienten berechnet. Danach erfolgte schrittweise die Eliminierung aller Größen, die nur einen sehr geringen Teil der Gesamtvarianz der Zielgröße erklären (d. h., es wurden die Größen ausgeschaltet, die keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Gesamtvarianz der Zielgröße leisten, also nur unterhalb des Signifikanzniveaus 95 % Varianz erklären). Nach jedem Schritt wurden die Koeffizienten erneut berechnet. Auf diese Weise wurde so lange verfahren, bis von allen Einflußgrößen nur noch diejenigen übrigblieben, die die größte Wirkung auf die Zielgröße haben bzw. am engsten mit ihr zusammenhängen. Da in jede Rechnung für alle Größen gleich viele Werte eingehen müssen, diente als Berechnungsbasis einheitlich der Zeitraum Januar 1921 bis Juni 1987, für den für alle Größen Daten vorlagen. Eine Ausnahme bilden die Rechnungen mit den Salzgehalten, auf Grund der Lücken konnten hier nur die Zeiträume Januar 1921 bis Juni 1939 und Januar 1946 bis Juni 1975 verwendet werden.

Es muß hier angemerkt werden, daß auch statistische Modelle nicht zwangsläufig kausale Zusammenhänge nachweisen. Da in den Rechnungen aber die meisten wichtigen Einflußgrößen für die jeweilige Zielgröße verwendet werden konnten, ergeben sich auf jeden Fall qualitativ genau bestimmbare Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen, die durch physikalische Zusammenhänge auch in ihrer Wirkungsweise erklärbar sind.

Zur Berechnung derjenigen Varianz der Zielgröße, die mit Hilfe der Einflußgrößen erklärt werden kann, wurden meist die Werte der Einflußgrößen aus dem entsprechenden Monat und dem Vormonat verwendet. Dabei zeigt sich, daß die Werte des betrachteten Monats im allgemeinen stärker zur erklärbaren Varianz beitragen als der Vormonat. Der Vormonat hingegen war in der Regel bedeutungslos. Bei den Untersuchungen zur Persistenzneigung einer Größe wurden der Vormonat und der Vorvormonat verwendet, der Vorvormonat ist aber nur beim Tiefensalzgehalt in einigen Monaten sowie bei der Flußwasserzufuhr relevant. Auf Grund der hohen Persistenz der Flußwasserzufuhr wurden bei ihr oft 5 Vormonate in die Rechnungen einbezogen, von denen aber ebenfalls meist nur ein bis zwei Vormonate relevant waren. Auf diese Weise wurde formal für alle Zielgrößen der Anteil der Varianz berechnet, der mit Hilfe der jeweiligen Einflußgrößen erklärt werden kann. Auf eine Angabe der einzelnen Koeffizienten sowie eine Verifikation der Ergebnisse mit unabhängigen Datenreihen wird verzichtet, da nicht beabsichtigt war, für die Zielgrößen optimale statistische Modelle zu entwickeln. Die qualitativen (kausalen) Zusammenhänge, die sich aus den Koeffizienten ergeben, werden aber nachfolgend verbal erläutert. Der Anteil der durch die Einflußgrößen erklärbaren Varianz wird auf 5 % genau angegeben (im allgemeinen als Jahresmittel).

5.7.2 Zur Varianz des Niederschlags im Ostsee-Einzugsgebiet und der Flußwasserzufuhr zur Ostsee

Niederschlag im Ostsee-Einzugsgebiet

Mit den Druckverhältnissen lassen sich 50 % der Varianz des Niederschlags erklären (niedriger Bodendruck führt zu hohen Niederschlägen), mit den Windverhältnissen - wenn überhaupt - nur 10 % (eine Verstärkung der Zonalströmung ist mit erhöhten Niederschlägen verbunden) (Abb. 5.7). Druck- und Windfeld zusammen erklären 60 % der Varianz des Niederschlags. Dies ist eine Folge der Tiefdrucktätigkeit, da die von Westen heranziehenden Tiefdruckgebiete zu hohen Niederschlägen führen, wohingegen Hochdruckgebiete mit geringen Niederschlägen einhergehen. Da dies im Sommer nur eingeschränkt gilt (starke konvektive Niederschläge auch in Hochdruckgebieten), ist der mit dem Druck- und Windfeld erklärbare Varianzanteil von Mai bis Juli niedriger. Der Niederschlag zeigt keinerlei Persistenzverhalten, auch mit der Temperatur besteht kein Zusammenhang.

Flußwasserzufuhr

Vom Frühjahr abgesehen, lassen sich mit dem Druckfeld 40 % (im Jahresmittel 30 %) der Varianz der Flußwasserzufuhr erklären (niedriger Bodendruck führt zu einer hohen Flußwasserzufuhr) (Abb. 5.7). Die Windverhältnisse erklären nur 10 % der Varianz der Fluß-

wasserzufuhr (eine verstärkte Zonalströmung ist mit erhöhter Flußwasserzufuhr verbunden). Druck- und Windfeld zusammen erklären kaum mehr Varianz als das Druckfeld allein (35 %).

Die Persistenz der Flußwasserzufuhr erklärt von März bis Juni 20 %, ansonsten 55 % ihrer Varianz (im Jahresmittel 45 %). Die niedrigen Werte im Frühjahr dürften ein Effekt der Schneeschmelze sein, da in diesem Zeitraum die stärksten Variationen zwischen den Monaten auftreten.

Der relativ hohe Anteil an Varianz, der sich mit dem Druck- und Windfeld erklären läßt, hat seine Ursachen in der engen Kopplung zwischen diesem und dem Niederschlag. Letzterer erklärt 45 % der Varianz der Flußwasserzufuhr (hohe Niederschläge führen zu hoher Flußwasserzufuhr), auch hier ist der Anteil im Frühjahr geringer. Die Temperatur trägt - wenn überhaupt - nur zu einem geringen Teil (15 %) zur Erklärung der Varianz der Flußwasserzufuhr bei (im Winterhalbjahr führen hohe Temperaturen zu einer verstärkten Schneeschmelze und damit zu einer höheren Flußwasserzufuhr, im Sommerhalbjahr führen hohe Temperaturen zu einer höheren Verdunstung und damit zu einer geringeren Flußwasserzufuhr).

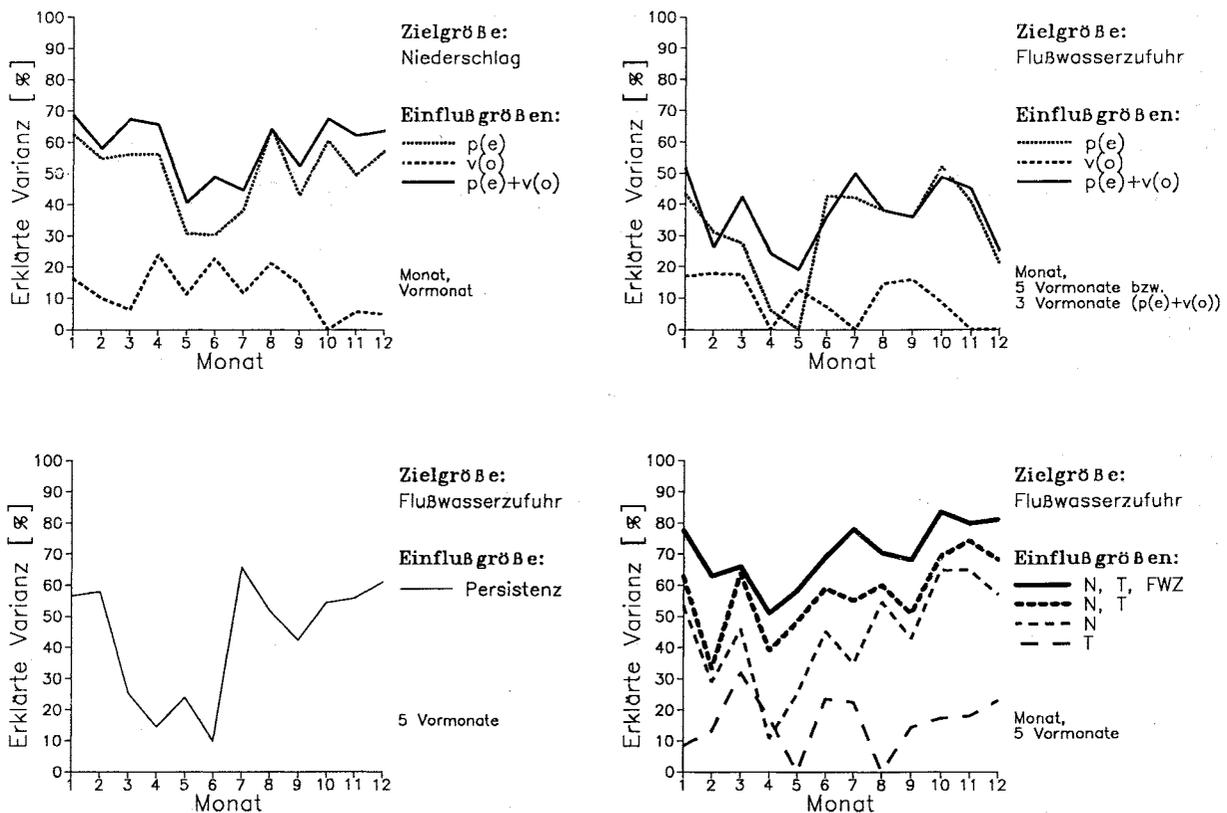


Abb. 5.7: Jahresgang der durch die unterschiedlichsten Einflußgrößen erklärbaren Varianz der Zielgröße (Niederschlag bzw. Flußwasserzufuhr); rechts unten stehen jeweils die Monate, von denen Daten der Einflußgrößen in den Modellrechnungen verwendet wurden

Bedeutung der Abkürzungen:

- $p(e)$ - Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet
- $v(o)$ - geostrophischer Wind über der Ostsee
- N - Niederschlag
- T - Temperatur
- FWZ - Flußwasserzufuhr

Niederschlag und Temperatur zusammen erklären 55 % der Varianz der Flußwasserzufuhr, das Minimum im Frühjahr verschwindet teilweise. Dies dürfte dadurch bedingt sein, daß die Schnee- und Eismassen, die im Winter akkumuliert wurden, durch die höheren Temperaturen schmelzen und zur Erhöhung der Flußwasserzufuhr beitragen. Das ist auch die Ursache dafür, warum die Flußwasserzufuhr im Frühjahr nur zu einem geringen Teil vom Niederschlag bestimmt wird. Allerdings lassen sich auch im Herbst und Winter nur 60 % der Varianz der Flußwasserzufuhr mit den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen erklären. Mit dem Niederschlag, der Temperatur und der Persistenz zusammen lassen sich 70 % der Varianz der Flußwasserzufuhr erklären (im Winter 80 %, im Frühjahr 60 %).

5.7.3 Zur Varianz der Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser

Landsort

Mit dem Windfeld lassen sich 55 % der Varianz des Wasserstandes von Landsort erklären (ein hoher Wasserstand der Ostsee wird in allen Monaten durch eine Verstärkung der u-Komponente und in einigen Monaten zusätzlich durch eine Abschwächung der v-Komponente hervorgerufen) (Abb. 5.8). Der Anteil an Varianz, der sich mit dem Druckfeld erklären läßt, ist deutlich geringer und liegt bei 30 %. Es ist auffällig, daß das Windfeld im Frühjahr besonders starken Einfluß auf den Wasserstand von Landsort hat, wohingegen das Druckfeld im Herbst von größerer Bedeutung ist. Druck- und Windfeld erklären ganzjährig relativ konstant etwa 70 % der Varianz des Wasserstandes von Landsort. Niederschlag (20 % erklärte Varianz) und Flußwasserzufuhr (25 % erklärte Varianz) tragen zu einem geringeren Teil zu den Schwankungen des Wasserstandes von Landsort bei (hohe Werte der beiden Größen sind mit hohen Wasserständen verbunden). Ihr Einfluß auf den Wasserstand von Landsort ist aber vergleichbar mit dem Einfluß des Druckfeldes und im Herbst ebenfalls besonders stark. Das unterstützt die These, daß das Druckfeld zusammen mit dem Niederschlag und der Flußwasserzufuhr im Herbst für günstige bzw. ungünstige Einstrombedingungen sorgt und somit einen entscheidenden Einfluß auf das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen hat. Druck- und Windfeld zusammen mit Niederschlag und Flußwasserzufuhr tragen kaum noch zu einer Steigerung der erklärbaren Varianz des Wasserstandes bei - eine Folge der starken Kopplung dieser Größen.

Die Temperatur trägt nur in einigen Monaten, zu einem geringen Teil und auf sehr unterschiedliche Weise, zur Varianz des Wasserstandes bei. Dies ist sicher kein thermischer Effekt, sondern durch ihre - von der Jahreszeit abhängige - Kopplung mit anderen Größen bedingt. Die Persistenzneigung des Wasserstandes ist nur gering (15 % erklärte Varianz).

Die Wasserstände von Hornbaek und Gedser bzw. die Wasserstandsdifferenz zwischen Hornbaek und Gedser erklären 75 %, 45 % bzw. 25 % der Varianz des Wasserstandes von Landsort (hohe Werte dieser drei Größen sind mit einem hohen Wasserstand von Landsort verbunden). Während mit dem Wasserstand von Hornbaek nahezu ganzjährig ein hoher Teil der Varianz des Wasserstandes von Landsort erklärt werden kann (Windstau im Kattegat führt

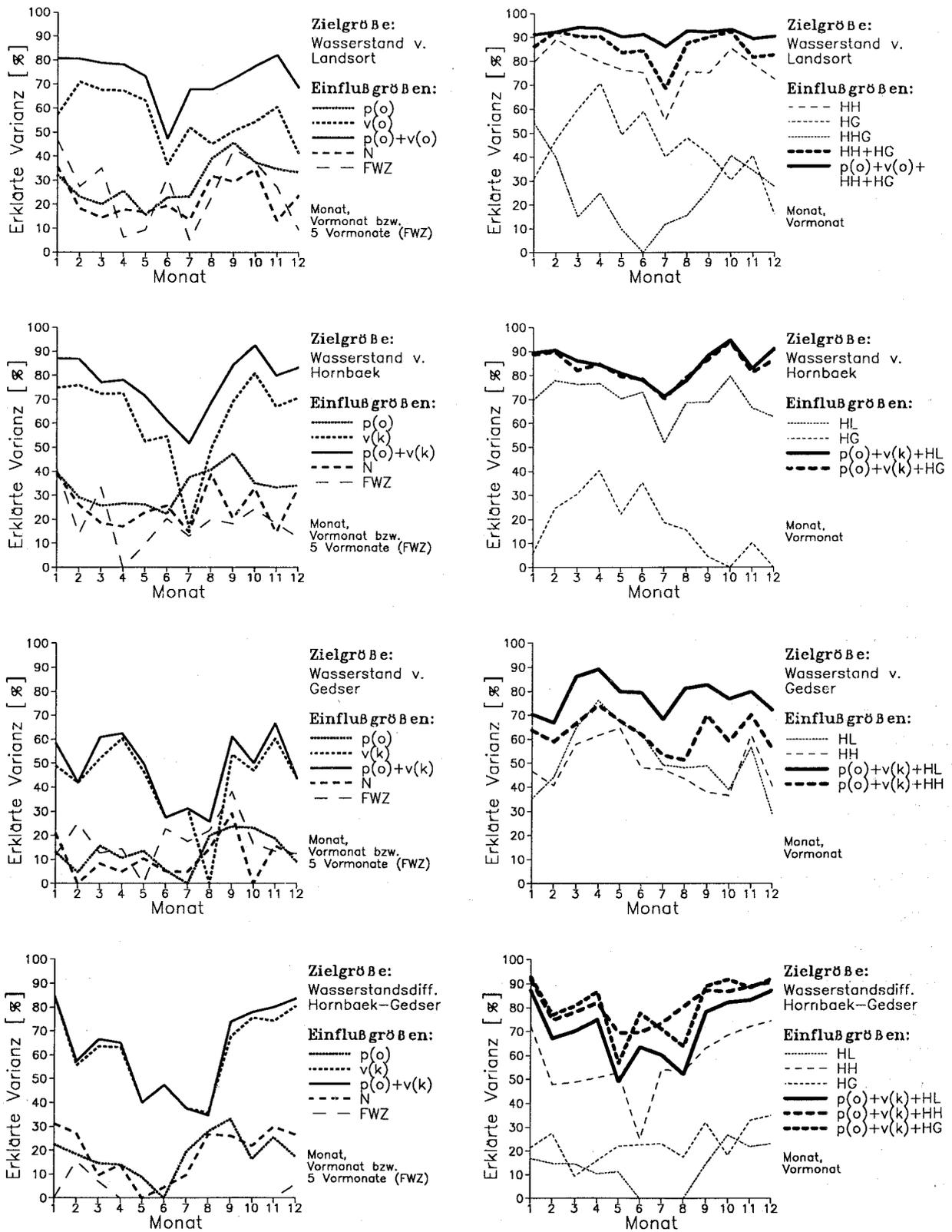


Abb. 5.8: Jahrgang der durch die unterschiedlichsten Einflußgrößen erkläraren Varianz der Zielgröße (Wasserstände); rechts unten stehen jeweils die Monate, von denen Daten der Einflußgrößen in den Modellrechnungen verwendet wurden

Bedeutung der Abkürzungen:

- $p(o)$, $p(o)$ - Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet bzw. über der Ostsee
- $v(k)$, $v(o)$ - geostr. Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich (Kattegat) bzw. über der Ostsee
- N - Niederschlag
- T - Temperatur
- FWZ - Flußwasserzufuhr
- HL, HH, HG - Wasserstand von Landsort, Hornbaek bzw. Gedser
- HHG - Wasserstandsdiff. Hornbaek-Gedser

im allgemeinen zu Einstrom und damit zu einer Erhöhung des Ostseewasserstandes), gilt dies nicht für den Wasserstand von Gedser. Dieser weist starke Ähnlichkeiten mit den Schwankungen des Wasserstandes von Landsort offenbar nur in den Monaten auf, in denen der Wasserstand der Ostsee - bedingt durch eine geringe u-Komponente des Windes - relativ niedrig ist (hauptsächlich also im Frühjahr). Das dürfte dadurch begründet sein, daß zu Zeiten geringer Zonalzirkulation der Wasserstand von Gedser stark vom Ostseewasserstand geprägt ist. In Monaten mit einer verstärkten Zonalzirkulation (bzw. einem erhöhten Wasserstand der Ostsee) tritt in der westlichen Ostsee offenbar verstärkt der "Niedrigwassereffekt" auf, der einem Gleichlaufen des Wasserstandes von Gedser mit dem Ostseewasserstand entgegenwirkt. Möglicherweise ist das auch der Grund dafür, daß die Wasserstandsdifferenz zwischen Hornbaek und Gedser in diesen Monaten einen höheren Anteil der Varianz des Wasserstandes von Landsort erklärt (starke Westwinde verursachen unmittelbar einen hohen Wasserstand von Hornbaek und einen niedrigen von Gedser, was zu einer großen Wasserstandsdifferenz führt, die starken Einstrom und damit einen hohen Ostseewasserstand zur Folge hat).

Mit den Wasserständen von Hornbaek und Gedser zusammen lassen sich 85 % der Varianz des Wasserstandes von Landsort erklären. Beide Wasserstände zusammen mit dem Druck- und Windfeld beschreiben ganzjährig nahezu vollständig das Verhalten des Wasserstandes von Landsort (über 90 % erklärte Varianz).

Hornbaek und Gedser

Der Einfluß des Druck- und Windfeldes, des Niederschlags und der Flußwasserzufuhr auf die Wasserstände von Hornbaek und Gedser ähnelt in wesentlichen Zügen qualitativ dem bei Landsort beschriebenen Verhalten (Abb. 5.8). Druck- und Windfeld beeinflussen den Wasserstand von Hornbaek (erklärte Varianz: Druckfeld 35 %, Windfeld 65 %, zusammen 75 %) deutlich stärker als den Wasserstand von Gedser (erklärte Varianz: Druckfeld 15 %, Windfeld 45 %, zusammen 50 %). Im Gegensatz zu den Verhältnissen am Pegel Hornbaek leistet der Luftdruck zur mit dem Druck- und Windfeld erklärbaren Varianz des Wasserstandes von Gedser nahezu keinen Beitrag. Niederschlag (Hornbaek 25 %, Gedser 10 % erklärte Varianz) und Flußwasserzufuhr (Hornbaek 20 %, Gedser 15 %) haben eine geringere Bedeutung. Temperatureinflüsse auf die Wasserstände sind irrelevant, auch eine Persistenzneigung tritt nur vereinzelt auf (im Jahresmittel 5 bis 10 % erklärte Varianz).

Mit dem Wasserstand von Landsort lassen sich 70 % der Varianz des Wasserstandes von Hornbaek und 50 % der Varianz des Wasserstandes von Gedser erklären (ein hoher Wasserstand von Landsort ist mit hohen Wasserständen von Hornbaek und Gedser verbunden). Während ersteres hauptsächlich auf die Wirkung des Druck- und Windfeldes zurückgeht (ähnliche Wirkung auf die Pegel Landsort und Hornbaek), ist letzteres sicher auch dadurch bedingt, daß der Wasserstand der Ostsee einen nicht unbedeutenden Einfluß auf den Pegel von Gedser hat. Es ergibt sich, daß das Druck- und Windfeld in etwa denselben Einfluß auf den Pegel von Gedser hat wie der Wasserstand von Landsort. Im Sommer ist der Wasserstand von Landsort von größerer Bedeutung, im Herbst und Winter ist es das Druck- und Windfeld. Im Frühjahr haben sie etwa den gleichen Einfluß.

Während der Wasserstand von Hornbaek 50 % der Varianz des Wasserstandes von Gedser erklärt, liegt dies umgekehrt nur bei 15 %. Dies bedeutet, daß Variationen des Wasserstandes von Hornbaek (zumeist durch das Druck- und Windfeld hervorgerufen) einen deutlichen Einfluß auf den Wasserstand von Gedser haben. Variationen des Wasserstandes von Gedser (durch das Druck- und Windfeld sowie den Wasserstand der Ostsee bedingt) hingegen haben nur einen geringen Einfluß auf den Wasserstand von Hornbaek. Mit dem Druck- und Windfeld sowie dem Wasserstand von Landsort läßt sich ein sehr hoher Anteil der Varianz der Wasserstände erklären (Hornbaek 85 %, Gedser 80 %). Durch die Hinzunahme anderer Größen wird der Anteil der erklärbaren Varianz nicht höher.

Da der Wasserstand von Gedser unabhängiger vom Druck- und Windfeld als der Wasserstand von Hornbaek ist, läßt sich mit dem Druck- und Windfeld sowie dem Wasserstand von Gedser mehr Varianz des Wasserstandes von Hornbaek erklären (85 %) als mit dem Druck- und Windfeld und dem Wasserstand von Hornbaek für den Wasserstand von Gedser (65 %).

Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser

Mit dem Druckfeld lassen sich 20 % der Varianz der Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser erklären (ein hoher Bodendruck im betrachteten Monat - und damit eine ruhige Wetterlage - ist mit einer geringen Wasserstandsdifferenz verbunden, häufig steht ein hoher Bodendruck im Vormonat in Zusammenhang mit einer hohen Wasserstandsdifferenz) (Abb. 5.8). Das Windfeld trägt zur Erklärung der Varianz der Wasserstandsdifferenz 60 % bei (eine hohe u-Komponente des Windes im betrachteten Monat führt zu einer hohen Wasserstandsdifferenz, eine hohe u-Komponente im Vormonat führt zu einer geringen Wasserstandsdifferenz; eine hohe v-Komponente im Vormonat führt in vielen Monaten zu einer höheren Wasserstandsdifferenz). Da eine hohe Wasserstandsdifferenz für starken Einstrom notwendig ist, folgt hieraus, daß starke Westwinde unmittelbar zu einem starken Einstrom führen und daß dieser durch geringe Westwinde im Vormonat nochmals verstärkt wird. Das bestätigt die Hypothese, daß für starke Einströme in die Ostsee zuerst Hochdruckeinfluß - verbunden mit einer Abschwächung der u-Komponente des Windes - und anschließend verstärkte Tiefdrucktätigkeit - gekoppelt mit einer erhöhten u-Komponente des Windes - notwendig sind. Druck- und Windfeld zusammen erklären kaum mehr Varianz der Wasserstandsdifferenz als das Windfeld allein (60 %), ein besonders hoher Einfluß auf die Wasserstandsdifferenz ist im Herbst und Winter zu beobachten.

Mit dem Niederschlag lassen sich nur 20 % der Varianz der Wasserstandsdifferenz erklären (hohe Niederschläge im betrachteten Monat führen zu einer hohen Wasserstandsdifferenz, hohe Niederschläge im Vormonat führen zu einer geringen Wasserstandsdifferenz). Dies dürfte lediglich ein Effekt der Kopplung des Niederschlags an das Druck- und Windfeld sein. Die Flußwasserzufuhr hat im allgemeinen keinen Einfluß auf die Wasserstandsdifferenz. Eine Persistenzneigung ist nur in einigen Monaten vorhanden und sehr gering (im Jahresmittel 5 % erklärte Varianz). Auch die Temperatur hat keinen Einfluß auf die Wasserstandsdifferenz.

Der Wasserstand von Landsort leistet mit 15 % nur einen geringen Beitrag zur Erklärung der Varianz der Wasserstandsdifferenz zwischen Hornbaek und Gedser (hohe Wasserstände im betrachteten Monat sind im allgemeinen mit einer hohen Wasserstandsdifferenz verbunden, hohe Wasserstände im Vormonat führen oft zu einer niedrigen Wasserstandsdifferenz). Auch dies dürfte lediglich ein Effekt der starken Kopplung des Wasserstandes von Landsort mit dem Druck- und Windfeld sein. Mit dem Wasserstand von Hornbaek läßt sich wesentlich mehr Varianz der Wasserstandsdifferenz erklären (55 %) als mit dem Wasserstand von Gedser (25 %). Hieraus kann man den Schluß ziehen, daß für die Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser der Pegel von Hornbaek ausschlaggebend ist. Mit dem Druck- und Windfeld und dem Wasserstand von Landsort lassen sich 70 %, mit dem Druck- und Windfeld und dem Wasserstand von Hornbaek bzw. Gedser je 80 % der Varianz der Wasserstandsdifferenz erklären.

5.7.4 Zur Varianz der Salzgehaltsverhältnisse am Feuerschiff Gedser Rev

In der Oberschicht kann man mit dem Druck- und Windfeld 35 bis 40 % der Varianz des Salzgehaltes erklären, in der Bodenschicht 20 bis 25 % (Abb. 5.9). Die Wirkung des Druck- und Windfeldes auf den Salzgehalt ist in beiden Schichten qualitativ gleich. Generell gilt: Eine hohe u-Komponente des Windes im betrachteten Monat sorgt durch vermehrten Einstrom in allen Schichten für höhere Salzgehalte. Da dies meist mit einem niedrigen Luftdruck (verstärkte Tiefdrucktätigkeit) verbunden ist, werden hohe Salzgehalte auch durch einen niedrigen Luftdruck begünstigt. Eine Abnahme der v-Komponente (seltener/schwächere Südwinde bzw. häufigere/stärkere Nordwinde) begünstigt ebenfalls hohe Salzgehalte. Ähnlich wie bei der Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser ist auch hier ein umgekehrter Einfluß der Vormonatsgrößen zu beobachten. Das heißt mit anderen Worten, ein hoher Luftdruck - verbunden mit einer Abschwächung der u-Komponente des Windes - und anschließend verstärkte Tiefdrucktätigkeit - gekoppelt mit einer erhöhten u-Komponente des Windes - tragen zu hohen Salzgehalten in der gesamten Schicht bei. Dies bestätigt, daß hohe Salzgehalte hauptsächlich nach einer längeren Ausstromperiode auftreten, die von einer Einstromwetterlage abgelöst wird.

Von Mai bis August, hauptsächlich jedoch in diesen beiden Monaten, hängt der Oberflächen-salzgehalt - offenbar bedingt durch windschwache Wetterlagen - nur zu einem geringen Teil vom Druck- und Windfeld ab. Der Tiefensalzgehalt wird im Oktober und besonders im November stark vom Druck- und Windfeld bestimmt. Dies sind bekanntlich die Monate, in denen optimale Einstrombedingungen vorherrschen (siehe Abschn. 4.12).

Mit dem Niederschlag und der Flußwasserzufuhr lassen sich 20 bis 25 % der Varianz des Salzgehaltes an der Oberfläche (Niederschlag 15 %, Flußwasserzufuhr 10 bis 20 %) und 35 % der Varianz des Salzgehaltes im Tiefenwasser (Niederschlag 10 bis 15 %, Flußwasserzufuhr 25 %) erklären. Besonders im Sommer und im Herbst ist der Einfluß von Niederschlag und Flußwasserzufuhr auf den Tiefensalzgehalt beachtlich. Betrachtet man die Regressionskoeffizienten dieser zwei Größen, so ergibt sich zunächst ein etwas verwirrendes Bild, da sehr viele vorher-

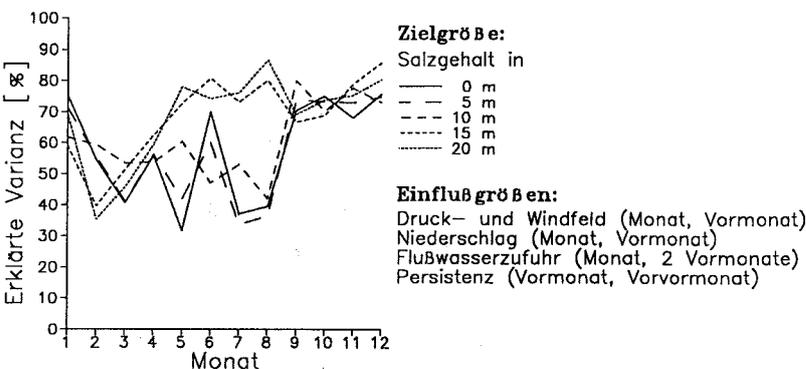
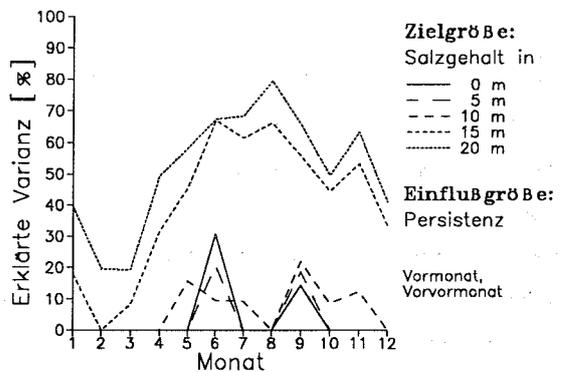
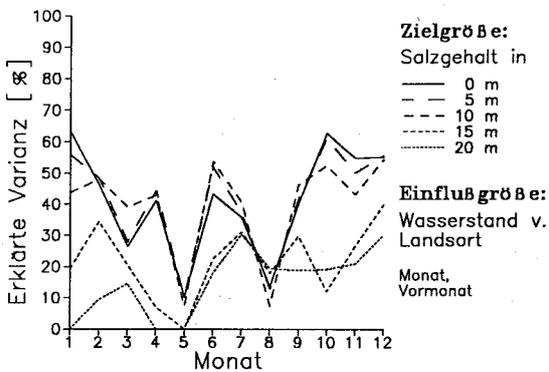
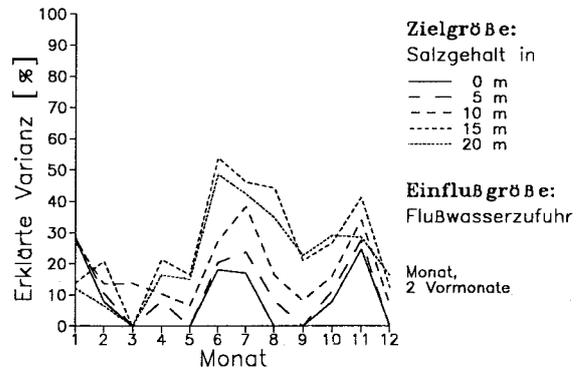
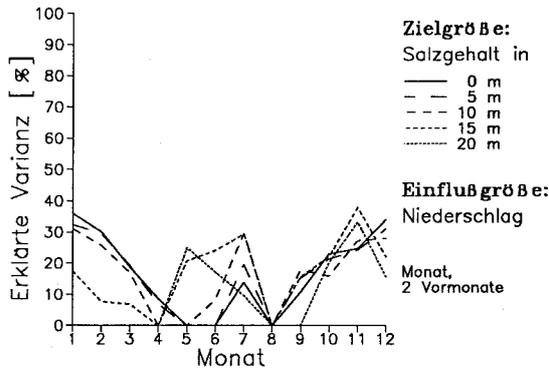
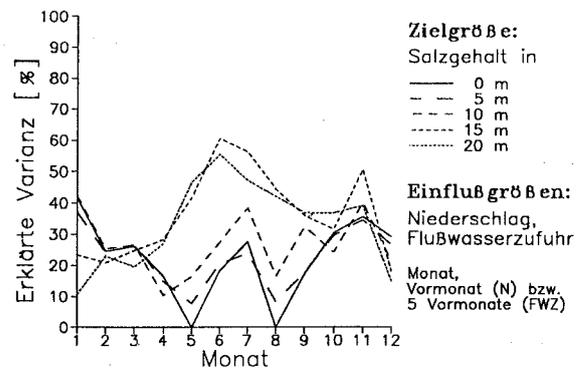
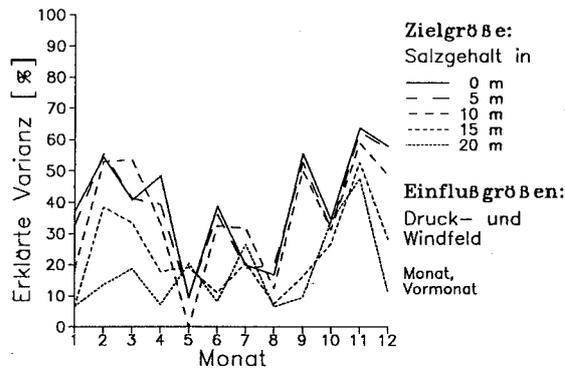


Abb. 5.9: Jahrgang der durch die unterschiedlichsten Einflußgrößen erkläraren Varianz der Zielgröße (Salzgehalte); rechts unten stehen jeweils die Monate, von denen Daten der Einflußgrößen in den Modellrechnungen verwendet wurden; zur Berechnung wurden der Bodendruck über dem Ostsee-Einzugsgebiet sowie der geostrophische Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich verwendet (N - Niederschlag, FWZ - Flußwasserzufuhr)

gehende Monate in das Modell eingehen und die Koeffizienten unterschiedliche Vorzeichen haben. Eine Rechnung, die lediglich den Einfluß des Niederschlags (bzw. der Flußwasserzufuhr) des betrachteten Monats und der zwei Vormonate auf die Salzgehalte berücksichtigt, deckt aber klare Zusammenhänge auf.

Von September bis April sind hohe Niederschläge im betrachteten Monat mit hohen Salzgehalten in der Oberschicht an der Darßer Schwelle verbunden. Dieses anscheinend widersprüchliche Ergebnis läßt sich aber ohne weiteres dadurch erklären, daß in diesem Zeitraum die hohen Niederschläge mit verstärkten Westwinden einhergehen, die die Salzfronten stark in Richtung Ostsee verschieben bzw. die durch eine stärkere Durchmischung mit dem Tiefenwasser zu einem Anstieg des Salzgehaltes in der Oberschicht führen. Das Gleichlaufen von Niederschlag und Salzgehalt ist also ein Effekt, der sich auf andere Größen zurückführen läßt. Das erkennt man auch daran, daß in den meisten Monaten - vorwiegend aber von September bis Februar - hohe Niederschläge in den Vormonaten zu geringen Salzgehalten in der Oberschicht führen. Das ist zu einem Teil ein Effekt des direkt über der Ostsee fallenden Niederschlags, zum anderen eine Folge des - mit zeitlicher Verzögerung - durch die Flußwasserzufuhr zur Ostsee gelangenden Niederschlags im Einzugsgebiet der Ostsee. Die Wirkung des Niederschlags auf das Tiefenwasser ist - von seltenen Ausnahmen abgesehen - analog zu dem auf die Oberschicht. Allerdings sind die Niederschläge im betrachteten Monat zumeist ohne Einfluß auf den Tiefensalzgehalt.

Die Flußwasserzufuhr des betrachteten Monats hat - auf Grund ihrer zeitlichen Verzögerung zwischen Eintrag in die Ostsee und Wirkung im Ostsee-Eingangsbereich - nahezu keinen Einfluß auf die Salzgehalte in der Oberschicht. Eine hohe Flußwasserzufuhr in den vorhergehenden Monaten führt - durch den vermehrten Ausstrom - fast immer zu niedrigen Salzgehalten. Die Verhältnisse beim Tiefensalzgehalt sehen ähnlich aus. Eine hohe Flußwasserzufuhr in den vorhergehenden Monaten führt in allen 12 Monaten zu niedrigen Salzgehalten, was offensichtlich durch eine Abschwächung des Tiefenkompensationsstromes bedingt ist. Die Flußwasserzufuhr des betrachteten Monats ist hauptsächlich im Sommer von Bedeutung, aber auch im Mai (Maximum der Flußwasserzufuhr) und im Oktober, der ja besonders bedeutsam für Salzwassereinbrüche ist. Qualitativ hat sie dieselbe Wirkung wie die Flußwasserzufuhr der vorhergehenden Monate.

Mit dem Wasserstand von Landsort lassen sich in der Oberschicht 40 % der Varianz des Salzgehaltes erklären, in der Tiefenschicht nur 15 bis 20 %. Im allgemeinen ist ein hoher Wasserstand von Landsort in allen Schichten mit einem hohen Salzgehalt verbunden. Auch hier tritt die inverse Wirkung des Vormonats auf: Ein niedriger Wasserstand von Landsort im Vormonat steht in Zusammenhang mit hohen Salzgehalten im betrachteten Monat. Da der Wasserstand von Landsort hauptsächlich vom Druck- und Windfeld abhängt, stimmt auch der Jahresgang der erklärbaren Varianz der Salzgehalte durch den Wasserstand von Landsort mit dem Jahresgang der erklärbaren Varianz durch das Druck- und Windfeld gut überein.

Besonders auffällig ist die Persistenzneigung des Salzgehaltes. Während in der Oberschicht praktisch keine Persistenz vorhanden ist (starker Wechsel von Ein- und Ausstrom, erklärbare Varianz des Salzgehaltes im Mittel 5 %), so ist sie in der Tiefenschicht doch sehr stark ausgeprägt (40 bis 50 % der Varianz des Salzgehaltes lassen sich mit der Persistenzneigung erklären). Dies gilt insbesondere für den Sommer und den Herbst, im Winter ist auch beim Tiefensalzgehalt nur eine geringe Persistenzneigung erkennbar. Ein Einfluß der Lufttemperatur auf den Salzgehalt konnte nicht festgestellt werden.

Beachtenswert ist, daß das Druck- und Windfeld sowie der Niederschlag und die Flußwasserzufuhr die Salzgehaltsverhältnisse in den meisten Monaten beeinflussen und daß die Wirkung dieser Größen in der Oberschicht und in der Unterschicht qualitativ gleich ist. *Verstärkte Tiefdrucktätigkeit mit erhöhten Westwinden führt zu höheren Salzgehalten in der ganzen Schicht, erhöhte Niederschläge und eine erhöhte Flußwasserzufuhr führen zu niedrigeren Salzgehalten in der ganzen Schicht.* Da das eine meist mit dem anderen gekoppelt ist, werden die Salzgehaltsverhältnisse an der Darßer Schwelle im wesentlichen zwar durch ein und dieselbe Ursache bestimmt, die aber auf zwei gegensätzliche Arten und in unterschiedlichen zeitlichen Skalen wirksam wird. Im Zeitbereich von einigen Tagen bis Wochen werden die Salzgehaltsverhältnisse vom Druck- und Windfeld bestimmt, im Zeitbereich von einigen Wochen bis Monaten vor allem von der Flußwasserzufuhr. Letztere hat besonders im Sommer größeren Einfluß auf die Salzgehaltsverhältnisse im Tiefenwasser als das Druck- und Windfeld. Da dieses aber nur die Intensität des Wasseraustausches verändern kann und nicht den resultierenden Transport (WYRTKI 1954c, siehe Abschn. 2.3.2), kann es auch auf die mittleren Salzgehaltsverhältnisse nur zweitrangigen Einfluß haben. Weil der resultierende Transport nur von der Flußwasserzufuhr abhängig ist, die ebenso wie der Tiefensalzgehalt eine hohe Persistenz aufweist, liegt der Schluß nahe, daß die mittleren Tiefensalzgehalte an der Darßer Schwelle hauptsächlich durch die Flußwasserzufuhr bestimmt werden. Daraus folgt, daß geringe Niederschläge und eine geringe Flußwasserzufuhr im Sommer und Herbst zu hohen Tiefensalzgehalten an der Darßer Schwelle führen. Auf diese Weise lassen sich ohne weiteres die erhöhten Salzgehalte im Tiefenwasser erklären, die des öfteren vor Salzwassereinbrüchen beobachtet werden. Das stellt jedoch nicht die Tatsache außer Frage, daß das Druck- und Windfeld kurzfristig stärkere Variationen des Salzgehaltes hervorruft.

Berechnet man den Anteil an Varianz des Salzgehaltes, den man mit den hier genannten Einflußgrößen zusammen (lokales Druck- und Windfeld, Niederschlag, Flußwasserzufuhr, Persistenzneigung) erklären kann, so erhält man für die Oberschicht 60 % und für die Tiefenschicht 70 %. Es ist überraschend, daß der Tiefensalzgehalt von den genannten Größen stärker beeinflusst wird als der Salzgehalt in der Oberschicht. Von September bis Januar (und beim Tiefensalzgehalt zusätzlich auch von Mai bis August) lassen sich sogar 80 % der Varianz des Salzgehaltes in allen Tiefen mit den genannten Größen erklären. Auch aus diesem Grund erscheint es unwahrscheinlich, daß Fernwirkungen (siehe Kap. 6) einen nennenswerten Einfluß auf die Salzgehaltsverhältnisse in der Beltsee haben.

5.7.5 Gemessene und mit statistischen Modellen berechnete Wasserstände

Eine Anwendungsmöglichkeit der statistischen Modelle besteht darin, aus den meteorologischen Größen die ozeanographischen zu ermitteln und sie dann mit den gemessenen Werten zu vergleichen. Deshalb wurden die Wasserstände von Landsort, Hornbaek und Gedser sowie die Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser aus den entsprechenden Regressionskoeffizienten bestimmt. Auf eine Berechnung der Salzgehalte wurde verzichtet, da der Anteil an erklärbarer Varianz durch die meteorologischen Größen in vielen Monaten zu klein war. Aus Abschn. 5.7.3 ergibt sich, daß - speziell im Winterhalbjahr - mit dem Druck- und Windfeld ein sehr hoher Teil der Varianz der Wasserstände erklärbar ist. Die gemessenen Wasserstände von Landsort im Vergleich zu den mit Hilfe des Druck- und Windfeldes berechneten Modellwerten im - für Salzwassereinbrüche wichtigen - Oktober zeigt Abb. 5.10. Dies verdeutlicht noch einmal, wie sehr die Wasserstandsverhältnisse der Ostsee vom Druck- und Windfeld bestimmt werden.

Mit den Modellwasserständen wurde analog zu den realen Daten eine Unterteilung in Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen und in solche ohne Salzwassereinbrüche vorgenommen. Hierbei zeigt sich, daß die Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne auch bei den Modellwerten zu erkennen sind. Das ist um so deutlicher der Fall, je mehr Varianz des gemessenen Wasserstandes durch den modellierten erklärt wird. So lassen sich die Unterschiede beim Wasserstand von Landsort (bis etwa 11 cm im Oktober) nahezu vollständig mit dem Druck- und Windfeld erklären. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, daß der höhere Wasserstand in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche durch einen verstärkten Einstrom in die Ostsee zustande kommt. Auch wenn die Flußwasserzufuhr im Vergleich zum Druck- und Windfeld nur einen geringen Teil der Varianz des Ostseewasserstandes erklärt und nur geringe Wasserstandsschwankungen hervorruft, so ist es doch sehr wahrscheinlich, daß die erhöhte Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche diese Wasserstandserhöhung bewirkt (siehe Abschn. 5.3).

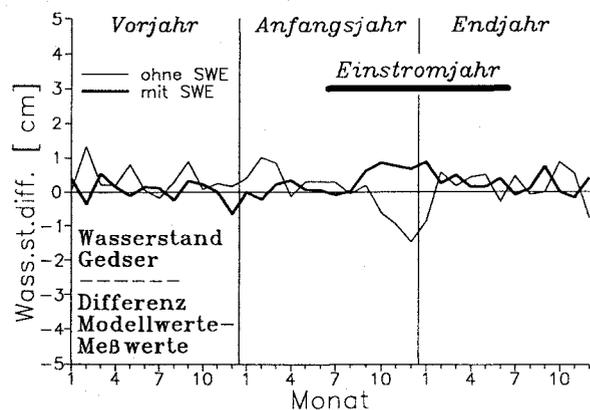
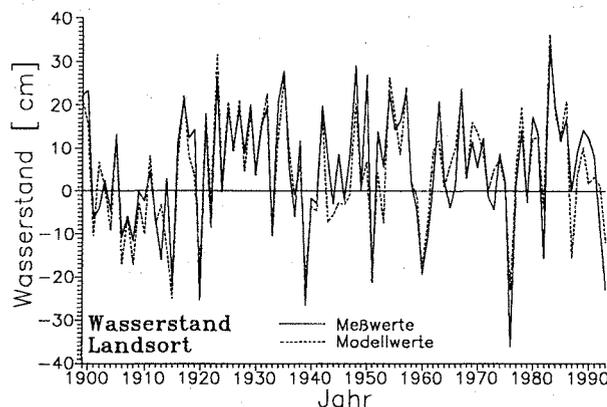


Abb. 5.10: Wasserstand von Landsort im Oktober - Meßwerte und mit dem Druck- und Windfeld berechnete Werte (linke Abb.)

Abb. 5.11: Mittlerer Verlauf der Differenz zwischen den Modellwerten und den Meßwerten des Wasserstandes Gedser im Vor-, Anfangs- und Endjahr im Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne Salzwassereinbrüche (rechte Abb.)

Weiterhin wurde der Frage nachgegangen, ob es systematische Unterschiede im Vergleich zwischen Modellwerten und Meßwerten in Abhängigkeit von Salzwassereinbrüchen gibt. Dazu wurde für alle Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen die Differenz zwischen den Modellwerten und den Meßwerten gebildet. Analog wurde mit den Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche verfahren und der Zeitraum wieder auf drei Jahre ausgedehnt. Es zeigt sich, daß es beim Wasserstand von Landsort sowie der Wasserstandsdifferenz Hornbaek-Gedser keinerlei systematische Unterschiede zwischen Modellwerten und Meßwerten in Abhängigkeit vom Auftreten von Salzwassereinbrüchen gibt. Beim Wasserstand von Gedser hingegen sind deutliche Unterschiede erkennbar, wenn man ihn aus dem Druck- und Windfeld bestimmt und mit den Meßwerten vergleicht. Berechnet man ihn aus dem Druck- und Windfeld sowie dem Wasserstand von Landsort, so treten immer noch Unterschiede auf (Abb. 5.11). Sie sind derart, daß das Modell in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen den Wasserstand überschätzt und in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche unterschätzt. Die Unterschiede treten nur von Oktober bis Januar auf und liegen - beide Unterschiede zusammengenommen - bei 1,5 bis 2 cm. Ähnliche - aber geringere - Unterschiede zeigen sich beim Wasserstand von Hornbaek.

Dieser relativ geringe systematische Fehler könnte dadurch zustande kommen, daß in Monaten mit Salzwassereinbrüchen oft extreme Wasserstandsvariationen auftreten, die dem Druck- und Windfeld ab einer bestimmten Stufe nicht mehr in gewohnter Weise zu folgen vermögen (z. B. kann bei lange anhaltenden extrem starken Westwinden irgendwann kein Wasser mehr in die Ostsee eindringen). Dies führt dazu, daß das Druck- und Windfeld in diesen Monaten mit einer geringeren Wirkung als unter normalen Umständen in die Gleichung zur Berechnung der Regressionskoeffizienten eingeht. Letztendlich führt das dann zur Überschätzung der Wasserstände durch das Modell in diesen Monaten. Das wirkt sich natürlich auch mit umgekehrtem Vorzeichen auf die Modellwerte in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche aus.

Theoretisch lassen sich die Unterschiede auch mit Variationen der Flußwasserzufuhr erklären: In Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche ist eine erhöhte Flußwasserzufuhr zu beobachten, die zu einem höheren Wasserstand von Gedser beiträgt, welche durch das Modell nicht richtig wiedergegeben wird. Dagegen spricht aber unter anderem, daß die Variationen nicht beim Wasserstand von Landsort auftreten, der wesentlich träger auf Änderungen des Druck- und Windfeldes reagiert als die Wasserstände von Hornbaek und Gedser.

5.8 Übersicht über alle Faktoren, die Salzwassereinbrüche begünstigen - Schlußfolgerungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die unterschiedlichsten meteorologischen und ozeanographischen Größen diskutiert, die Salzwassereinbrüche begünstigen oder behindern. Tab. 5.7 stellt noch einmal alle signifikanten Unterschiede von Juni des Anfangsjahres bis April des Endjahres dar (mit Ausnahme der signifikant höheren Lufttemperatur im Januar und der signifikant höheren Niederschläge im April der Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen, da

Meteorologische Größen	Differenz	Sig.	Ozeanographische Größen	Differenz	Sig.
Juni					
höherer Druck über dem OEG	+1,1 hPa	95	geringerer Wasserstand Landsort	-3,7 cm	95
geringere u-Komponente des geostr. Windes	-0,7 m/s		höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+1,2 PSU	
geringere Niederschläge im nördlichen OEG	-7 mm		höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+1,5 PSU	
höhere Temperaturen im OEG	+0,8 °C	99			
Juli					
höherer Druck über dem OEG	+0,4 hPa		geringerer Wasserstand Landsort	-3,0 cm	
geringerer Betrag des geostr. Windes	-0,5 m/s	95	geringere Flußwasserzufuhr	-2,2 km ³	
geringere u-Komponente des geostr. Windes	-0,8 m/s	95	höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+1,6 PSU	
geringere Niederschläge im nördlichen OEG	-4 mm		höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,0 PSU	
höhere Temperaturen im OEG	+0,5 °C				
August					
höherer Druck über dem OEG	+0,6 hPa		geringerer Wasserstand Landsort	-3,9 cm	
geringerer Betrag des geostr. Windes	-0,4 m/s		geringerer Wasserstand Hornbaek	-2,2 cm	
geringere u-Komponente des geostr. Windes	-0,9 m/s	95	geringere Flußwasserzufuhr	-3,8 km ³	95
geringere Niederschläge im OEG	-5 mm		höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+2,6 PSU	95
geringere Niederschläge im nördlichen OEG	-11 mm	95	höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,6 PSU	
höhere Temperaturen im OEG	+0,7 °C	99			
September					
höherer Druck über dem OEG	+2,0 hPa	95	geringerer Wasserstand Landsort	-5,8 cm	95
geringerer Betrag des geostr. Windes	-0,1 m/s		geringerer Wasserstand Hornbaek	-4,3 cm	95
geringere u-Komponente des geostr. Windes	-0,6 m/s		geringerer Wasserstand Gedser	-2,7 cm	
geringere Niederschläge im OEG	-7 mm		geringere Flußwasserzufuhr	-6,9 km ³	99,9
geringere Niederschläge im südlichen OEG	-7 mm		höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+2,2 PSU	95
geringere Niederschläge im nördlichen OEG	-7 mm		höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,4 PSU	95
Oktober					
höherer Druck über dem OEG	+3,0 hPa	99	geringerer Wasserstand Landsort	-10,2 cm	99,9
geringerer Betrag des geostr. Windes	-0,9 m/s	95	geringerer Wasserstand Hornbaek	-7,6 cm	99
geringere u-Komponente des geostr. Windes	-1,7 m/s	95	geringerer Wasserstand Gedser	-5,2 cm	99
geringerer absoluter/relativer MSI	-9,2	95	geringere Flußwasserzufuhr	-10,7 km ³	99,99
geringere Niederschläge im OEG	-16 mm	99	höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+1,9 PSU	95
geringere Niederschläge im südlichen OEG	-14 mm	95	höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,3 PSU	99
geringere Niederschläge im nördlichen OEG	-18 mm	99,9			

Tab. 5.7: (siehe nächste Seite)

Meteorologische Größen	Differenz	Sig.	Ozeanographische Größen	Differenz	Sig.
November					
keine erkennbaren Unterschiede			geringerer Wasserstand Landsort	-5,2 cm	
			geringerer Wasserstand Hornbaek	-3,4 cm	
			geringerer Wasserstand Gedser	-7,3 cm	99
			geringere Flußwasserzufuhr	-8,4 km ³	99,99
			höherer Salzgehalt G. Rev 0 m*	+1,7 PSU	99,9
			höherer Salzgehalt G. Rev 5 m*	+1,9 PSU	99,9
			höherer Salzgehalt G. Rev 10 m*	+2,2 PSU	99,9
			höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+3,0 PSU	99,9
			höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,7 PSU	99
Dezember					
keine erkennbaren Unterschiede			geringerer Wasserstand Landsort	-3,9 cm	
			geringerer Wasserstand Hornbaek	-3,3 cm	
			geringerer Wasserstand Gedser	-4,8 cm	95
			geringere Flußwasserzufuhr	-7,3 km ³	99,99
			höherer Salzgehalt G. Rev 0 m*	+1,1 PSU	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 5 m*	+1,2 PSU	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 10 m*	+1,5 PSU	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+2,1 PSU	99
			höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,5 PSU	99
Januar					
keine erkennbaren Unterschiede			geringere Flußwasserzufuhr	-6,9 km ³	99,99
			höherer Salzgehalt G. Rev 0 m*	+1,2 PSU	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 5 m*	+1,4 PSU	99
			höherer Salzgehalt G. Rev 10 m*	+1,7 PSU	99
			höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+2,3 PSU	99
			höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,9 PSU	99,9
Februar					
keine erkennbaren Unterschiede			geringere Flußwasserzufuhr	-6,3 km ³	99,99
			höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+1,2 PSU	
			höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+1,7 PSU	
März					
keine erkennbaren Unterschiede			geringere Flußwasserzufuhr	-6,9 km ³	99
			höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+1,8 PSU	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,2 PSU	99
April					
keine erkennbaren Unterschiede			geringere Flußwasserzufuhr	-6,7 km ³	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 10 m	+0,9 PSU	95
			höherer Salzgehalt G. Rev 15 m	+1,9 PSU	99
			höherer Salzgehalt G. Rev 20 m	+2,0 PSU	95
Einstromjahr insgesamt					
höhere Verdunstung	+13 mm				
höheres Verhältnis	+5,0 %	99,99			
Verdunstung/Niederschlag					

Tab. 5.7: Übersicht über alle Größen, die Salzwassereinbrüche begünstigen (Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne), von Juni des Anfangsjahres bis April des Endjahres; Abkürzungen: Druck = Bodendruck, geostr. Wind = geostrophischer Wind über dem Ostsee-Eingangsbereich, OEG = Ostsee-Einzugsgebiet; * = nur durch Salzwassereinbrüche verursacht

diese offenbar nicht mit Salzwassereinbrüchen in Zusammenhang stehen). Weiterhin wurden alle Unterschiede berücksichtigt, die vom Sommer bis zum Winter des Einstromjahres mit demselben Vorzeichen auftreten und nur in einigen Monaten signifikant sind. Dazu zählen auch die meist signifikanten Differenzen beim Salzgehalt von Gedser Rev in 15 m und 20 m Tiefe. Da vor dem Juni des Anfangsjahres keine Unterschiede erkennbar sind, die das Auftreten von Salzwassereinbrüchen beeinflussen könnten, und ab Mai des Endjahres keine Salzwassereinbrüche mehr erfolgen, wurde die Übersicht auf den Zeitraum Juni bis April beschränkt.

Zunächst fällt auf, daß Unterschiede bei den meteorologischen Größen nur von Juni bis Oktober auftreten. Ab November sind Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne nur noch bei den ozeanographischen Größen zu finden (siehe Abschn. 5.3). Es ist offensichtlich, daß ein hoher Luftdruck im Herbst über dem Ostseegebiet - gekoppelt mit einer Abschwächung der Westkomponente des Windes, geringeren Niederschlägen und einer verminderten Flußwasserzufuhr - sowie erhöhte Temperaturen im Sommer und eine erhöhte Verdunstung im Einstromjahr optimale Bedingungen für das Eintreten von Salzwassereinbrüchen im Herbst und Winter schaffen. Diese führen zu einer Verringerung des Wasserstandes der Ostsee, der Wasserstände im Ostsee-Eingangsbereich und des Nettoausstromes. Da diese optimalen Bedingungen bevorzugt im September und Oktober anzutreffen sind, erklärt das auch den Jahresgang der Salzwassereinbrüche mit einem Maximum im November und Dezember, also noch vor dem Maximum der Zonalströmung. Hieraus kann man den Schluß ziehen, daß das Vorhandensein dieser günstigen Bedingungen für das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen offenbar wichtiger ist als die über mehrere Tage andauernden starken Westwinde, die den Salzwassereinbruch letztendlich bewirken (siehe Kap. 4). Der erhöhte Luftdruck sowie die erniedrigten Wasserstände der Ostsee etwa 60 bis 20 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode eines Einbruchs lassen sich ebenfalls mit den Druckverhältnissen im Oktober erklären. Da die meisten Einbrüche im November und Dezember auftreten, ist der Oktober besonders häufig Bestandteil der 100tägigen erweiterten Vorlaufphase.

Wenn man Tab. 5.7 betrachtet, werden auch die Unterschiede beim Jahresgang der Stärke der Salzwassereinbrüche verursachenden Wetterlage verständlich (Abschn. 4.12, Tab. 4.5). Dabei hat es den Anschein, daß Salzwassereinbrüche auf zwei quantitativ unterschiedliche Arten zustande kommen:

1. Salzwassereinbrüche von September bis Dezember

Für diese Einbrüche ist eine ausgeprägte Hochdruckwetterlage über der Ostsee entscheidend, die durch eine schwache bis mittlere Einstromwetterlage abgelöst wird. Durch den niedrigen Wasserstand der Ostsee und die geringe Flußwasserzufuhr bedingt, reicht solch eine Wetterlage aus, um zu einem Salzwassereinbruch zu führen.

2. Salzwassereinbrüche im Januar und Februar

Die Einbrüche werden hauptsächlich durch die in dieser Jahreszeit häufiger vorkommende extrem ausgeprägte Einstromwetterlage verursacht. Der vorhergehende Hochdruckeinfluß über der Ostsee hat nur zweitrangige Bedeutung.

Diese Zweiteilung der Ursachen von Salzwassereintrüben ist natürlich sehr allgemein. Auch im Herbst können extreme Einstromwetterlagen ohne vorhergehenden Hochdruckeinfluß Salzwassereintrübe hervorrufen, ebenso wie schwächere Einstromwetterlagen nach einem Hoch im Winter dazu führen können. Sehr starke Salzwassereintrübe treten nur ein, wenn ein sehr ausgeprägtes Hochdruckgebiet durch eine mehrwöchige extreme Einstromwetterlage abgelöst wird.

Mit den in diesem Kapitel dargelegten Ergebnissen lassen sich auch die zwei Phasen erhöhter Salzgehalte im Tiefenwasser der Darßer Schwelle in der erweiterten Vorlaufphase erklären (siehe Abschn. 4.11). Durch die stark verringerte Flußwasserzufuhr in Einstromjahren mit Salzwassereintrüben ist der Ausstrom in der Oberflächenschicht reduziert. Das führt zu einer Zunahme des Tiefenkompensationsstromes, der letztlich zu einem Anstieg der Salzgehaltswerte im Tiefenwasser führt. Dieser Prozeß setzt im Mittel 3 bis 2 Monate vor Beginn der Haupteinstromperiode ein (Abb. 4.17). Die kurzzeitige Abnahme des Salzgehaltes 50 bis 30 Tage vor Beginn der Haupteinstromperiode läßt sich mit dem in dieser Zeit besonders ausgeprägten Hochdruckeinfluß über der Ostsee erklären, der zu einem verstärkten Ausstrom in der Oberflächenschicht führt (Abnahme des Wasserstandes der Ostsee) und der damit vorübergehend den Tiefeneinstrom wieder abschwächt. Somit lassen sich die erhöhten Salzgehalte im Tiefenwasser vor Salzwassereintrüben aus dem veränderten Wasserhaushalt der Ostsee erklären.

Da sich die verschiedensten Größen wechselseitig beeinflussen und miteinander gekoppelt sind (z. B. hoher Luftdruck mit geringen Niederschlägen, geringer u-Komponente des Windes, niedriger Flußwasserzufuhr und niedrigem Wasserstand der Ostsee), ist es schwer, die entscheidende für das Zustandekommen von Salzwassereintrüben herauszufinden. Möglicherweise ist auch nur ihr komplexes Zusammenwirken in der Lage, optimale Bedingungen für das Auftreten von Salzwassereintrüben zu erzeugen. Sollten Variationen in der Flußwasserzufuhr entscheidend für das Auftreten oder Ausbleiben von Salzwassereintrüben sein, und vieles spricht dafür, so hat dies vielseitige Konsequenzen. So läßt sich ihr Ausbleiben nicht mehr allein mit Änderungen der atmosphärischen Zirkulation erklären. Die Flußwasserzufuhr ist ein Resultat komplexer Wirkmechanismen, da sie u. a. von Niederschlägen, Verdunstung, Vegetation und nicht zuletzt von menschlichen Eingriffen (in der Phase des Jahresganges) beeinflußt wird. Das bedeutet, daß eine erhöhte Flußwasserzufuhr im Winter ihre meteorologischen Ursachen im Winter, im Herbst oder im Sommer haben kann oder aber überhaupt keine meteorologischen Ursachen dafür vorhanden sein müssen, da die Flußwasserregulierung den natürlichen Abfluß stark modifiziert und auf viele Monate transformiert. Es ist nicht anzunehmen, daß die Flußwasserregulierung die Hauptursache für das Ausbleiben der Salzwassereintrübe in den 80er Jahren ist, zumal der Ausbau der Staubecken kontinuierlich erfolgte, die Flußwasserzufuhr im Sommer zwischen Einstromjahren mit Salzwassereintrüben und solchen ohne keine Unterschiede zeigt und das Ausbleiben der Eintrübe relativ abrupt erfolgte. Da aber die Regulierung im September und Oktober keine großen Änderungen in der Flußwasserzufuhr bewirkt, von November bis April aber ungünstige Verhältnisse für das Auftreten von Salzwassereintrüben schafft, wäre auch in Zukunft nur noch mit einem vereinzelten Auftreten von Salzwassereintrüben zu rechnen.

6. Fernwirkungen - begünstigen sie das Auftreten von Salzwassereinbrüchen?

6.1 Zur Hypothese von Dickson

In den Kap. 4 und 5 wurde festgestellt, daß im Tiefenwasser an der Darßer Schwelle vor Salzwassereinbrüchen im Mittel höhere Salzgehalte vorhanden sind. Dies bestätigt die Aussagen anderer Autoren, daß erhöhte Salzgehalte im Tiefenwasser des Übergangsbereiches zwischen Nord- und Ostsee begünstigend für Salzwassereinbrüche sind (siehe Abschn. 2.3). Als Ursachen dafür wurden bisher Einströme größerer Mengen salzreicher atlantischer Wassermassen in die Nordsee vermutet bzw. ein weites Vordringen salzreicher Wassermassen ins Skagerrak und Kattegat.

DICKSON (1971, 1973) wies nach, daß die hohen Salzgehalte in allen europäischen Schelfmeeren, die im Abstand von etwa drei bis vier Jahren zu beobachten sind, mit dem periodischen Auftreten eines relativ beständigen Druckmusters erklärt werden können, das durch negative Druckanomalien über dem westlichen Nordatlantik und positive Druckanomalien über dem östlichen Nordatlantik gekennzeichnet ist. Solch ein Druckmuster führt zu einem verstärkten Transport salzreicheren Wassers aus den Subtropen in nördlichere Breiten und verursacht so die erhöhten Salzgehalte in den europäischen Schelfmeeren. Nach DICKSON treten Salzwassereinbrüche in die Ostsee vorwiegend zu Zeiten des höchsten Salzgehaltes in den europäischen Schelfmeeren - und damit auch im Skagerrak und Kattegat - auf und stellen einen Begleitumstand des Transports salzreichen Wassers in die Schelfmeere dar (siehe Abschn. 2.3.4).

Ab Anfang der 70er Jahre konzentrierte sich die Forschung zu den meteorologischen Ursachen von Salzwassereinbrüchen auf den Nachweis bestimmter spektraler Schwankungen im Druckfeld über dem Nordatlantik und deren Zusammenhang mit den Salzgehaltsverhältnissen im Skagerrak und Kattegat (siehe Abschn. 2.3.7). In all diesen Untersuchungen wird von einer uneingeschränkten Gültigkeit der DICKSONSchen Hypothese ausgegangen und diese als ein entscheidendes Kriterium für das Auftreten von Salzwassereinbrüchen betrachtet. Lokale Bedingungen im Ostseegebiet wurden hierbei als zweitrangig eingestuft. Auch der von WYRTKI (1954a) als bedeutsam bezeichneten vorhergehenden Ostlage, die zu einem niedrigeren Wasserstand der Ostsee führt, wurde eine geringere Bedeutung beigemessen.

In der vorliegenden Arbeit konnte die Existenz erhöhter Salzgehaltswerte im Tiefenwasser von Gedser Rev vor Salzwassereinbrüchen mit Schwankungen im Wasserhaushalt der Ostsee erklärt werden (siehe Kap. 5). Diese Erklärung liegt schon deshalb nahe, da die Unterschiede bei den Salzgehaltswerten nur in den Monaten signifikant sind, in denen bereits die lokalen meteorologischen und ozeanographischen Größen deutliche Anomalien zeigen. Aber auch ein bis anderthalb Jahre vor dem Winter des Einstromjahres sind Unterschiede erkennbar, so daß es zweifelhaft erscheint, daß Unterschiede im Salzgehalt eine notwendige Voraussetzung für Salzwassereinbrüche sind. Der These, daß die lokalen Bedingungen allein nicht in der Lage sind, starke Salzwassereinbrüche zu begünstigen, muß hier also ganz klar widersprochen

werden. Die sehr deutlichen Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne insbesondere im Herbst zeigen, daß im Ostseegebiet sehr wohl günstige oder ungünstige Bedingungen für das Eintreten von Salzwassereinbrüchen geschaffen werden. Lediglich die Einstromwetterlage ist regionaler Natur. Sie tritt in Wintern mit Salzwassereinbrüchen nicht häufiger auf und kann damit auch nicht das Kriterium für das Eintreten oder Ausbleiben dieser Ereignisse in einem Winter sein. Dieser Aspekt stimmt mit der DICKSONschen Hypothese überein.

Auch wenn sich die erhöhten Salzgehalte im Tiefenwasser der Beltsee aus Änderungen im Wasserhaushalt der Ostsee erklären lassen, so bleibt dennoch die Frage, ob nicht ein weites Vordringen salzreicher atlantischer Wassermassen in die europäischen Schelfmeere - das durch das von DICKSON beschriebene Druckmuster ausgelöst wird - begünstigend für Salzwassereinbrüche wirkt. Dieser Frage wird in den folgenden Abschnitten nachgegangen.

6.2 Zur Periodizität von Salzwassereinbrüchen

Es war nicht das Ziel dieser Arbeit, mit den unterschiedlichsten Datenreihen die vorliegenden Ergebnisse über Periodizitäten bei meteorologischen Größen bzw. beim Salzgehalt zu verifizieren. Sie sind offensichtlich, erklären das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen jedoch nicht. Das Problem bei allen spektralanalytischen Untersuchungen bezüglich des Eintretens von Salzwassereinbrüchen ist, daß man bestimmte Periodizitäten im Salzgehalt des Tiefenwassers des Kattegats, die mit Periodizitäten in der Atmosphäre - auch über dem Nordatlantik - gekoppelt sind, uneingeschränkt nach der DICKSONschen Hypothese auf das Auftreten von Salzwassereinbrüchen überträgt. Das setzt aber voraus, daß auch Salzwassereinbrüche durch dieses periodische Auftreten gekennzeichnet sind. Deshalb muß zunächst die Frage geklärt werden, ob sie ein periodisches Verhalten zeigen.

Salzwassereinbrüche sind kurzzeitige Extremereignisse, die nur unter bestimmten Voraussetzungen erfolgen. Die Aufdeckung von Periodizitäten beim Auftreten dieser Ereignisse ist mit der Zeitreihe aller Salzwassereinbrüche seit 1897 nach FRANCK et al. (1987) möglich. Analog zu Kap. 5 erfolgte hierzu als erstes eine Unterteilung aller Einstromjahre in solche mit Salzwassereinbrüchen (1) und in solche ohne Salzwassereinbrüche (0). Anschließend wurde von dieser quasi-digitalen Zeitreihe eine Art Autokorrelation ermittelt, indem die Reihe dupliziert und zunächst mit sich selbst verglichen wurde. Zuerst erfolgte also für eine Zeitverschiebung von 0 Jahren die Ermittlung der Anzahl der Übereinstimmungen (= Anzahl der vorhandenen Werte) und die Anzahl der Unterschiede (= 0). Im nächsten Schritt wurde die eine Reihe um ein Jahr verschoben und wiederum die Anzahl der Übereinstimmungen und Unterschiede ermittelt. Dies wurde fortgesetzt bis zu einer zeitlichen Verschiebung von 10 Jahren. Die Ergebnisse zeigt Abb. 6.1. Es fällt auf, daß die Kurve der Übereinstimmungen (00, 11) bei einer Periode von 3 Jahren ein Minimum und bei 4 Jahren ein Maximum hat. Das nächste Minimum tritt erst bei 8 Jahren auf. Auch wenn man nur die Übereinstimmungen der Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen (11) zählt, sieht die "Autokorrelationsfunktion"

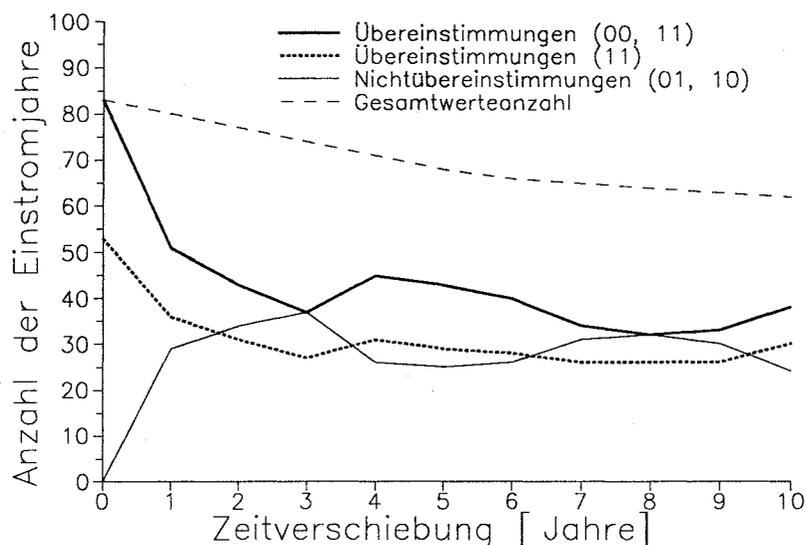


Abb. 6.1: "Autokorrelationsfunktion" der Einstromjahre bis zu einer maximalen Verschiebung von 10 Jahren (0 = Einstromjahr ohne Salzwassereinbrüche, 1 = Einstromjahr mit Salzwassereinbrüchen)

ähnlich aus. Da die sich hier andeutende 4jährige Schwingung nur schwach ausgeprägt ist, kann eine mögliche Schwingung dieser Art in der Atmosphäre nur zu einem sehr geringen Teil zur Erklärung von Salzwassereinbrüchen beitragen. Da HEINB (1994) und HUPFER et al. (1994) Variationen bei dreijährigen Schwingungen über dem Nordatlantik (35° N bis 55° N) aufzeigten, spricht dies nicht für einen Zusammenhang zwischen diesem atmosphärischen Schwingungsverhalten und dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen. Gegen eine dreijährige Periode beim Auftreten von Salzwassereinbrüchen (nach der Definition von FRANCK et al.) spricht auch die Tatsache, daß sich in den meisten Wintern Salzwassereinbrüche ereignet haben. Hieraus kann man den Schluß ziehen, daß das Auftreten von Salzwassereinbrüchen keine klaren Periodizitäten aufweist und daß sie weitaus öfter - als nach der DICKSONschen Hypothese möglich - vorkommen können. Schon daraus folgt, daß Salzwassertransporte, wie sie von DICKSON beschrieben worden sind, bestenfalls Salzwassereinbrüche verstärken können, zu ihrem Auftreten aber nicht notwendig sind.

6.3 Die Druckanomalie nach DICKSON und Meridionalindizes im Vorfeld von Salzwassereinbrüchen

Die von DICKSON (1971, 1972, 1973) beschriebenen quasiperiodischen Druckanomalien über dem Nordatlantik führen zu einem verstärkten Transport salzhaltigen Wassers in die europäischen Schelfmeere. Wenn das Auftreten dieser Anomalien Salzwassereinbrüche begünstigt, so müßten sie vor Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen um so deutlicher erkennbar sein, wenn man - wie in Kap. 5 beschrieben - die Einstromjahre in solche mit Salzwassereinbrüchen und in solche ohne unterteilt und anschließend jeweils die Druckanomalien über dem Nordatlantik für den Zeitraum Vorjahr, Anfangsjahr und Endjahr berechnet. Nach BÖRNGEN (1978b) - der davon ausgeht, daß die Druckanomalien über dem Nordatlantik 1,5 bis 2 Jahre vor Salzwassereinbrüchen auftreten - müßten sich im Vorjahr deutliche Unterschiede zeigen. Die hier verwendete Betrachtungsweise hat den Vorteil, daß sie vollkommen unabhängig von

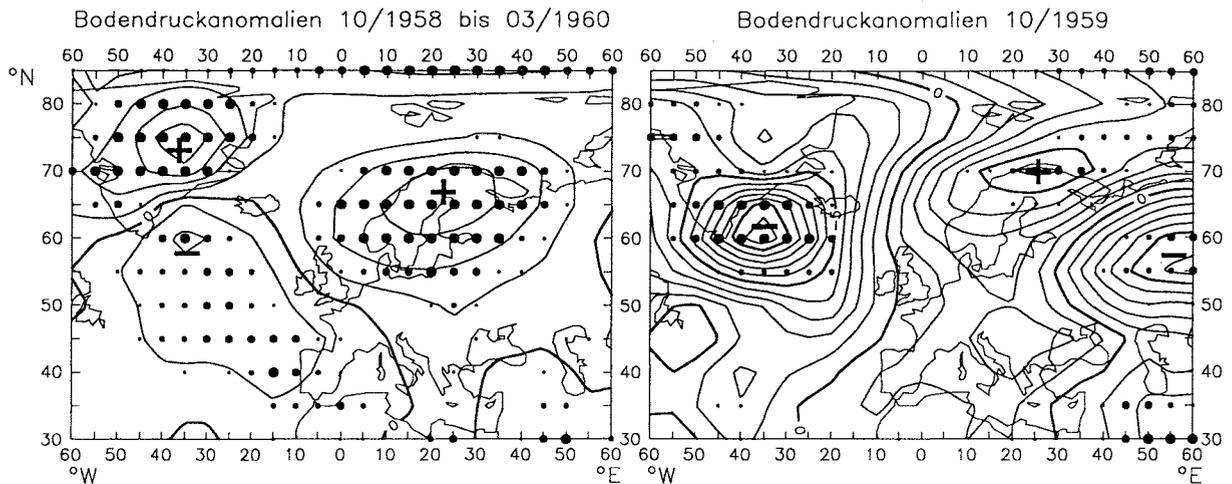


Abb. 6.2: Mittlere Anomalien des Bodendruckfeldes im Zeitraum Oktober 1958 bis März 1960 und im Oktober 1959; die Kreise stellen das Niveau dar (95 % - kleinster Kreis, 99 %, 99,9 % und 99,99 % - größter Kreis), auf dem die Anomalien signifikant von 0 verschieden sind (t-Test, SCHÖNWIESE 1992); Isobarenabstand: 1 hPa

bestimmten Periodizitäten sowohl im Druckfeld als auch beim Auftreten von Salzwassereinbrüchen ist. Variationen in der Periodenlänge oder auch ein Ausbleiben der Anomalien beeinflussen das Ergebnis nicht, da bei einem kausalen Zusammenhang ein Auftreten der Druckanomalien im allgemeinen mit dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen einhergehen, ein Ausbleiben hingegen mit dem Fehlen von Salzwassereinbrüchen verbunden sein müßte.

Zur Beschreibung der Zirkulation über dem Nordatlantik wurden 7 Indizes gebildet. Die ersten zwei wurden analog dem relativen MSI (siehe Abschn. 3.2 und 4.6) berechnet. Als Basisdruckverteilung dienten hier aber nicht die mittleren Druckanomalien am ersten Tag eines Salzwassereinbruchs, sondern bei Index 1 die mittleren Druckanomalien im Zeitraum Oktober 1958 bis März 1960 und bei Index 2 die mittleren Druckanomalien im Oktober 1959 (Abb. 6.2). Diese beiden Druckmuster wurden gewählt, da sie DICKSON (1971) als typisch für sein "*anomales und beständiges atmosphärisches Zirkulationsmodell*" bezeichnet hat. Ein hoher Kovarianzkoeffizient zu diesen Druckmustern steht also für ein Druckfeld, dessen Anomalien den Anomalien nach DICKSON sehr nahe kommen. Bei den anderen Indizes handelt es sich um Meridionalindizes. Die Indizes 3 bis 6 stellen Luftdruckdifferenzen zwischen der Westküste Europas und der Ostküste Nordamerikas auf den Breitenkreisen 55° N, 50° N, 45° N und 40° N dar (Abb. 6.3). Hierbei handelt es sich um die Luftdruckdifferenzen, bei denen HEINB (1994) und HUPFER et al. (1994) das Auftreten einer 3jährigen Periode in diesem Jahrhundert und ihr Abbrechen Mitte der 70er Jahre festgestellt haben. Der 7. Index stellt das arithmetische Mittel der 4 Meridionalindizes dar und bildet damit eine Art Gebietsmittel.

Mit den Indizes wurde wie in Kap. 5 verfahren, um Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne herauszufinden. Die Ergebnisse zeigt Abb. 6.4. Bei allen Indizes sind während der dargestellten drei Jahre keine systematischen Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne zu erkennen. Nennenswerte Einflüsse der Meridionalzirkulation auf Salzwassereinbrüche noch vor Beginn des

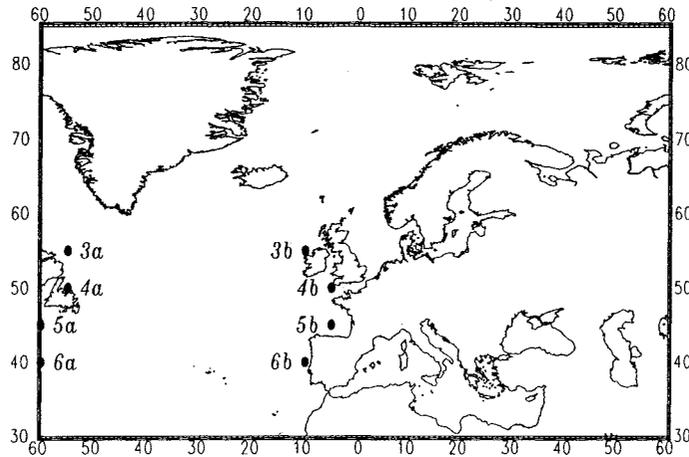


Abb. 6.3: Die 8 verwendeten Gitterpunkte zur Berechnung der 5 Meridionalindizes (östlicher Gitterpunkt - westlicher Gitterpunkt, nach HEINB 1994)

Vorjahres, also mehr als 1,5 bis 2,5 Jahre vor Beginn eines Salzwassereintruchs, kann man ebenfalls ausschließen (siehe Abschn. 6.4). Die vereinzelt auftretenden unsystematischen signifikanten Abweichungen sind ohne jegliche Bedeutung für das Zustandekommen von Salzwassereintrüchen. Der einzige auffällige Unterschied zwischen den beiden Reihen ist im Herbst des Einstromjahres bei den Kovarianzkoeffizienten zu den Druckverteilungen zu erkennen (Indizes 1 und 2). Das ist eine Folge der Ähnlichkeit dieser Druckverteilungen mit derjenigen, die im Herbst für günstige Bedingungen für Salzwassereintrüche sorgt (siehe Kap. 5). Somit kann man aus dem Dargelegten den Schluß ziehen, daß Änderungen in der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik keinen Einfluß auf das Auftreten von Salzwassereintrüchen haben. Die Übereinstimmung des von DICKSON angegebenen Druckmusters mit dem Auftreten von Salzwassereintrüchen rührt folglich daher, daß das Hoch über dem Ostseegebiet - das auch Bestandteil dieses Druckmusters ist - zu günstigen Voraussetzungen für Salzwassereintrüche führt.

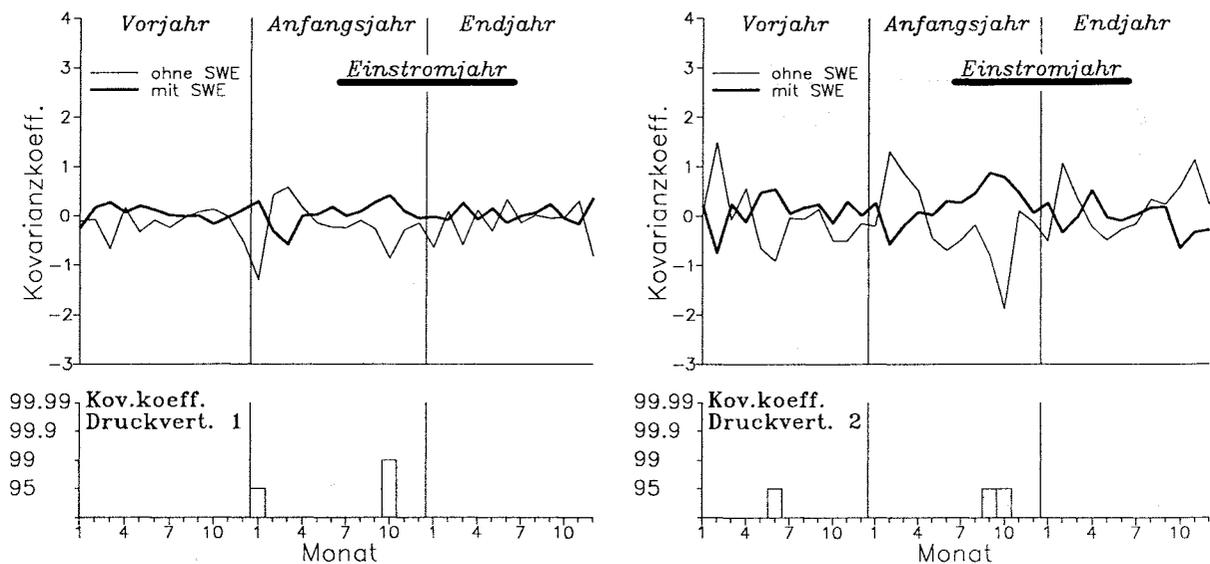


Abb. 6.4: Mittlerer Verlauf der 7 Indizes im Vor-, Anfangs- und Endjahr im Vergleich zwischen Einstromjahren mit Salzwassereintrüchen und solchen ohne Salzwassereintrüche; die Säulen geben das Signifikanzniveau an, auf dem sich die Monatsmittel voneinander unterscheiden

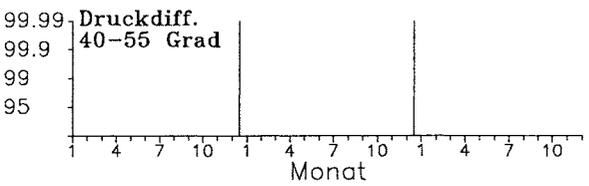
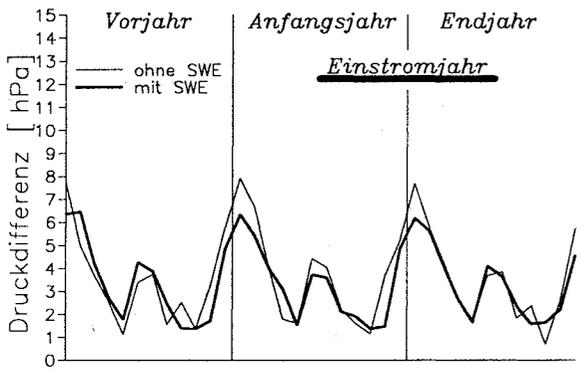
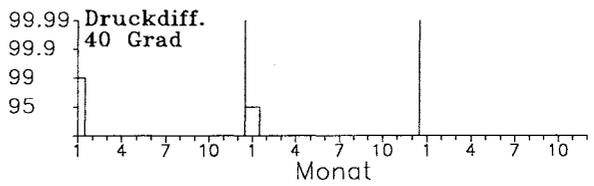
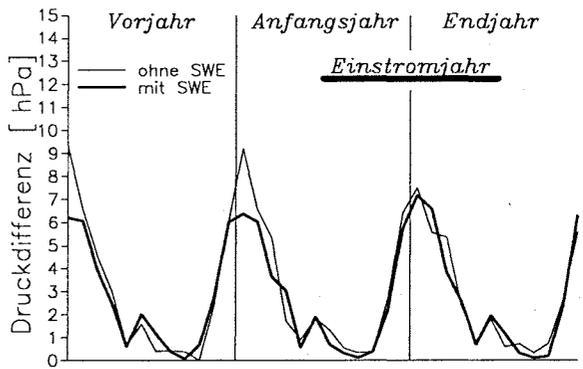
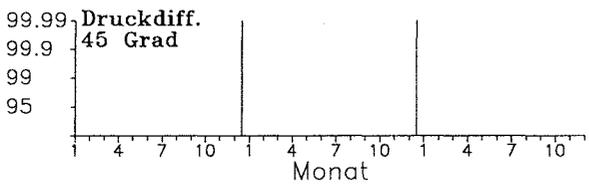
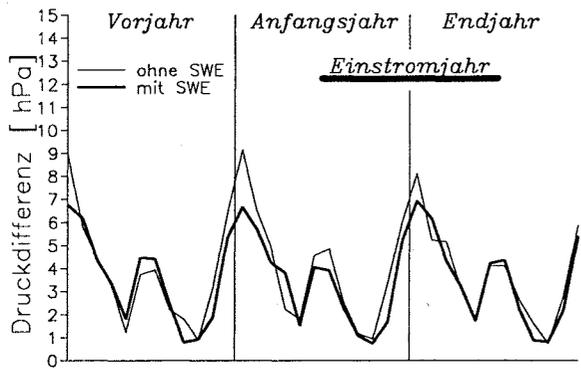
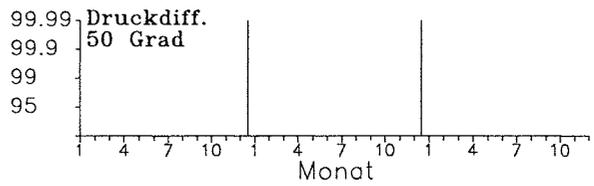
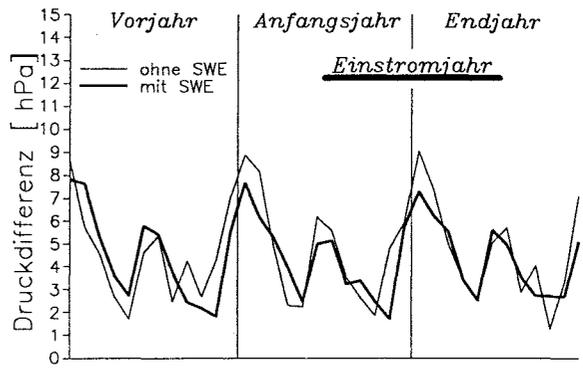
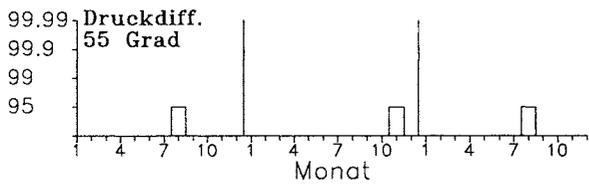
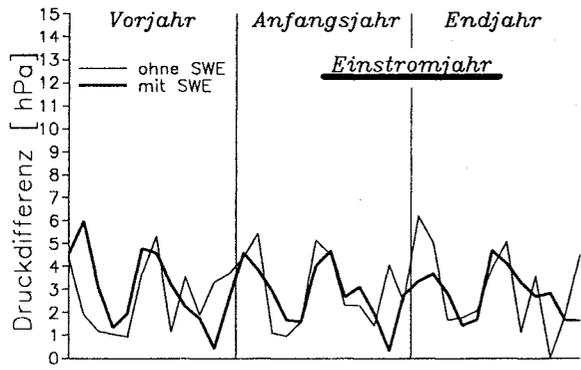


Abb. 6.4: (Fortsetzung)

6.4 Fernwirkungen - Anomalien im Druckfeld in Jahren vor Salzwassereinbrüchen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt speziell die von DICKSON (1971) beschriebenen Änderungen in der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik als mögliche Ursache von Salzwassereinbrüchen diskutiert worden sind, soll nun der Frage nachgegangen werden, ob es vielleicht andere auffällige Anomalien im Bodendruckfeld gibt, die im Zusammenhang mit Salzwassereinbrüchen stehen. Hierzu wurde zunächst wieder nach Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne unterschieden. Im Gegensatz zu Kap. 5, in dem daraufhin die Monatsmittel des Druckfeldes für die einzelnen Monate gebildet wurden, erfolgte hier die Berechnung von Dreimonatsmitteln. Dies erschien ratsamer, da Fernwirkungen - um z. B. erhöhte Transporte salzreichen Wassers zu bewirken - über einen längeren Zeitraum auftreten müssen, um erkennbare Effekte hervorzurufen. Begonnen wurde mit dem Zeitraum November bis Januar des Einstromjahres (der nachfolgend als Kerneinstromperiode bezeichnet wird), da in diesem Zeitraum die meisten Salzwassereinbrüche auftreten. Er hat die Zeitverschiebung 0 Monate. Analog dazu wurden die anderen Monatsmittel vor diesem Zeitraum gebildet, der Zeitabschnitt von August bis Oktober des Anfangsjahres hat z. B. die Zeitverschiebung 3 Monate. Auf diese Weise wurden alle Dreimonatsmittel bis zu 48 Monaten vor der Kerneinstromperiode vor Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne berechnet. Das Prinzip verdeutlicht Tab. 6.1.

Monate vor K.	J A S O N D	J F M A M J J A S O N D	J F M A M J
	Vorjahr (Juli - Dez.)	A n f a n g s j a h r	Endjahr (Jan. - Juni)
0			x
1			x x x
2			x x x
3			x x x
...			
12		x	
13		x x x	
...			

Tab. 6.1: Schema der Berechnung der Dreimonatsmittel; x bezeichnet die Monate, aus denen das jeweilige Monatsmittel berechnet wurde (z. B. 3 Monate vor der Kerneinstromperiode: August bis Oktober des Anfangsjahres, 12 Monate vor der Kerneinstromperiode: November des Vorjahres bis Januar des Anfangsjahres)

Als Ergebnis erhält man 2 x 49 Druckfelder mit Druckanomalien in den verschiedensten Gegenden. Die Höhe der Anomalien und ihre räumliche Ausdehnung sind dabei sehr unterschiedlich, die meisten sind auf einem höheren oder niedrigeren Niveau signifikant. Darin besteht aber auch das Problem: die Beurteilung der Frage, ob die Druckanomalien mit dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen in Verbindung stehen. So können einerseits bestimmte Wechselwirkungen bestehen, z. B. durch Verstärkung oder Abschwächung von Meeresströmungen (DICKSON 1971, 1973), andererseits ist eine großskalige atmosphärische Kopplung des Auftretens der positiven Druckanomalien über dem Ostseegebiet mit anderen Anomalien denkbar. Genaugut kann es aber auch sein, daß die Anomalien mit dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen nichts zu tun haben.

Um einen Überblick über die Größe der Druckanomalien zu bekommen, wurden zunächst für alle Druckfelder die mittleren Werte aller positiven Anomalien sowie die mittleren Werte aller negativen Anomalien gebildet. Weiterhin erfolgte aus allen 300 Werten eines jeden Druckfeldes die Berechnung des Mittels sowie des mittleren Betrages aller Druckanomalien (Abb. 6.5). Als erstes fällt der starke Jahresgang auf, der zu besonders großen Anomalien im Bereich 12, 22 und 36 Monate vor der Kerneinstromperiode führt. Die negativen Anomalien im Herbst der Einstromjahre ohne Salzwassereinbrüche sind 3 Monate bis 1 Monat vor der Kerneinstromperiode genauso gut zu erkennen wie die positiven Anomalien 3 bis 2 Monate vor der Kerneinstromperiode in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen. Es ist jedoch auffällig, daß sich sowohl die negativen als auch die positiven Anomalien in ihrer Größe nicht nennenswert von den anderen Anomalien unterscheiden. Sie zeichnen sich lediglich durch eine hohe Wirksamkeit auf die Verhältnisse im Ostseegebiet aus. Die starken Anomalien, die etwa bei 12, 22 und 36 Monaten auftreten, legen den Schluß nahe, daß sie lediglich auf Grund der erhöhten Variabilität in der Zirkulation im Winter zustandekommen und daher kein Zusammenhang zum Auftreten von Salzwassereinbrüchen besteht. Hieraus folgt, daß mehr als 12 Monate vor Wintern mit Salzwassereinbrüchen keine Anomalien mehr nachweisbar sind, die in einem kausalen Zusammenhang zum Auftreten von Salzwassereinbrüchen stehen.

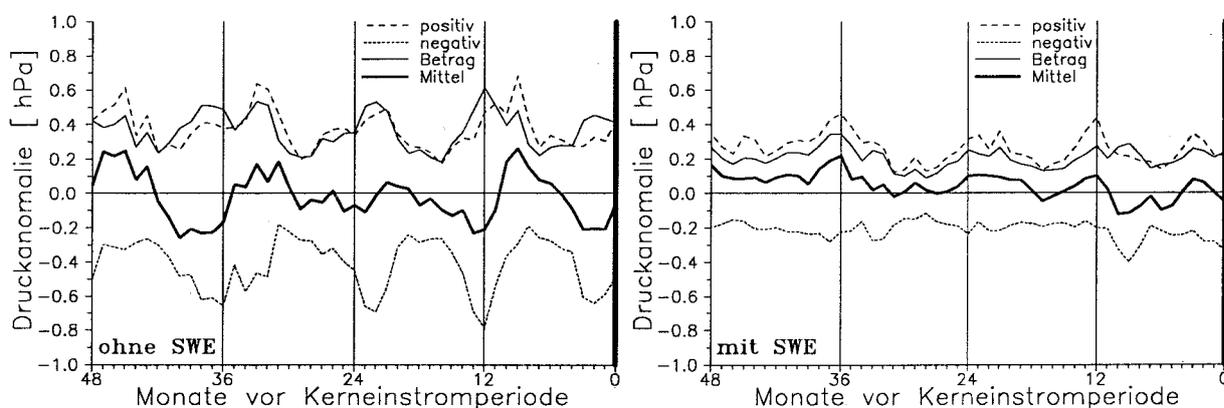


Abb. 6.5: Mittlere positive und negative Anomalien sowie mittlerer Betrag und Mittel aller Anomalien vor der Kerneinstromperiode von Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und der Kerneinstromperiode von Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen

Da die allgemeinen Ausführungen zu den Druckfeldern nichts über ihre räumliche Struktur verraten, ist eine Einzelanalyse der verschiedensten Anomalien erforderlich. Sie wurde für alle Druckfelder bis zu 24 Monate vor der Kerneinstromperiode durchgeführt. Bei der nachfolgenden Erläuterung der Resultate werden nur die Anomalien diskutiert, die sich über mehrere Monate zeigen, eine große räumliche Ausdehnung besitzen bzw. signifikant auf hohem Niveau sind. Weiterhin werden hier nur die Anomalien vor der Kerneinstromperiode von Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen beschrieben, die Anomalien bei Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche sind meist analog dazu mit umgekehrtem Vorzeichen. Da bei letzteren weniger Werte in die Rechnung eingehen, ist die Variabilität deutlich größer, und es treten eher signifikante Abweichungen auf, die aber ohne Bedeutung sind.

Als erstes sind im Zeitraum von etwa 5 bis 2 Monaten vor der Kerneinstromperiode von Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen positive Anomalien über dem Ostseegebiet

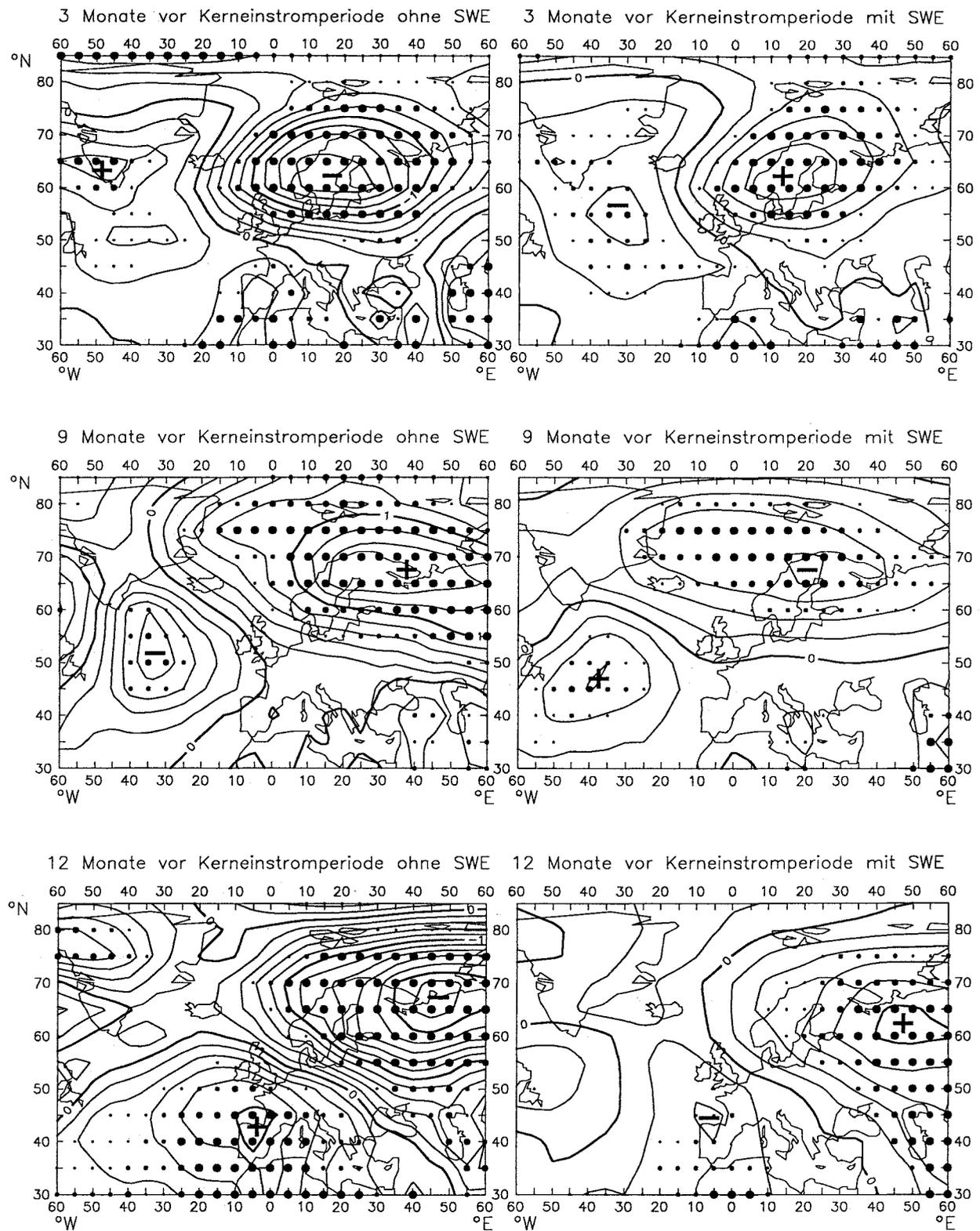


Abb. 6.6: Mittlere Anomalien des Bodendruckfeldes in einigen Monaten vor der Kerneinstromperiode von Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche und der Kerneinstromperiode von Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen; die Kreise stellen das Niveau dar (95 % - kleinster Kreis, 99 %, 99,9 % und 99,99 % - größter Kreis), auf dem die Anomalien signifikant von 0 verschieden sind (t-Test, SCHÖNWIESE 1992); Isobarenabstand: 0,2 hPa

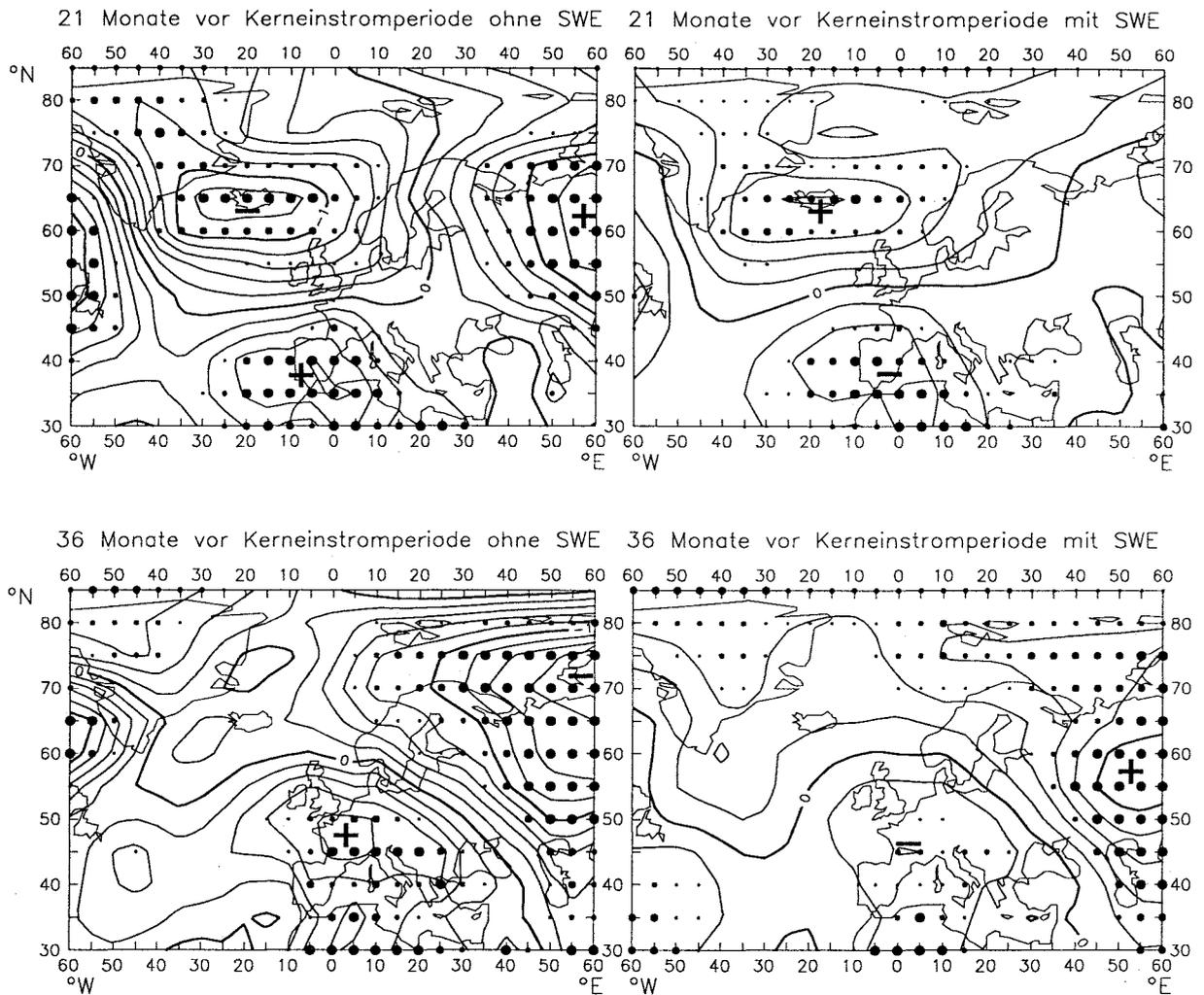


Abb. 6.6: (Fortsetzung)

erkennbar (Abb. 6.6), die mit einer leichten Verstärkung des Islandtiefs gekoppelt sind (d. h. negative Anomalien im isländisch-grönländischen Raum und über dem zentralen Nordatlantik). Dies sind die bereits in Kap. 5 beschriebenen Anomalien, die im Herbst auftreten. Sie werden immer schwächer, je größer die Zeitdifferenz zur Kerneinstromperiode wird. In den Sommermonaten sind nur schwache Anomalien vorhanden. Im Zeitraum von 10 bis 8 Monaten (Februar bis April des Anfangsjahres) fallen negative Anomalien im Gebiet von Grönland bis Skandinavien auf. Diese sind bereits in Abb. 6.5 erkennbar. Bei 14 bis 12 Monaten vor der Kerneinstromperiode (insbesondere bei 12 Monaten), das entspricht dem Oktober bis Dezember des Vorjahres, ist eine Verstärkung und Westausdehnung des sibirischen Kältehochs erkennbar. Dies zeigt sich auch durch deutliche und teilweise signifikante Anomalien zu Beginn des Anfangsjahres (insbesondere geringere Windgeschwindigkeiten, geringerer MSI, geringerer Wasserstand der Ostsee sowie geringere Flußwasserzufuhr, siehe hierzu Abb. 5.2 und 5.3). In den Monaten 24 bis 15 vor der Kerneinstromperiode konnten keine systematischen, persistenten bzw. deutlich signifikanten Anomalien im Druckfeld festgestellt werden. Dies gilt insbesondere auch für Anomalien in der Meridionalzirkulation, die nach BÖRNGEN (1978b) 24 bis 18 Monate vor dem Beginn von Salzwassereinbrüchen auftreten. Eine Verstärkung der Meridionalzirkulation derart, daß ein verstärkter Transport salzreichen Wassers nach Norden erfolgt, ist nicht einmal andeutungsweise zu erkennen (Abb. 6.6, 21 Monate vor der Kern-

einstromperiode). Betrachtet man zum Vergleich noch einmal die Anomalien 36 Monate vor der Kerneinstromperiode, so kann man - wie schon bei 12 Monaten - eine Verstärkung des sibirischen Kältehochs erkennen.

Als Bilanz ergeben sich zunächst 3 mögliche Fernwirkungen, die Salzwassereinbrüche begünstigen: bei 3 Monaten vor der Kerneinstromperiode positive Anomalien über dem Ostseegebiet, bei 9 Monaten negative Anomalien von Grönland bis Skandinavien und bei 12 Monaten eine Verstärkung und Westausdehnung des sibirischen Kältehochs. Die erste ist keine Fernwirkung, sondern tritt unmittelbar vor Salzwassereinbrüchen auf und beeinflusst nachhaltig die ozeanographischen Verhältnisse der Ostsee. Die Anomalien bei 9 Monaten sorgen für einen höheren Wasserstand in der Ostsee (vgl. Abb. 5.3) im März und April des Anfangsjahres und sind zum Teil auch bei anderen Größen (MSI, Luftdruck, vgl. Abb. 5.2) erkennbar. Inwieweit dies allerdings positive Auswirkungen auf das Eintreten von Salzwassereinbrüchen im darauffolgenden Winter haben könnte, ist nicht ersichtlich. Es wäre lediglich denkbar, daß die durch diese Anomalie verstärkte Zonalströmung zu höheren Salzgehalten im Kattegat beiträgt, indem sie zu einem verstärkten Eindringen von Nordseewasser führt. In Anbetracht der Tatsache, daß die Anomalien 12 Monate vor der Kerneinstromperiode den Anomalien bei 36 Monaten sehr ähnlich sind, erscheint es unwahrscheinlich, daß sie etwas mit dem Auftreten von Salzwassereinbrüchen zu tun haben könnten. Bei all diesen Anomalien könnte es sich aber durchaus um Erscheinungen handeln, die miteinander gekoppelt sind, so wie dies auch zwischen ENSO-Ereignissen und anderen atmosphärischen Prozessen der Fall ist.

Als Resümee bleibt die Feststellung, daß günstige Bedingungen für das Eintreten von Salzwassereinbrüchen nahezu ausschließlich im Ostseegebiet geschaffen werden. Zwar sind vor Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen die verschiedensten Anomalien im Druckfeld erkennbar, es erscheint aber zweifelhaft, daß sie irgendeinen Einfluß auf das Auftreten von Salzwassereinbrüchen haben. Ebenso kann man davon ausgehen, daß Änderungen in der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik keinen Einfluß auf das Auftreten von Salzwassereinbrüchen haben.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnten viele Einzelergebnisse anderer Autoren sowie einige Hypothesen zum Auftreten von Salzwassereinbrüchen umfassend bestätigt werden. Andere hingegen, die bisher als relevant betrachtet wurden, stehen offenbar in keinem direkten Zusammenhang zu Salzwassereinbrüchen. Weiterhin deutet es sich an, daß die Flußwasserzufuhr - die bisher im Zusammenhang mit Salzwassereinbrüchen als unbedeutend betrachtet wurde - von grundlegender Bedeutung für solche Ereignisse sein könnte. Auf statistischer Basis konnten Bedingungen gefunden werden, die für das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen notwendig bzw. günstig sind. Da diese Bedingungen auch für den Zeitraum 1983 bis 1993 ohne Salzwassereinbrüche gelten, war es möglich, eine Erklärung des Ausbleibens dieser Ereignisse von 1983 bis 1993 zu geben.

Die zwei Phasen eines Salzwassereinbruchs

Nach den vorliegenden Ergebnissen läßt sich ein Salzwassereinbruch auch aus meteorologischer Sicht in zwei verschiedene Phasen unterteilen:

1. In der ersten Phase werden günstige Vorbedingungen für einen Salzwassereinbruch geschaffen. Sie ist gekennzeichnet durch das Auftreten eines Hochdruckgebietes über dem Ostsee-Einzugsgebiet. Dieses sorgt - durch die statische Wirkung des Druckes sowie die mit ihm verbundenen Ostwinde über der Ostsee - für einen niedrigen Ostseewasserstand. Mit dem Auftreten des Hochdruckgebietes ist zusätzlich eine Abnahme der Niederschlags-tätigkeit und der Flußwasserzufuhr verbunden, was ebenfalls zur Erniedrigung des Ostseewasserstandes beiträgt. Eine höhere Verdunstung in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen trägt gleichfalls zur Verringerung der Flußwasserzufuhr bei, die unter anderem wahrscheinlich durch eine höhere Lufttemperatur im Sommer vor der Einstromsaison bedingt ist. Durch die verringerte Flußwasserzufuhr tritt eine Verstärkung des Tiefeneinstromes über die Darßer Schwelle auf, was an erhöhten Salzgehalten im Tiefenwasser erkennbar ist. Dieser verstärkte Tiefeneinstrom wird kurzzeitig wieder abgeschwächt, wenn das Hochdruckgebiet über der Ostsee zu einem verstärkten Ausstrom von Ostseewasser führt. Die erste Phase hat eine Dauer von etwa ein bis zwei Monaten.
2. Die zweite Phase beginnt einige Tage nach dem Ende der ersten Phase. Sie ist geprägt durch ein mehrwöchiges Auftreten der charakteristischen Einstromwetterlage (Tiefdruckgebiete über Nordskandinavien, verstärktes und mit seinem Zentrum nach Nordspanien verschobenes Azorenhoch), die durch hohe Druckgradienten und entsprechend starke Westwinde über dem Ostsee-Eingangsbereich gekennzeichnet ist. Diese Verhältnisse führen zu einem Windstau im Kattegat und zu einem "Niedrigwassereffekt" in der westlichen Ostsee, was zu einer hohen Wasserstandsdifferenz zwischen dem Kattegat und der westlichen Ostsee führt. Hierdurch erfolgt ein intensiver Einstrom, durch den größere Mengen salzreiches Wasser in die Ostsee gelangen (hohe Salzgehalte in der ganzen Schicht bei Gedser Rev). Damit ist ein starker Anstieg des Wasserstandes der Ostsee verbunden.

Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne

Einstromjahre mit Salzwassereinbrüchen unterscheiden sich von solchen ohne darin, daß die günstigen Verhältnisse für Salzwassereinbrüche (erste Phase) im Mittel von Juli bis Oktober auftreten. Dabei sind sie im Oktober besonders stark ausgeprägt. Ab November gibt es keine Unterschiede mehr bei den meteorologischen Größen zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne. Allerdings treten noch Unterschiede bei den Wasserständen bis Januar sowie bei den Salzgehalten und der Flußwasserzufuhr bis zum Frühjahr auf (niedrigere Wasserstände, höhere Salzgehalte und eine geringere Flußwasserzufuhr in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen).

Zur besonderen Rolle der Flußwasserzufuhr

Die einzige Größe, die in allen Monaten der Einstromsaison signifikante Unterschiede (und das zumeist auf einem hohen Niveau) zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne aufweist, ist die Flußwasserzufuhr. Da sie auch den Nettostrom durch die dänischen Meerengen bestimmt, ist es sehr wahrscheinlich, daß sie für das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen von erheblicher Bedeutung ist. Hauptsächlich mit ihr lassen sich auch die um maximal bis etwa 10 cm erhöhten Wasserstände der Ostsee erklären, die in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche auftreten. Die leicht erhöhte u-Komponente des Windes sorgt für einen Anstau der im Mittel um etwa 24 km^3 erhöhten Flußwasserzufuhr von Juli bis Oktober (führt zu einem um 6 cm höheren Wasserstand), und der statische Effekt des Luftdruckes (im Mittel -3 hPa) bedingt zusätzlich eine Wasserstandserhöhung um 3 cm.

Zur Kurzzeitigkeit eines Salzwassereinbruchs

Mit Hilfe der Flußwasserzufuhr läßt sich auch erklären, warum sich der Einstromvorgang bei Salzwassereinbrüchen relativ schnell vollziehen muß: von September bis Februar kommen pro Monat im Mittel etwa 30 km^3 Wasser durch die Flußwasserzufuhr in die Ostsee, was einer theoretischen Erhöhung des Ostseewasserstandes um etwa 8 cm pro Monat entspricht. Diese Wasserstandserhöhung ist dem durch das Druck- und Windfeld angetriebenen Wechsel von Ein- und Ausstrom überlagert. Erfolgt nur ein langsamer Einstrom, so füllt sich die Ostsee mit überproportional viel salzarmem Wasser, das ebenfalls den Wasserstand erhöht und das Kräftegleichgewicht zugunsten des Ausstromes verändert.

Flußwasserregulierung

Wenn die Flußwasserzufuhr für Salzwassereinbrüche eine große Bedeutung besitzt, so können auch menschliche Einflüsse auf sie nicht ohne Wirkung auf solche Ereignisse bleiben. Durch die Flußwasserregulierung tritt eine deutliche Verschiebung des Jahresganges auf: Im Mittel ist die Flußwasserzufuhr dadurch im Sommer geringer, im Winter und zu Beginn des Frühjahrs höher. Damit werden im Winter ungünstige Verhältnisse für Salzwassereinbrüche geschaffen. Die Unterschiede, die durch die Flußwasserregulierung bei der Flußwasserzufuhr von Januar bis April hervorgerufen werden, sind etwa in derselben Höhe, wie die Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne in diesem Zeitraum. Dies führt zwangsläufig zu dem Schluß, daß auch der Mensch Einfluß auf das Zustandekommen von

Salzwassereinbrüchen haben kann und in Zukunft möglicherweise nur mit einem seltenen Auftreten von Salzwassereinbrüchen zu rechnen ist.

Zur Stärke von Salzwassereinbrüchen

Wenn in der ersten Phase optimale Einstrombedingungen geschaffen wurden, reicht auch eine schwach bis gar nicht vorhandene Einstromwetterlage aus, um einen Salzwassereinbruch herbeizuführen. Dies trifft insbesondere auf Salzwassereinbrüche im Herbst zu. Analog dazu kann es auch zu einem Salzwassereinbruch kommen, wenn die Einstromwetterlage der zweiten Phase sehr intensiv ausgeprägt ist und lange anhält, dafür aber die Vorbedingungen nicht optimal waren. Das ist besonders häufig bei Salzwassereinbrüchen im Januar und Februar der Fall. Verlaufen beide Phasen optimal, kann es zu sehr starken Salzwassereinbrüchen kommen, wie es zum Beispiel im November/Dezember 1951 der Fall war. Im allgemeinen gilt: Je stärker der Salzwassereinbruch, um so optimaler waren alle begünstigenden Verhältnisse in den zwei Phasen.

Jahresgang der Häufigkeit von Salzwassereinbrüchen

Das besonders häufige Auftreten von günstigen Vorbedingungen im Herbst - insbesondere im Oktober - erlaubt auch eine Erklärung des Jahresganges der Häufigkeit von Salzwassereinbrüchen (Maximum im Dezember), der sich vom Jahresgang von atmosphärischen Zirkulationsgrößen unterscheidet (Maximum im Januar). Durch die optimalen Vorbedingungen im Herbst kommt es von November bis Januar besonders häufig zu Salzwassereinbrüchen. Erste Versuche mit einem Index zur Berechnung des Nettostromes durch die dänischen Meerengen, in den nur die täglichen Wasserstandsänderungen des Pegels Landsort und die Flußwasserzufuhr eingingen, haben gezeigt, daß die stärksten zusammenhängenden Einströme in die Ostsee - unabhängig vom Salzgehalt des Wassers - von November bis Januar auftreten. Das Maximum liegt auch hier im Dezember. Von Mai bis Juli - dem Zeitraum ohne Salzwassereinbrüche - traten am seltensten längere Einströme in die Ostsee auf. Viele Salzwassereinbrüche wurden mit ihren Daten (Anfang bzw. Ende des Einbruchs) durch den Index relativ gut wiedergegeben. Dieser Index kann daher als Basis für eine verbesserte Version dienen, bei der die Rolle der Flußwasserzufuhr und möglicherweise noch anderer Größen besser berücksichtigt wird.

Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren, Fernwirkungen

Die Ergebnisse von WYRTKI (1954a) zum Auftreten von Salzwassereinbrüchen konnten vollständig, die von DICKSON (1971, 1973), BÖRNGEN (1978b) und BÖRNGEN et al. (1990) teilweise bestätigt werden. Einige Wochen vor Salzwassereinbrüchen tritt eine Abschwächung der Zonalkomponente des Windes auf, die einen niedrigeren Ostseewasserstand verursacht. Außerdem sind vor Salzwassereinbrüchen erhöhte Salzgehalte im Tiefenwasser an der Darßer Schwelle und in der Beltsee zu beobachten. Ausgelöst werden Salzwassereinbrüche letztendlich durch länger anhaltende starke Westwinde. Die Ursachen dieser erhöhten Salzgehalte sind aber - anders als von DICKSON und BÖRNGEN vermutet - in einer verminderten Flußwasserzufuhr zu suchen, wodurch der Tiefenkompensationsstrom an der Darßer Schwelle sehr gut ausgebildet ist. Mit dem von DICKSON (1971) beschriebenen Druckmuster konnte ein

Zusammenhang mit Salzwassereinbrüchen nur insoweit festgestellt werden, als daß das Hoch über Nordwesteuropa (das Bestandteil dieses Druckmusters ist) im Herbst auch über dem Ostseegebiet auftritt und damit für die geringe Flußwasserzufuhr und den geringen Wasserstand der Ostsee sorgt. Ein Auftreten dieses Druckmusters 1,5 bis 2 Jahre vor Salzwassereinbrüchen (BÖRNGEN 1978b) konnte nicht festgestellt werden. Ebenso ließen sich keine Zusammenhänge zwischen der Meridionalzirkulation über dem Nordatlantik und Salzwassereinbrüchen finden. Hieraus folgt, daß erhöhte Salztransporte in die europäischen Schelfmeere ohne Einfluß auf das Auftreten von Salzwassereinbrüchen sind. Auch andere Druckmuster in den Monaten vor Salzwassereinbrüchen können mit diesen nur über Telekonnektionen mit dem Hochdruckgebiet über der Ostsee in Zusammenhang stehen. Ein direkter Einfluß auf Salzwassereinbrüche ließ sich nicht finden.

Zum Ausbleiben von Salzwassereinbrüchen in den 80er Jahren

Da Salzwassereinbrüche - aus meteorologischer Sicht - Ereignisse in einem großen räumlichen und zeitlichen Scale sind, ist es unwahrscheinlich, daß geringe Änderungen von Zyklonzugbahnen ein Ausbleiben dieser Ereignisse von 1983 bis 1993 bewirkt haben. Deshalb ist ebenfalls nicht anzunehmen, daß Eigenschwingungen der Ostsee von Bedeutung für Salzwassereinbrüche sind. Nach den hier dargelegten Ergebnissen erscheint es aber sehr wahrscheinlich, daß die relativ hohe Flußwasserzufuhr in den 80er Jahren - zusammen mit einer leicht verstärkten Zonalströmung bzw. einer Abnahme von Ostwetterlagen (LASS und MATTHÄUS 1994) - die Ursache für das Ausbleiben dieser Ereignisse ist.

Zur Periodizität von Salzwassereinbrüchen

Mit dem Datensatz der Salzwassereinbrüche nach FRANCK et al. (1987) konnte keine deutliche Periodizität bei Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen festgestellt werden. In einigen Einstromjahren treten mehrere Salzwassereinbrüche auf, in anderen hingegen keine. Die Abstände zwischen Salzwassereinbrüchen sind sehr unterschiedlich, sie reichen von einigen Tagen bis zu mehreren Jahren.

Zu den Salzgehaltsverhältnissen an der Darßer Schwelle

Eine verstärkte Zonalströmung führt zu einer Salzgehaltszunahme, eine erhöhte Flußwasserzufuhr hingegen führt zu niedrigeren Salzgehalten. Dies gilt sowohl für die Ober- als auch die Tiefenschicht. Da eine verstärkte Zonalströmung im allgemeinen mit höheren Niederschlägen und einer höheren Flußwasserzufuhr gekoppelt ist, werden die Salzgehaltsverhältnisse zum großen Teil durch ein und dieselbe Ursache bestimmt, die aber auf gegensätzliche Art und auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen wirksam wird. Im Zeitbereich von einigen Tagen bis Wochen werden die Salzgehaltsverhältnisse vom Druck- und Windfeld bestimmt, im Zeitbereich von einigen Wochen bis Monaten vor allem von der Flußwasserzufuhr. Die Überlagerung dieser zwei Effekte sorgt für die Komplexität der Salzgehaltsverhältnisse an der Darßer Schwelle. So können z. B. kurz anhaltende Ostwinde den Tiefensalzgehalt an der Darßer Schwelle verringern (durch starken Ausstrom von Ostseewasser), länger anhaltende Ostwinde hingegen den Tiefensalzgehalt erhöhen (durch die damit verbundene geringe Flußwasserzufuhr bei einem konstant niedrigen Ostseewasserstand).

Ausblick

Nachdem in dieser Arbeit die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen bei Salzwassereintrüben analysiert wurden, bleibt als nächstes die Frage, inwieweit diese Zusammenhänge durch Klimaänderungen (HUPFER 1991) und menschliche Eingriffe modifiziert werden bzw. ob sich in Zukunft die Bedingungen für Salzwassereintrüben ändern. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit tauchen neue Fragen auf, und es lassen sich viele weitergehende Untersuchungen ableiten. Einige davon sollen nachfolgend genannt werden.

- Einzelanalyse von Salzwassereintrüben unter besonderer Beachtung ihrer statistischen Gesetzmäßigkeiten
Dies erscheint allein deshalb notwendig, um mögliche Grenzwerte diverser Größen herauszufinden, die gerade noch bzw. nicht mehr zu solchen Ereignissen führen. Besondere Beachtung dürften dabei die "untypischen" Salzwassereintrüben finden, d. h. Salzwassereintrüben, bei denen nur eine schwache Ausprägung der Einstromwetterlage oder aber auch ein negativer Ostseewasserstand am Ende des Einbruchs vorhanden war. Dies steht in Zusammenhang mit der
- Herstellung weiterer Animationen zu Einzelereignissen.
Hierbei bietet es sich an, Animationen zu den großen Salzwassereintrüben im November/Dezember 1951 und im Oktober/November 1969 anzufertigen. Dies gilt ebenso für einige kleinere "untypische" Salzwassereintrüben. Weiterhin wäre eine genauere Betrachtung der Einstromsaison 1971/72 angebracht, in der insgesamt vier Salzwassereintrüben auftraten. Zusätzlich zu den Animationen von Salzwassereintrüben wäre es auch von Interesse, eine Animation zu einem Zeitabschnitt aus den 80er Jahren anzufertigen, die das typische Verhalten des Windes in Einstromjahren ohne Salzwassereintrüben verdeutlicht (häufiges, relativ kurzzeitiges Eintreten der Einstromwetterlage, ohne daß zwischendurch längere Ausstromperioden auftreten).
- Durchführung von "Negativtests"
Hierunter ist die Analyse von typischen Einstromwetterlagen zu verstehen, die aber nicht zu Salzwassereintrüben geführt haben. Dies ist unbedingt erforderlich, da die Fragestellung immer wieder auftaucht, warum bei einer lang andauernden Einstromwetterlage öfters keine Salzwassereintrüben auftreten. Unter Beachtung der hier dargelegten statistischen Gesetzmäßigkeiten dürfte sich für die meisten dieser Fälle ergeben, daß keine günstigen Vorbedingungen vorhanden waren.
- Schaffung eines allgemeinen Salzwassereintrüben-Indexes
Dazu ist eine Verbesserung des bereits oben erwähnten Indexes notwendig, mit dem bereits vielversprechende Ergebnisse gewonnen werden konnten.
- Bestimmung der Wirkungsweise der Flußwasserzufuhr auf Salzwassereintrüben
Auch wenn die verringerte Flußwasserzufuhr in Einstromjahren mit Salzwassereintrüben wahrscheinlich auf zweierlei Art Salzwassereintrüben begünstigt (niedrigerer Wasserstand

der Ostsee, erhöhte Salzgehalte im Tiefenwasser der Beltsee), so besteht doch noch keine restlose Klarheit darüber. Dies ist schon deshalb der Fall, da in der Oberschicht an der Darßer Schwelle keine Unterschiede zwischen Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen und solchen ohne auftreten. Das läßt sich zwar auch ohne weiteres mit der Abnahme der Zonalkomponente des Windes in Einstromjahren mit Salzwassereinbrüchen erklären, weitergehende Studien hierzu erscheinen aber angebracht.

- Bestimmung der Ursachen der hohen Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche bzw. in den 80er Jahren und des Einflusses der Verdunstung auf das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen

Eine wichtige Frage ist noch die nach den Ursachen der hohen Flußwasserzufuhr in Einstromjahren ohne Salzwassereinbrüche, die sich nur zu etwa einem Drittel aus den erhöhten Niederschlägen erklären lassen. Dies gilt speziell auch für die Winterhalbjahre der 80er Jahre. Auch die Verdunstung in den einzelnen Einstromjahren muß noch exakter - möglichst auf Monatsbasis - bestimmt werden. Hierzu ließen sich u. a. einfache Näherungsformeln verwenden, aber auch komplexere Modelle, die die Vegetation berücksichtigen.

- Modellierung von Salzwassereinbrüchen

Durch die Fortschritte der Modellierung in den letzten Jahren ist es möglich geworden, die wesentlichen Bedingungen für einen Salzwassereinbruch zu simulieren. Dabei konnten bereits erste Erfolge erzielt werden (siehe Abschn. 2.3.10). Da alle Größen, die einen Salzwassereinbruch begünstigen, in der Natur nie voneinander losgelöst auftreten, ist es schwer, die dabei entscheidende Größe herauszufinden. Genauso wahrscheinlich ist, daß nur ihr komplexes Zusammenwirken die günstigen Vorbedingungen für einen Salzwassereinbruch schafft. Auch mit statistischen Modellen ist eine Trennung der einzelnen Einflußfaktoren nur begrenzt realisierbar. Mit Hilfe von dynamischen Modellen ist es aber eher möglich, gezielt einige Faktoren auszuschalten, um die Wirkungsweise der anderen zu studieren. Hier bietet sich ein breites Feld von Fallstudien an.

- Prognose von Salzwassereinbrüchen

Auf der Basis der in dieser Arbeit dargelegten statistischen Gesetzmäßigkeiten erscheint es möglich, eine kurzfristige Prognose über das Auftreten von Salzwassereinbrüchen zu geben. Dazu wären zwei Schritte erforderlich:

1. Die Berechnung eines Parameters, der angibt, wie günstig die Vorbedingungen für das Eintreten eines Salzwassereinbruchs sind. Hierzu wäre eine ständige Beobachtung des Wasserstandes der Ostsee sowie der Flußwasserzufuhr am geeignetsten. Da letzteres mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein dürfte, müßte die Bestimmung der Flußwasserzufuhr mit Hilfe statistischer Beziehungen aus anderen (hauptsächlich meteorologischen) Größen vorgenommen werden.

2. An Hand der Wettervorhersagen ließe sich dann kurzfristig abschätzen (d. h. einige Tage im voraus), ob die zu erwartende Einstromwetterlage ausreicht, um einen Salzwassereinbruch zu bewirken.

- Spektralanalytische Untersuchungen von Wasserständen der gesamten Ostseeküste im Periodenbereich kleiner als ein bis zwei Tage

Auch wenn eine unterstützende Wirkung von Eigenschwingungen der Ostsee auf das Zustandekommen von Salzwassereinbrüchen sehr unwahrscheinlich ist (siehe oben), so steht doch eine endgültige Untersuchung noch aus, die in diesem Punkt Klarheit schafft.

- Detaillierte Analyse der Trends in den Wasserstandsdaten

Obwohl die starken Trends bei den Wasserständen im wesentlichen auf Landhebungs- und Senkungsprozesse zurückzuführen sind (STRIGGOW und TILL 1987), erscheint doch ihre genauere Analyse angebracht. Dies gilt um so mehr, als sie in den einzelnen Monaten sehr unterschiedlich sind, was sicherlich nicht typisch für tektonische Prozesse ist. Die Trends - und damit ihre Ursachen - wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da sie von den Originaldaten abgezogen wurden. Darum stellt sich die Frage, ob nicht auch die bei den Wasserständen zu beobachtenden Trends Einfluß auf das Auftreten von Salzwassereinbrüchen haben. Das erscheint schon deshalb wichtig, da tektonische Prozesse offensichtlich auch Auswirkungen auf die Salzgehaltsverhältnisse der Ostsee haben (STRIGGOW 1983). Eventuell mögliche geringfügige Variationen der Ein- und Ausstromdynamik durch die Brückenbauten über den Großen Belt wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

- Anwendung einer modifizierten Definition von Salzwassereinbrüchen

Alle hier gewonnenen Ergebnisse beruhen auf der Definition von Salzwassereinbrüchen nach FRANCK et al. (1987). Dabei bleibt der Wasserumsatz durch den Sund unberücksichtigt. Es ist nicht anzunehmen, daß eine etwas andere Definition von Salzwassereinbrüchen die hier dargelegten Ergebnisse qualitativ beeinflusst, eine Modifizierung einiger quantitativer Aussagen ist dadurch aber möglich.

Einige der genannten Probleme sind eng mit Teilaufgabenstellungen des Baltic Sea Experiments BALTEX (RASCHKE 1994; INTERNATIONAL BALTEX SECRETARIAT 1995) verbunden, daher bietet sich für die weitere Untersuchung der Ursachen von Salzwassereinbrüchen eine enge Zusammenarbeit mit dem BALTEX-Projekt an.

Literaturverzeichnis

- VAN BEBBER, W. J.: Die Zugstraßen der barometrischen Minima. Meteor. Z., 8 (1891), 361-366 u. Taf. V.
- BERGSTROM, S.; CARLSSON, B.: Hydrology of the Baltic basin. Inflow of fresh water from rivers and land for the period 1950 - 1990. SMHI Reports Hydrology, Nr. 7 (1993), 21 S.
- BERGSTROM, S.; CARLSSON, B.: River runoff to the Baltic Sea: 1950 - 1990. Ambio, 23 (1994), 280-287
- BÖRNGEN, M.: Salzgehaltsspektren für das Übergangsgebiet zwischen Nord- und Ostsee. Beitr. Meereskd., 40 (1977), 167-171
- BÖRNGEN, M.: On the causes of the strong salt inflows into the Baltic. Proc. 11th Conf. Baltic Oceanographers, Rostock, Vol. 1 (1978a), 305-315
- BÖRNGEN, M.: Beitrag zur Analyse und Interpretation zeitlicher Änderungen des Salzgehaltes im Bereich der Ostsee-Eingänge. Diss. A, Karl-Marx-Universität Leipzig, Sektion Physik. Leipzig 1978b, 110 S.
- BÖRNGEN, M.: Beitrag zur Analyse und Interpretation zeitlicher Änderungen des Salzgehaltes im Bereich der Ostsee-Eingänge. Geodät. Geophys. Veröff. R. IV, H. 38 (1983), 67-109
- BÖRNGEN, M.; HUPFER, P.: Statistische Spektralanalyse von Jahresmittelwerten der Wassertemperatur und des Salzgehalts im Übergangsgebiet zwischen Nord- und Ostsee. Z. geol. Wiss., 3 (1975), 485-494
- BÖRNGEN, M.; HUPFER, P.: Spektrale Analyse des Oberflächensalzgehaltes in der westlichen Ostsee. Acta Hydrophys., 23 (1978), 5-15
- BÖRNGEN, M.; HUPFER, P.; OLBERG, M.: Occurrence and absence of strong salt influxes into the Baltic Sea. Beitr. Meereskd., 61 (1990), 11-19
- BROGMUS, W.: Eine Revision des Wasserhaushaltes der Ostsee. Kieler Meeresforsch., 9 (1952), 15-42
- CARLSSON, B.; SANNER, H.: Influence of river regulation on runoff to the Gulf of Bothnia. The Gulf of Bothnia Year 1991. SMHI Reports Hydrology, Nr. 9 (1994), 30 S.
- CHADWYCK-HEALEY LTD.: World climate disc. Global climatic change data on CD-ROM. From the Climatic Research Unit at the University of East Anglia, UK. Cambridge 1992
- DAHLIN, H.; FONSELIUS, S. H.; SJÖBERG, B.: The changes of the hydrographic conditions in the Baltic proper due to 1993 major inflow to the Baltic Sea. ICES Statutory Meeting 1993, ICES C.M. 1993/C:58, 6 S.
- DEFANT, F.: Klima und Wetter der Ostsee. Kieler Meeresforsch., 28 (1972), 1-30
- DICKSON, R. R.: A recurrent and persistent pressure-anomaly pattern as the principal cause of intermediate-scale hydrographic variation in the European shelf seas. Dt. Hydrogr. Z., 24 (1971), 97-119 u. Taf. 3-8
- DICKSON, R. R.: The beginnings of a new Baltic inflow? ICES Statutory Meeting 1972, ICES C.M. 1972/C:10, 9 S.
- DICKSON, R. R.: The prediction of major Baltic inflows. Dt. Hydrogr. Z., 26 (1973), 97-105

- DIETRICH, G.: Oberflächenströmungen im Kattegat, im Sund und in der Beltsee. Dt. Hydrogr. Z., 4 (1951), 129-150
- DOBROVOLSKI, S. G.: Global climatic changes in water and heat transfer - accumulation processes. Amsterdam 1992, 265 S.
- FONSELIUS, S. H.: Hydrography of the Baltic deep basins. Fishery Board of Sweden, Ser. Hydrogr., Nr. 13 (1962), 41 S.
- FONSELIUS, S. H.: Hydrography of the Baltic deep basins II. Fishery Board of Sweden, Ser. Hydrogr., Nr. 20 (1967), 31 S.
- FONSELIUS, S. H.: Hydrography of the Baltic deep basins III. Fishery Board of Sweden, Ser. Hydrogr., Nr. 23 (1969), 97 S.
- FONSELIUS, S. H.: On the stagnation and recent turnover of the water in the Baltic. Tellus, 22 (1970), 533-544
- FONSELIUS, S. H.: An inflow of unusually warm water into the Baltic deep basins. ICES Statutory Meeting 1977, ICES C.M. 1977a/C:15, 3 S.
- FONSELIUS, S. H.: An inflow of unusually warm water into the Baltic deep basins. Medd. Havsfiskelab. Lysekil, Hydrogr. avdeln., Nr. 229 (1977b), 3 S.
- FONSELIUS, S. H.; RATTANASEN, C.: On the water renewals in the eastern Gotland Basin after World War II. Medd. Havsfiskelab. Lysekil, Hydrogr. avdeln., Nr. 90 (1970), 6 S.
- FRANCK, H.; MATTHÄUS, W.: Volumes of water masses penetrating during major Baltic inflows and their characteristic properties. Acta Ichthyol. Pisc., 21 (1991) Suppl., 47-55
- FRANCK, H.; MATTHÄUS, W.: The absence of effective major inflows and the present changes in the hydrographic conditions of the central Baltic deep water. Proc. 12th Baltic Marine Biologists Symposium, Helsingør 1991. In: Int. Symp. Series, Fredensborg Olsen & Olsen 1992a, 53-60
- FRANCK, H.; MATTHÄUS, W.: Sea level conditions associated with major Baltic inflows. Beitr. Meereskd., 63 (1992b), 65-90
- FRANCK, H.; MATTHÄUS, W.; SAMMLER, R.: Major inflows of saline water into the Baltic Sea during the present century. Gerlands Beitr. Geophysik, 96 (1987), 517-531
- FRANCKE, E.; HUPFER, P.: Ein Beitrag zur Untersuchung des Salzwassereintruchs im Winter 1975/76 in die Ostsee. Beitr. Meereskd., 44/45 (1980), 15-26
- FRANCKE, E.; NEHRING, D.: Erste Beobachtungen über einen erneuten Salzwassereintruch in die Ostsee im Februar 1969. Beitr. Meereskd., 28 (1971), 33-47
- GERSTENGARBE, F. W.; WERNER, P. C.: Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881 - 1992. 4. vollst. neu bearb. Aufl., Ber. Dt. Wetterd., Bd. 113 (1993), 249 S.
- HAKANSSON, B. G.; BROMAN, B.; DAHLIN, H.: The flow of water and salt in the Sound during the Baltic major inflow event in January 1993. ICES Statutory Meeting 1993, ICES C.M. 1993/C:57, 9 S.

- HEINß, B.: Untersuchung des raumzeitlichen Verhaltens des Bodendruck- und des 500-hPa-Geopotentialfeldes über dem Nordatlantik. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Meteorologisches Institut. Berlin 1994, 69 S.
- HELA, I.: Über die Schwankungen des Wasserstandes in der Ostsee (mit besonderer Berücksichtigung des Wasseraustausches durch die dänischen Gewässer). Merentutkimuslaitoksen Julkaisu Havsforskningsinstitutets Skrift, Nr. 134 (1944), 108 S.
- HELCOM: Water balance of the Baltic Sea. A Regional Cooperation Project of the Baltic Sea States. International Summary Report. Baltic Sea Environment Proceedings, Nr. 16 (1986), 174 S.
- HELCOM: Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984 - 1988; Background Document. Baltic Sea Environment Proceedings, Nr. 35B (1990), 428 S.
- HERMANN, F.: A strong inflow of high salinity water to the Baltic during 1971 - 72. Proc. 8th Conf. Baltic Oceanographers, Kopenhagen 1972, Beitrag Nr. 27
- HESS, P.; BREZOWSKY, H.: Katalog der Großwetterlagen Europas. Ber. Dt. Wetterd. in der US-Zone, 33 (1952), 39 S.
- HESS, P.; BREZOWSKY, H.: Katalog der Großwetterlagen Europas. 2. neu bearb. und erg. Aufl., Ber. Dt. Wetterd., 15 (1969) 113, 14 S.
- HESS, P.; BREZOWSKY, H.: Katalog der Großwetterlagen Europas 1881 - 1976. 3. verb. und erg. Aufl., Ber. Dt. Wetterd., 15 (1977) 113, 14 S.
- HEYEN, H.; ZORITA, E.; VON STORCH, H.: Statistical downscaling of winter monthly mean North Atlantic sea-level pressure to sea level variations in the Baltic Sea. MPI-Report Nr. 150. Hamburg 1994, 13 S.
- HEYEN, H.; ZORITA, E.; VON STORCH, H.: Statistical downscaling of monthly mean North Atlantic air-pressure to sea level anomalies in the Baltic Sea. 1995, 13 S. (Vordruck)
- HUBER, K.; KLEINE, E.; LASS, H.-U.; MATTHÄUS, W.: The major Baltic inflow in January 1993 - measurements and modelling results. Dt. Hydrogr. Z., 46 (1994), 103-114
- HUPFER, P.: Meeresklimatische Veränderungen im Gebiet der Beltsee seit 1900. Veröff. Geophys. Inst. Karl-Marx-Univ. Leipzig, 2. Ser., 17 (1962) 4, 355-512
- HUPFER, P.: Marine climatic fluctuations in the Baltic Sea area since 1900. Z. Meteor., 25 (1975), 85-93
- HUPFER, P.: Die Ostsee - kleines Meer mit großen Problemen. Kleine Naturwiss. Bibl., Bd. 40. 3. Aufl., Leipzig 1981, 152 S.
- HUPFER, P. (Hrsg.): Das Klimasystem der Erde: Diagnose und Modellierung, Schwankungen und Wirkungen. Berlin 1991, 464 S.
- HUPFER, P.; OLBERG, M.; HEINß, B.: Ozeanographischer Zustand der Ostsee und Klimaänderungen. PIK Reports, Nr. 1 (1994), 110-113
- INTERNATIONAL BALTEX SECRETARIAT (Hrsg.): Baltic Sea Experiment BALTEX Initial Implementation Plan. International BALTEX Secretariat Publication, Nr. 2. Geesthacht 1995, 84 S.

- JACOBSEN, J. P.: Mittelwerte von Temperatur und Salzgehalt. Bearbeitet nach hydrographischen Beobachtungen in dänischen Gewässern 1880 - 1907. Mit 11 Tafeln. Meddelelser fra Kommissionen for Havundersøgelse, Serie Hydrografi, 1 (1908) 10, 26 S.
- JACOBSEN, J. P.: Beitrag zur Hydrographie der dänischen Gewässer. Meddelelser fra Kommissionen for Havundersøgelse, Serie Hydrografi, 2 (1913) 2, 94 S.
- JACOBSEN, J. P.: Die Wasserumsetzung durch den Öresund, den Großen und den Kleinen Belt. Meddelelser fra Kommissionen for Havundersøgelse, Serie Hydrografi, 2 (1925) 9, 72 S.
- JACOBSEN, J. P.: Die Wasserbewegung in den Verbindungsstraßen zwischen der Ostsee und dem Kattegat. In: 5. Hydrol. Konf. d. Balt. Staaten. Helsinki 1936, Mitt. 9B
- JACOBSEN, T. S.: Sea water exchange of the Baltic. Measurements and methods. The Belt Project, National Agency of Environmental Protection. Copenhagen 1980, 106 S.
- JAKOBSEN, F.: The major inflow to the Baltic Sea during January 1993. J. Mar. Systems, 6 (1995), 227-240
- JENNE, R. L.: Data sets for meteorological research. NCAR Tech. Note NCAR-TN/1A-111. Boulder 1975, 194 S.
- KALLE, K.: Die große Wasserumschichtung im Gotland-Tief vom Jahre 1933/34. Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie, 71 (1943), 142-146
- KÄNDLER, R.: Der Einfluß der Wetterlage auf die Salzgehaltsschichtung im Übergangsbereich zwischen Nord- und Ostsee. Dt. Hydrogr. Z., 4 (1951), 150-160
- KLEINE, E.: Numerical simulation of the recent (1993) major Baltic inflow. ICES Statutory Meeting 1993, ICES C.M. 1993/C:48, 7 S.
- KNUDSEN, M.: Erneuerung der unteren Wasserschichte in der Ostsee. Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie, 28 (1900), 586-590
- KÖPPEN, W.: Die Klimate der Erde. Grundriß der Klimakunde. Berlin und Leipzig 1923, 369 S.
- KRAUSS, W.; MAGAARD, L.: Zum System der Eigenschwingungen der Ostsee. Kieler Meeresforsch., 18 (1962), 184-186
- KRÜMMEL, O.: Neue physikalische Untersuchungen aus der Ostsee. Mitteilungen des deutschen Seefischereivereins, 10 (1894), 133-142
- KRÜMMEL, O.: Zur Physik der Ostsee. Petermanns Geographische Mitteilungen, 41 (1895), 81-86, 111-118
- KULLENBERG, G.: Observations of the mixing in the Baltic thermo- and halocline layers. Tellus, 29 (1977), 572-587
- LASS, H.-U.: A theoretical study of the barotropic water exchange between the North Sea and the Baltic and the sea level variations of the Baltic. Beitr. Meereskd., 58 (1988), 19-33
- LASS, H.-U.; MATTHÄUS, W.: On the forcing of salt water inflows into the Baltic Sea. Proc. 19th Conf. Baltic Oceanographers, Sopot, Vol. 1 (1994), 192-211
- LASS, H.-U.; SCHWABE, R.: An analysis of the salt water inflow into the Baltic in 1975 to 1976. Dt. Hydrogr. Z., 43 (1990), 97-125

- LASS, H.-U.; SCHWABE, R.; MATTHÄUS, W.; FRANCKE, E.: On the dynamics of water exchange between Baltic and North Sea. *Beitr. Meereskd.*, 56 (1987), 27-49
- LEHMANN, A.: Numerical modeling of a major inflow to the Baltic Sea. ICES Statutory Meeting 1993, ICES C.M. 1993/C:48, 7 S.
- LEHMANN, A.: A model study of major Baltic inflows, *Proc. 19th Conf. Baltic Oceanographers*, Sopot, Vol. 1 (1994a), 410-421
- LEHMANN, A.: The major Baltic inflow in 1993 - a numerical model simulation. ICES Statutory Meeting 1994, ICES C.M. 1994b/Q:9, 7 S.
- LISITZIN, E.: Some characteristics of the variation in the water volume in the Baltic as a function of air pressure gradient changes. *Commentationes physico-mathematicae*, 26 (1962) 9, 16 S.
- MAGAARD, L.; RHEINHEIMER, G. (Hrsg.): *Meereskunde der Ostsee*. Berlin 1974, 269 S.
- MANEGOLD, W.: Die Wetterabhängigkeit der Oberflächenströmungen in den Pforten der Ostsee. *Aus d. Archiv d. Dt. Seewarte*, 54 (1936) 4, 40 S.
- MATTHÄUS, W.: Langzeitvariationen von Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. *Beitr. Meereskd.*, 42 (1979), 41-93
- MATTHÄUS, W.: Aktuelle Trends in der Entwicklung des Temperatur-, Salzgehalts- und Sauerstoffregimes im Tiefenwasser der Ostsee. *Beitr. Meereskd.*, 49 (1983), 47-64
- MATTHÄUS, W.: Climatic and seasonal variability of oceanological parameters in the Baltic Sea. *Beitr. Meereskd.*, 51 (1984), 29-49
- MATTHÄUS, W.: Charakteristische Eigenschaften von Stagnationsperioden im Tiefenwasser der Ostsee. *Beitr. Meereskd.*, 55 (1986), 39-53
- MATTHÄUS, W.: Die Veränderungen des ozeanologischen Regimes im Tiefenwasser des Gotlandtiefs während der gegenwärtigen Stagnationsperiode. *Fischerei-Forsch.*, 25 (1987) 2, 17-22
- MATTHÄUS, W.: Langzeittrends und Veränderungen ozeanologischer Parameter während der gegenwärtigen Stagnationsperiode im Tiefenwasser der zentralen Ostsee. *Fischerei-Forsch.*, 28 (1990) 3, 25-34
- MATTHÄUS, W.: Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee. *Geogr. Rundschau*, 44 (1992), 626-631
- MATTHÄUS, W.: Salzwassereinbrüche und ihre Bedeutung für die Meeresumwelt der Ostsee. *Wasser und Boden*, 45 (1993a), 922-928
- MATTHÄUS, W.: Major inflows of highly saline water into the Baltic Sea - a review. ICES Statutory Meeting 1993, ICES C.M. 1993b/C:52, 10 S.
- MATTHÄUS, W.: Forschungsberichte - Salzwassereinbruch in die Ostsee. *Geogr. Rundschau*, 45 (1993c), 473-474
- MATTHÄUS, W.: Pers. Mitteilung (1995)
- MATTHÄUS, W.; FISCHER, H.: Pers. Mitteilung (1995)

- MATTHÄUS, W.; FRANCK, H.: Zur kurzzeitigen Veränderlichkeit der Schichtungsverhältnisse im Seegebiet der Darßer Schwelle. *Beitr. Meereskd.*, 42 (1979), 95-110
- MATTHÄUS, W.; FRANCK, H.: The seasonal nature of major Baltic inflows. *Kieler Meeresforsch., Sonderh.* 6 (1988), 64-72
- MATTHÄUS, W.; FRANCK, H.: Is the positive salinity anomaly in the Kattegat deep water a necessary precondition for major Baltic inflows? *Gerlands Beitr. Geophysik*, 98 (1989), 332-343
- MATTHÄUS, W.; FRANCK, H.: The water volume penetrating into the Baltic Sea in connection with major Baltic inflows. *Gerlands Beitr. Geophysik*, 99 (1990), 377-386
- MATTHÄUS, W.; FRANCK, H.: Characteristics of major Baltic inflows - a statistical analysis. *Cont. Shelf Res.*, 12 (1992), 1375-1400
- MATTHÄUS, W.; LASS, H.-U.: The recent salt inflow into the Baltic Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (1995), 280-286
- MATTHÄUS, W.; SCHINKE, H.: Mean atmospheric circulation patterns associated with major Baltic inflows. *ICES Statutory Meeting 1994, ICES C.M. 1994a/Q:1*, 9 S.
- MATTHÄUS, W.; SCHINKE, H.: Mean atmospheric circulation patterns associated with major Baltic inflows. *Dt. Hydrogr. Z.*, 46 (1994b), 321-339
- MATTHÄUS, W.; FRANCKE, E.; LASS, H.-U.; SCHWABE, R.: Untersuchung der Wasseraustauschprozesse im Bereich der Darßer Schwelle. *Beitr. Meereskd.*, 47 (1982), 31-50
- MATTHÄUS, W.; LASS, H.-U.; FRANCKE, E.; SCHWABE, R.: Zur Veränderlichkeit des Volumen- und Salztransports über die Darßer Schwelle. *Gerlands Beitr. Geophysik*, 92 (1983), 407-420
- MATTHÄUS, W.; LASS, H.-U.; TIESEL, R.: The major Baltic inflow in January 1993. *ICES Statutory Meeting 1993, ICES C.M. 1993/C:51*, 9 S.
- MATTHÄUS, W.; NEHRING, D.; NAUSCH, G.: Effects of the inflows of salt-rich water during 1993 and early 1994 in the central Baltic Sea. *ICES Statutory Meeting 1994, ICES C.M. 1994/Q:3*, 9 S.
- MIKULSKI, Z.: River inflow to the Baltic Sea 1921 - 1975. Polish Academy of Sciences, Polish national Committee of the IHP. University of Warsaw, Faculty of Geography and Regional Studies. Warschau 1982
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Modellergebnisse zur baroklinen Zirkulation im Kattegat, im Sund und in der Beltsee. *Dt. Hydrogr. Z.*, 36 (1983), 237-257
- NAMIAS, J.: Recent seasonal interactions between North Pacific waters and the overlying atmospheric circulation. *J. Geophys. Res.*, 64 (1959), 631-646
- NAMIAS, J.: Seasonal persistence and recurrence of European blocking during 1958-1960. *Tellus*, 16 (1964), 394-407
- NAMIAS, J.: Short-period climatic fluctuations. *Science*, 147 (1965), 696-706
- NAUSCH, G.; NEHRING, D.: Nutrient dynamics in the Gotland Deep - reactions to the major salt water inflow in 1993. *Proc. 19th Conf. Baltic Oceanographers, Sopot, Vol. 2 (1994)*, 551-559

- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: The stagnation in the deeps of the Baltic during 1971 and the influx of high saline water in March, 1972. Proc. 8th Conf. Baltic Oceanographers, Copenhagen 1972, Beitrag Nr. 15
- NEHRING, D.; FRANCKE, E.: Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee im Jahre 1972 unter besonderer Berücksichtigung des Salzwassereintruchs im März/April 1972. Fischerei-Forsch., 12 (1974) 1, 23-33
- NEHRING, D.; MATTHÄUS, W.; LASS, H.-U.; NAUSCH, G.: Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1993. Dt. Hydrogr. Z., 46 (1994), 151-162
- NEUMANN, G.: Eigenschwingungen der Ostsee. Aus d. Archiv d. Dt. Seewarte u. Marine-observatorium, 61 (1941) 4, 59 S.
- NIKOLAJEV, I. I.: Über die Ursachen der Salzgehaltsschwankungen der Ostsee (in russ.). Trudy Baltiuro [im Original: НИКОЛАЕВ, И. И.: О причинах колебаний солености Балтийского моря. Труды Балтиуро], 2 (1956), 96-106
- OLBERG, M.; RAKÓCZI, F.: Informationstheorie in Meteorologie und Geophysik. Mit besonderer Berücksichtigung der Maximum-Entropie-Spektralschätzung. Berlin 1984, 181 S.
- RASCHKE, E. (Hrsg.): BALTEX. Scientific plan for the Baltic Sea Experiment (BALTEX). Second Edition. Geesthacht 1994, 52 S.
- RIEMANN, J.: Mögliche Veränderungen von Zyklonenzugbahnen im europäischen Raum. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Meteorologisches Institut. Berlin 1994, 90 S.
- ROSSITER, J. R.: An analysis of annual sea level variations in European waters. Geophys J. Roy. astron. Soc., (1967) 12, 259-299
- SCHEMAINDA, R.: Die ozeanographischen Veränderungen im Bornholmtief in den Jahren 1951 - 1955. Annalen f. Hydrographie, 8 (1956/57), 48-64
- SCHEMAINDA, R.: Zur rezenten Aussüßung der Ostsee. Fischereiforsch., Inf. für die Praxis, 3 (1960) 4, 19-22
- SCHINKE, H.: Zum Auftreten von Zyklonen mit Kerndrücken ≤ 990 hPa im atlantisch-europäischen Raum von 1930 - 1991. Spezialarbeiten aus der Arbeitsgruppe Klimaforschung des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin. Herausgegeben von Peter Hupfer. Nr. 1, Berlin 1992, 73 S.
- SCHINKE, H.: On the occurrence of deep cyclones over Europe and the North Atlantic in the period 1930 - 1991. Contributions to Atmospheric Physics/Beiträge zur Physik der Atmosphäre, 66 (1993), 223-238
- SCHINKE, H.; MATTHÄUS, W.: Mean sea level pressure and wind fields during major Baltic inflows. Proc. 19th Conf. Baltic Oceanographers, Sopot, Vol. 1 (1994), 212-223
- SCHMIDT, T.: Datensatz "Die Großwetterlagen Europas nach Hess/Brezowsky" 1881 - 1989, Berlin 1990
- SCHÖNWIESE, C.-D.: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 2. verb. Aufl. Berlin 1992, 231 S.

- SCHÖNWIESE, C.-D.; RAPP, J.; FUCHS, T.; DENHARD, M.: Klimatrend-Atlas Europa 1891 - 1990. Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Berichte des Zentrums für Umweltforschung, Nr. 20. Frankfurt am Main 1993, 218 S.
- SCHOTT, F.: Der Oberflächensalzgehalt in der Nordsee. Diss., Christian-Albrechts-Universität Kiel, Kiel 1964, 79 S.
- SCHOTT, F.: Der Oberflächensalzgehalt in der Nordsee. Dt. Hydrogr. Z., Erg.-H. A, Nr. 9 (1966), 58 S.
- SCHULZ, B.: Die Durchlüftung der Nord- und Ostsee. Naturwiss., 12 (1924) 6, 105-113, 126-133
- SCHULZ, B.: Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee. Peterm. Mitth., Erg.-H. Nr. 209 (1930), 183-194
- SEINÄ, A.: Ice time series of the Baltic Sea. In: Leppäranta, M.; Haapala, J. (Hrsg.): Proc. of the first workshop on the Baltic Sea ice climate. University of Helsinki, Department of Geophys., Report Ser. in Geophys., Nr. 27. Helsinki 1993, 87-90
- SEINÄ, A.; PALOSUO, E.: Itämeren suurimpien vuotuisten jääpeitteiden laajuuksien luokittelu 1720 - 1992 (The classification of the maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720 - 1992) (in finnisch). MERI, Nr. 20 (1993), 5-20
- SOSKIN, I. M.: Der Salzaustausch durch die dänischen Meerengen und sein Einfluß auf die langjährigen Schwankungen des Salzgehaltes der Ostsee (in russ.). Trudy GOIN [im Original: СОСКИН, И. М.: Солеобмен через датские проливы и его влияние на многолетние колебания солености Балтийского моря. Труды ГОИН], 37 (1959), 34-41
- SOSKIN, I. M.: Langjährige Veränderungen der hydrologischen Charakteristika der Ostsee (in russ.) [im Original: СОСКИН, И. М.: Многолетние изменения гидрологических характеристик Балтийского моря]. Leningrad 1963, 160 S.
- SOSKIN, I. M.; ROZOVA, L. V.: Der Wasseraustausch zwischen Ost- und Nordsee (in russ.). Trudy GOIN [im Original: СОСКИН, И. М.; РОЗОВА, Л. В.: Водообмен между Балтийским и Северным морями. Труды ГОИН], 41 (1957), 9-30
- STRIGGOW, K.: Die relative Landsenkung im Bereich des Sundes und der Beltsee - eine weitere Ursache der rezenten Salzgehaltszunahme der Ostsee. Gerlands Beitr. Geophysik, 92 (1983), 228-240
- STRIGGOW, K.; TILL, K.-H.: Einhundertjährige Pegelregistrierungen des südwestlichen Ostseeraums - Indikatoren für die Existenz kippende starrer Platten beiderseits der Tornquist-Teisseyre-Zone wie für die rezente Aktivität dieser Zone. Z. geol. Wiss., 15 (1987), 225-241
- TRENBERTH, K. E.; PAOLINO JR., D. A.: The Northern Hemisphere sea-level pressure data set: trends, errors and discontinuities. Mon. Wea. Rev., 108 (1980), 855-872
- VOIPIO, A. (Hrsg.): The Baltic Sea. Elsevier Oceanogr. Ser. 30. Amsterdam 1981, 418 S.
- WATTENBERG, H.: Über die Grenzen zwischen Nord- und Ostseewasser. Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie, 69 (1941), 265-279
- WATTENBERG, H.: Entwurf einer natürlichen Einteilung der Ostsee. Kieler Meeresforsch., 6 (1949), 10-17

- WILLIAMS, J.; VAN LOON, H.: An examination of the Northern Hemisphere sea-level pressure data set. *Mon. Wea. Rev.*, 104 (1976), 1354-1361
- WOLF, G.: Salzwassereinbrüche im Gebiet der westlichen Ostsee. *Beitr. Meereskd.*, 29 (1972), 67-77
- WÜBBER, C.; KRAUSS, W.: The two-dimensional seiches of the Baltic Sea. *Oceanol. Acta*, 2 (1979), 435-446
- WYRTKI, K.: Die Dynamik der Wasserbewegungen im Fehmarnbelt I. *Kieler Meeresforsch.*, 9 (1953), 155-170
- WYRTKI, K.: Der große Salzeinbruch in die Ostsee im November und Dezember 1951. *Kieler Meeresforsch.*, 10 (1954a), 19-25
- WYRTKI, K.: Die Dynamik der Wasserbewegungen im Fehmarnbelt II. *Kieler Meeresforsch.*, 10 (1954b), 162-181
- WYRTKI, K.: Schwankungen im Wasserhaushalt der Ostsee. *Dt. Hydrogr. Z.*, 7 (1954c), 91-129

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dr. habil. Wolfgang Matthäus vom Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) für die hervorragende Zusammenarbeit, jederzeit gewährte Unterstützung und das sehr gute kollegiale Verhältnis sowie die vielen Hinweise, Ratschläge und anregenden Diskussionen. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Peter Hupfer, ohne den diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre, für die Unterstützung und wertvollen Ratschläge, insbesondere zu den klimatologischen Aspekten des Auftretens von Salzwasser-einbrüchen. Für die gute Zusammenarbeit, die vielen Hinweise und anregenden Diskussionen möchte ich ebenfalls Frau Christiane Baerens sowie Herrn Dr. Hartmut Fischer (IOW) danken.

Allen Mitarbeitern des Meteorologischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin sowie des Instituts für Ostseeforschung Warnemünde danke ich für das gute Arbeitsklima sowie die zahlreichen interessanten Diskussionen. Gleichfalls möchte ich mich bei den Besatzungen der Forschungsschiffe des IOW "Prof. Albrecht Penck" und "Alexander v. Humboldt" für die angenehme Atmosphäre an Bord sowie die Beantwortung meiner zahlreichen Fragen bedanken.

Weiterhin danke ich Frau Antje Günther, Herrn André Moldenhauer sowie Herrn Tobias Gablunsky für die mühevollen Anfertigung der zahlreichen Einzelbilder für die Animationen, Frau Katharina Pfaff für die Vervollständigung des Datensatzes aller Starktiefs, Herrn Doz. Dr. sc. Manfred Olberg sowie Herrn Dr. Frank-Michael Chmielewski für die Überlassung der Programme zur gleitenden Maximum-Entropie-Spektralanalyse bzw. zur EOF-Analyse sowie den Mitarbeitern des Rechenzentrums der Humboldt-Universität zu Berlin, insbesondere Herrn Frank Olzog, für das Kopieren aller Datensätze sowie der Animationen auf CD-ROM.

Dem National Center for Atmospheric Research in Boulder (USA), insbesondere Herrn Wilbur Spangler, möchte ich für die Bereitstellung der Druckdatensätze danken, Herrn Thomas Schmidt für die Bereitstellung des Datensatzes der Großwetterlagen sowie Herrn Dr. Bengt Carlsson und Herrn Barry Broman vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) für die Überlassung der Daten der Flußwasserzufuhr bzw. der Daten des Wasserstandes von Landsort. Die Zusammenstellung der Wasserstandsdaten von Hornbaek und Gedser erfolgte im Rahmen eines Projektes, finanziert durch die National Agency of Environmental Protection in Dänemark in Verbindung mit dem HAV/90 Marine Research Program in Dänemark. Sie wurden freundlicherweise von Herrn Dr. Torben S. Jacobsen zur Verfügung gestellt.

Anhang

Dokumentation

zu

**Computer-Animationen über charakteristische Zirkulationsmuster
der Atmosphäre bei Salzwassereinbrüchen in die Ostsee**

1. Einleitung

Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee vollzieht sich ausschließlich durch das enge und flache Übergangsgebiet zwischen beiden Meeren. Bedingt durch ihre Lage in der humiden Klimazone weist die Ostsee eine positive Wasserbilanz auf. Zu dem aus dem Wasserüberschuß resultierenden Ausstrom salzarmen Wassers im Oberflächenbereich existiert im Mittel ein Einstrom salzreichen Wassers in den tieferen Schichten des Übergangsgebietes, so daß eine permanente Salzgehaltsschichtung in der Ostsee aufrechterhalten wird. Eine durchgreifende Erneuerung und damit Verbesserung der Lebensbedingungen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee erfolgt aber nur durch die relativ seltenen Einströme größerer Mengen salz- und sauerstoffreichen Wassers, die als Salzwassereinbrüche (SWE) bezeichnet werden (MATTHÄUS und FRANCK 1992). Ihr Auftreten ist an spezielle meteorologische und ozeanographische Bedingungen gebunden. Zur Veranschaulichung dieser Prozesse dienen die hier beschriebenen Computer-Animationen.

2. Inhalt der Animationen

Einen Überblick über alle Animationen (FLC-Format) gibt Tab. 1:

Dateiname	Beschreibung	Länge (Byte)	©
SWE.FLC	mittlerer SWE Animation 1: 15tägige Vorperiode und Tage 1 bis 5 des SWE	6 806 587	1994
VSWE.FLC	mittlerer sehr starker SWE Animation 2: 15tägige Vorperiode und Tage 1 bis 22 des SWE	14 762 334	1994
SWE7576.FLC	SWE im Dezember 1975 und Januar 1976 Animation 3: 01. 11. 1975 bis 31. 01. 1976	94 705 045	1994
SWE9293.FLC	SWE im Januar 1993 Animation 4: 01. 12. 1992 bis 15. 02. 1993	81 202 475	1995

Tab. 1: Übersicht über die vorhandenen Animationen

Für die 87 im Zeitraum 1899 bis 1976 aufgetretenen Salzwassereinbrüche wurde das mittlere Bodendruckfeld für die 15tägige Vorperiode sowie die ersten fünf Tage der Haupteinstromperiode berechnet (Animation 1). Als typisches Merkmal in der Vorperiode eines Salzwassereinbruchs zeigt sich eine Verstärkung und Nordostverlagerung des Azorenhochs sowie eine mit Vertiefung einhergehende Verlagerung des Zentrums des niedrigsten Druckes aus dem grönländisch-isländischen Raum nach Nordnorwegen. Dies führt zu starken Druckgradienten und damit zu hohen Windgeschwindigkeiten über dem Ostsee-Eingangsbereich. Durch die Verschiebung der Druckzentren kommt es außerdem in der Vorperiode zu einer Drehung der Isobarenrichtung von Westsüdwest auf Westnordwest. Diese westnordwestliche Richtung ist typisch für die Tage unmittelbar vor Beginn und während der ersten Tage eines Salzwassereinbruchs.

Das charakteristische Verhalten des Druckfeldes bei Einstromsituationen tritt noch deutlicher hervor, wenn man nur die 6 stärksten Salzwassereintrüche betrachtet (Animation 2). Hier wurden - wegen der längeren Andauer dieser Ereignisse - nicht nur die ersten fünf, sondern insgesamt 22 Tage der Haupteinstromperiode einbezogen. Eine detaillierte Analyse der mittleren Druck- und Windfelder bei Salzwassereintrüchen wurde an anderer Stelle dargelegt (MATTHÄUS und SCHINKE 1994).

Als Einzelbeispiele wurden der Salzwassereintruch im Dezember 1975/Januar 1976 (Animation 3) sowie der jüngste Salzwassereintruch im Januar 1993 herangezogen (Animation 4). Letzterer beendete eine 10jährige Periode ohne derartige Ereignisse, die durch drastische Abnahmen von Salzgehalt, Temperatur und Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser der Ostsee gekennzeichnet war. In diesen Animationen ist das typische Verhalten des Druckfeldes in den Wochen vor einem Salzwassereintruch (hoher Druck über der Ostsee) sowie bei einem Salzwassereintruch (starke Westwinde und Drehung der Isobarenrichtung auf Westnordwest) zu erkennen. Der dargestellte Zeitraum bei den Einzelbeispielen beträgt je 2 bis 3 Monate.

Besondere Berücksichtigung fand in den Animationen die Wirkung des Druck- und Windfeldes auf die Wasserfüllung der Ostsee, die während eines Salzwassereintruchs von geringer Unterfüllung oder etwa mittlerem Füllungsgrad auf extrem hohe Werte (bis +70 cm) ansteigen kann.

3. Datengrundlage

Druckdaten

Als Grundlage für die Animationen diente der Datensatz des nordhemisphärischen Bodendruckes, der vom National Center for Atmospheric Research, Boulder (USA), erstellt wurde. Dieser Datensatz enthält für den größten Teil der Nordhemisphäre tägliche Werte des Bodendruckes in einer Auflösung von $5^\circ \times 5^\circ$. Für jeden Tag liegt mindestens 1 Datensatz von 13 Uhr bzw. 12 Uhr UTC vor, seit April 1955 ist im allgemeinen noch ein Datensatz der 0-Uhr-Werte vorhanden. Für die Animationen standen damit für das gesamte Gebiet Druckwerte im Abstand von 24 bzw. 12 Stunden zur Verfügung.

Wasserstandsdaten

Zur Charakterisierung des mittleren Füllungsgrades der Ostsee wurden Tagesmittel des Wasserstandes des Pegels Landsort verwendet. Da der Wasserstand von Landsort - bedingt durch Landhebungsprozesse in Skandinavien - stark trendbehaftet ist, wurde dieser Trend von den Tageswerten abgezogen. Die resultierende Zeitreihe stellt somit die täglichen Abweichungen (in cm) vom mittleren Füllungsgrad der Ostsee dar.

4. Allgemeines zu den Animationen

Alle Abbildungen der Druckverteilungen wurden mit dem Programm "Surfer" der Golden Software Inc. erstellt. Die mittleren Druckverteilungen der Salzwassereinbrüche wurden aus den 12-Uhr- bzw. 13-Uhr-Werten berechnet. Anschließend wurden 3 Zwischenwerte für jeden Gitterpunkt bestimmt (lineare Interpolation), so daß der zeitliche Abstand zwischen 2 Bildern bei diesen Animationen 6 Stunden beträgt. Bei den Animationen einzelner Salzwassereinbrüche (Druckdaten alle 12 Stunden vorhanden) wurden ebenfalls 3 Zwischenwerte berechnet, so daß hier der zeitliche Abstand zwischen zwei Bildern 3 Stunden beträgt. Der Abstand zwischen zwei Isobaren ist 1 hPa. Einen Überblick über die Farben der Isobaren gibt Tab. 2. Im allgemeinen besteht ein Farbintervall aus 5 Isobaren gleicher Farbe. Eine Ausnahme bildet der Übergangsbereich zwischen niedrigem und hohem Druck (1000 hPa bis 1019 hPa). Hier wurden die Farben symmetrisch gewählt (grau - weiß - grau) und das weiße Farbintervall auf 10 hPa erweitert. Ausgedehnte Gebiete niedrigen Druckes sind durch eine hohe Isobarenanzahl in der Farbe grün, ausgedehnte Gebiete hohen Druckes sind durch eine hohe Isobarenanzahl in der Farbe gelb gekennzeichnet.

Farbe	Druckintervall		
grün	989 hPa	und	darunter
dunkelblau	990 hPa	bis	994 hPa
hellblau	995 hPa	bis	999 hPa
grau	1000 hPa	bis	1004 hPa
weiß	1005 hPa	bis	1014 hPa
grau	1015 hPa	bis	1019 hPa
hellrot	1020 hPa	bis	1024 hPa
dunkelrot	1025 hPa	bis	1029 hPa
gelb	1030 hPa	und	darüber

Tab. 2: Farben der Isobaren

In der Kopfzeile jeder Abbildung stehen Datum und Uhrzeit und - in der rechten oberen Ecke - der Wasserstand der Ostsee (in grün). Die Farbe der Kopfzeile sagt aus, welche Phase eines Salzwassereinbruchs sich gerade ereignet:

- weiß normale Tage
- gelb 15tägige Vorperiode eines Salzwassereinbruchs oder Salzwassereinstromes
- rot Haupteinstromperiode eines Salzwassereinbruchs oder Salzwassereinstromes
- grau 5 Tage unmittelbar nach einem Salzwassereinbruch oder Salzwassereinstrom

Überschneidet sich ein Zeitraum mit der Farbe gelb mit einem der Farbe grau, so wurde der Farbe gelb die Priorität gegeben.

5. Die einzelnen Animationen im Überblick

Zu jeder Animation wurde ein Titelbild erstellt, das wichtige Informationen über die Animation enthält (in Englisch): den Titel, Namen und Anschrift der Autoren, einen kurzen Überblick über den Inhalt der Animation, eine Legende über die Farben der Isobaren, das IOW-Logo sowie einen Copyrightvermerk. Eine vollständige Liste der Texte aller Titelbilder findet sich in den folgenden Abschnitten.

5.1 SWE.FLC - Mittlere Bodendruckfelder bei Salzwassereinbrüchen

Mean Sea Level Pressure Patterns During
Major Baltic Inflows

Holger Schinke / Wolfgang Matthäus
Baltic Sea Research Institute
Seestr. 15, D-18119 Warnemünde

This animation shows the mean sea level pressure patterns during the last 15 days before a major Baltic inflow (pre-inflow period) and during the first 5 days of the inflow event (main inflow period). The 87 major Baltic inflows in the period 1899 - 1976 are the basis of this calculation. The time interval between two grids is 6 hours, the distance of isobars is 1 hPa.

Animationsdauer: 20 Tage

5.2 VSWE.FLC - Mittlere Bodendruckfelder bei sehr starken Salzwassereinbrüchen

Mean Sea Level Pressure Patterns During
Very Strong Major Baltic Inflows

Holger Schinke / Wolfgang Matthäus
Baltic Sea Research Institute Warnemünde
Seestr. 15, D-18119 Warnemünde, Germany

This animation shows the mean sea level pressure patterns during the last 15 days before a very strong major Baltic inflow (pre-inflow period) and during the first 22 days of the inflow event (main inflow period). The 6 very strong major Baltic inflows in the period 1899 - 1976 are the basis of this calculation. The time interval between two grids is 6 hours, the distance of isobars is 1 hPa. The number in the upper right corner is the Baltic sea level above or below mean filling represented by the Landsort sea level.

Animationsdauer: 37 Tage

5.3 SWE7576.FLC - Die Salzwassereinbrüche im Dezember 1975 und Januar 1976

The Major Baltic Inflows in December 1975 and January 1976

Holger Schinke / Wolfgang Matthäus
Baltic Sea Research Institute Warnemünde
Seestr. 15, D-18119 Warnemünde, Germany

This animation shows the daily sea level pressure fields in the period from 01 November 1975 to 31 January 1976. Two major inflows and 3 smaller inflow events occurred during these 3 months which are recognizable by the colours in the headline: normal days, days of the 15-day pre-inflow period, days of the main inflow period and the first 5 days of the post period. The time interval between two grids is 3 hours, the distance of isobars is 1 hPa. The number in the upper right corner is the Baltic sea level above or below mean filling represented by the Landsort sea level.

Animationsdauer: 92 Tage

Einströme:

20. 11. 1975	Salzwassereinstrom (1 Tag)
23. 11. 1975	Salzwassereinstrom (1 Tag)
06. 12. 1975 bis 20. 12. 1975	Salzwassereinbruch (15 Tage)
22. 12. 1975 bis 14. 01. 1976	Salzwassereinbruch (24 Tage)
23. 01. 1976 bis 24. 01. 1976	Salzwassereinstrom (2 Tage)

5.4 SWE9293.FLC - Der Salzwassereinbruch im Januar 1993

The Major Baltic Inflow in January 1993

Holger Schinke / Wolfgang Matthäus
Baltic Sea Research Institute Warnemünde
Seestr. 15, D-18119 Warnemünde, Germany

This animation shows the daily sea level pressure fields in the period from 01 December 1992 to 15 February 1993. After a break of 10 years, a major inflow occurred during this period which is recognizable by the colours in the headline: normal days, days of the 15-day pre-inflow period, days of the main inflow period and the first 5 days of the post period. The time interval between two grids is 3 hours, the distance of isobars is 1 hPa. The number in the upper right corner is the Baltic sea level above or below mean filling represented by the Landsort sea level.

Animationsdauer: 77 Tage

Einströme:

18. 01. 1993 bis 28. 01. 1993	Salzwassereinbruch (11 Tage)
-------------------------------	------------------------------

6. Format der Animationen

Die Animationen haben eine Auflösung von 640 x 480 Bildpunkten bei 256 Farben, liegen im FLC-Format vor und wurden im Standard ISO 9660 auf CD aufgezeichnet. Sie sind unter MS-DOS lesbar, ein MS-DOS-Programm zum Betrachten der Animationen liegt auf Diskette bei.

Literatur

MATTHÄUS, W.; FRANCK, H.: Characteristics of major Baltic inflows - a statistical analysis.
Cont. Shelf Res., 12 (1992), 1375-1400

MATTHÄUS, W.; SCHINKE, H.: Mean atmospheric circulation patterns associated with major
Baltic inflows. Dt. Hydrogr. Z., 46 (1994), 321-339

Ergänzender Hinweis zur Dokumentation der Animationen

Im Jahre 1996 wurden weitere Animationen angefertigt, die in der Dokumentation nicht erwähnt sind. Insgesamt existieren nun 12 Animationen, die das Bodendruckfeld bei 18 Salzwassereinbrüchen darstellen, sowie 4 Animationen zu mittleren Druckverhältnissen. Einen kurzen Überblick über alle derzeit verfügbaren Animationen gibt die folgende Tabelle (kursiv: bereits in der Dokumentation beschriebene Animationen). Eine ausführlichere Dokumentation sowie die Animationen selbst sind in der Bibliothek des IOW erhältlich.

Nr.	von/bis	SWE im	Stärke	Charakteristik
1	16. 11. 1924 28. 02. 1925	Januar 1925	stark	Anteil des über den Sund einströmenden salzreichen Wassers war besonders hoch
		Februar 1925	mittel	trat in Zusammenhang mit SWE im Januar 1925 auf
2	01. 07. 1926 15. 09. 1926	August 1926	mittel	einzigster bisher beobachteter Salzwassereinbruch im Sommer (zu Anfang der Einstromsaison), relativ schwache Ausprägung der Einstromwetterlage
3	16. 03. 1927 15. 05. 1927	April 1927	mittel	einzigster bisher beobachteter Salzwassereinbruch in der zweiten Aprilhälfte (zum Ende der Einstromsaison), relativ schwache Ausprägung der Einstromwetterlage
4	01. 10. 1951 31. 01. 1952	November/ Dezember 1951	sehr stark	stärkster bisher beobachteter Salzwassereinbruch, sehr geringe Flußwasserzufuhr
		Januar 1952	mittel	trat in Zusammenhang mit SWE im Nov./Dez. 1951 auf, sehr geringe Flußwasserzufuhr
5	16. 11. 1959 31. 01. 1960	Januar 1960	mittel	Ostseewasserstand im negativen Bereich an den ersten 5 Tagen des SWE, sehr geringe Flußwasserzufuhr
6	01. 09. 1968 15. 11. 1968	Oktober 1968	schwach	Ostseewasserstand während des gesamten SWE sehr niedrig, sehr schwache Ausprägung der Einstromwetterlage
7	01. 01. 1969 15. 02. 1969	Februar 1969	mittel	Ostseewasserstand im negativen Bereich während des gesamten SWE, geringe Flußwasserzufuhr
8	01. 08. 1969 31. 12. 1969	September/ Oktober 1969	schwach	trat in Zusammenhang mit SWE im Okt./Nov. 1969 auf
		Oktober/ November 1969	stark	sehr geringe Flußwasserzufuhr
9	16. 09. 1971 15. 01. 1972	Oktober 1971	schwach	in der Einstromsaison 1971/72 traten ungewöhnlich viele einzelne Salzwassereinbrüche auf - insgesamt 4, geringe Flußwasserzufuhr
		Oktober 1971	schwach	
		November 1971	mittel	
		Dezember 1971	mittel	
10	01. 11. 1975 31. 01. 1976	Dezember 1975	mittel	<i>besonders bedeutsam in Zusammenhang mit dem SWE im Januar 1976</i>
		Dezember 1975/ Januar 1976	stark	<i>einer der bedeutendsten SWE in jüngster Vergangenheit und in der Literatur häufig beschrieben, geringe Flußwasserzufuhr</i>
11	01. 08. 1986 31. 12. 1986	(Herbst 1986)	-	in diesem Zeitraum kam die typische Einstromwetterlage wiederholt vor, der Ostseewasserstand war jedoch zu hoch, so daß keine günstigen Vorbedingungen für einen SWE vorhanden waren
12	01. 12. 1992 15. 02. 1993	Januar 1993	sehr stark	<i>beendete eine 10jährige Periode ohne SWE, die durch drastische Abnahmen von Salzgehalt, Temperatur und Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser der Ostsee gekennzeichnet war, Anteil des über den Sund einströmenden salzreichen Wassers war besonders hoch, in der Literatur sehr häufig beschrieben</i>
Sonderanimationen				
13	mittlere Bodendruckanomalien bei SWE			15tägige Vorperiode und Tage 1 bis 5 des SWE
14	mittleres Bodendruckfeld bei SWE			15tägige Vorperiode und Tage 1 bis 5 des SWE
15	mittleres Bodendruckfeld bei sehr starken SWE			15tägige Vorperiode und Tage 1 bis 22 des SWE
16	mittlerer Jahresgang des Bodendruckfeldes und des Ostseewasserstandes			365 Tage

Meereswissenschaftliche Berichte

MARINE SCIENCE REPORTS

- 1 (1990) Postel, Lutz:
Die Reaktion des Mesozooplanktons, speziell der Biomasse, auf küstennahen Auftrieb vor Westafrika (The mesozooplankton response to coastal upwelling off West Africa with particular regard to biomass)
- 2 (1990) Nehring, Dietwart:
Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee von 1979 bis 1988 – ein Vergleich (Hydrographic and chemical conditions in the western and central Baltic Sea from 1979 to 1988 – a comparison)
Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang:
Aktuelle Trends hydrographischer und chemischer Parameter in der Ostsee, 1958 – 1989 (Topical trends of hydrographic and chemical parameters in the Baltic Sea, 1958 – 1989)
- 3 (1990) Zahn, Wolfgang:
Zur numerischen Vorticityanalyse mesoskaler Strom- und Massenfelder im Ozean (On numerical vorticity analysis of mesoscale current and mass fields in the ocean)
- 4 (1992) Lemke, Wolfram; Lange, Dieter; Endler, Rudolf (Eds.):
Proceedings of the Second Marine Geological Conference – The Baltic, held in Rostock from October 21 to October 26, 1991
- 5 (1993) Endler, Rudolf; Lackschewitz, Klas (Eds.):
Cruise Report RV "Sonne" Cruise SO82, 1992
- 6 (1993) Kulik, Dmitri A.; Harff, Jan:
Physicochemical modeling of the Baltic Sea water-sediment column: I. Reference ion association models of normative seawater and of Baltic brackish waters at salinities 1–40 ‰, 1 bar total pressure and 0 to 30°C temperature
(system Na–Mg–Ca–K–Sr–Li–Rb–Cl–S–C–Br–F–B–N–Si–P–H–O)
- 7 (1994) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans-Ulrich; Nausch, Günther:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993
- 8 (1995) Hagen, Eberhard; John, Hans-Christian:
Hydrographische Schnitte im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992
- 9 (1995) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994
Seifert, Torsten; Kayser, Bernd:
A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea
- 10 (1995) Schmidt, Martin:
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11 (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)
Schneider, Bernd; Pohl, Christa:
Spurenmittelkonzentrationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

12 (1996)

Schinke, Holger:
Zu den Ursachen von Salzwassereinbrüchen in die Ostsee