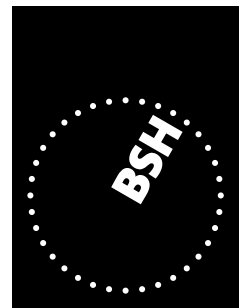


BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Niedrigwasser in der südlichen Ostsee

(westlicher und mittlerer Teil)



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Niedrigwasser in der südlichen Ostsee

(westlicher und mittlerer Teil)

Autoren:

Marzenna Sztobryn

Bärbel Weidig

Ida Stanisławczyk

Jürgen Holfort

Beata Kowalska

Monika Mykita

Alicja Kańska

Katarzyna Krzysztofik

Ines Perlet

Berichte des

Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Nr. 45/2009

In der Reihe „Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie“ werden Themen mit Dokumentationscharakter aus allen Bereichen des BSH veröffentlicht. Durch die Publikation nimmt das BSH zu den Inhalten der Beiträge keine Stellung. Die Veröffentlichungen in dieser Berichtsreihe erscheinen nach Bedarf.

Niedrigwasser in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)

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

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2009
www.bsh.de

ISSN-Nr. 0946-6010

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des BSH reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Zusammenfassung

Die Charakteristika von Niedrigwassern (Pegelstände unter 440 cm – entspricht 60 cm unter dem mittleren Wasserstand) in der südlichen Ostsee werden anhand von Daten von fünf Stationen an der deutschen und polnischen Küste beschrieben. Die Stationen sind Wismar, Warnemünde und Sassnitz auf der deutschen Seite und Świnoujście und Kołobrzeg auf der polnischen. An allen Stationen liegen seit 1958 stündliche, bzw. 4-stündliche Datenreihen vor. Außerdem wurden 20 starke Ereignisse des Zeitraums 1955–2005 ausgewählt und diese, zusammen mit der meteorologischen Lage, ausführlich dargestellt.

Der wichtigste Faktor, der zum Entstehen von Niedrigwasser beiträgt, ist starker ablandiger Wind (Sturm), der das Wasser von der Küste weg drängt. Windmessungen an der Küste zeigen in der überwiegenden Mehrheit aller Niedrigwasser (ca. 90 %) ablandigen Wind, d. h. aus Richtung OSO-WSW. Ablandige Starkwinde treten in der Regel im Zusammenhang mit rasch die Ostsee überquerenden Tiefdruckgebieten auf.

Der überwiegende Teil aller erfassten Niedrigwasser (83,6 %) ereignete sich unter zonalen Zirkulationsbedingungen. Unter diesen ist mit 32,5 % die zyklonale Westlage WZ die wichtigste, gefolgt von der Hochbrückenlage BM (14,8 %) und der zyklonalen Nordwestlage NWZ (10 %).

Die Stärke und Häufigkeit von Niedrigwassern nimmt von West nach Ost hin ab, was damit zusammenhängt, dass die südliche Ostsee die Form einer nach Osten hin offenen Bucht hat. Statistisch gesehen kommt in Wismar alle 50 Jahre ein Niedrigwasser von –190 cm vor, während in Kołobrzeg nur mit –128 cm gerechnet werden kann. Wismar ist auch die einzige Station, an der in allen Monaten des Jahres Niedrigwasser auftraten, im Allgemeinen treten die meisten Niedrigwasser aber in den Wintermonaten auf.

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Einleitung | 7 |
| 1.1 | Hintergrund | 7 |
| 1.2 | Überblick über den Stand der Wissenschaft | 7 |
| 1.3 | Geographische und hydrodynamische Bedingungen..... | 8 |
| 2 | Daten und Definition | 11 |
| 2.1 | Daten..... | 11 |
| 2.2 | Niedrigwasserdefinition und allgemeine Eigenschaften..... | 12 |
| 3 | Jahreszeitliche und Langzeitvariabilität | 16 |
| 3.1 | Innerjährliche Schwankungen | 16 |
| 3.2 | Jahreszeitliche Verteilung..... | 19 |
| 3.3 | Langzeitstatistik | 22 |
| 4 | Meteorologische Faktoren, die zu Niedrigwasserereignissen beitragen | 25 |
| 4.1 | Stark ablandiger Wind an der Küste | 25 |
| 4.2 | Niedrigwasser bei ablandigem Sturm im Windfeld eines vorbeiziehenden Tiefdruckgebiets | 26 |
| 4.3 | Hochdruckgebiet als Ursache niedriger Wasserstände | 26 |
| 4.4 | Zusammenhang zwischen den atmosphärischen Bedingungen über Europa und Niedrigwasser an der südlichen Ostseeküste | 27 |
| 5 | Extreme Niedrigwasser in der südlichen Ostsee | 30 |
| 5.1 | November 1956 | 30 |
| 5.2 | Januar 1960 | 32 |
| 5.3 | Januar 1961 | 34 |
| 5.4 | Februar 1962..... | 36 |
| 5.5 | Dezember 1965..... | 38 |
| 5.6 | Oktober 1967 | 40 |
| 5.7 | März 1969 | 42 |
| 5.8 | Januar 1979 | 44 |
| 5.9 | November 1979 | 46 |
| 5.10 | November 1981 | 48 |
| 5.11 | November 1985 | 50 |
| 5.12 | Januar 1990 | 52 |
| 5.13 | Februar 1990..... | 54 |
| 5.14 | Januar 1993 | 56 |
| 5.15 | Februar 1996..... | 58 |
| 5.16 | Dezember 1999..... | 60 |
| 5.17 | November 2001 | 64 |
| 5.18 | Dezember 2001..... | 66 |
| 5.19 | Januar 2005 | 68 |
| | Literaturverzeichnis | 71 |
| | Abbildungsverzeichnis | 73 |
| | Tabellenverzeichnis | 76 |
| | Abkürzungen | 77 |
| | Autoren | 78 |

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Extreme Wasserstandsschwankungen an den Küsten sind in vielen Ländern ein wirtschaftliches und ökologisches Risiko. Um die Auswirkungen solcher Phänomene zu verringern, die katastrophale Ausmaße erreichen können, werden weltweit erhebliche Mittel in die Forschung und Technik investiert. Sturmfluten sind Wasserstands-extreme, die wegen der von ihnen ausgehenden Gefahren für die Küstenbewohner bereits eingehend erforscht worden sind. Im Gegensatz dazu ist der Stand der Forschung zu extremen Niedrigwasserereignissen sehr viel dürftiger. Da Niedrigwasser jedoch das Risiko birgt, dass kleinere Häfen trockenfallen und die Schifffahrt generell behindert wird, ist ein Verständnis des Niedrigwassergeschehens von erheblicher Bedeutung für die Sicherheit der Schifffahrt. Künftige Schiffsneubauten werden größer sein und einen größeren Tiefgang haben, und die Fahrtzeiten zwischen den Häfen werden noch mehr verkürzt, um weitere Kosteneinsparungen zu erzielen. Für Reedereien stellt die Umschlaggeschwindigkeit einen wesentlichen Faktor dar. Auch der Fährverkehr ist natürlich auf ausreichend hohe Wasserstände angewiesen, und Werften benötigen für das Ein- und Ausdocken genug Wasser unter dem Kiel. Zuverlässige Wasserstandsdaten sind unentbehrlich, um die Sicherheit der Schifffahrt in den schwierigen Gewässern der südlichen Ostsee zu gewährleisten, vor allem bei extremem Niedrigwasser.

Die vorliegende Untersuchung von Niedrigwasserereignissen im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste wurde von der polnisch-deutschen Arbeitsgruppe W-1, Hydrologie und Hydrogeologie in den deutsch-polnischen Grenzgewässern, durchgeführt. Sie schließt sich an eine im Jahr 2005 abgeschlossene Untersuchung historischer Sturmfluten an derselben Küste an, die ebenfalls in deutsch-polnischer Zusammenarbeit erstellt wurde. Die vorliegende Studie umfasst allerdings einen fünf Jahre längeren Zeitraum als die vorherige Studie. Das Projekt wurde gemeinsam vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg/Rostock (BSH) und dem polnischen Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski (IMGW-OM) durchgeführt.

Im ersten Teil der Monographie wird, basierend auf historischen Aufzeichnungen von Pegelstationen entlang der deutschen und polnischen Küste, das Phänomen extremer Niedrigwasser im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste für

den Zeitraum 1955–2005 analysiert. Eine Liste sämtlicher an ausgewählten Pegelstationen aufgezeichneter Niedrigwasser wird vorgelegt, und es wird eine statistische Auswertung der zu ihrem Entstehen führenden Parameter vorgenommen. Der zweite Teil enthält ausführliche Darstellungen der zwanzig gefährlichsten Niedrigwasser im oben genannten Zeitraum, jeweils mit einer Beschreibung der meteorologischen Lage und der Auswirkung der herrschenden Luftdruckbedingungen auf die Wasserstände an der Küste.

1.2 Überblick über den Stand der Wissenschaft

Die wichtigste bisher veröffentlichte Arbeit zum Thema Wasserstandsänderungen in der Ostsee ist die von E. Lisitzin (1974). Es sind bereits mehrere Arbeiten veröffentlicht worden, die sich mit extremen Wasserstandsänderungen in der Ostsee befassen (Majewski 1983, 1961; Stanislawczyk 2001; Sztobryn 2005) oder mit den Auswirkungen gefährlicher Wetterlagen – Zirkulationsstörungen, steiler Druckgradient und Starkwind (Stanislawczyk 2002; Wielbinska 1964). Im Unterschied zu Sturmfluten, die zu steigenden Wasserständen an der Küste führen, sind Niedrigwasserstände bisher in weit geringerem Maße untersucht worden. Es existieren nur wenige Studien zu diesem Thema (Majewski 1985; Stanislawczyk 2001, 2003; Sztobryn 2001; Wroblewski 1970), darunter „The low sea levels in the Baltic Sea“ mit einer Analyse allgemeiner Eigenschaften niedriger Wasserstände. Die bisher ausführlichste Untersuchung zu Niedrigwasserereignissen an der polnischen Küste stammt von Majewski und Dziadziuszko (1985).

Die Autoren untersuchten Niedrigwasser im Zeitraum von 1951 bis 1976. Die meisten neueren Studien untersuchen Niedrigwasserereignisse nur im Rahmen allgemeiner Wasserspiegelschwankungen. Die wichtigsten neueren Projekte sind „Studies and Modelling of Severe Hydrometeorological Conditions Along the Polish Coast“ (Projekt ERB CE PDCP 925076 im Zusammenhang mit dem Projekt SELF) und „Forecast of Extreme Sea Levels by Artificial Neural Network – Western Coast of Poland“ (Projekt 3TO9003/200/98 des polnischen Wissenschaftsausschusses).

Für Niedrigwasserereignisse an der polnischen Küste sind drei Hauptfaktoren verantwortlich: Wind, der inverse barometrische Effekt und der Füllungsgrad der Ostsee. Die allgemeinen atmosphärischen Bedingungen, die zu extremen Wasserständen führen, sind im Prinzip bekannt.

Niedrigwasser an der Küste der Deutschen Demokratischen Republik in der Zeit von 1900 bis 1980 einschließlich der Niedrigwasserereignisse an der dänischen Küste wurden von Schmager (1984) untersucht. In diesem Zeitraum traten 75 sturmbedingte Niedrigwasser auf, wobei deren Häufigkeit in den letzten beiden Dekaden niedriger war als in den ersten beiden Dekaden. Unter Extrembedingungen können die Pegel innerhalb von 12 Stunden um mehr als 1,5 m fallen. Der Wasserspiegel ist mit den örtlichen Windverhältnissen korreliert, und die beste Windkorrelation für die DDR-Küste wurde in Arkona gefunden. Aufgrund solcher Korrelationen gelang es, verschiedene statistische Vorhersagemodelle zu entwickeln. Ein sehr einfaches Modell sind Windstaukurven, in denen die Wasserstände als Funktion von Windgeschwindigkeit und -richtung dargestellt sind. Zum Beispiel ist beim Auftreten südwestlicher Winde von 20 m/s bei Kap Arkona ein Wasserstand von 1 m unter dem mittleren Wasserstand in Warnemünde zu erwarten. Allerdings spiegeln solche einfachen Punktkorrelationen die komplizierten Abläufe in der Natur nur unzureichend wieder. Mewes (1987) unterscheidet drei Hauptzugbahnen von Tiefdruckgebieten, die an der Küste der DDR Niedrigwasser verursachen: erstens Tiefdruckgebiete, die im westlichen Nordatlantik entstehen und die Nordsee überqueren; zweitens Tiefdruckgebiete, die sich südlich von Island bilden und in nordöstlicher Richtung ziehen; drittens Tiefdruckgebiete, die bei Island entstehen und entlang Skandinavien zum Polarmeer ziehen, ohne dass ihr Zentrum dabei die Ostsee überquert. Nach der Wiedervereinigung von Deutschland untersuchten Baerens et al. (1995) die Häufigkeit des Auftretens von Niedrigwasser an der deutschen Ostseeküste zwischen Flensburg und Warnemünde, ohne in dieser Studie jedoch den östlichen Teil der Ostsee zwischen Warnemünde und der polnischen Staatsgrenze zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur abnehmenden Häufigkeit von Niedrigwasserereignissen an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern waren an der Küste von Schleswig-Holstein im Zeitraum von 1900 bis 1990 mehr Niedrigwasser zu verzeichnen. Diese unterschiedliche Entwicklung hängt vermutlich mit dem Küstenverlauf zusammen, aber die genaue Ursache ist bisher immer noch ungeklärt. In beiden Gebieten treten Niedrigwasserereignisse gehäuft im Zeitraum von November bis Januar auf.

Wasserspiegelschwankungen an der polnischen Küste und im östlichen Teil der deutschen Küste hängen vermutlich eng zusammen, aber eine grenzüberschreitende Analyse von Niedrigwasserereignissen hat bisher noch nicht stattgefunden. Daher ist die Entstehung von Niedrigwas-

serereignissen in den verschiedenen Küstenabschnitten sowie die genaue Ursache der Unterschiede im Auftreten von Niedrigwassern in verschiedenen Bereichen der Küste immer noch nicht vollständig geklärt.

1.3 Geographische und hydrodynamische Bedingungen

Das in der vorliegenden Monographie untersuchte Gebiet ist die südliche Küste des westlichen und mittleren Teils der südlichen Ostsee. Die westliche Ostsee hat die Form einer nach Osten hin offenen Bucht, die sich von 25 sm in Wismar auf 120 sm bei Kołobrzeg (Abb. 1.3 a) erweitert. Der westlichste Teil der südlichen Ostseeküste zwischen Wismar an der Mecklenburger Bucht und Kap Arkona auf Rügen verläuft ungefähr von Südwest nach Nordost. Dieser Teil der Küste, an der die Pegelstationen Wismar und Warnemünde liegen, hat eine stark gegliederte Topographie mit Flachwasserbereichen und einer Vielzahl kleiner Buchten, Untiefen und Sandbänken.

Der mittlere Bereich der Küste, der sich von den Kreidekliffs bei Kap Arkona bis Świnoujście und bis an die Odermündung (Pegelstationen Sassnitz und Świnoujście) erstreckt, verläuft von Nordwest nach Südost und ist ebenfalls stark gegliedert mit kleinen, der Küste vorgelagerten Sandinseln, Meeresengen und Sandbänken. Auch in der angrenzenden Pommerschen Bucht ist der Meeresboden sehr formenreich, wobei Untiefen von weniger als 10 m überwiegen. Ein besonders breiter Untiefengürtel liegt vor der Insel Usedom, im Bereich des Pegels Świnoujście und um die Insel Wolin herum.

Der relativ gerade östliche Küstenabschnitt zwischen Wolin und Kołobrzeg verläuft von West-Südwest nach Ost-Nordost. Auch die nur eine Seemeile vor der Küste verlaufende 10-m-Tiefenlinie hat einen relativ geraden Verlauf.

Betrachtet man die drei topographisch unterschiedlichen Teile der Küste, so könnte man annehmen, dass die Wahrscheinlichkeit von Extremwasserständen in Sassnitz und in Świnoujście in etwa gleich ist. Dasselbe gilt für die Pegel in Wismar und Warnemünde. Wegen des Buchteneffekts nimmt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens extremer Wasserstandsereignisse jedoch von West nach Ost ab, wie aus Kapitel 3.3 eindeutig hervorgeht. Eine der Hauptursachen dieses Phänomens ist die Größe der offenen Wasserfläche bezogen auf die Küstenlänge und die Vergrößerung der Buchtenöffnung.



Abb. 1.3 a Die Geographie der westlichen und südlichen Ostsee hat die Form einer Bucht, die sich von 25 sm in Wismar über 45 sm in Warnemünde, 60 sm in Sassnitz und 90 sm in Świnoujście auf 120 sm in Kołobrzeg erweitert

Der Haupteinflussfaktor für Wasserstände im Ostseegebiet ist der Wind, der das Wasser entweder von der Küste wegdrängt oder zur Küste hin schiebt. Tiden sind hingegen von untergeordneter Bedeutung. Ein weiterer Faktor von geringerer Bedeutung ist der unterschiedliche Füllungsgrad der Ostsee. Größenordnung und Eigenschaften der Wasserstandsschwankungen in der Ostsee hängen unter anderem von der Küstenform ab sowie von der Windeinwirkung auf die betreffende Küste, der Bathymetrie des vorgelagerten Meeresbeckens und von den in dem jeweiligen Gebiet herrschenden Strömungen.

Die auffälligste Deformation der Wasseroberfläche vor der Ostseeküste verursachen stürmische bis orkanartige Winde. Das ist meistens dann der Fall, wenn ein starkes Tiefdruckgebiet entlang der Küste oder über die Küste hinwegzieht wie im Beispiel in Abb. 1.3 b dargestellt. Am Morgen des 4. Dezember 1999 wurde an den Küsten der Danziger Bucht (Pegelstationen Gdynia und Hel) ein Anstieg der Wasserstände infolge eines Sturms im Anschluss an den Durchzug einer Kaltfront

beobachtet. Zur gleichen Zeit sanken die Pegel zwischen Wismar und Świnoujście aufgrund einer sich nähernden Störung. Um ca. 05 UTC an diesem Tag betrug die Differenz der Wasserstände an der Küste zwischen Hel und Wismar über 260 cm. Die Extremwerte von 600 cm in Hel um 02 UTC und 315 cm in Wismar um 05 UTC lagen um fast 3 m auseinander (Abb. 1.3 c).

Extreme Niedrigwasserstände sind in Wismar normalerweise ausgeprägter als in Kołobrzeg, nicht nur in diesem Beispiel. Die Erklärung liegt in der Form der Küste. Wie schon oben erwähnt, hat dieser Teil der Ostsee die Form einer Bucht. Ein bestimmtes Wasservolumen, das aus diesem Gebiet abfließt oder zusätzlich hineinströmt, wirkt sich im westlichen Teil der Bucht auf kleinerem Gebiet aus als im östlichen Teil. Wegen des sogenannten Buchteneffekts sind niedrige Wasserstände im westlichen Teil der Bucht immer niedriger, und hohe Wasserstände höher, als im östlichen Teil der Bucht.

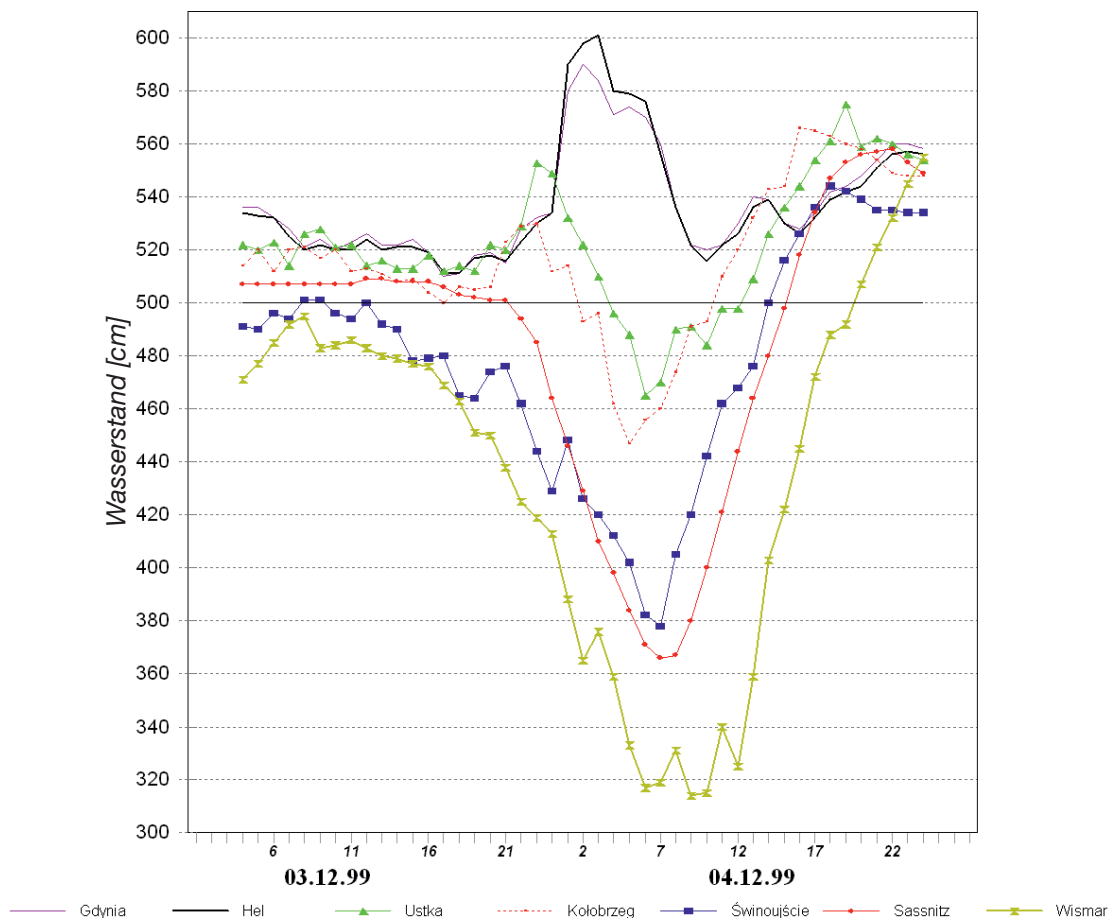


Abb. 1.3 b Wasserstandsschwankung an der südlichen Ostseeküste am 3. und 4. Dezember 1999

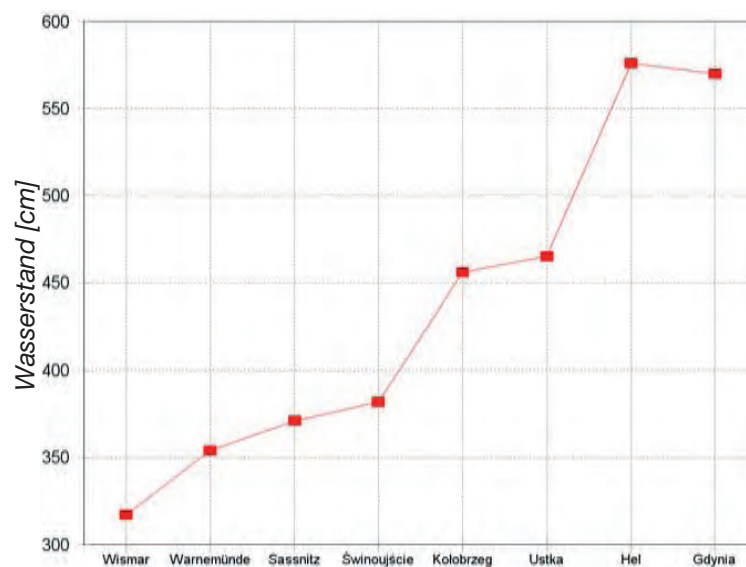


Abb. 1.3 c Wasserstände an der Küste zwischen Wismar und Hel, 06 UTC am 4. Dezember 1999
(Abstände zwischen den Pegelstationen sind nicht maßstabsgerecht)

2 Daten und Definition

2.1 Daten

Die vorliegende Monographie basiert auf hydrologischen und meteorologischen Daten, die beim BSH und IMGW archiviert sind sowie auf anderen veröffentlichten Daten. Pegelaufzeichnungen lagen von den Pegelstationen Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg vor. Alle Zeitreihen beginnen um 1955 und sind bis einschließlich 2005 analysiert. Für den betrachteten Zeitraum stehen die deutschen Daten überwiegend in 1-Stunden-Intervallen zur Verfügung. Die polnischen Daten werden in den Zeiten extremer Wasserstände (Niedrigwasser und Sturmfluten) in 1-Stunden-Intervallen digitalisiert. Die Mehrheit der anderen Daten liegt in 4-Stunden-Intervallen vor.

Der Nullpegel der Stationen in Schleswig-Holstein und Polen ist $PN = NN - 500$ cm. In Mecklenburg-Vorpommern ist der Nullpegel $PN = HN - 514$ cm, aber bis Oktober 1985 war der Bezugspegel NN. Die Pegeldaten vor Oktober 1985 sind entsprechend der aktuell verwendeten Definition berichtigt worden (Die Küste: Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns von Hans-Joachim Stigge).

Die Station Wismar weist im Jahr 1963 große Datenlücken auf. Es fehlen sämtliche Daten von Juli bis September, weil die Station wegen Wartungsarbeiten außer Betrieb war. Diese Datenlücken wurden durch Interpolation mit Daten von der nahe gelegenen Station Timmendorf ergänzt. Bei Verwendung derselben Zeitspanne wie bei der linearen Regression, d. h. 30 Tage vor und 30 Tage nach der Datenlücke, beträgt der Korrelationskoeffizient zwischen Timmendorf und Wismar 0,98. Die Standardabweichung der Differenzen zwischen Messwerten und Regressionsdaten beträgt 3,8 cm, bei einem Bereich zwischen $-15,0$ cm und $+14,0$ cm. Es fehlen auch in Wismar und Timmendorf die stündlichen Werte für Januar und Februar 1963, da zu dieser Zeit die Aufzeichnungsgeräte wegen Vereisung funktionsunfähig waren. Daher sind nur einzelne Tageswerte (7:00 MEZ) sowie die höchsten und niedrigsten Werte jedes Monats vorhanden. Die niedrigsten Werte im Januar und Februar waren 410 cm bzw. 450 cm. Die vorhandenen Messwerte wurden linear auf Stundenwerte interpoliert.

Die Zeitreihe Świnoujście weist zwei Datenlücken auf, die sich auf insgesamt drei Monate addieren: November 1978 und August/September 1982. Diese Werte wurden mittels einer linearen Funktion mit den Werten für Kołobrzeg und Sassnitz interpoliert. Die Parameter der Funktion wurden jeweils mit Hilfe der Daten eines kompletten Jahres vor dem fehlenden Monat berechnet. Die interpolierte Kurve wurde mittels „linear drift“ korrigiert, um Sprünge zwischen gemessenen und interpolierten Werten zu vermeiden.

In Kołobrzeg ist an mehreren Tagen nur ein einziger Tageswert vorhanden. Insgesamt 805 Messungen, umgerechnet ca. 268 Tage, fehlen in der 4-stündigen Zeitreihe. Die fehlenden Werte wurden durch lineare Interpolation ergänzt. Da die vorhandenen Daten alle von weiter westlich gelegenen Stationen stammen, waren die Ergebnisse dieser Methode bei Świnoujście nicht zufriedenstellend.

Die Extremwerte der digitalen Pegeldaten können geringfügig von den veröffentlichten Extremwerten abweichen, weil es sich bei den Digitaldaten um Einzelmessungen in Intervallen (1 h oder 4 h) handelt und die bei Dauermessungen erfassten Extremwerte zwischen diesen Intervallen gelegen haben können. Es existiert auch eine Differenz zwischen stündlich und 4-stündlich gemessenen Daten. Die Differenz wurde durch eine verminderte Abtastung der stündlich in Warnemünde erfassten Daten ermittelt. Die so erhaltenen 4-Stunden-Werte wurden linear auf stündliche Werte zurückinterpoliert. Der Effekt auf das Wasserstands-Jahresmittel ist sehr gering (weniger als 0,1 cm Maximalabweichung). Die durch verminderte Abtastung erhaltenen 4-stündlichen Daten zeigten gleiche oder höhere jährliche Wasserstandsminima mit einer maximalen Differenz von 9 cm. Die mittlere Differenz aller Jahreswerte betrug 1,9 cm mit einer Standardabweichung von 2,4 cm. Die Differenz in der Anzahl der Stunden pro Jahr, in denen die Wasserstände unter 440 cm lagen, reichte von -13 bis $+9$ Stunden mit einer mittleren Differenz von $0,5 \pm 4,3$ Stunden unter Verwendung der 4-stündlichen Daten (siehe Abb. 2.1.). Bei den linear interpolierten Daten reichen die Werte von 0 bis 18 Stunden, mit einer mittleren Differenz von $6,3 \pm 4,4$ Stunden.

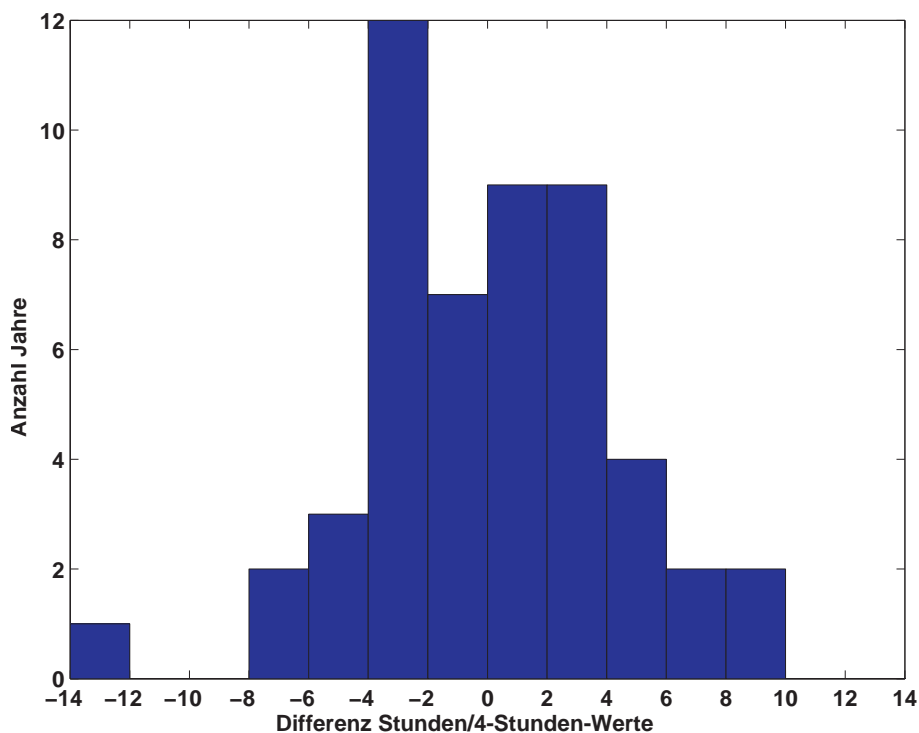


Abb. 2.1 Differenz zwischen stündlichen und 4-stündlichen Daten am Pegel Warnemünde

2.2 Niedrigwasserdefinition und allgemeine Eigenschaften

Laut Definition des Deutschen Instituts für Normung (DIN 4049-3) ist Niedrigwasser der Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand oder der Durchfluss einen bestimmten Wert erreicht oder unterschritten hat. Je nach Betrachtungsweise können unterschiedliche Werte maßgebend sein. Hinsichtlich der deutschen Küste wurden Niedrigwasser als Wasserstände definiert, die mindestens 1 m unter Normalmittelwasser liegen. In gemessenen Pegelwerten wären das 400 cm oder darunter.

Die offiziellen Alarm- und Warnpegelstände in Deutschland sind wie folgt:

- 425 cm oder 75 cm unter dem mittleren Wasserstand: Wasserstandsinformation wird herausgegeben
- 400 cm oder 100 cm unter dem mittleren Wasserstand: Warnung wird herausgegeben.

Schiffahrtswarnungen (NAVTEX) werden entsprechend internationalen Übereinkommen zusätzlich bei Wasserständen unter 440 cm herausgegeben.

In Polen existiert keine offizielle Definition von Niedrigwasser. Je nachdem, welche Aktivität durch den niedrigen Wasserstand gefährdet ist, erhalten die Empfänger, z. B. Schiffahrt, Wasserbau,

Häfen, Frachtdienstleister oder die Küstenwache, Warnungen bei unterschiedlichen Niedrigwasserständen. Für die täglichen Wasserstandsvorhersagen und wissenschaftliche Veröffentlichungen wurde Niedrigwasser aus praktischen Erwägungen heraus als hydrologische Situation definiert, die zu einem Absinken des Wasserspiegels auf 440 cm oder darunter führt. Dieser Wert beruht auf einer von IMGW-OM, Gdynia, durchgeführten eingehenden Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeit der Niedrigwasser im mittleren Teil der südlichen Ostseeküste.

Der Wert von 440 cm wird auch in dieser Monographie verwendet. Tabelle 2.2 a zeigt eine Zusammenstellung aller Niedrigwasser zwischen 1958 und 2005, bei denen an mindestens vier von fünf in der Studie ausgewerteten Pegelstationen (Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg) Wasserstände unter 440 cm gemessen wurden. Insgesamt gab es 107 Fälle, und in 46 Fällen unterschritten alle fünf Pegel diesen Wert. Die längste Dauer eines Niedrigwasserereignisses, gemessen im Dezember 1959, war 69 Stunden.

Die niedrigsten Wasserstände im Zeitraum von 1951 bis 2005 und seit Beginn der Messungen sind in Tabelle 2.2 b zusammengestellt. Der niedrigste jemals gemessene Wasserstand lag fast 2 m unter dem mittleren Wasserstand in Wismar. Die gemessenen Minima nehmen von West nach Ost ab.

Tabelle 2.2 a Niedrigwasser im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste von 1958 bis 2005
(Daten aus den 1 h/4 h-Zeitreihen, bei denen an mindestens 4 Pegelstationen Wasserstände unter 440 cm gemessen wurden)

| Anfang, Ende und Dauer des Niedrigwassers | | | | Niedrigwasserminimum [cm] | | | | |
|---|----------|----------|-----------|---------------------------|------------|----------|-------------|-----------|
| Nr. | Anfang | Ende | Dauer [h] | Wismar | Warnemünde | Sassnitz | Świnoujście | Kołobrzeg |
| 1 | 18.01.58 | 19.01.58 | 22 | 414 | 403 | 423 | 425 | 427 |
| 2 | 20.02.59 | 21.02.59 | 18 | 394 | 419 | 425 | 439 | 451 |
| 3 | 15.12.59 | 18.12.59 | 69 | 423 | 430 | 434 | 428 | 429 |
| 4 | 20.12.59 | 21.12.59 | 25 | 425 | 433 | 440 | 435 | 435 |
| 5 | 18.01.60 | 19.01.60 | 21 | 379 | 400 | 414 | 418 | 425 |
| 6 | 03.02.60 | 05.02.60 | 52 | 418 | 426 | 431 | 408 | 410 |
| 7 | 09.02.60 | 10.02.60 | 16 | 408 | 420 | 429 | 425 | 439 |
| 8 | 02.11.60 | 03.11.60 | 19 | 412 | 410 | 434 | 432 | 437 |
| 9 | 27.01.61 | 29.01.61 | 33 | 410 | 409 | 426 | 418 | 424 |
| 10 | 29.01.61 | 30.01.61 | 36 | 409 | 407 | 415 | 406 | 412 |
| 11 | 12.02.62 | 13.02.62 | 24 | 389 | 398 | 424 | 428 | 458 |
| 12 | 30.12.64 | 31.12.64 | 29 | 397 | 413 | 436 | 430 | 435 |
| 13 | 05.01.65 | 05.01.65 | 10 | 412 | 439 | 423 | 437 | 457 |
| 14 | 01.11.65 | 02.11.65 | 21 | 372 | 397 | 437 | 435 | 480 |
| 15 | 06.12.65 | 06.12.65 | 15 | 386 | 408 | 413 | 435 | 438 |
| 16 | 18.12.66 | 19.12.66 | 21 | 416 | 428 | 418 | 442 | 439 |
| 17 | 17.10.67 | 18.10.67 | 18 | 334 | 332 | 380 | 381 | 421 |
| 18 | 21.01.69 | 22.01.69 | 24 | 421 | 428 | 438 | 425 | 430 |
| 19 | 05.03.69 | 07.03.69 | 36 | 428 | 429 | 432 | 437 | 441 |
| 20 | 08.03.69 | 09.03.69 | 25 | 392 | 399 | 408 | 414 | 432 |
| 21 | 22.09.69 | 23.09.69 | 14 | 408 | 420 | 410 | 429 | 455 |
| 22 | 01.01.70 | 02.01.70 | 24 | 390 | 405 | 418 | 412 | 430 |
| 23 | 03.01.70 | 04.01.70 | 23 | 405 | 420 | 436 | 429 | 446 |
| 24 | 02.02.70 | 03.02.70 | 20 | 422 | 427 | 442 | 435 | 436 |
| 25 | 01.03.70 | 02.03.70 | 17 | 420 | 423 | 438 | 430 | 443 |
| 26 | 19.10.70 | 20.10.70 | 27 | 404 | 413 | 425 | 412 | 435 |
| 27 | 07.01.71 | 08.01.71 | 25 | 411 | 416 | 421 | 408 | 425 |
| 28 | 20.01.72 | 20.01.72 | 12 | 433 | 433 | 440 | 438 | 434 |
| 29 | 11.03.72 | 14.03.72 | 60 | 425 | 424 | 423 | 424 | 416 |
| 30 | 22.03.72 | 23.03.72 | 20 | 431 | 437 | 433 | 432 | 440 |
| 31 | 25.01.73 | 26.01.73 | 43 | 418 | 428 | 436 | 427 | 432 |
| 32 | 09.10.73 | 10.10.73 | 17 | 401 | 414 | 425 | 426 | 450 |
| 33 | 03.12.73 | 03.12.73 | 17 | 388 | 384 | 429 | 439 | 460 |
| 34 | 24.02.76 | 25.02.76 | 20 | 421 | 424 | 427 | 433 | 427 |
| 35 | 25.02.76 | 26.02.76 | 21 | 410 | 417 | 398 | 405 | 405 |
| 36 | 11.12.77 | 12.12.77 | 28 | 423 | 424 | 435 | 422 | 431 |
| 37 | 24.12.77 | 25.12.77 | 22 | 415 | 392 | 420 | 415 | 456 |
| 38 | 01.01.78 | 02.01.78 | 10 | 431 | 436 | 427 | 436 | 455 |
| 39 | 20.02.78 | 21.02.78 | 13 | 432 | 430 | 430 | 430 | 455 |
| 40 | 07.01.79 | 08.01.79 | 31 | 373 | 372 | 395 | 410 | 404 |
| 41 | 03.11.79 | 05.11.79 | 36 | 373 | 381 | 387 | 375 | 376 |
| 42 | 26.11.79 | 27.11.79 | 29 | 390 | 410 | 430 | 416 | 446 |
| 43 | 27.12.79 | 29.12.79 | 28 | 422 | 427 | 441 | 425 | 431 |
| 44 | 28.02.80 | 29.02.80 | 16 | 430 | 433 | 429 | 434 | 437 |
| 45 | 08.01.81 | 09.01.81 | 20 | 391 | 406 | 434 | 426 | 445 |
| 46 | 14.01.81 | 15.01.81 | 14 | 404 | 422 | 437 | 429 | 450 |
| 47 | 21.11.81 | 21.11.81 | 16 | 408 | 407 | 430 | 435 | 479 |
| 48 | 24.11.81 | 25.11.81 | 28 | 331 | 368 | 403 | 409 | 458 |

Tabelle 2.2 a Niedrigwasser im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste von 1958 bis 2005
 (Daten aus den 1 h/4 h-Zeitreihen, bei denen an mindestens 4 Pegelstationen Wasserstände unter 440 cm gemessen wurden) (Fortsetzung)

| Anfang, Ende und Dauer des Niedrigwassers | | | | Niedrigwasserminimum [cm] | | | | |
|---|----------|----------|-----------|---------------------------|------------|----------|-------------|-----------|
| Nr. | Anfang | Ende | Dauer [h] | Wismar | Warnemünde | Sassnitz | Świnoujście | Kołobrzeg |
| 49 | 20.10.82 | 21.10.82 | 26 | 397 | 424 | 424 | 421 | 430 |
| 50 | 15.12.82 | 16.12.82 | 45 | 398 | 404 | 416 | 411 | 421 |
| 51 | 27.12.83 | 28.12.83 | 13 | 400 | 416 | 419 | 431 | 462 |
| 52 | 01.01.84 | 01.01.84 | 11 | 409 | 426 | 436 | 435 | 480 |
| 53 | 13.01.84 | 14.01.84 | 31 | 392 | 403 | 435 | 423 | 450 |
| 54 | 29.02.84 | 01.03.84 | 28 | 424 | 437 | 445 | 433 | 437 |
| 55 | 28.11.84 | 29.11.84 | 16 | 424 | 436 | 444 | 433 | 436 |
| 56 | 29.01.85 | 30.01.85 | 22 | 412 | 411 | 429 | 425 | 439 |
| 57 | 06.11.85 | 07.11.85 | 28 | 377 | 389 | 420 | 426 | 458 |
| 58 | 13.12.85 | 14.12.85 | 24 | 419 | 436 | 436 | 438 | 452 |
| 59 | 22.03.86 | 24.03.86 | 31 | 421 | 424 | 421 | 412 | 413 |
| 60 | 25.03.86 | 26.03.86 | 24 | 416 | 420 | 418 | 422 | 433 |
| 61 | 30.01.87 | 31.01.87 | 20 | 392 | 393 | 424 | 435 | 438 |
| 62 | 10.04.88 | 11.04.88 | 15 | 409 | 430 | 421 | 423 | 463 |
| 63 | 26.10.88 | 27.10.88 | 17 | 422 | 429 | 443 | 434 | 438 |
| 64 | 26.01.90 | 27.01.90 | 24 | 335 | 376 | 422 | 425 | 466 |
| 65 | 26.02.90 | 27.02.90 | 16 | 394 | 398 | 408 | 421 | 460 |
| 66 | 26.12.90 | 27.12.90 | 34 | 402 | 410 | 448 | 425 | 427 |
| 67 | 30.03.91 | 31.03.91 | 13 | 431 | 437 | 432 | 435 | 438 |
| 68 | 01.11.91 | 03.11.91 | 40 | 400 | 414 | 427 | 408 | 411 |
| 69 | 22.11.91 | 22.11.91 | 14 | 394 | 408 | 428 | 434 | 444 |
| 70 | 21.12.91 | 21.12.91 | 9 | 421 | 432 | 436 | 435 | 472 |
| 71 | 08.10.92 | 09.10.92 | 19 | 414 | 425 | 430 | 426 | 445 |
| 72 | 01.11.92 | 02.11.92 | 22 | 404 | 413 | 436 | 433 | 440 |
| 73 | 02.11.92 | 03.11.92 | 25 | 399 | 407 | 422 | 429 | 432 |
| 74 | 05.01.93 | 06.01.93 | 26 | 410 | 420 | 427 | 424 | 430 |
| 75 | 14.01.93 | 14.01.93 | 13 | 375 | 404 | 389 | 432 | 439 |
| 76 | 13.10.93 | 13.10.93 | 17 | 393 | 411 | 418 | 412 | 436 |
| 77 | 01.12.93 | 03.12.93 | 36 | 424 | 427 | 436 | 427 | 432 |
| 78 | 04.12.93 | 06.12.93 | 33 | 409 | 420 | 433 | 415 | 444 |
| 79 | 06.03.94 | 06.03.94 | 15 | 432 | 439 | 432 | 435 | 443 |
| 80 | 14.11.94 | 15.11.94 | 28 | 399 | 404 | 415 | 408 | 412 |
| 81 | 23.01.95 | 23.01.95 | 20 | 410 | 438 | 426 | 432 | 443 |
| 82 | 26.09.95 | 26.09.95 | 16 | 390 | 408 | 419 | 413 | 441 |
| 83 | 10.12.95 | 11.12.95 | 11 | 428 | 435 | 439 | 435 | 448 |
| 84 | 15.02.96 | 16.02.96 | 24 | 363 | 379 | 383 | 410 | 412 |
| 85 | 29.02.96 | 29.02.96 | 16 | 424 | 426 | 418 | 420 | 438 |
| 86 | 29.09.96 | 30.09.96 | 20 | 416 | 424 | 430 | 427 | 434 |
| 87 | 14.12.96 | 15.12.96 | 16 | 391 | 407 | 426 | 424 | 456 |
| 88 | 12.01.97 | 13.01.97 | 16 | 400 | 407 | 419 | 425 | 431 |
| 89 | 04.02.97 | 05.02.97 | 19 | 406 | 420 | 434 | 430 | 440 |
| 90 | 26.03.97 | 27.03.97 | 17 | 429 | 437 | 413 | 432 | 442 |
| 91 | 06.12.97 | 06.12.97 | 17 | 410 | 428 | 436 | 430 | 449 |
| 92 | 30.11.99 | 01.12.99 | 20 | 343 | 365 | 377 | 388 | 416 |
| 93 | 03.12.99 | 04.12.99 | 20 | 314 | 335 | 366 | 405 | 462 |
| 94 | 06.12.99 | 07.12.99 | 18 | 382 | 394 | 422 | 412 | 446 |
| 95 | 17.12.99 | 18.12.99 | 32 | 382 | 408 | 413 | 413 | 444 |
| 96 | 11.02.01 | 12.02.01 | 17 | 400 | 410 | 430 | 434 | 435 |

Tabelle 2.2 a Niedrigwasser im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste von 1958 bis 2005
(Daten aus den 1 h/4 h-Zeitreihen, bei denen an mindestens 4 Pegelstationen Wasserstände unter 440 cm gemessen wurden) (Fortsetzung)

| Anfang, Ende und Dauer des Niedrigwassers | | | | Niedrigwasserminimum [cm] | | | | |
|---|----------|----------|-----------|---------------------------|------------|----------|-------------|-----------|
| Nr. | Anfang | Ende | Dauer [h] | Wismar | Warnemünde | Sassnitz | Świnoujście | Kołobrzeg |
| 97 | 15.11.01 | 16.11.01 | 13 | 368 | 397 | 408 | 426 | 465 |
| 98 | 20.12.01 | 21.12.01 | 18 | 358 | 376 | 408 | 393 | 438 |
| 99 | 22.02.02 | 23.02.02 | 25 | 403 | 418 | 436 | 419 | 442 |
| 100 | 19.12.02 | 20.12.02 | 16 | 421 | 430 | 431 | 427 | 439 |
| 101 | 11.01.03 | 12.01.03 | 17 | 420 | 429 | 426 | 436 | 451 |
| 102 | 24.12.03 | 25.12.03 | 16 | 391 | 404 | 429 | 429 | 445 |
| 103 | 12.11.04 | 13.11.04 | 18 | 391 | 411 | 429 | 416 | 440 |
| 104 | 22.12.04 | 23.12.04 | 21 | 392 | 402 | 419 | 421 | 477 |
| 105 | 08.01.05 | 09.01.05 | 19 | 356 | 380 | 403 | 416 | 514 |
| 106 | 14.11.05 | 15.11.05 | 23 | 393 | 411 | 430 | 422 | 449 |
| 107 | 10.12.05 | 11.12.05 | 16 | 401 | 414 | 439 | 433 | 452 |

Tabelle 2.2 b Niedrigste Wasserstände im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste

| Pegelstation | Niedrigster Wasserstand 1951–2005 | | Niedrigster Wasserstand seit Beginn der Aufzeichnungen | |
|--------------|-----------------------------------|------------|--|------------|
| | cm | Datum | cm | Datum |
| Kołobrzeg | 370 | 1979-11-04 | 370 | 1979-11-04 |
| Świnoujście | 366 | 1967-10-18 | 366 | 1967-10-18 |
| Sassnitz | 364 | 1999-12-04 | 357 | 1939-12-22 |
| Warnemünde | 332 | 1967-10-18 | 332 | 1967-10-18 |
| Wismar | 309 | 1999-12-04 | 309 | 1999-12-04 |

3 Jahreszeitliche und Langzeitvariabilität

Die Langzeitvariabilität der Niedrigwasserereignisse und die jährliche Häufigkeitsverteilung liefern wichtige Informationen über dieses hydrologische Ereignis.

3.1 Innerjährliche Schwankungen

Abb. 3.1 a zeigt das tiefste gemessene Niedrigwasser in jedem Kalenderjahr, die jährlichen Mittelwerte und Mediane der Niedrigwasser sowie die Werte, die 24, 72 bzw. 240 fortlaufende Stunden lang unterschritten wurden. Im Allgemeinen werden während eines Niedrigwasserereignisses von West nach Ost ansteigende Pegelstände beobachtet, mit Ausnahme des Pegels Sassnitz. Der Unterschied in Sassnitz im Vergleich zu anderen Pegeln, die an einem geraden Küstenabschnitt oder in einer Bucht liegen, ist auf die Lage dieses Pegels auf einer Landzunge zurückzuführen.

Der mittlere Wasserstand ist an allen Pegeln um 15–17 cm pro Jahrhundert gestiegen (siehe Tabelle 3.1 a), wieder mit Ausnahme von Sassnitz, wo nur ca. 6–7 cm Anstieg pro Jahrhundert beobachtet wurden. Diese Unterschiede zwischen den Pegelständen haben mehrere Ursachen, deren wichtigste der weltweite Meeresspiegelanstieg und lokale Landhebungen oder -senkungen sind. Generell ist zu beobachten, dass im Norden eine postglaziale Landhebung nach Abschmelzen des Eispanzers stattfindet, während sich weiter südlich das Land senkt. Diese unterschiedlichen Prozesse können möglicherweise erklären, warum der Meeresspiegelanstieg in Sassnitz geringer ist als an den anderen Pegeln. Die beobachtete

Veränderlichkeit des mittleren Wasserstands von Jahr zu Jahr ist hauptsächlich auf die herrschenden Windverhältnisse zurückzuführen, die den Wasseraustausch mit der Nordsee beeinflussen sowie auf schwankende Niederschläge und die Abflussmengen der Flüsse.

Bei steigendem mittlerem Wasserstand würde man logischerweise erwarten, dass auch die Niedrigwasserstände ansteigen. Die 240-Stunden-Werte sind in der Tat im Laufe der Zeit gestiegen, wobei der Korrelationskoeffizient mit dem mittleren Wasserstand von 0,57 im Westen auf 0,85 im Osten zunimmt. Im Westen wurden allerdings niedrige Korrelationskoeffizienten für die 72-Stunden-Werte (0,28) und die 24-Stunden-Werte (0,03) ermittelt, und das jährliche Wasserstandsminimum ist an allen Pegeln mit Ausnahme von Kołobrzeg gesunken. Das zeigt deutlich, dass die unmittelbaren Ursachen niedriger Wasserstände nicht mit den Ursachen der beobachteten Änderungen des mittleren Wasserstands identisch sind. Extreme Niedrigwasser werden von einzelnen Starkwindereignissen verursacht, und eine bessere Korrelation der Werte mit dem jährlichen Mittelwert (errechnet aus 365 x 24-Werten) erhält man nur, wenn man mehrere Werte in eine gemeinsame Größe zusammenfasst (z. B. die 72 kleinsten stündlichen Werte, um den 72-Stunden-Wert zu berechnen).

Die negative Korrelation ist leicht zu erklären: lang anhaltende westliche Winde drücken Wasser aus der Nordsee in die Ostsee hinein und erhöhen so den jährlichen mittleren Wasserstand. Dadurch wird allerdings auch die Wahrscheinlichkeit größer, dass starker Wind aus süd- bis südöstlicher Richtung zu extrem niedrigen Wasserständen im westlichen und südlichen Teil der Ostsee führt.

Tabelle 3.1 a Statistische Indikatoren für mittlere und niedrige Wasserstände: linearer Regressionskoeffizient und Korrelation mit der Zeitreihe der jährlichen mittleren Wasserstände

| | | Wismar | | | Warnemünde | | | Sassnitz | | | Świnoujście | | | Kołobrzeg | | |
|---|-------|--------|-------|-------|------------|-------|-------|----------|------|------|-------------|------|------|-----------|------|------|
| | | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| MWST (in cm) | | 503 | 17,4 | | 504 | 16,80 | | 505 | 6,5 | | 502 | 14,6 | | 504 | 15,1 | |
| Wasserstand, bei dem die Anzahl von Stunden im Jahr unterschritten wird | 240 h | 456 | 12,9 | 0,57 | 462 | 10,20 | 0,69 | 469 | 4,0 | 0,83 | 465 | 9,9 | 0,79 | 469 | 16,5 | 0,85 |
| | 72 h | 436 | 6,8 | 0,28 | 445 | 5,60 | 0,38 | 455 | 0,6 | 0,58 | 450 | 1,6 | 0,61 | 458 | 13,2 | 0,75 |
| | 24 h | 415 | -6,4 | 0,03 | 429 | 2,40 | 0,09 | 441 | -2,9 | 0,32 | 436 | -6,3 | 0,38 | 448 | 14,7 | 0,60 |
| Wasserstandsminimum | | 383 | -24,7 | -0,16 | 400 | -0,12 | -0,12 | 416 | -6,3 | 0,04 | 419 | -3,3 | 0,04 | 436 | 23,2 | 0,41 |

A – Konstante (für das Jahr 2000) aus linearer Regression

B – Trend (im Jahr 2000) für lineare Regression

C – Korrelationskoeffizient mit dem jährlichen mittleren Wasserstand

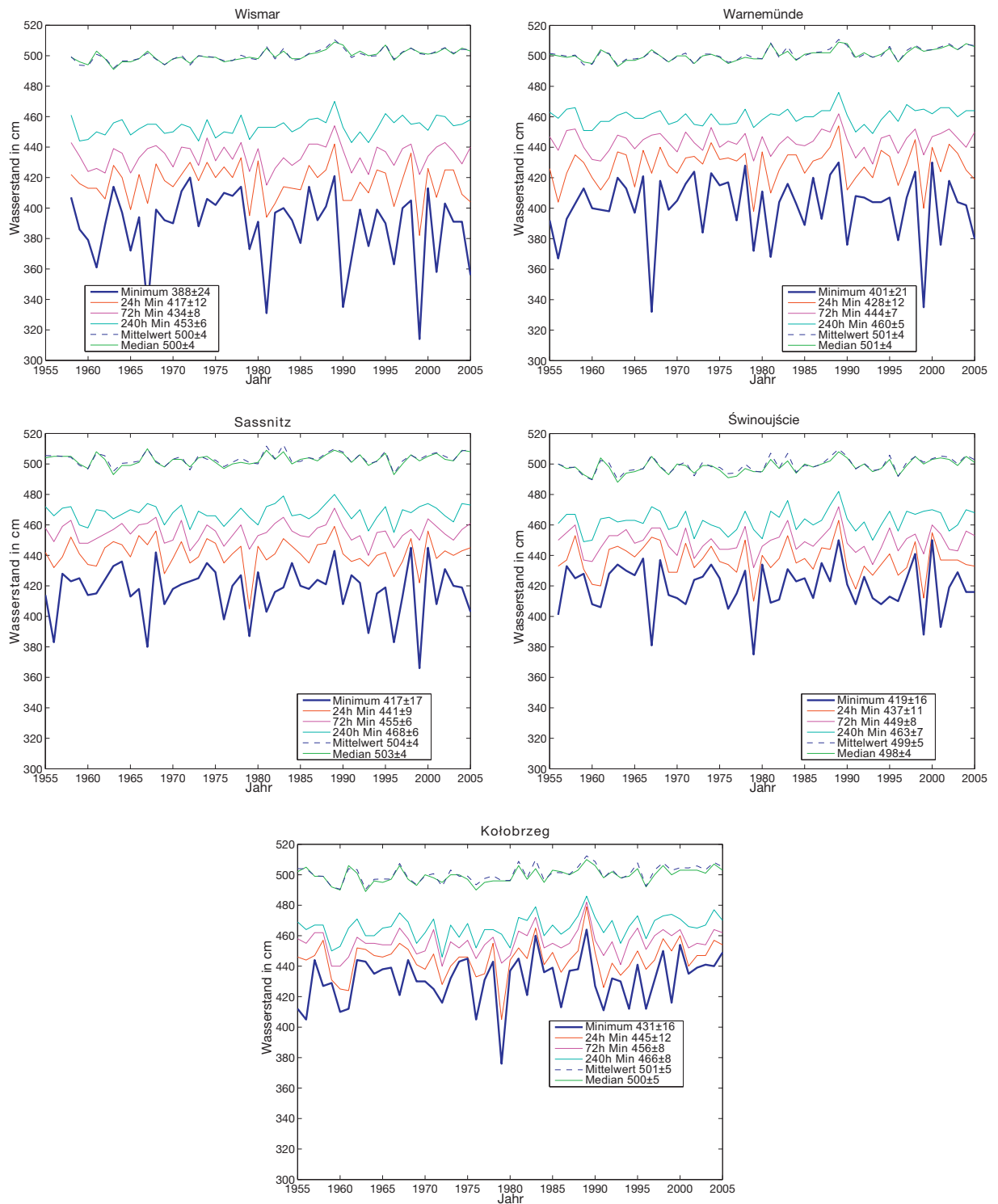


Abb. 3.1 a Niedrigster Wasserstand, jährlicher Mittelwert und Median des Wasserstandes; Werte, bei denen der Wasserstand für mindestens 24, 72 und 240 aufeinander folgende Stunden gefallen ist an den Pegeln Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg

Die jährlichen mittleren Wasserstände an den verschiedenen Pegeln korrelieren recht gut, wobei der niedrigste Korrelationskoeffizient von 0,83 zwischen Wismar und Sassnitz ermittelt wurde und der höchste Korrelationskoeffizient von 0,98 zwischen Świnoujście und Kołobrzeg (siehe Tabelle 3.1 b und 3.1 c). Dagegen ist die Korrelation der jährlichen Wasserstandsminima an den Stationen relativ niedrig, z. B. zwischen Wismar und Kołobrzeg nur 0,25. Diese geringe Übereinstimmung zeigt sich auch in Abb. 3.1 b, die die Jahresminima aller Pegelstationen zeigt. Während in einigen Jahren an allen Stationen

niedrige Werte auftraten, lagen in anderen Jahren (z. B. 1972) die Jahresminima in Wismar hoch, während sie in Kołobrzeg relativ niedrig lagen. Die Korrelationskoeffizienten der 240-, 72- und 24-Stunden-Minima liegen zwischen den Korrelationskoeffizienten der jährlichen mittleren Wasserstände und der jährlichen Wasserstandsminima. Generell ist der Korrelationskoeffizient umso niedriger, je größer die geographische Entfernung ist. Die Pegelstationen Wismar und Warnemünde korrelieren am besten, gefolgt von dem Stationspaar Sassnitz-Świnoujście.

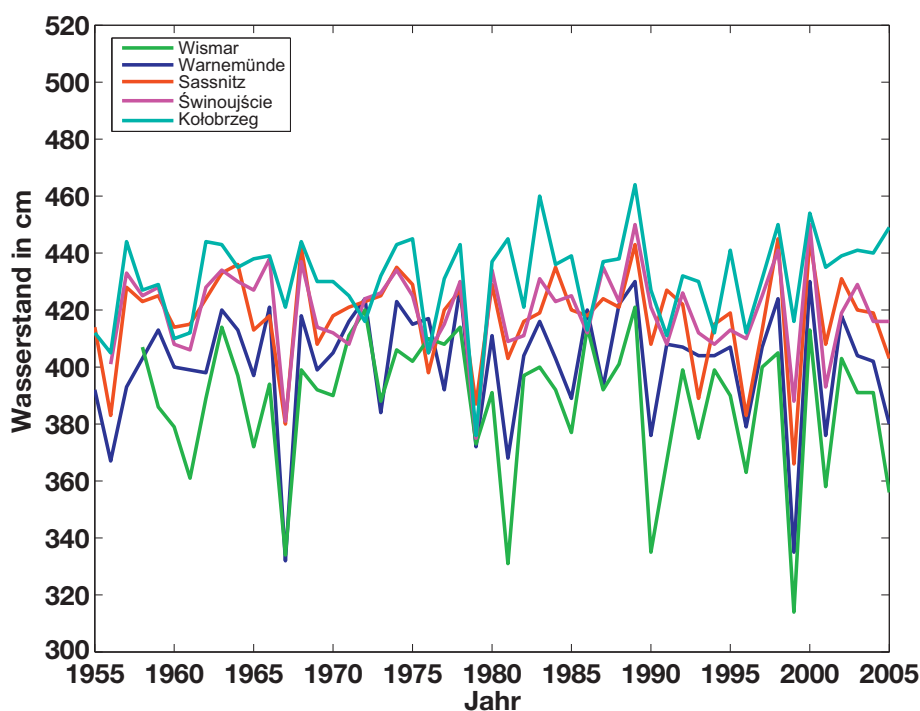


Abb. 3.1 b Jährliche Wasserstandsminima an den Pegeln Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg

Tabelle 3.1 b Korrelationskoeffizient zwischen den Stationen:
unten links, jährliche mittlere Wasserstände; oben rechts, jährliche 240-Stunden-Niedrigwasserstände

| | Wismar | Warnemünde | Sassnitz | Świnoujście | Kołobrzeg |
|-------------|--------|------------|----------|-------------|-----------|
| Wismar | X | 0,92 | 0,48 | 0,63 | 0,45 |
| Warnemünde | 0,95 | X | 0,72 | 0,81 | 0,68 |
| Sassnitz | 0,83 | 0,87 | X | 0,92 | 0,89 |
| Świnoujście | 0,92 | 0,96 | 0,93 | X | 0,90 |
| Kołobrzeg | 0,93 | 0,96 | 0,93 | 0,98 | X |

Tabelle 3.1 c Korrelationskoeffizient zwischen den Stationen:
unten links, jährliche mittlere Wasserstände; oben rechts, jährliche 72-Stunden-Niedrigwasserstände

| | Wismar | Warnemünde | Sassnitz | Świnoujście | Kołobrzeg |
|-------------|--------|------------|----------|-------------|-----------|
| Wismar | X | 0,91 | 0,50 | 0,52 | 0,34 |
| Warnemünde | 0,87 | X | 0,73 | 0,74 | 0,60 |
| Sassnitz | 0,71 | 0,77 | X | 0,89 | 0,80 |
| Świnoujście | 0,59 | 0,69 | 0,80 | X | 0,86 |
| Kołobrzeg | 0,25 | 0,34 | 0,59 | 0,75 | X |

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die gemessenen Niedrigwasserstände keinen eindeutigen zeitlichen Trend erkennen lassen und die Niedrigwasserstände unabhängig von den jährlichen mittleren Wasserständen sind. In manchen Jahren wurden sehr niedrige Wasserstände gemessen, die nur kurze Zeit anhielten, während in anderen Jahren das jährliche Wasserstandsminimum nicht besonders tief war, aber sehr viel länger dauerte. Klare Unterschiede wurden in der Verteilung der Niedrigwasserstände entlang der

Küste gefunden: neben einem linearen Trend mit niedrigeren Minima im westlichen Teil der Küste als im östlichen Teil existieren auch Unterschiede bei den Zeitreihen.

Abb. 3.1 c zeigt die Anzahl der Stunden pro Jahr, in denen Wasserstände unter 440 cm auftraten. Da es sich hier nur um eine andere Darstellung der Daten in Abb. 3.1 a handelt, gelten obige Ergebnisse.

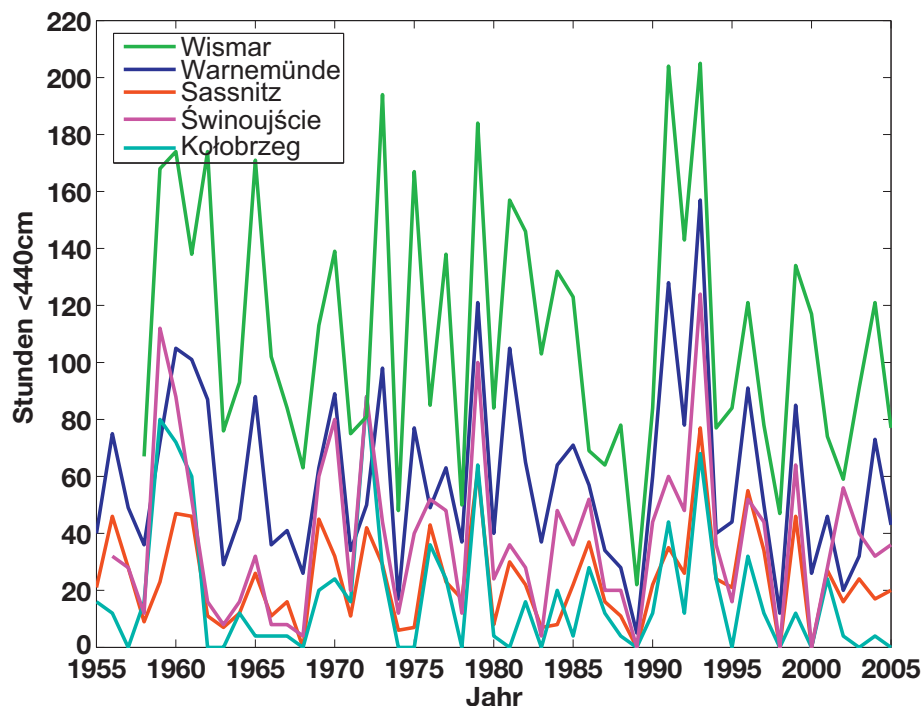


Abb. 3.1 c Langzeitvariabilität der Niedrigwasserereignisse ≤ 440 cm an den Pegelstationen Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg

3.2 Jahreszeitliche Verteilung

Im mittleren Jahreszyklus unterscheiden sich die monatlichen Verteilungen deutlich wie am Beispiel der monatlichen Wasserstandsverteilung in Warnemünde (Abb. 3.2 a) oder an den Verteilungen für Januar und Juni an allen fünf Stationen (Abb. 3.2 b und c) zu erkennen ist. Die monatlichen Mittelwerte und Mediane differieren um 12–16 cm, wobei das Maximum in den Sommermonaten erreicht wird und das Minimum im Winter oder Frühjahr. Ein noch stärker ausgeprägter Unterschied in den Extremwasserständen findet sich in der Breite der monatlichen Verteilungen. Im Sommer, z. B. im Juni, ist die Verteilung schmal mit einer Standardabweichung um 12 cm und zeigt ein ausgeprägtes Maximum, bei dem ca. 34 % aller Werte ± 5 cm um den Mittelwert streuen. Der niedrigste erfasste Juni-Wert ist 436 cm in Wismar. Die Winterverteilung, z. B. im

Januar, ist viel breiter mit einer Standardabweichung von ca. 28 cm und einem schwächer ausgeprägten Maximum, bei dem nur 16 % aller Werte ± 5 cm um den Mittelwert streuen. Der niedrigste jemals gemessene Wert, 335 cm in Wismar, liegt weit unterhalb des Juni-Werts, und dies gilt für alle fünf Stationen.

Der Jahreszyklus ist deutlicher in Abb. 3.2 d zu erkennen, die die jahreszeitliche Verteilung der Wasserstände unterhalb von 440 cm an allen fünf Stationen zeigt. Die meisten Niedrigwasserereignisse fanden im Dezember und Januar statt. Dies ist die stürmischste Jahreszeit mit häufigen Starkwinden aus südwestlicher Richtung (180–270°), die das Wasser in der südlichen Ostsee von der Küste wegdrängen. Das erklärt die Häufigkeit von Wasserständen unterhalb von 440 cm in den Wintermonaten von Oktober bis Februar. Die größte Anzahl von Niedrigwasserereignissen

wurde am Pegel Wismar gemessen, der einzigen Pegelstation, an der solche Ereignisse in allen Monaten des Jahres vorkamen. In Warnemünde war Juni der einzige Monat, in dem niemals Wasserstände unter 440 cm gemessen wurden. In Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg wurden in den Monaten Mai, Juni, Juli und August keine

Niedrigwasser beobachtet. In diesen Monaten treten Starkwind oder Tiefdruckgebiete mit stürmischen Winden sehr selten auf. Die Unterschiede in der Verteilung von West nach Ost sind auf den Buchteneffekt und die lokalen Gegebenheiten zurückzuführen.

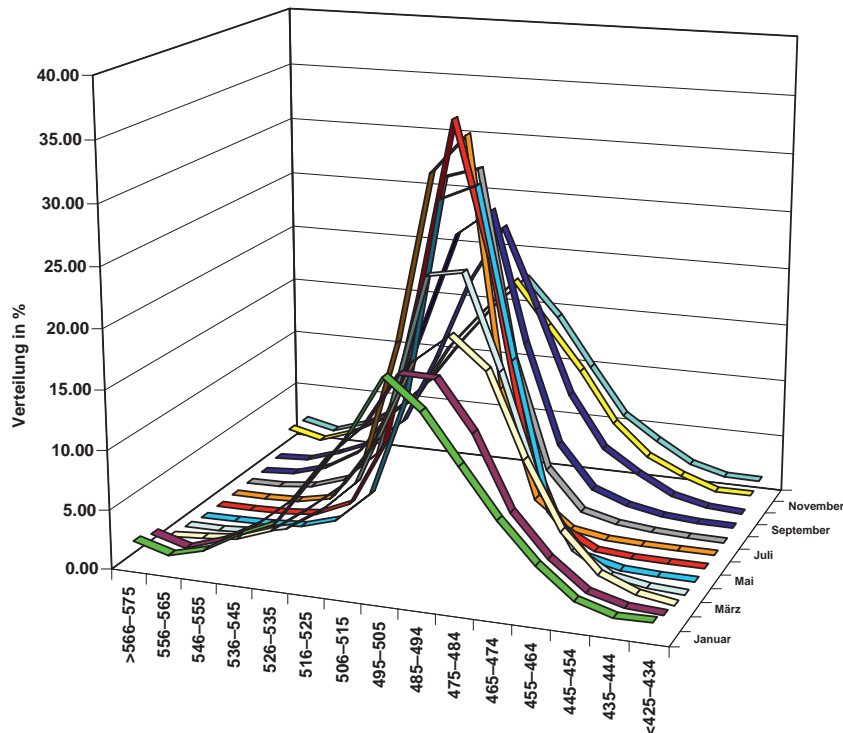


Abb. 3.2 a Monatliche Verteilung der Wasserstände am Pegel Warnemünde

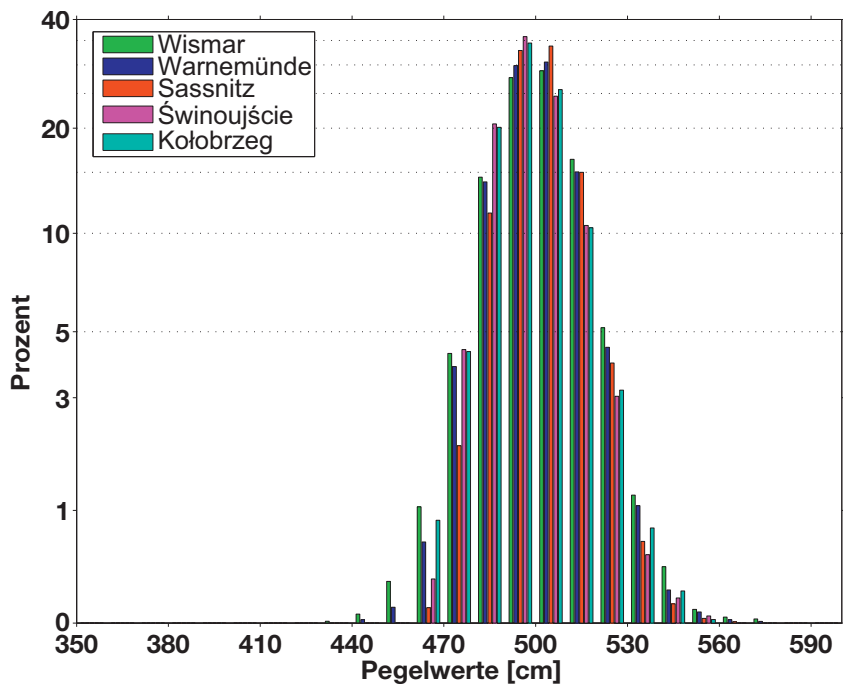


Abb. 3.2 b Mittlere Verteilung der Wasserstände an allen Pegelstationen im Juni. Die Y-Achse ist logarithmisch eingeteilt, um die Verteilung am Anstieg besser darzustellen, die horizontale Achse ist in 5%-Schritten dargestellt

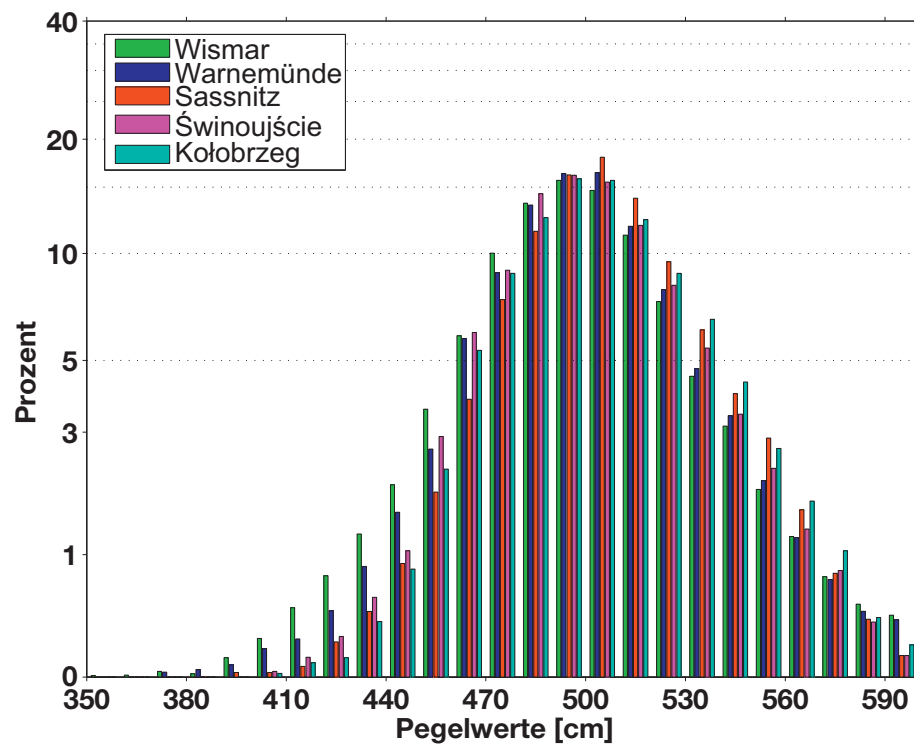
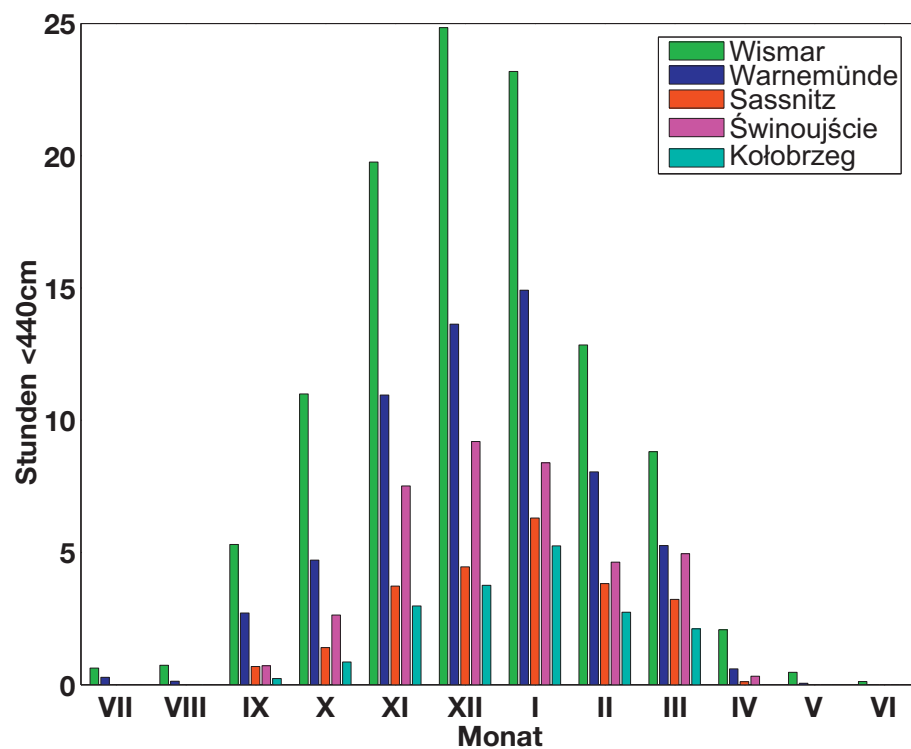


Abb. 3.2 c wie in Abb. 3.2 b, aber für den Monat Januar

Abb. 3.2 d Jahreszeitliche Verteilung der Wasserstände ≤ 440 cm an den Pegeln Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg

3.3 Langzeitstatistik

Die Gumbel-Methode eignet sich sehr gut für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Niedrigwassern in der Ostsee. Bei der Gumbel-Verteilung sind die Extremwert-Ereignisse asymmetrisch verteilt (Abb. 3.3 a). Die Gumbel-Wahrscheinlichkeitskurve ist positiv schief (nach links) und beschreibt eine doppelte Exponentialverteilung.

Für die Berechnung der Gumbel-Wahrscheinlichkeit von Niedrigwasserereignissen wurde als Grundlage $T \geq 5$ Jahre verwendet.

Die folgende Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeit $W(x)$ eignet sich als Bemessungsgrund-

lage für das Auftreten von Niedrigwasserereignissen mit dem Maximalwert X :

$$W(x) = e^{-e^{-y}} \quad y = a(x-b) \quad x = cy + a$$

Daraus folgt:

$$W(x) = e^{-e^{-a(x-b)}}$$

Gumbel-Wahrscheinlichkeiten werden mit Hilfe der obigen Bestimmungsgleichungen $y = a(x-b)$ und $x = ay + b$ unter Verwendung der jährlichen Extremwasserstände ermittelt. Sie werden jährlich aktualisiert.

Die Wiederkehrintervalle $T(x)$ sind als reziproke jährliche Wiederkehrwahrscheinlichkeit definiert:

$$T(x) = \frac{1}{1 - W(x)}$$

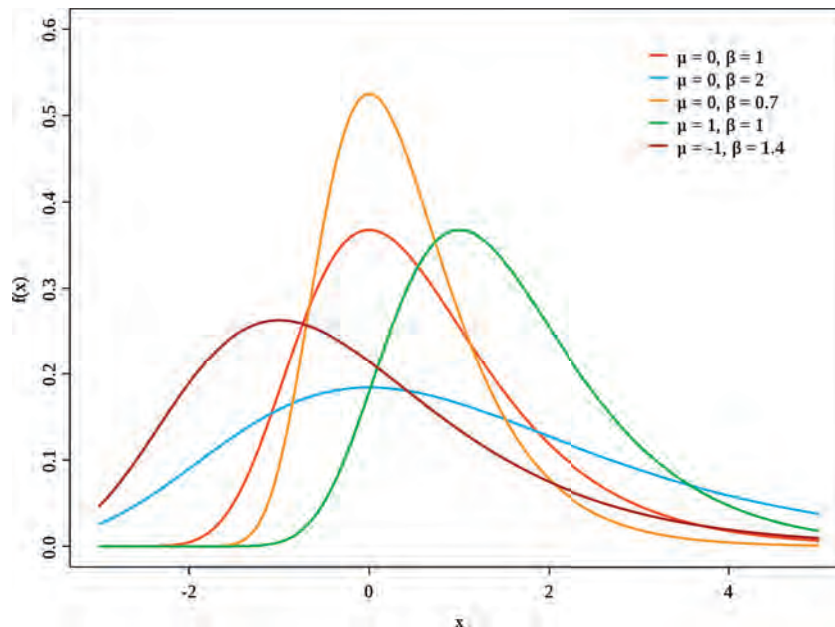


Abb. 3.3 a Gumbel-Verteilungen

Tabelle 3.3 a Gumbel-Wahrscheinlichkeit niedriger Wasserstände in m unter dem mittleren Wasserstand (MWST = 5 m), berechnet 2007/2008 für Wiederkehrintervalle T (Jahre)

| Pegel/T in Jahren | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| Flensburg | 1,58 | 1,76 | 1,93 | 2,15 | 2,31 |
| Schleimünde | 1,43 | 1,59 | 1,74 | 1,94 | 2,08 |
| Eckernförde | 1,41 | 1,55 | 1,69 | 1,88 | 2,01 |
| Kiel | 1,41 | 1,57 | 1,72 | 1,91 | 2,06 |
| Neustadt | 1,37 | 1,54 | 1,70 | 1,90 | 2,06 |
| Travemünde | 1,40 | 1,55 | 1,70 | 1,90 | 2,04 |
| Wismar | 1,38 | 1,55 | 1,70 | 1,90 | 2,05 |
| Warnemünde | 1,21 | 1,34 | 1,47 | 1,64 | 1,76 |
| Stralsund | 1,04 | 1,15 | 1,26 | 1,40 | 1,50 |
| Sassnitz | 0,93 | 1,05 | 1,17 | 1,32 | 1,43 |
| Greifswald | 1,06 | 1,18 | 1,29 | 1,44 | 1,54 |
| Świnoujście | 0,97 | 1,07 | 1,17 | 1,29 | 1,39 |
| Kołobrzeg | 0,85 | 0,96 | 1,06 | 1,19 | 1,28 |

Tabelle 3.3 a und Abb. 3.3 b zeigen die Gumbel-Wahrscheinlichkeit für das Wiederkehrintervall T (Jahre) an deutschen und polnischen Pegeln. Kursiv gedruckte Werte sind für die Gumbel-Statistik interpoliert worden, weil es an einigen Stationen wie z. B. Świnoujście nur eine ca. 50-jährige Zeitreihe gibt. Die anderen Werte basieren auf Beobachtungen in einem Zeitraum von mindestens 100 Jahren. Von ihnen wird das Intervall abgeleitet, in dem ein bestimmter Wasserstand durchschnittlich wieder auftritt. Man erkennt eindeutig, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Niedrigwasser von West nach Ost abnimmt. Das ist unter anderem auf den in Kapitel 1.3 beschriebenen Buchteneffekt zurückzuführen. Die niedrigsten Wasserstände treten in Buchten auf, die sich nach Nordosten hin öffnen. Die Werte an den Pegelstationen Świnoujście und Sassnitz zeigen gute Übereinstimmung infolge ihrer geographischen Nähe und ähnlichen Bathymetrie.

Das geht auch aus der Perzentilverteilung der monatlichen Niedrigwasser an den fünf Pegelstationen hervor (Abb. 3.3 c). Ein Perzentil ist der Wert einer Variablen, unter die ein bestimmter Anteil der Beobachtungen fallen, d. h. das 20. Perzentil ist der Wert, unter den 20 Prozent aller Beobachtungen fallen. Das 20. Perzentil für Wismar z. B. ist 365 cm, Warnemünde 389 cm, Sassnitz 406 cm, Świnoujście 406 cm und Kołobrzeg 412 cm. Das bedeutet, dass 20 Prozent aller Beobachtungen (in diesem Fall der

monatlichen Niedrigwasserereignisse) unterhalb dieser Werte liegen. In Warnemünde liegen 75 % aller Werte unter 414 cm (oder 86 cm unter dem mittleren Wasserstand), 50 % aller Werte liegen unter 403 cm (oder 97 cm unter dem mittleren Wasserstand), und 25 % aller Werte liegen unter 392 cm (oder 108 cm unter dem mittleren Wasserstand).

Eine sehr lange Zeitreihe jährlicher Niedrigwasserereignisse liegt für den Pegel Warnemünde vor. Abb. 3.3 d zeigt die jährlichen Niedrigwasser von 1910 bis 2005 am Pegel Warnemünde. Für die Jahre 1941/42 und 1945/46 liegen keine Daten vor.

Die orangefarbene Linie zeigt den Wasserstand von 440 cm (60 cm unter dem mittleren Wasserstand), der als Definition für Niedrigwasser in dieser Monographie verwendet wird. Die rote Linie zeigt den deutschen Warnpegel (400 cm). Die 3 blauen Linien zeigen die Perzentile aus Abb. 3.3 c. Die durchgehende blaue Linie stellt 75 % aller Werte dar, die gestrichelte blaue Linie 50 %, und die gepunktete blaue Linie 25 % aller Werte. Wasserstände unterhalb von 440 cm kamen in allen Jahren vor. Wasserstände, die mehr als 100 cm unter dem mittleren Wasserstand lagen, sind nicht jedes Jahr registriert worden. Extremwerte von mehr als 140 cm unter dem mittleren Wasserstand sind sehr selten und kamen überhaupt nur zweimal vor: in den Jahren 1967 und 1999.

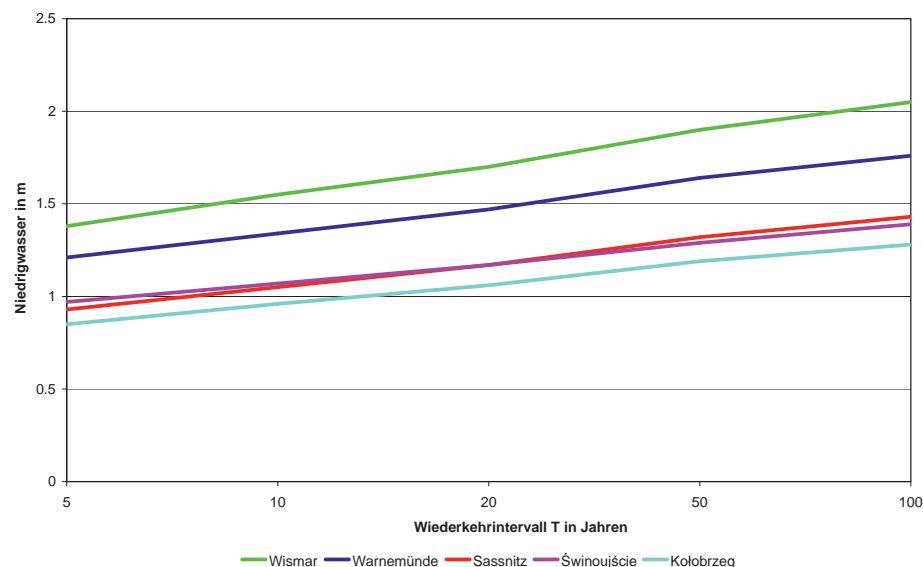


Abb. 3.3 b Niedrigwasser in m als Funktion statistischer Wiederkehr

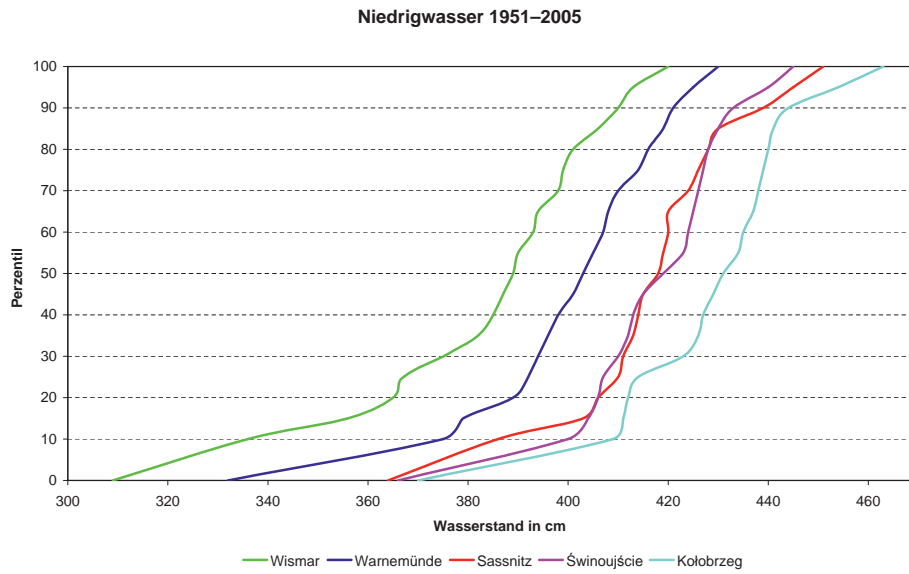


Abb. 3.3 c Perzentilverteilung der monatlichen Niedrigwasser an den 5 Pegelstationen

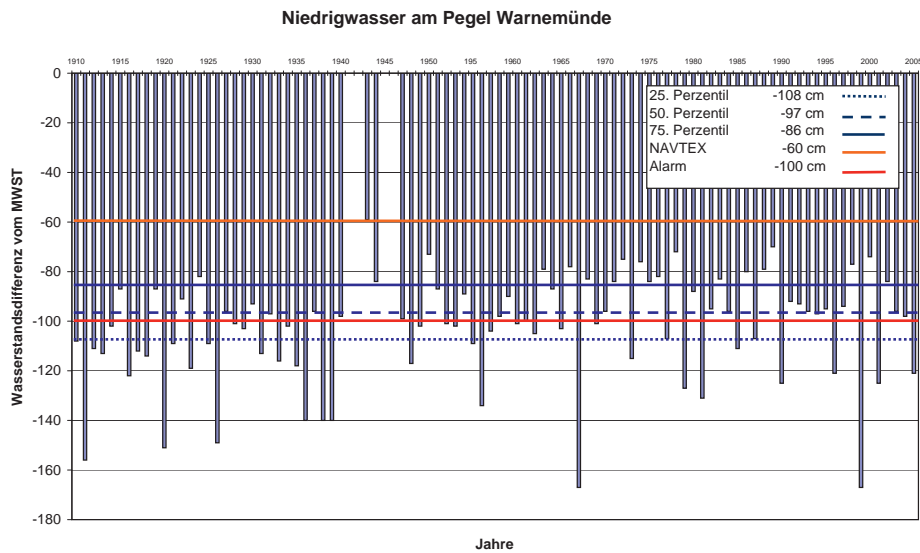


Abb. 3.3 d Tiefstwerte der jährlichen Wasserstände zwischen 1910 und 2005

4 Meteorologische Faktoren, die zu Niedrigwasserereignissen beitragen

Der dominierende Faktor, der Wasserstandsschwankungen in der Ostsee hervorruft, ist Starkwind. In der Regel ist ablandiger Wind, der zu sinkenden Wasserständen führt, über Land weniger stark ausgeprägt als auf See und kann je nach Form der Küstenlinie mehr oder weniger stark in der Richtung abgelenkt werden. Durch Wahl einer geeigneten Stelle für die Windmessstation an der Küste lassen sich Ablenkungen der Windrichtung auf ein Minimum reduzieren. Von der Küstenstation gemessene ablandige Starkwinde treten in der Regel im Zusammenhang mit rasch die Ostsee überquerenden Tiefdruckgebieten auf, die weiträumige Auswirkungen haben und Sturm mit sich bringen. Eine relativ seltene Ursache von Niedrigwasser, die dennoch nicht unerwähnt bleiben sollte, sind lang anhaltende stürmische Winde aufgrund eines Hochdruckgebiets über Skandinavien sowie Ost- und Mitteleuropa. Die im Zusammenhang mit solchen Hochdrucksystemen auftretenden O-SO- und S-Winde erfassen weite Bereiche des Ostseebeckens.

Alle diese unterschiedlichen Windsysteme werden auf ihrer Zugbahn zwar verändert und stark beeinflusst, entwickeln sich aber entsprechend den über Europa und dem angrenzenden Atlantik herrschenden Luftdruckverhältnissen.

4.1 Stark ablandiger Wind an der Küste

Stark ablandiger Wind ist an der Küste sehr viel schwächer als auf See. Windmessungen an der Küste während Niedrigwasserereignissen haben

ergeben, dass in der weit überwiegenden Mehrheit aller Fälle (ca. 90 %) ablandiger Wind an der Küste herrschte, d. h. OSO-WSW. Küstenparallele und andere Windrichtungen traten bei Niedrigwasserereignissen in der Regel unmittelbar nach Drehen des Winds auf, wenn die Wasserstände schon wieder anstiegen, aber der Schwellenwert noch nicht erreicht war.

Um die Verteilung der Windrichtungen zu ermitteln, wurde an ausgewählten Pegelstationen die hydrologische Lage untersucht. Dafür wurden die Windrichtungen verwendet, die bei Erreichen eines Pegelstands ≤ 440 cm gemessen worden waren; außerdem wurde ein unmittelbar vor Erreichen des Niedrigwasser-Schwellenwerts erfasster Windmesswert verwendet. Die Anzahl der Windaufzeichnungen an den verschiedenen Stationen ist deshalb unterschiedlich.

Die vorherrschenden Windsektoren während Niedrigwasser-Ereignissen waren SW-S. Die Häufigkeit dieser Sektoren betrug im westlichen und mittleren Teil der Ostseeküste (z. B. Warnemünde und Świnoujście) 75–77 % und im östlichen Teil (Kołobrzeg) 62 %. Die Häufigkeit westlicher Windrichtungen betrug im westlichen und mittleren Teil 12–13 % und im östlichen Teil der Ostseeküste knapp unter 6 %. Der Anteil südöstlicher Windrichtungen erreichte an der westlichen Küste knapp 10 %, in Kołobrzeg dagegen etwas über 17 %. Außerdem betrug der Anteil ost-südöstlicher Winde in Kołobrzeg ca. 8 %. In den anderen Teilen der Küste trat diese Windrichtung nur sporadisch auf, wenn sich ein Sturmgebiet näherte. Wind aus dem großen W-NW-Sektor (300°) und den östlichen Sektoren (90°) war extrem selten. Wie schon oben ausgeführt, wurden diese Windrichtungen nur gelegentlich beobachtet, solange die Wasserstände noch unterhalb des definierten Schwellenwerts lagen, aber nach Erreichen des Tiefstwertes bereits wieder anstiegen (Abb. 4.1 a bis 4.1 c).

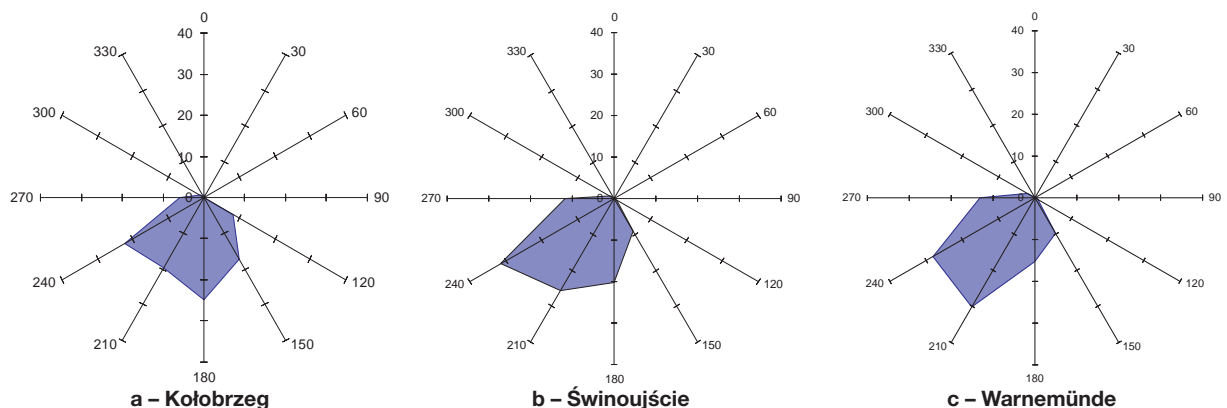


Abb. 4.1 Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen bei Wasserständen ≤ 440 cm, 1955–2005

4.2 Niedrigwasser bei ablandigem Sturm im Windfeld eines vorbeziehenden Tiefdruckgebiets

Die Norwegische See, die Nordsee, Skandinavien und die Ostsee liegen in einer Zone vorherrschend westlicher Winde, die regelmäßig von ostwärts ziehenden Störungen, meistens aktiven Tiefdruckgebieten atlantischen Ursprungs mit ihren Frontsystemen, überquert wird. Bevor ein solches Tiefdruckgebiet das Ostseegebiet erreicht, überwiegen Winde mit stark südlicher Komponente, die jedoch nach Durchzug der Front meistens drehen. An den südlichen Küsten der Nord- und Ostsee herrschen vor Ankunft eines Tiefdruckgebiets ablandige Winde. Tiefdruckgebiete kommen in diesem Gebiet regelmäßig vor.

Kleinere, rasch ziehende Tiefdruckgebiete mittlerer Stärke, die häufig mit einem Frontensystem einhergehen, verursachen zwar stürmische Winde, wirken aber nicht lange genug auf die Meeresoberfläche ein, um die Wasserstände an der Küste nachhaltig zu beeinflussen.

Im Gegensatz dazu verursachen gut entwickelte Tiefdruckgebiete, die mit ihren Frontsystemen die Küste überqueren, bei Annäherung der Fronten rückdrehende Winde in Sturmstärke und nach ihrem Abzug rechtdrehende Winde. Diese Situation führt in der Regel zu Wasserstandsschwankungen. Die Pegelstände sinken zunächst, bis ein ausgeprägtes Minimum erreicht ist, um dann nach Rechtdrehen des Windes wieder anzusteigen. Stürmischer Wind hinter den Fronten führt zu einem Wasserstandsanstieg, manchmal weit über den anfangs verzeichneten Wert hinaus. Diese Situation ist in den Pegelkurven in Abb. 5.1 b, 5.6 b und 5.18 b dargestellt.

Manche ostwärts ziehenden Tiefdruckgebiete verlangsamen sich unter weiterer Verstärkung, wenn sie Skandinavien erreicht haben. Der Druckgradient wird sehr steil, und der stürmische Wind nimmt weiter zu, bis er schließlich Orkanstärke erreicht. Ablandiger Wind an der südlichen Ostseeküste führt zu sinkenden Pegeln, bis der Wind entweder abflaut oder rechtdreht. Eine typische Reaktion der Ostsee auf diese Art der Windwirkung sind allmählich sinkende Wasserstände an großen Teilen der Küste, oft gefolgt von einem plötzlichen starken Pegelabfall während der heftigsten Phase des Sturms, und schließlich ein lang anhaltendes Minimum (flacher Abschnitt der Pegelkurve), so lange der Orkan aus derselben Richtung kommt. Wenn der Wind schließlich dreht, beginnen die Pegel schneller

oder langsamer zu steigen (oft von küstenparallelem oder auflandigem Wind unterstützt). Die Pegelkurven in Abb. 5.5 b, 5.9 b, 5.12 b und 5.19 b zeigen Ereignisse im Zusammenhang mit solchen atmosphärischen Bedingungen.

4.3 Hochdruckgebiet als Ursache niedriger Wasserstände

Eine andere Form des Niedrigwassers tritt dann auf, wenn ein starkes ortsfestes Hochdruckgebiet über Skandinavien und Nordwestrussland liegt. Unter solchen Luftdruckbedingungen tragen zwei Faktoren zum Sinken der Wasserstände bei: ein Faktor ist der sehr hohe hydrostatische Druck in dem kräftigen Hoch, der andere ist das an seinem südwestlichen Rand entstehende Windsystem. Während im nördlichsten Teil der Ostsee leichte bis mäßige Winde mit stark nördlicher Komponente aufkommen, dreht der Wind weiter südlich auf O-SO und frischt auf, wobei stellenweise Sturmstärke erreicht wird. Das ist in der Regel auf einen steiler werdenden Druckgradienten zurückzuführen infolge mehrerer von Westeuropa kommender Tiefdruckgebiete, die über das Gebiet hinwegziehen. Im westlichsten Teil der Ostsee, in den Sunden sowie im südöstlichen Teil der Nordsee herrschen SO-S-Winde vor, weil hier der Luftdruck niedriger als über Skandinavien ist. Bei vergleichbaren Luftdruckkonfigurationen, die lange genug in dem Gebiet stabil sind – eine oder zwei Wochen oder noch länger – wird das Wasser nicht nur von den Küsten weggeschoben, sondern durch die Sunde aus dem Becken hinausgedrängt. Unter solchen meteorologischen Bedingungen zeigen sämtliche Pegelstationen an der Ostsee niedrige Wasserstände an. Extreme Niedrigwasser unter Hochdruckeinfluss sind jedoch sehr selten. Ein Extremereignis wurde vor dem in der vorliegenden Monographie behandelten Zeitraum verzeichnet, und zwar im Februar 1954. Zunächst herrschte vom 7. bis 14. Februar acht Tage lang eine mäßige bis starke südöstliche Luftströmung über Mitteleuropa und der Ostsee. Dann, vom 15. bis 22. Februar, drängte das Windsystem eines Hochdruckgebiets über Skandinavien weitere acht Tage lang das Oberflächenwasser von den östlichen und südlichen Ostseeküsten weg. Daraufhin fielen die Wasserstände im mittleren und westlichen Teil der südlichen Ostseeküste vor dem 23. Februar auf ca. 440 cm oder darunter. Am 23. Februar wurde in Warnemünde ein Tiefststand von 427 cm gemessen und einen Tag später 418 cm in Kolobrzeg. Dies ist einer der seltenen Fälle sturmbedingter Niedrigwasser, bei denen im östlichen Teil der Küste

tieferen Wasserstände erreicht wurden als im westlichen Teil. Außerdem war eine auffallende Übereinstimmung der Pegelkurven zu verzeichnen, die während der lang anhaltenden Phase stürmischen Wetters über eine sehr lange Zeit fast parallel verliefen (bei schnell durchziehenden Stürmen

dagegen bewegen sich die Wasserstände an derselben Küste oft entgegengesetzt, siehe Abb. 1.3 b). Bei weiterhin stark ablandigem Wind an der südlichen Ostseeküste schwankten die Wasserstände mehrere Tage lang zwischen 420 cm und 450–460 cm (Abb. 4.3.).

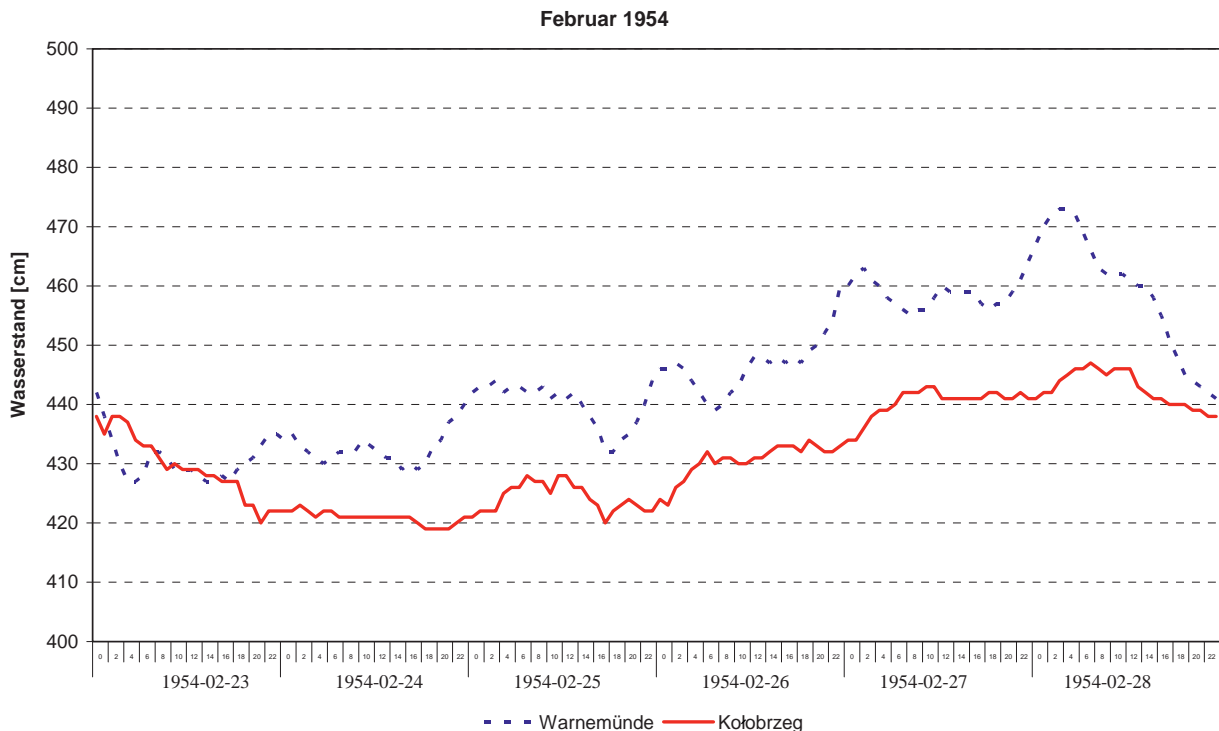


Abb. 4.3 Wasserspiegelschwankungen in Kolobrzeg und Warnemünde während einer langen Hochdruckphase im Februar 1954

4.4 Zusammenhang zwischen den atmosphärischen Bedingungen über Europa und Niedrigwasser an der südlichen Ostseeküste

Ein erhebliches Absinken der Wasserstände in weiten Teilen der Ostseeküste ist nur dann möglich, wenn stark ablandige Winde die Wassermassen von der Küste weg in Richtung offene See schieben. Niedrigwasser tritt daher in der Regel nur bei sehr dynamischen atmosphärischen Bedingungen auf, die eine stark windige Wetterlage zur Folge haben. Dazu gehören alle Wind/Luftdruckverhältnisse mit stark westlicher Strömungskomponente über der Ostsee und dem nordöstlichen Teil von Mitteleuropa, d. h. zonale und gemischte Zirkulationstypen. Charakteristisch für diese Zirkulationstypen sind aufeinanderfolgende atmosphärische Störungen, die rasch ostwärts ziehen und deren Windfeld stürmische Winde an allen Ostseeküsten verursacht, sowohl an Land als auch auf See. Diese atmo-

sphärischen Zirkulationstypen treten mit einer Häufigkeit von ca. 55 % auf. Die übrigen 45 % setzen sich aus atmosphärischen Zirkulationstypen zusammen, die meridionale und starke östliche Luftströmungskomponenten enthalten. Ihre Wettersysteme sind meistens ortsfester und unterhalten gleichmäßigere Winde, sogar bei Sturmstärken.

Die Häufigkeit des Auftretens von Niedrigwasser bei bestimmten atmosphärischen Bedingungen wurde für die Jahre 1955–2005 mit Hilfe des Kataloges der Großwetterlagen Europas von P. Hess und H. Brezowsky untersucht. Außerdem wurde ein Vergleich mit den Durchschnittsluftdruck-Karten von G. Cawley vorgenommen. Auf diese Weise konnten bestimmte Eigenschaften der verschiedenen Großwetterlagen identifiziert werden, die zu Niedrigwasserständen führen.

Die Klassifizierung von Hess und Brezowsky unterscheidet 30 verschiedene Zirkulationstypen, von denen 11 durch eine über Mitteleuropa vorherrschende oder zumindest vorhandene

westliche (zonale) Strömung gekennzeichnet sind. Es wird zwischen folgenden Zirkulationstypen unterschieden: Wa, Wz, WS, WW, SWa, SWz, Nwa, NWz, HM, BM und TM (Abb. 4.4 a). Sie machen die bereits erwähnten 55 % aller Zirkulationstypen aus, die im Untersuchungszeitraum zwischen 1955 und 2005 über Mitteleuropa auftraten. Wir haben die meridionalen Zirkulationstypen in zwei Gruppen unterteilt. Auf die erste Gruppe, unterteilt in Na, Nz, HNa, HNz, HB, TrM, TB, TrW und U, entfallen 27 % aller atmosphärischen Lagen, auf die zweite, bestehend aus NEa, NEz, HFa, HFz, HNFa, HNFz, SEa, SEz, Sa und Sz, entfallen die übrigen 18 %. Mit 83,6 % ereignete sich der weit überwiegende Teil aller im Zeitraum 1955–2005 erfassten Niedrigwasser unter zonalen Zirkulationsbedingungen. 32,5 % ereigneten sich während der zyklonalen Westlage Wz (Abb. 4.4 a), die übrigen 14,8 % bei der Hochdruckbrückenlage BM. Mit ca. 10 % die dritthäufigste Lage ist NWz, während die sonstigen zonalen und gemischten Lagen nur bei ca. 6 % der Niedrigwasserereignisse auftraten.

Die erste Gruppe meridionaler Lagen verursacht in der Regel kurz anhaltende Niedrigwasserstände, ähnlich den bereits erwähnten zonalen und gemischten atmosphärischen Lagen. Im Untersuchungszeitraum entfielen 11,3 % aller Niedrigwasserereignisse auf diese Zirkulationsformen, von denen HB am häufigsten vertreten war.

Nur 5,1 % aller Niedrigwasser entfielen auf die zweite meridionale Gruppe. Dabei traten überdurchschnittlich lang anhaltende Niedrigwasser auf. Bei den sehr ähnlichen südlichen und südöstlichen Lagen, auf die 4,8 % aller beobachteten Niedrigwasser entfielen, war die antizyklonale Südostlage (SEa) vorherrschend (Abb. 4.4 c). Es ist noch anzumerken, dass im Verlauf der in dieser Monographie untersuchten 56 Jahre kein sehr lang anhaltendes Niedrigwasser im mittleren Teil der südlichen Ostseeküste aufgetreten ist.

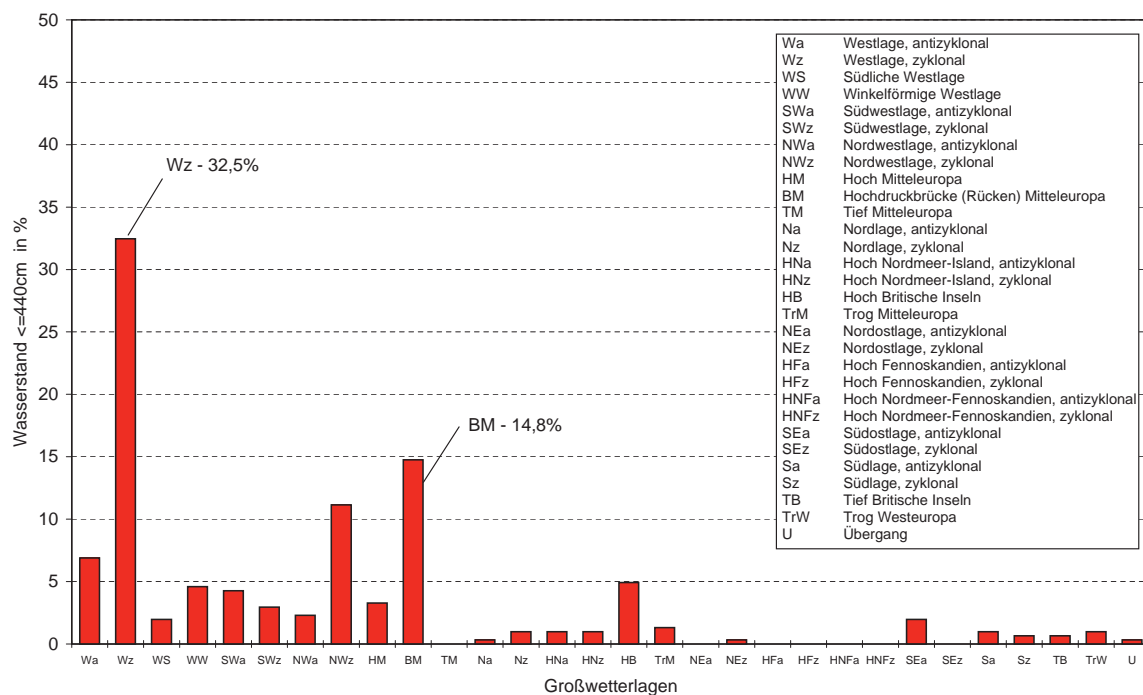


Abb. 4.4 a Häufigkeit des Zusammentreffens bestimmter atmosphärischer Lagen mit Niedrigwasserereignissen ≤ 440 cm an der südlichen Ostseeküste in den Jahren 1955–2005
(innerer Rahmen: Klassifizierung der Großwetterlagen über Europa nach G. Hess und H. Brezowsky)

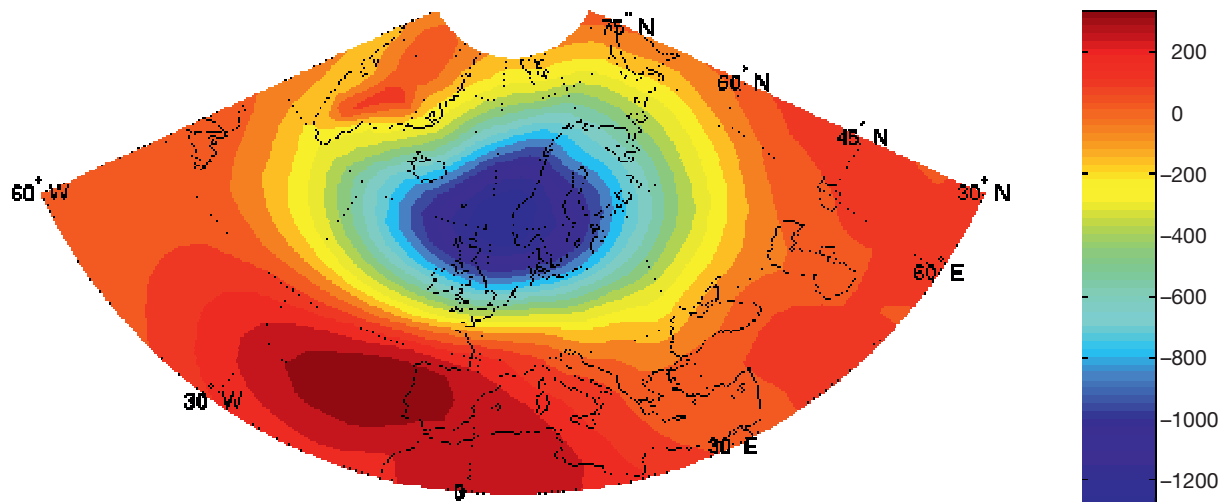
Wz – Zyklonale Westlage

Abb. 4.4 b Zirkulationsform Wz (zyklonale Westlage), bei der die meisten Niedrigwasser an der südlichen Ostseeküste auftreten (Karte der Luftdruckanomalien nach G. Cawley)

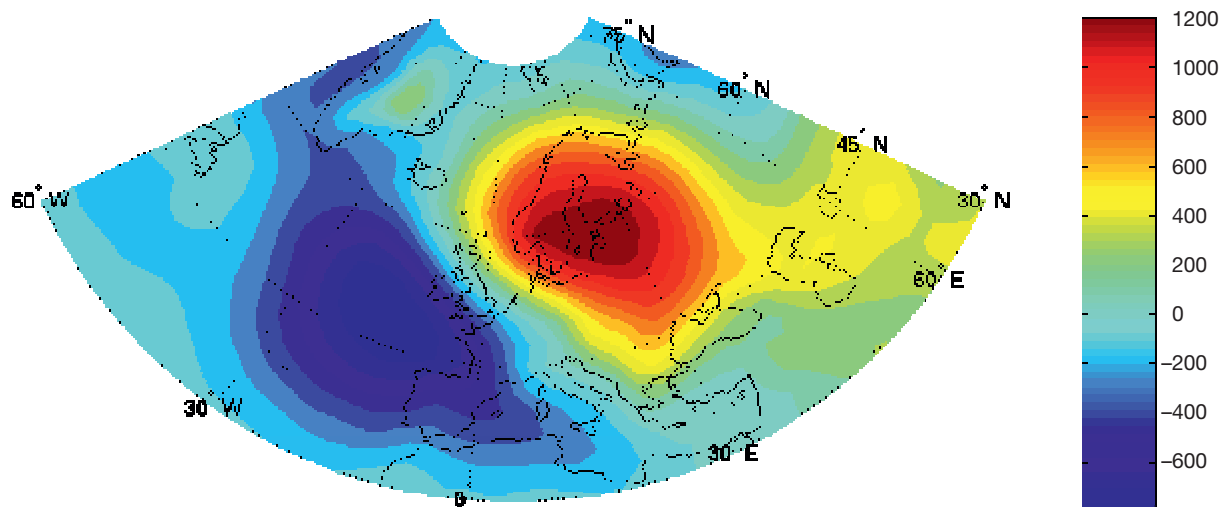
SEa – Antizyklonale Südostlage

Abb. 4.4 c Großwetterlage SEa (antizyklonale Südostlage) der meridionalen Zirkulationsform. Wetterlagen dieses Typs haben lang anhaltende Niedrigwasserstände ≤ 440 cm an der südlichen Ostseeküste verursacht (Karte der Luftdruckanomalien nach G. Cawley)

5 Extreme Niedrigwasser in der südlichen Ostsee

5.1 November 1956

Meteorologische Lage

Die Ostsee lag am 24. November 1956 im Einflussbereich eines schwachen Hochdruckrückens, als sich von der Norwegischen See her ein ausgedehntes Tiefdruckgebiet näherte und in südöstlicher Richtung über Westskandinavien hinwegzog. Die südliche Ostseeküste befand sich im Bereich einer anfangs schwachen, später mäßigen westlichen Luftströmung, die am späten Abend auf SW drehte und langsam auf 7 Bft zunahm. Am 25. November verstärkte sich das in östlicher Richtung weiterziehende Tief erheblich. Der Sturm aus SW-S erreichte über dem gesamten Ostseegebiet Windstärken von 8–10 Bft. Während die Kaltfront in den späten Abendstunden dieses Tages über den westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostsee hinwegzog, drehte der Sturm, der immer noch 8–9 Bft erreichte, auf W-NW und flaute allmählich ab.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Bis zum Nachmittag des 24. November lagen die Wasserstände knapp unterhalb von 500 cm. Als das Tiefdruckgebiet am Abend die Ostsee erreichte und die südliche Ostseeküste unter den Einfluss zunehmender westlicher Winde geriet, die dann allmählich über SW nach S drehten, begannen die Wasserstände zu sinken und erreichten ihren niedrigsten Stand am Abend des 25. November. Die Tiefstwerte wurden an der gesamten südlichen Ostseeküste fast zur gleichen Zeit erreicht. In Wismar, Warnemünde und Sassnitz wurden um 18 UTC Minima von 342 cm, 365 cm bzw. 383 cm gemessen, in Świnoujście und Kołobrzeg um 20 UTC 401 cm bzw. 393 cm.

Nach Durchzug der Sturmfront in der Nacht zum 26. November drehte der stürmische Wind über W nach NW. Daraufhin begannen die Wasserstände sofort wieder zu steigen und erreichten bereits am Morgen des 26. November Werte um 500 cm oder etwas darüber.

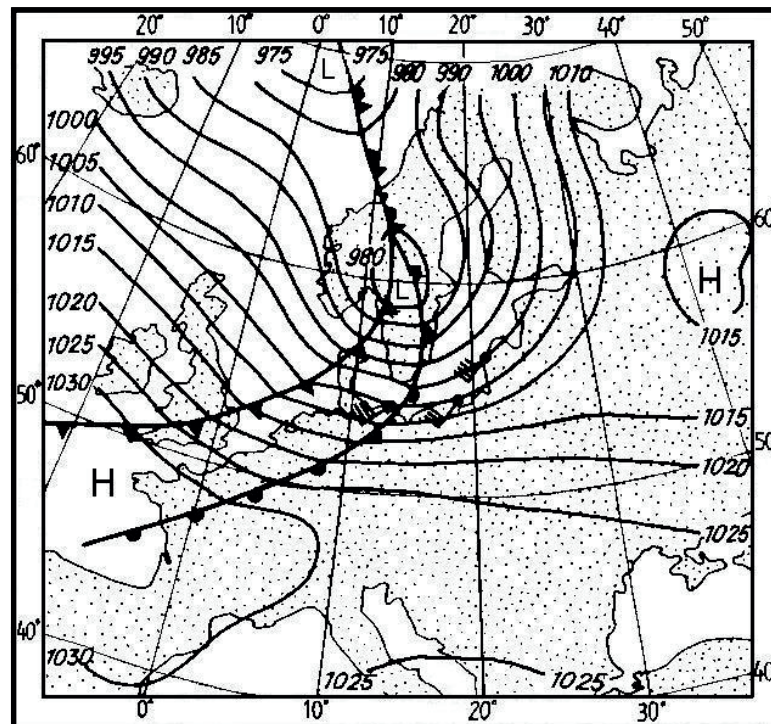


Abb. 5.1 a Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 25. November 1956 um 12 UTC

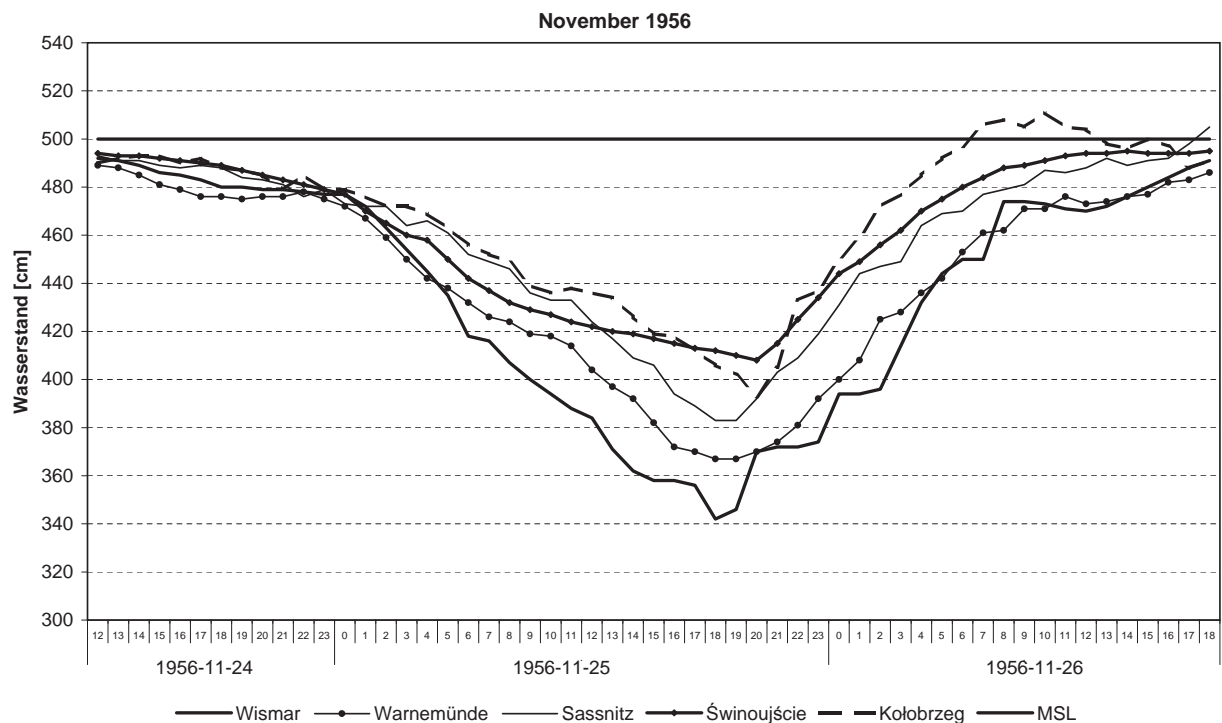


Abb. 5.1 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 25.-26. November 1956

5.2 Januar 1960

Meteorologische Lage

Am 17. Januar lag ein blockierendes Hochdruckgebiet über Russland, als sich von Schottland her ein in südöstlicher Richtung ziehendes Tief näherte, das noch am selben Abend Norddänemark erreichte. Am 18. Januar breiteten sich im südlichen Ostseegebiet stürmische südliche Winde der Stärke 7 Bft aus, die im Laufe des Tages vorübergehend auf 6 Bft abflauten und im östlichen Teil der Ostsee leicht drehten. In der Nacht vom 18. zum 19. Januar verstärkte sich das Tiefdruckgebiet über Dänemark und verlagerte sich nordostwärts in Richtung Südschweden. An der südlichen Ostseeküste erreichte der aus südlichen bis südwestlichen Richtungen kommende ablandige Wind im westlichen Küstenabschnitt 8–9 Bft.

Am 19. Januar verlagerte sich das Tief unter allmählicher Abschwächung nordostwärts. In den Frühstunden überquerten die Luftdruckfronten des Tiefs die südliche Ostseeküste, was im westlichen Teil der Küste besonders stürmisches Wetter zur Folge hatte. Nach Durchzug der Kaltfront über die Küste drehte der Wind kurz nach Mittag über W nach NW und flaute auf 6–5 Bft ab. Später ließ der Wind weiter nach und war leicht und wechselhaft.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

An der südlichen Ostseeküste blieben die Wasserstände mehrere Tage lang niedrig. Am 17./18. Januar um Mitternacht schwankten sie zwischen 425 cm und 455 cm. Ein zeitweise auf 8–9 Bft zunehmender ablandiger Südsturm über dem westlichsten Küstenabschnitt ließ die Wasserstände in diesem Gebiet in den Morgenstunden des 18. Januar weiter leicht sinken; auf ca. 415 cm in Wismar und 418 cm in Warnemünde.

Die nächste Phase stürmischen ablandigen Winds am 19. Januar führte zu weiter sinkenden Pegeln entlang der gesamten Küste: in Wismar betrug der Tiefststand 379 cm, in Warnemünde 398 cm und in Sassnitz 414 cm. In Świnoujście fiel der Pegel auf 416 cm, in Kołobrzeg auf 425 cm. Als der Wind später W-NW in auflandige Richtung drehte, stiegen die Wasserstände am Abend des 19. Januar auf Werte um 500 cm an.

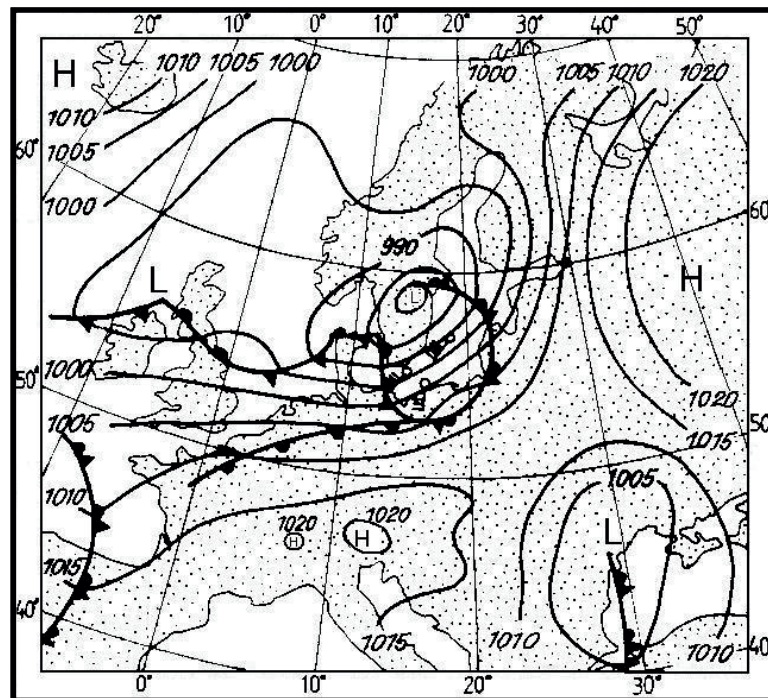


Abb. 5.2 a Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 19. Januar 1960 um 00 UTC

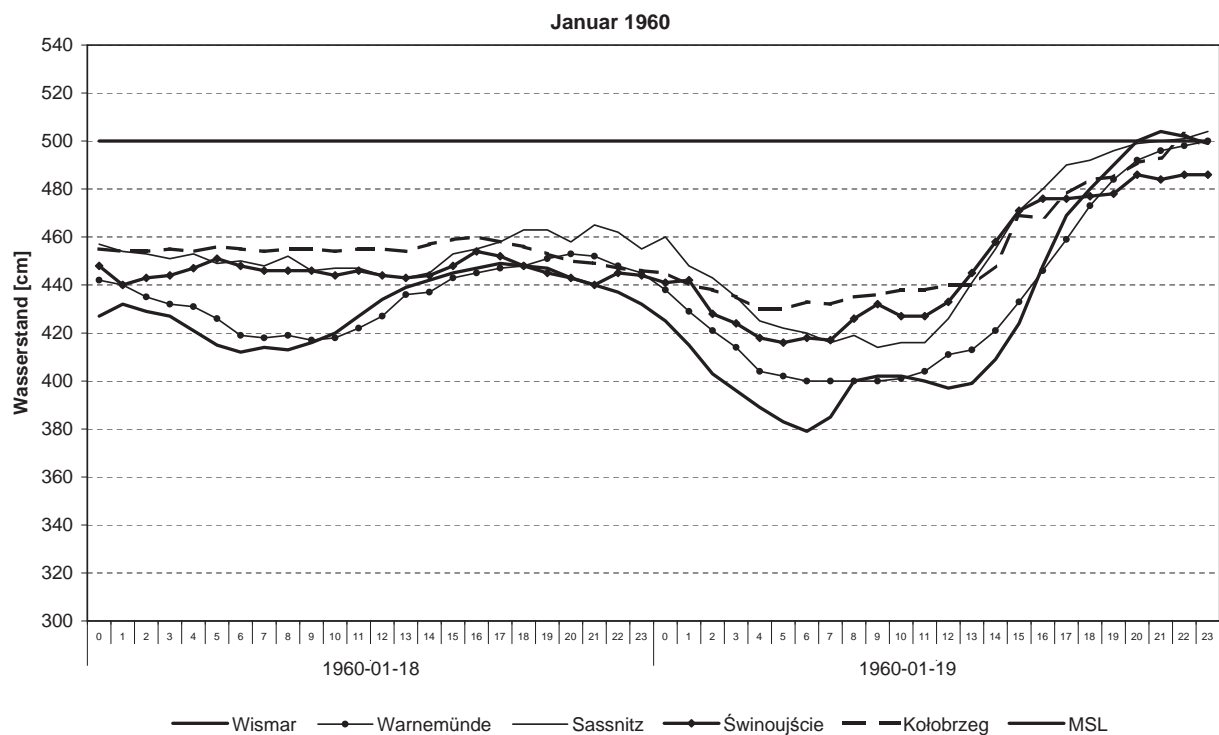


Abb. 5.2 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 18.–19. Januar 1960

5.3 Januar 1961

Meteorologische Lage

Über der Ukraine lag bereits seit mehreren Tagen der Kern eines ausgedehnten Hochdruckgebiets mit Keilen über der Ostsee und Skandinavien. Am 27. Januar verlagerte sich das Hoch in süd-östlicher Richtung, und über der Ostsee setzte eine westliche Luftströmung ein. Später drehte der Wind über SW nach S und nahm auf 6 Bft zu. In den Morgenstunden des 28. Januar frischte der leicht ablandige Wind bei Annäherung eines Tiefdruckgebiets leicht auf und erreichte 7 Bft. Am Nachmittag desselben Tages flaute der Wind wieder auf 5–6 Bft ab und drehte in leicht auflandige Richtung, während das Frontensystem ostwärts zog. Ein Tiefdruckgebiet überquerte die Ostsee am Morgen des 29. Januar. Der Wind drehte wieder auf S in ablandige Richtung und nahm auf 7–8 Bft zu. Ein von Nordschottland her in Richtung Südfinnland wanderndes Tief zog am 29. und 30. Januar langsam über das Gebiet hinweg und führte am 30. Januar zu einer starken südwestlichen Strömung über der gesamten südlichen Ostsee. Die Windstärke erreichte 8–9 Bft. In den Mittagsstunden des 30. Januar drehte der Wind nach Abzug der Kaltfront in westliche Richtung und flaute allmählich ab.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Stetige leichte bis mäßige ablandige Winde, hoher Luftdruck über dem Ostseebecken und jahreszeitlich bedingt geringe Abflussmengen führten zu niedrigen Wasserständen an der gesamten südlichen Ostseeküste. Zur letzten Januarpentade hin schwankten die Wasserstände um 470 cm.

Am 28. Januar ließ ein Sturm aus SW-S die Wasserstände langsam sinken, in Wismar auf 430 cm und Warnemünde auf 410 cm. Die Wasserstände in Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg schwankten um 440 cm. Am Mittag des 28. Januar drehte der Wind in westliche Richtungen, und die Wasserstände stiegen wieder auf 450–470 cm an.

Am 29. Januar gegen 9 UTC, nachdem der Wind auf Süd gedreht hatte, sanken die Wasserstände relativ schnell, ohne allerdings besonders niedrige Werte zu erreichen. Die gemessenen Tiefstände waren wie folgt: Wismar 409 cm, Warnemünde 407 cm, Sassnitz 415 cm, Świnoujście 398 cm und Kołobrzeg 412 cm. In den Mittagsstunden des 30. Januar drehte der Wind auf W, und die Wasserstände stiegen am 31. Januar mittags wieder auf Werte um 480 cm. Beide Pegelminima waren flach.

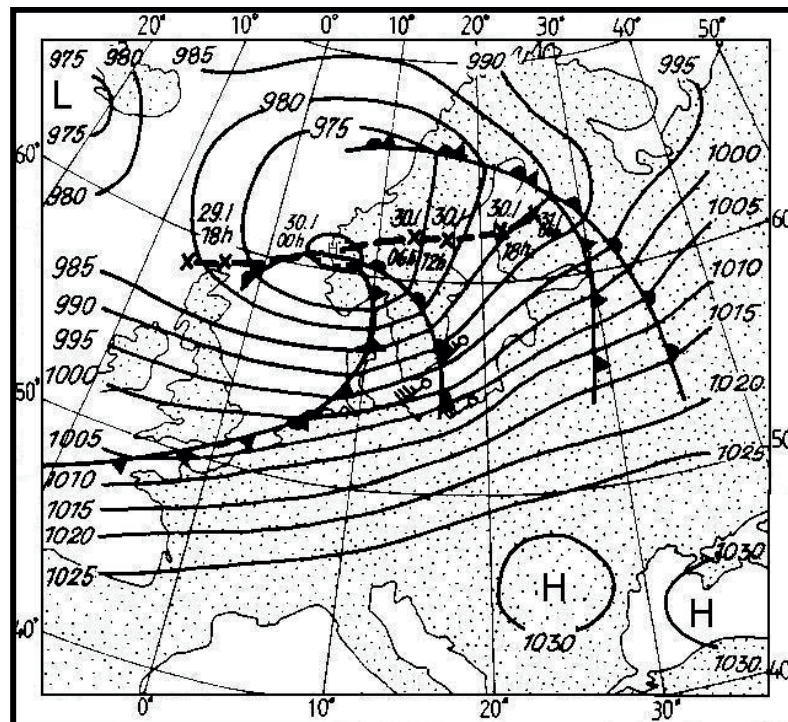


Abb. 5.3 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 29. Januar 18 UTC bis 31. Januar 1961;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 30. Januar 1961, 00 UTC

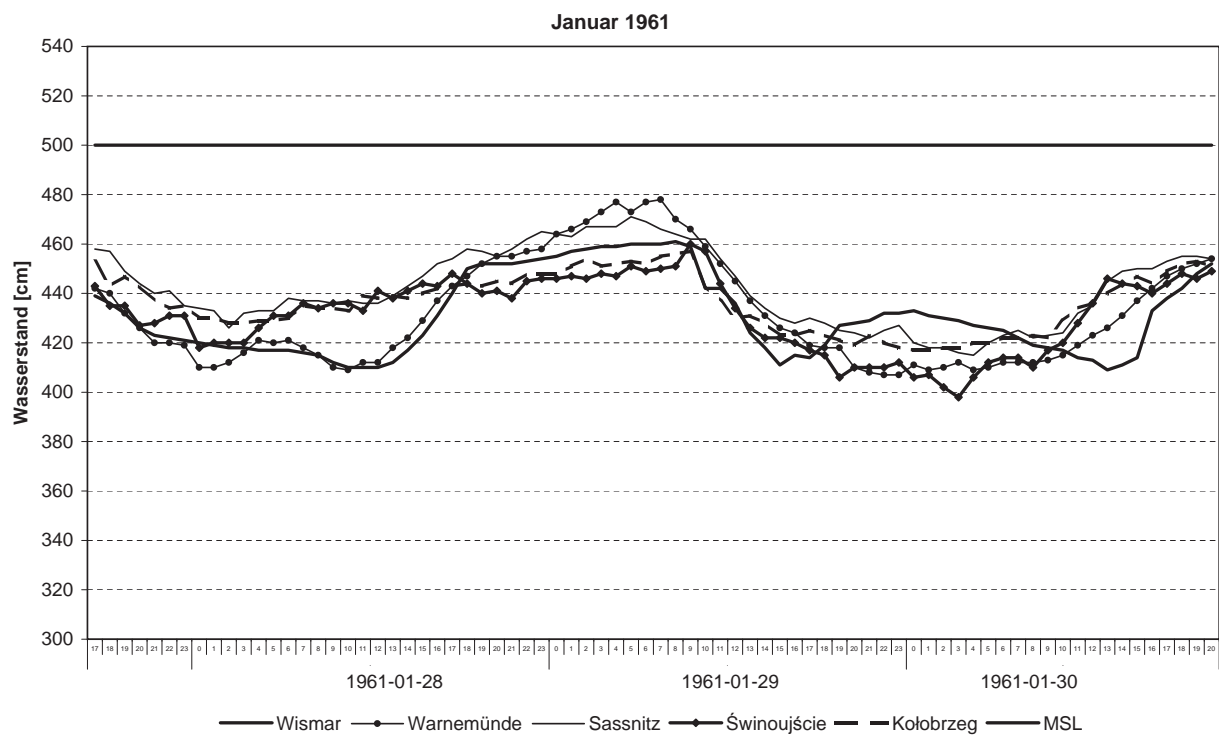


Abb. 5.3 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 27.–31. Januar 1961

5.4 Februar 1962

Meteorologische Lage

Am 11. Februar zog ein aktives Tiefdruckgebiet von Nordschottland aus rasch in östlicher Richtung und verstärkte sich beim Überqueren der Norwegischen See und Südnorwegens. Am 12. Februar mittags lag der Kern des Tiefs mit ca. 995 hPa über Stockholm. Das gesamte in Bewegung befindliche System hatte einen sehr steilen Druckgradienten. Das heranziehende Tief erzeugte im nordöstlichen Teil der Küste einen langsam rückdrehenden und im südlichen Teil einen allmählich drehenden Südweststurm der Stärke 9–10 Bft. An der südlichen Ostseeküste blieb die Windrichtung mehrere Stunden lang fast parallel zur Küste, teilweise sogar hinter der Kaltfront. Der Wind drehte erst West, nachdem die Kaltfrontokklusion kurz nach Mittag am 12. Februar über die Küste hinweggezogen war. Die auflandigen westlichen Winde erreichten zuerst den nördlichsten und zuletzt den westlichsten Teil der Küste.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Die Wasserstände an der südwestlichen Ostseeküste schwankten um den mittleren Wasserstand. In der Nacht vom 11. auf den 12. Februar führte der Südweststurm etwa ab Mitternacht zu einem langsamen, gleichmäßigen Sinken der Pegel. Der Durchzug des Frontensystems unterbrach das Fallen der Wasserstände, und ein leichter Pegelanstieg wurde um 12 UTC zuerst in Sassnitz und Świnoujście beobachtet, dann um 13 UTC in Kołobrzeg. Etwa um 17 UTC stieg der Wasserspiegel auch in Warnemünde. Um ca. 19 UTC stieg der Pegel schließlich auch in Wismar. Die Tiefstwerte an diesem Nachmittag waren wie folgt: Wismar 384 cm, Warnemünde 394 cm, Sassnitz 414 cm, Świnoujście 428 cm und Kołobrzeg 452 cm. Danach stiegen die Pegel langsam wieder an.

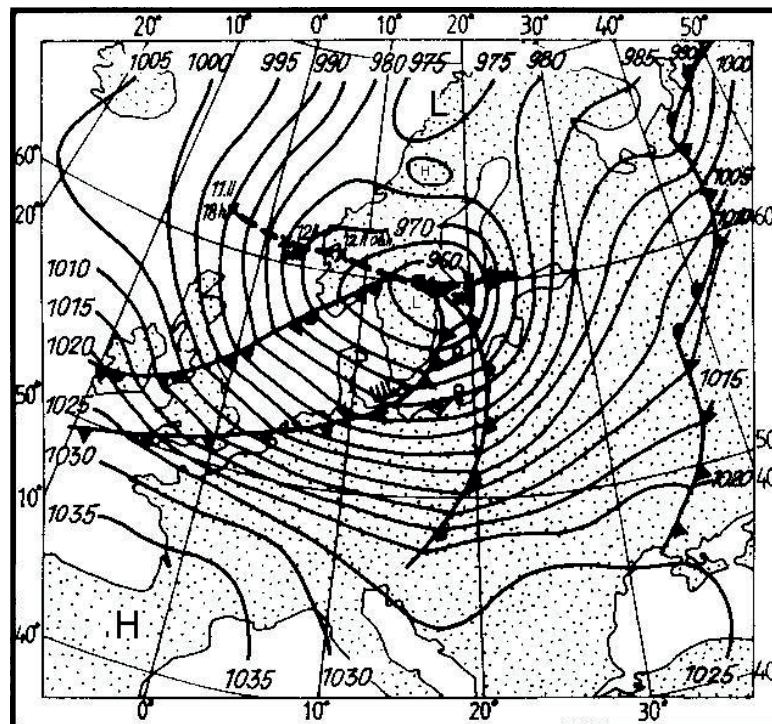


Abb. 5.4 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 11. Februar 18 UTC bis 12. Februar 1962, 12 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 12. Februar 1962, 12 UTC

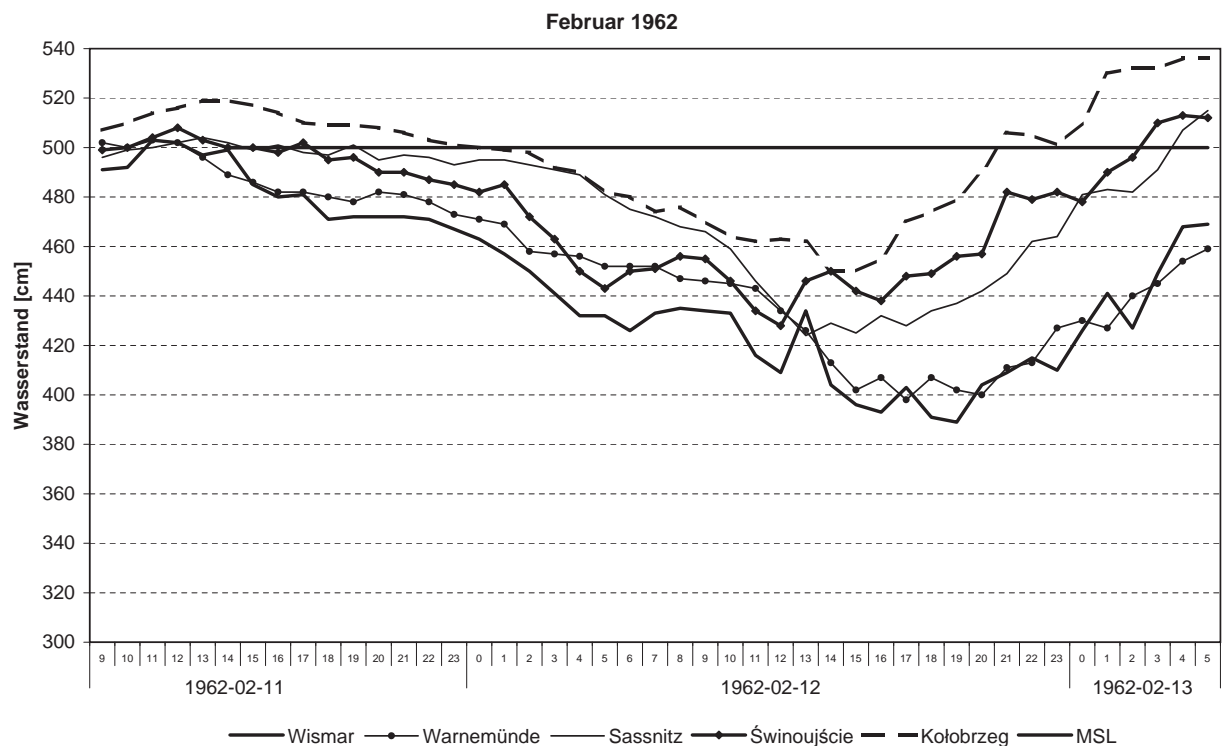


Abb. 5.4 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 11.–12. Februar 1962

5.5 Dezember 1965

Meteorologische Lage

In den frühen Morgenstunden des 5. Dezember herrschte an der südlichen Ostseeküste mäßiger Wind aus südlichen bis südwestlichen Richtungen.

Um ca. 06 UTC bildete sich über Wales, am südwestlichen Rand eines umfangreichen Tiefdruckgebiets nordöstlich von Schottland, ein sekundäres Tief, das unter rascher Verstärkung nordostwärts zog und dabei schnell Südengland, die südliche Nordseeküste und Dänemark überquerte. Nach vorübergehender Verlangsamung erreichte es am 6. Dezember um 00 UTC Schweden; im Kern des Tiefs betrug der Luftdruck zu diesem Zeitpunkt 960 hPa. Unter weiterer Verlangsamung und allmählicher Abschwächung erreichte das Tiefdruckgebiet um 18 UTC den Finnischen Meerbusen und zog weiter in östlicher Richtung, während es sich auffüllte. Das von diesem Luftdrucksystem erzeugte Windfeld führte am 5. Dezember und in den Morgenstunden des 6. Dezember über der Ostsee zu starken südlichen, SO- und z. T. O-drehenden Winden der Stärke 6–8 Bft. Die Okklusionsfront erreichte die Pegel in diesem Gebiet zwischen 08 und 13 UTC am 6. Dezember (zuerst die östlichsten Pegel). Hinter der Okklusion drehte der Wind und erreichte in Böen 8–10 Bft.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Die Wasserstände begannen gegen Mitternacht am 6. Dezember zu sinken und fielen weiter, bis der Sturm in leicht auflandige Richtung drehte. Der Tiefststand wurde zuerst in Kołobrzeg mit 438 cm erreicht und eine Stunde später in Świnoujście mit 430 cm, gefolgt von Sassnitz, wo der Pegel um 10 UTC 412 cm anzeigte. Die westlichen Pegel verzeichneten eine flache Kurve. In Warnemünde wurde der Tiefststand von 408 cm um 11 UTC erreicht. Um 12 Uhr wurde dann in Wismar ein Tiefstwert von 386 cm gemessen.

Nachdem der Sturm in leicht auflandige Richtung gedreht hatte, begannen die Wasserstände wieder zu steigen und erreichten am 7. Dezember um Mitternacht den mittleren Wasserstand.

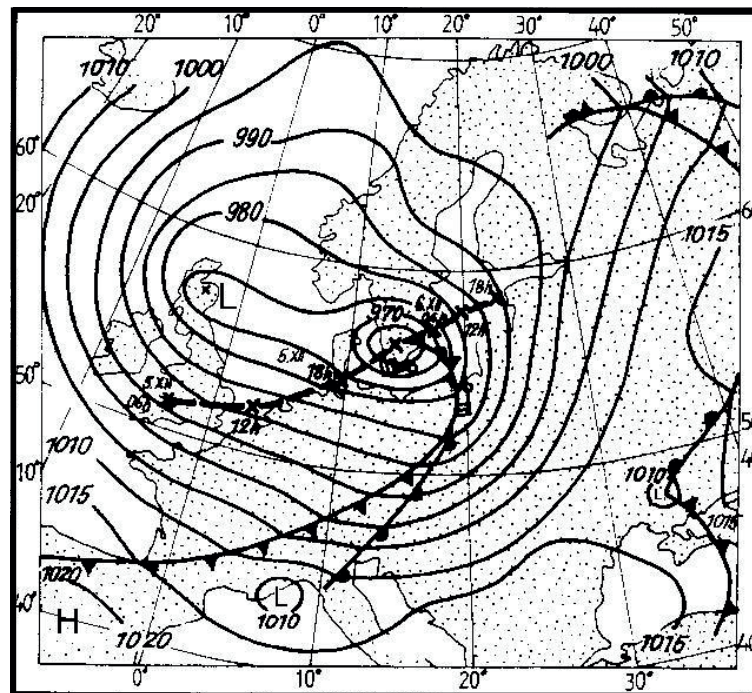


Abb. 5.5 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 5. Dezember 06 UTC bis 6. Dezember 18 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 6. Dezember 1965, 00 UTC

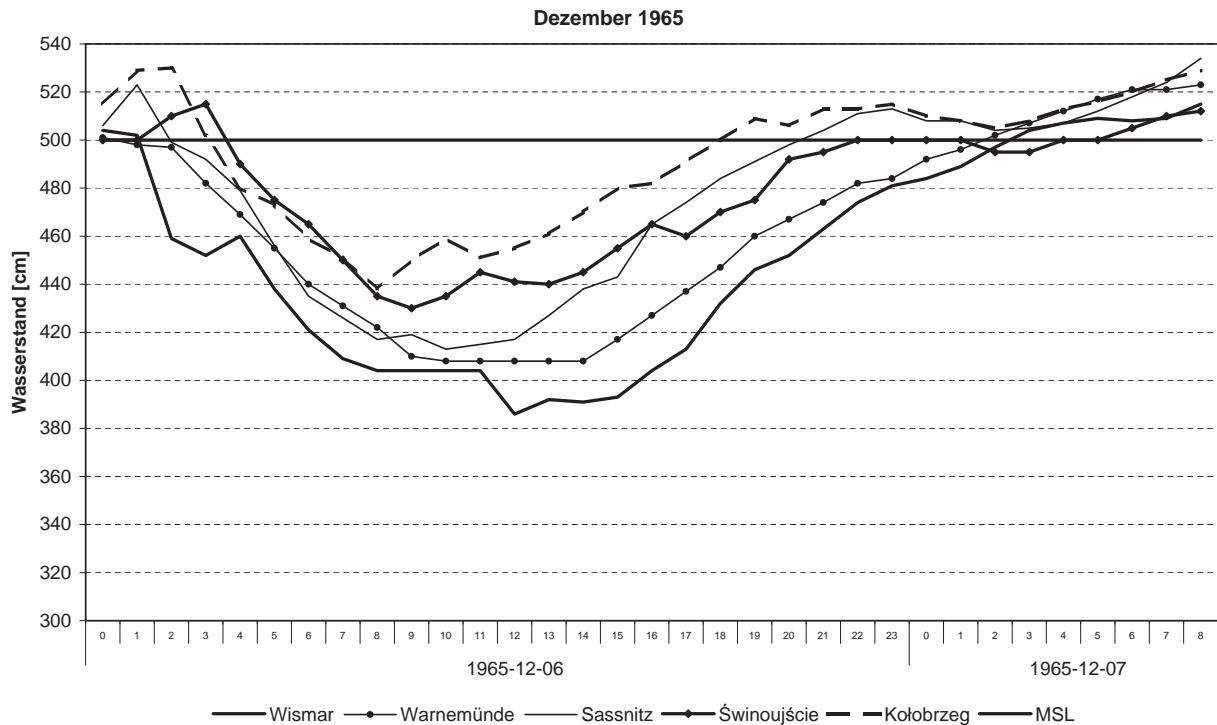


Abb. 5.5 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 5.–6. Dezember 1965

5.6 Oktober 1967

Meteorologische Lage

Ein sich vom Atlantik her näherndes Tiefdruckgebiet erreichte die Südwestküste Irlands am 16. Oktober um 18 UTC. Am 17. Oktober zog das sich verstärkende Tief rasch über die britischen Inseln und die Nordsee hinweg in Richtung Dänemark und Südschweden, wo es sich deutlich verlangsamte. Der Luftdruck im Kern des Tiefs fiel auf 967 hPa. Am 17. Oktober gegen Mitternacht führte ein Einbruch arktischer Kaltluft dazu, dass der Kern des Tiefs rasch in Richtung Weißes Meer abgedrängt wurde, wo es in den Mittagsstunden des 18. Oktober ankam (Abb. 5.6 a).

Am Nachmittag und in der Nacht des 17. Oktober, während das Zentrum fast stationär über Südschweden und dem Kattegat lag, entstand über der östlichen Nordsee und den südwestlichen Becken der Ostsee ein Sturmgebiet mit sehr starken westlichen bis südwestlichen Winden um 8–9 Bft, stellenweise bis zu 10 Bft. Hinter der Okklusionsfront drehte der Sturm in den Frühstunden des 18. Oktober auf NW und hielt mehrere Stunden lang unvermindert an.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Am 17. Oktober schwankten die Wasserstände in der südwestlichen Ostsee anfangs leicht oberhalb des mittleren Wasserstandes. Ab Mittag begannen die Pegel zu fallen, zuerst in der Wismarschen Bucht, die auf stürmische ablandige Winde am stärksten reagiert. Die Wasserstände sanken dort erst um ca. 10 cm/Stunde, später dann um 10–15 cm/Stunde. An den anderen Pegeln sanken die Wasserstände weniger gleichmäßig. In Kołobrzeg fiel der Pegel zuletzt: hier lag der Wasserstand oberhalb von 500 cm, bis der Warmsektor nach Osten abgezogen war und der küstenparallele westliche Wind um ca. 21 UTC auf SW, teilweise S, gedreht hatte. Dies führte zu rasch sinkenden Wasserständen. Die Tiefststände wurden kurz nach Mitternacht am 18. Oktober gemessen. Zwischen 01 und 04 UTC, während sich die Okklusion ostwärts verlagerte, drehte der orkanartige Sturm rasch auf NW. An der Okklusionsfront kam der Sturm jedoch immer noch aus südlichen Richtungen, was zu sehr schnell fallenden Wasserständen führte: in Sassnitz fiel der Pegel um ca. 40 cm/h, in Kołobrzeg und Świnoujście sogar um ca. 50 cm/h.

Die Tiefststände waren wie folgt: Warnemünde 332 cm, Wismar 334 cm, Świnoujście 366 cm, Sassnitz 380 cm und Kołobrzeg 410 cm.

Aufgrund des heftigen, jetzt aus nordwestlicher bis westlicher Richtung kommenden Sturms stiegen die Wasserstände sofort wieder stark an, was an den östlichen Pegeln innerhalb von 5–7 Stunden zu einem Anstieg um mehr als 1,5 m führte.

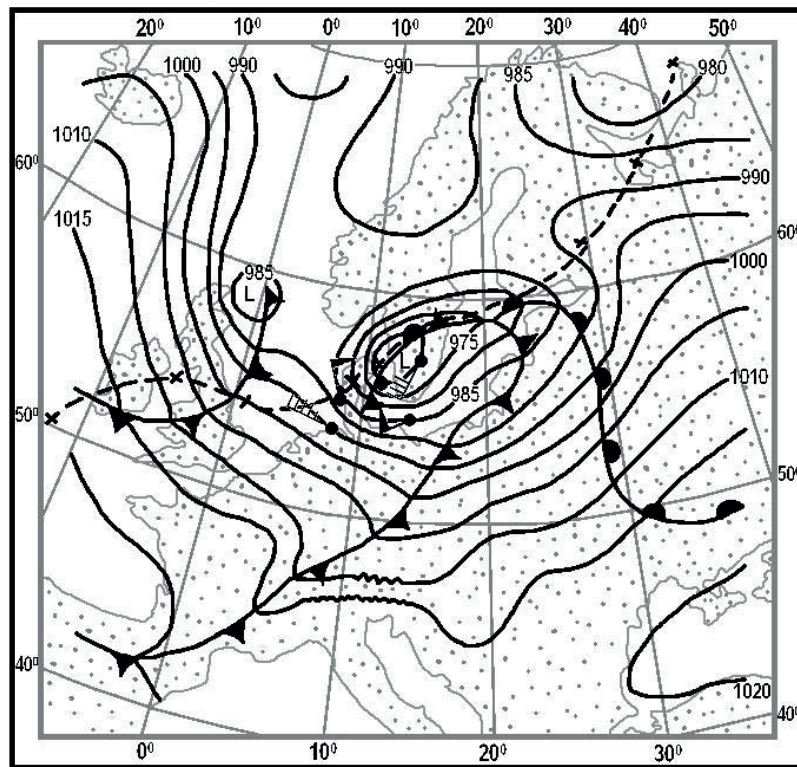


Abb. 5.6 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 16. Oktober 18 UTC bis 18. Oktober 18 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 17. Oktober 1967, 18 UTC

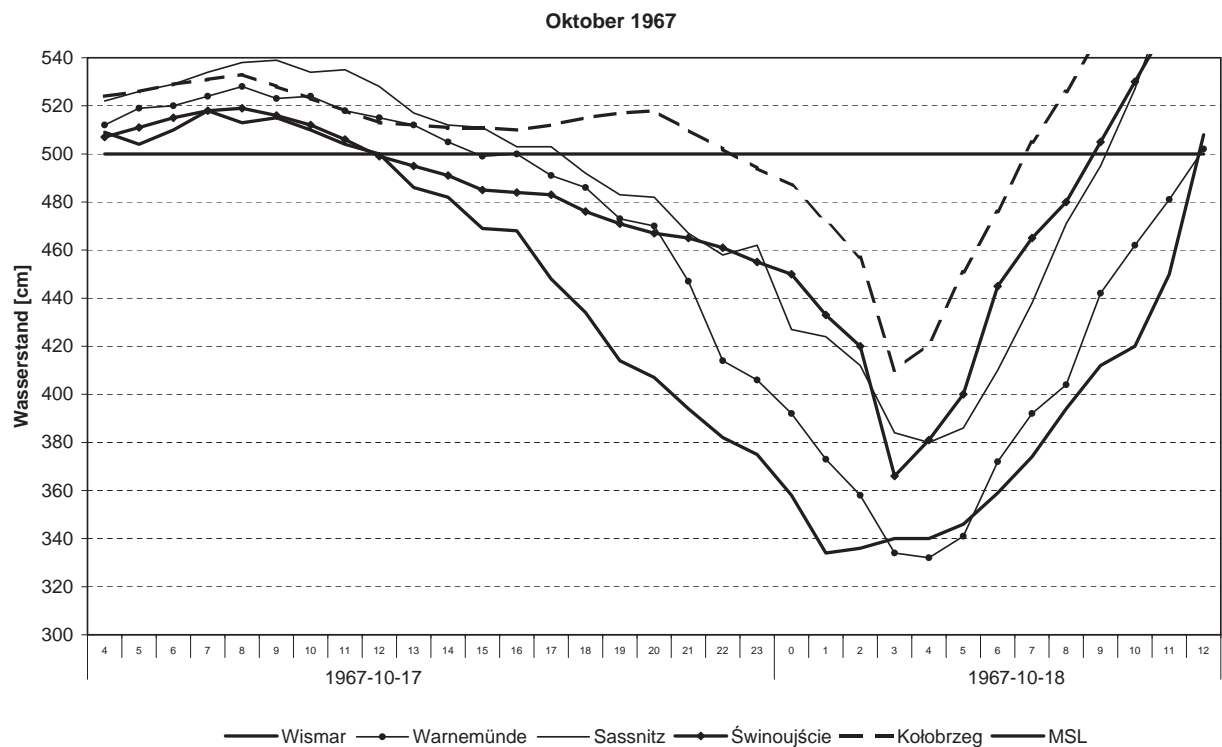


Abb. 5.6 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 17.–18. Oktober 1967

5.7 März 1969

Meteorologische Lage

In den Morgenstunden des 8. März zog ein schwacher Hochdruckrücken in östlicher Richtung über die Ostsee hinweg, während die südliche Ostseeküste im Bereich mäßiger Winde aus W-SW lag. Am Nachmittag desselben Tages zog ein aktives Tiefdruckgebiet mit seinem Frontensystem von der Norwegischen See her in Richtung Südschweden. Es erreichte dieses Gebiet in den Frühstunden des 9. März, verlangsamte sich dann etwas, änderte die Richtung und zog in östlicher Richtung zur Zentralen Ostsee weiter. Am 8. März nachmittags nahm der Wind allmählich zu und erreichte an der südlichen Küste eine Stärke von 7–9 Bft. Am 9. März kurz nach Mitternacht überquerte die Böenwalze einer Okklusionskaltfront die beiden östlichsten Pegel, während sich die westlichen Pegel noch im Bereich eines weniger böigen Südweststurms befanden, der an Stärke zunahm.

In den Mittagsstunden des 9. März zog eine sekundäre Kaltfront erst über die Pegel im östlichen, dann im westlichen Teil der südlichen Ostseeküste hinweg. Der Sturm, der inzwischen 9–10 Bft und in Böen 11 Bft erreichte, drehte W-NW und flaute gegen Abend langsam ab.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Am Morgen des 8. März schwankten die Wasserstände zwischen 480 cm und 460 cm, kamen aber allmählich unter den Einfluss auffrischender ablandiger Winde. Bis zum Abend fielen die Pegel auf 450–430 cm, und kurz nach Mitternacht am 9. März lagen alle Pegel mit Ausnahme von Kołobrzeg knapp unter 420 cm.

In Kołobrzeg und Świnoujście verzeichneten die Pegel gleichzeitig flache Minima von 430 cm bzw. 412 cm. An den weiter westlich gelegenen Pegeln fielen die Wasserstände weiter, und die Tiefststände wurden erst mittags erreicht: in Sassnitz 408 cm um ca. 11 UTC, Wismar 392 cm um 12 UTC und Warnemünde 398 cm um 13 UTC.

Etwa um diese Zeit verzeichneten die Pegel in Kołobrzeg und Świnoujście Sekundärminima. Unter dem Einfluss des Nordweststurms stiegen die Wasserstände wieder an und erreichten in den Abendstunden des 9. März 480–520 cm.

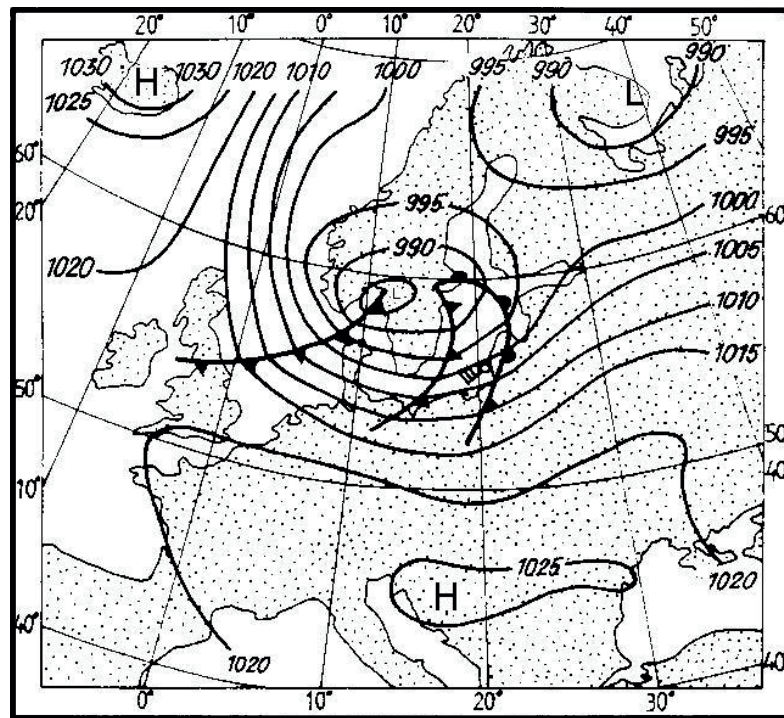


Abb. 5.7 a Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 9. März 1969, 00 UTC

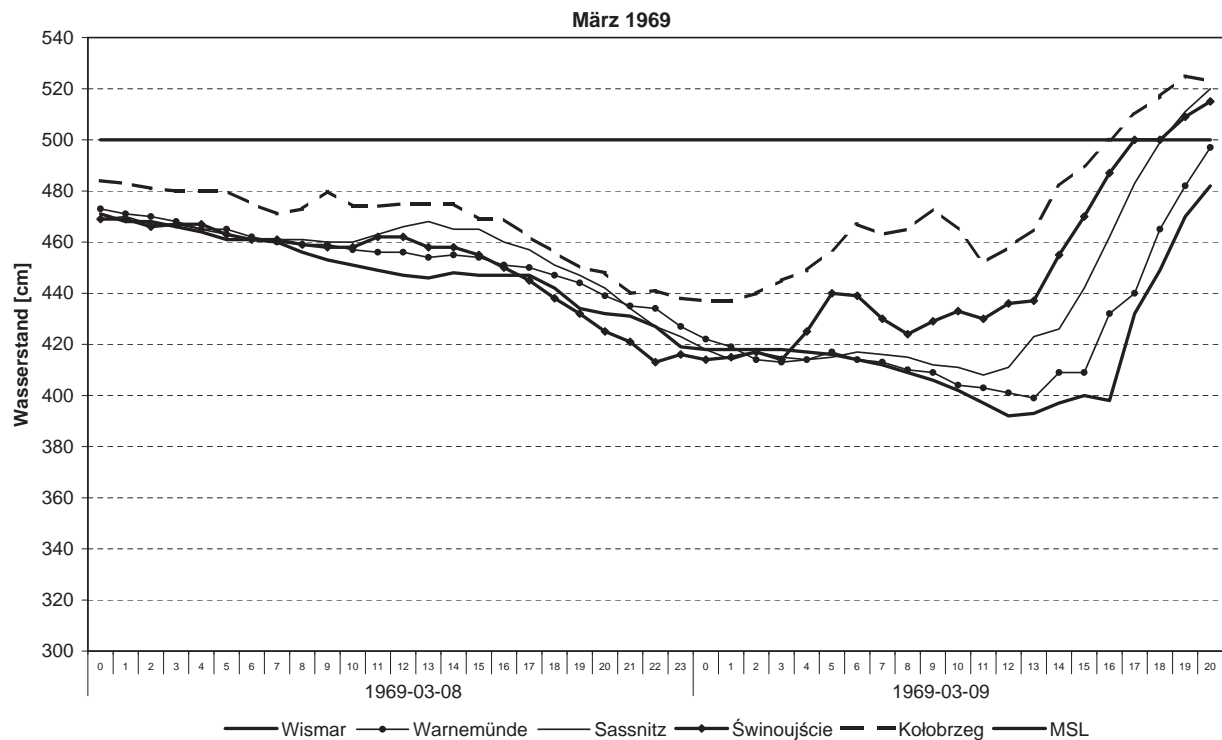


Abb. 5.7 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 8.–9. März 1969

5.8 Januar 1979

Meteorologische Lage

Am Morgen des 6. Januar bildete sich im Bereich einer Kaltfront hinter einem Tiefdrucktrog südwestlich der Färöer-Inseln ein Tiefdruckkern, der sich rasch in Richtung Nordosten verlagerte und die nördliche Norwegische See am 7. Januar um ca. 12 UTC erreichte, während der Tiefdrucktrog nach Osten abzog. Die Okklusionsfront lag über Skandinavien, als die Warmfront den Eingang zu den südlichen Ostseebecken erreichte. Vor der Warmfront, im östlichen Teil des Trops, nahm der Wind im gesamten Bereich der Ostsee zu und entwickelte sich zu einem Südweststurm der Stärke 7–9 Bft, während sich das Tiefdruckgebiet weiter verstärkte. Im Bereich der südlichen Ostseeküste ging der Durchzug der Warmfront mit rückdrehenden Winden und einer vorübergehenden Abnahme der Windgeschwindigkeit einher. Bei Durchzug der Kaltfront gegen Abend nahm der Wind wieder zu, und um 20 UTC drehte der Sturm über W nach WNW in auflandige Richtung.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Die Wasserstände begannen am 6. Januar morgens erst langsam zu fallen, dann beschleunigte sich der Rückgang in den Frühstunden des 7. Januar unter dem Einfluss des zunehmenden Südweststurms. Bei Durchzug der Warmfront zwischen 09 und 13 UTC flaute der Wind ab und drehte leicht (Abb. 5.8 a), wodurch die Pegel vorübergehend langsamer sanken. Bei Herannahen der Kaltfront fielen sie dann wieder schneller. Zwischen 20 und 23 UTC drehte der ablandige Wind hinter der Kaltfront, und die Wasserstände stiegen wieder langsam an. Werte um 480 cm wurden erst wieder am 8. Januar gegen 20 UTC erreicht.

Die Tiefststände waren wie folgt: Wismar und Warnemünde 372 cm um ca. 18 UTC am 7. Januar; Sassnitz 394 cm um 22 UTC; Świnoujście 410 cm und Kołobrzeg 403 cm, beide um ca. 17 UTC am 7. Januar.

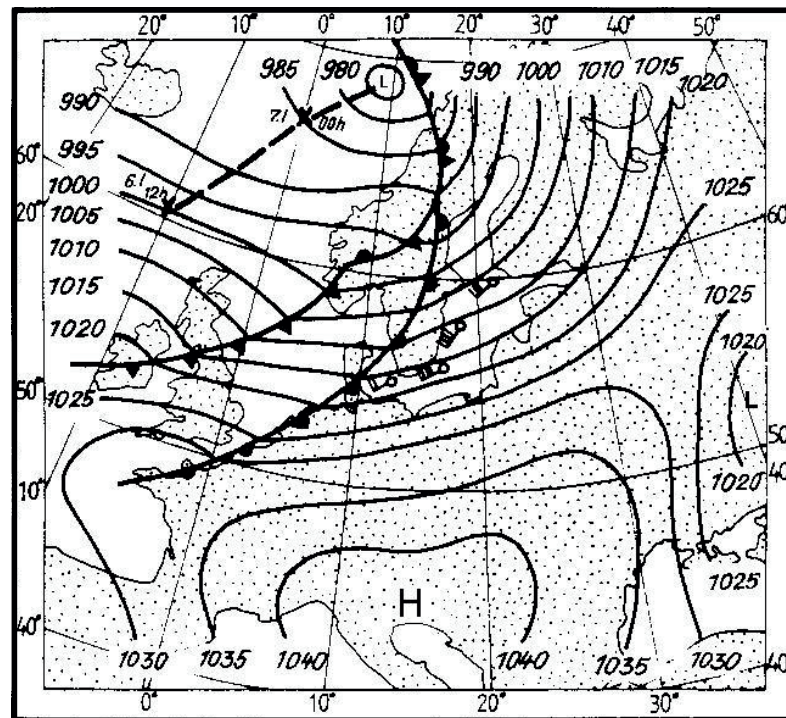


Abb. 5.8 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 6. Januar 12 UTC bis 7. Januar 12 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 7. Januar 1979, 12 UTC

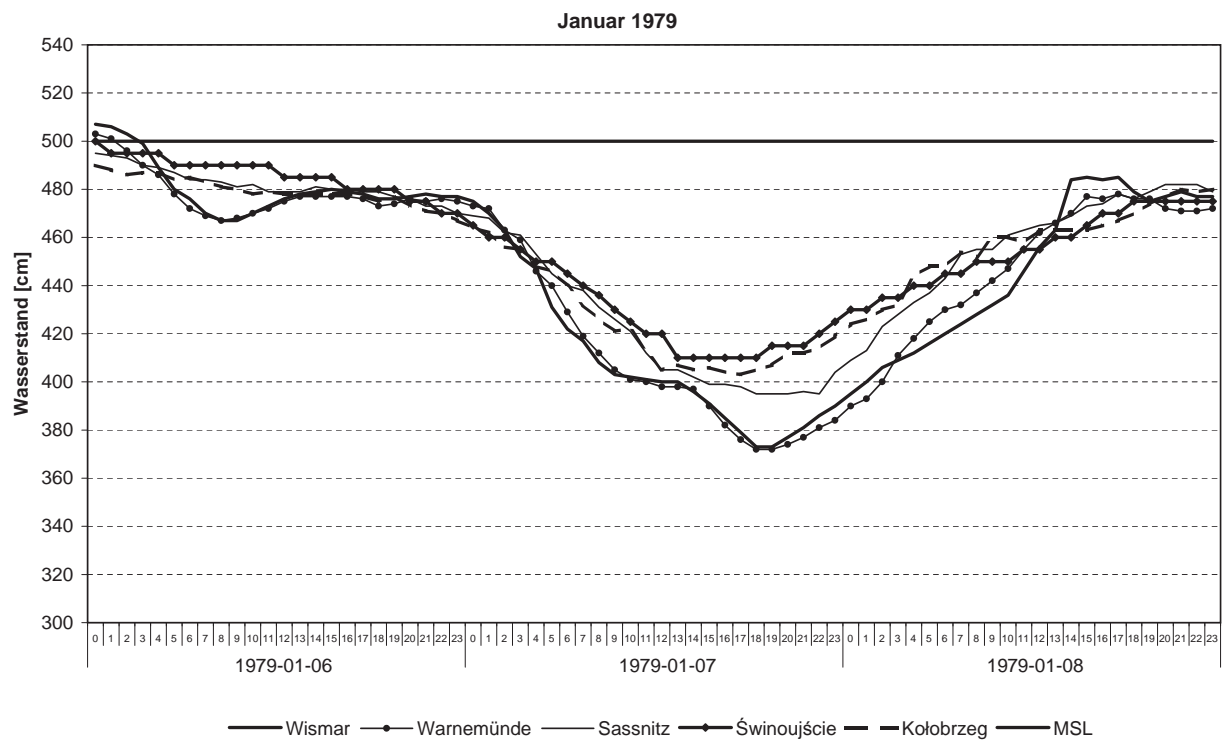


Abb. 5.8 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 6.–8. Januar 1979

5.9 November 1979

Meteorologische Lage

Am 2. und 3. November lagen Skandinavien und die Ostsee zwischen einem von Finnland her in südöstlicher Richtung ziehenden Hochdruckgebiet und einem Tief, das sich langsam von der Norwegischen See her näherte. Der Druckgradient über dem Gebiet verstärkte sich, und in den Mittagsstunden des 3. November lag das gesamte Ostseegebiet unter einer intensiven südlichen bis südöstlichen Luftströmung im Vorfeld des herannahenden Tiefdrucktrogs mit seinem Frontensystem. Der Trog verstärkte sich, als er am Nachmittag des 3. November Skandinavien und das Ostseegebiet erreichte. Bis zum Abend nahm der stürmische südwestliche Wind auf 7–9 Bft zu. Der Südweststurm hielt bis zum Abend des 4. November an, drehte dann auf W und schwächte sich im westlichen Bereich der Küste zeitweise ab, nachdem die Kaltfront die südliche Ostseeküste überquert hatte.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Seit dem 2. November lagen die Wasserstände etwas unterhalb des mittleren Wasserstandes. Ab 3. November mittags ließ der stark ablandige Wind die Pegel langsam fallen. Dieses Mal waren die Tiefststände an den östlichen Pegeln niedriger als an den westlichen. Die Tiefstwerte wurden am Abend des 4. November ungefähr zur selben Zeit gemessen: zwischen 18 und 19 UTC betrug der Pegelstand in Wismar 372 cm, in Warnemünde 381 cm, in Sassnitz 387 cm, in Świnoujście und Kołobrzeg 370 cm.

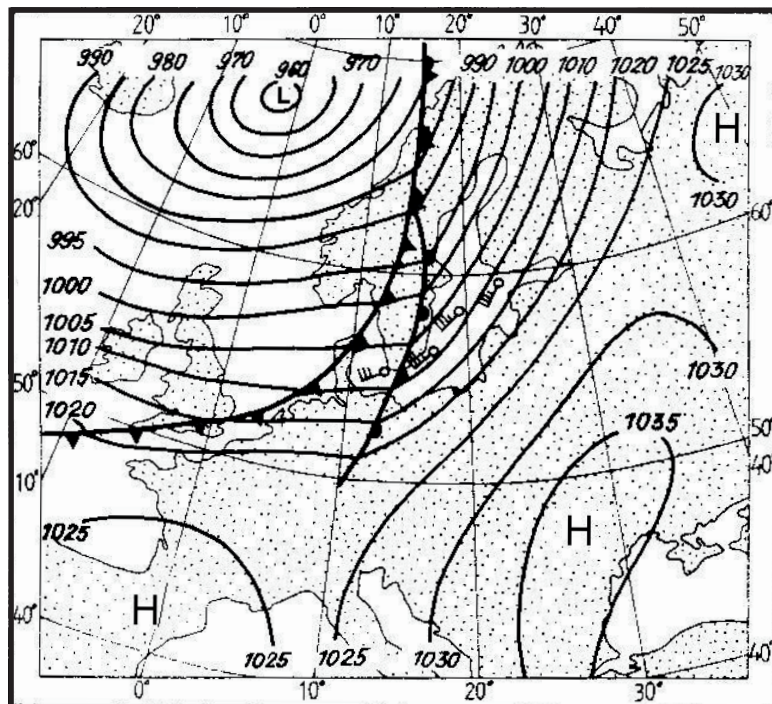


Abb. 5.9 a Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 4. November 1979, 12 UTC

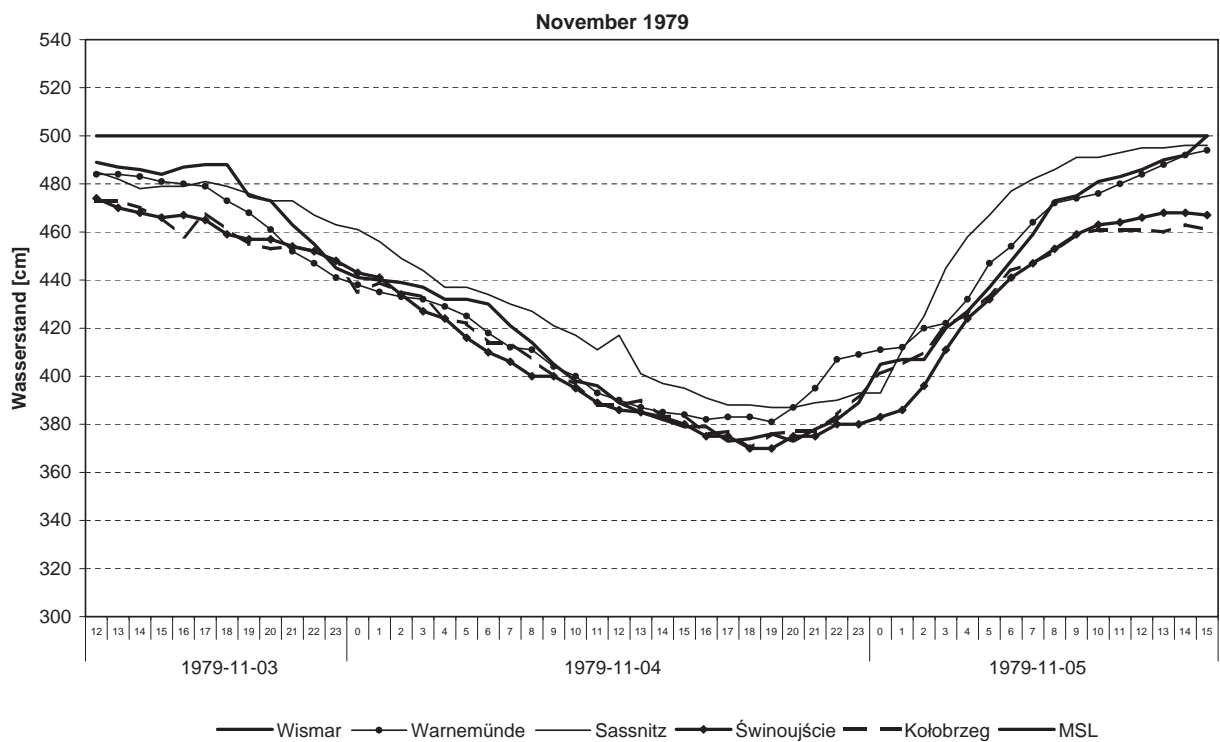


Abb. 5.9 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 3.–5. November 1979

5.10 November 1981

Meteorologische Lage

In der zweiten Novemberhälfte, während über Europa eine westliche Strömung herrschte, zog eine Reihe von Tiefdruckgebieten vom Atlantik her in östlicher Richtung. Eine dieser Störungen bildete sich am Nachmittag des 23. November über England und zog rasch in nordöstlicher Richtung über die Norwegische See und Südnorwegen hinweg, wo der Luftdruck unter 965 hPa fiel. Am 24. November um 18 UTC zog das Tiefdruckzentrum über Stockholm hinweg, drehte in südwestliche Richtung und erreichte um ca. 06 UTC am 25. November den Finnischen Meerbusen, wo es sich allmählich auffüllte.

Der Druckgradient dieses Tiefdruckgebiets war sehr steil. Die über der südwestlichen Ostsee herrschende intensive Luftströmung drehte langsam von SO in den östlichen Becken auf SW in den westlichen Becken und erreichte bereits am 23. November nachts Sturmstärke. In den Morgenstunden des 24. November erreichte der Sturm 9–10 Bft, stellenweise über 10 Bft, während der Druckgradient über der Ostsee immer steiler wurde. Nachts drehte der Sturm über W nach NW, zuerst im Osten des Gebiets am 24. November um ca. 20 UTC, später auch im Westen am Morgen des 25. November zwischen 03 und 06 UTC. Der stark auflandige Wind über der südlichen Ostsee flaute ab, als sich das Tief im südöstlichen Teil des Finnischen Meerbusens allmählich auffüllte.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Am 23. November lagen die Wasserstände noch über dem mittleren Wasserstand, begannen aber bereits am 24. November schnell zu sinken. Ein besonders schneller Rückgang war unter dem Einfluss des zunehmenden und in ablandige Richtung drehenden Sturms im westlichen Bereich der Küste zu beobachten. Während dieser Stunden lag der östliche Teil der Küste im Bereich eines flacheren Druckgradienten mit vorübergehend schwächerem Wind, was sich in den Wasserständen dieses Küstenabschnitts (z. B. in Kołobrzeg) widerspiegelte. Im westlichen Teil der Küste fielen die Wasserstände vom 24. November bis in die Morgenstunden des 25. November (00–04 UTC) unterschiedlich schnell weiter. Nachdem der Sturm in auflandige Richtung gedreht hatte, stiegen die Pegel rasch wieder an. Die Tiefstwerte bei diesem Niedrigwasser waren wie folgt:

Kołobrzeg 450 cm am 24. November 21 UTC;
Świnoujście 409 cm am 24. November 16 UTC;
Sassnitz 403 cm am 24. November 23 UTC;
Warnemünde 368 cm am 25. November zwischen 03 und 05 UTC;
Wismar 331 cm am 25. November um 03 UTC.

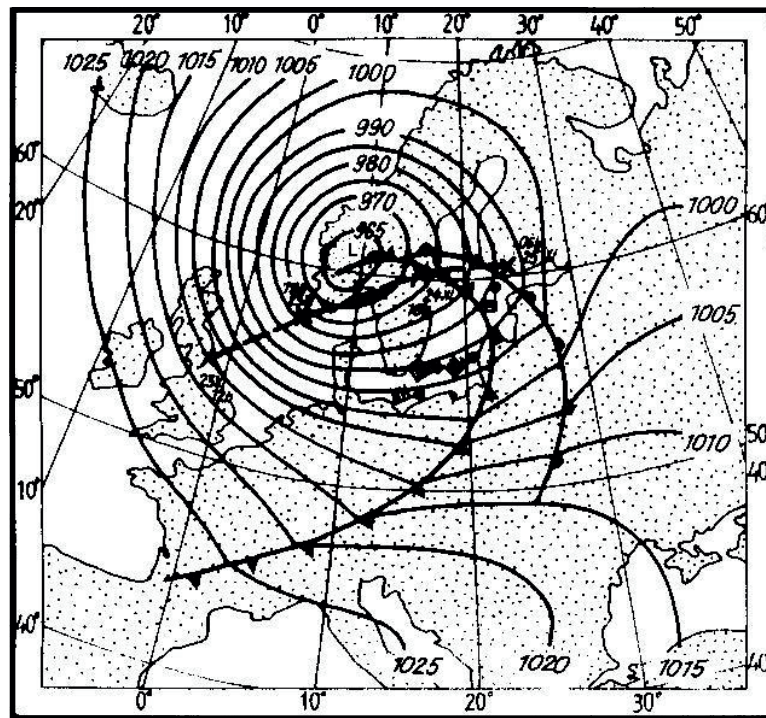


Abb. 5.10 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 23. November 12 UTC bis 25. November 1981, 06 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 24. November 1981, 00 UTC

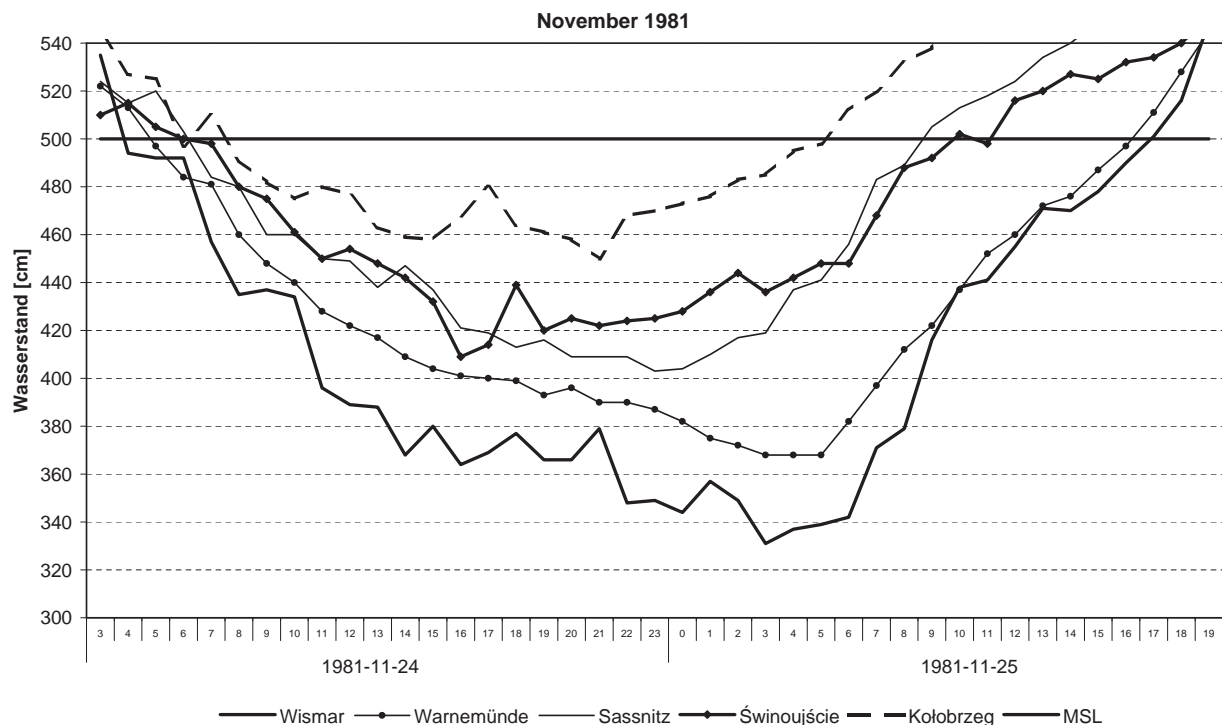


Abb. 5.10 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 24.–25. November 1981

5.11 November 1985

Meteorologische Lage

Am 5. November herrschte über Südschweden und der Ostsee eine südliche Luftströmung entlang der südwestlichen Grenze eines von der Ukraine heranziehenden Hochdruckgebiets.

Der Trog eines Tiefdruckgebiets über Schottland, das sich seit dem 5. November 00 UTC unter Verstärkung nach Osten hin verlagerte, drängte das Hoch nach Nordosten ab.

Während das Hoch sehr langsam abzog, verstärkte sich der Druckgradient in dem herannahenden Trog, besonders im westlichsten Teil der Ostsee. Dadurch nahm der aus südöstlichen bis südlichen Richtungen wehende starke Wind immer mehr zu, vor allem als die Okklusionsfront am Morgen des 6. November über die Ostsee hinwegzog. Der Kern des Tiefs, in dem der Luftdruck bereits unter 960 hPa gefallen war mit weiterhin sinkender Tendenz, lag stationär über den Sunden. Hinter der Okklusion drehte der Wind über SW nach W und erreichte 8–9 Bft, stellenweise 10 Bft. Über der Ostsee flaute der Wind erst ab, als der Kern des Tiefs am Abend des 6. November die Gegend von Stockholm erreichte und sich allmählich auffüllte.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Bis zum Morgen des 6. November lagen die Wasserstände im Bereich des mittleren Wasserstandes. Unter dem Einfluss des zunehmenden ablandigen Sturms aus südlicher Richtung begannen sie rasch zu fallen. Nach Drehung des Winds in küstenparallele Richtung sanken die Wasserstände dann langsamer. Am 6. November nachts blieben die flachen Minima 7–9 Stunden bestehen, bis der Wind am Morgen des 7. November auf W-NW drehte (um 00 UTC im westlichen Teil der Küste, und um 03 UTC weiter östlich). Die Pegel stiegen wieder auf den mittleren Wasserstand. Die niedrigsten Wasserstände wurden zwischen 20 und 21 UTC am 6. November gemessen: Wismar 377 cm, Warnemünde 389 cm, Sassnitz 420 cm und Świnoujście 415 cm und Kołobrzeg 457 cm um 00 UTC am 7. November.

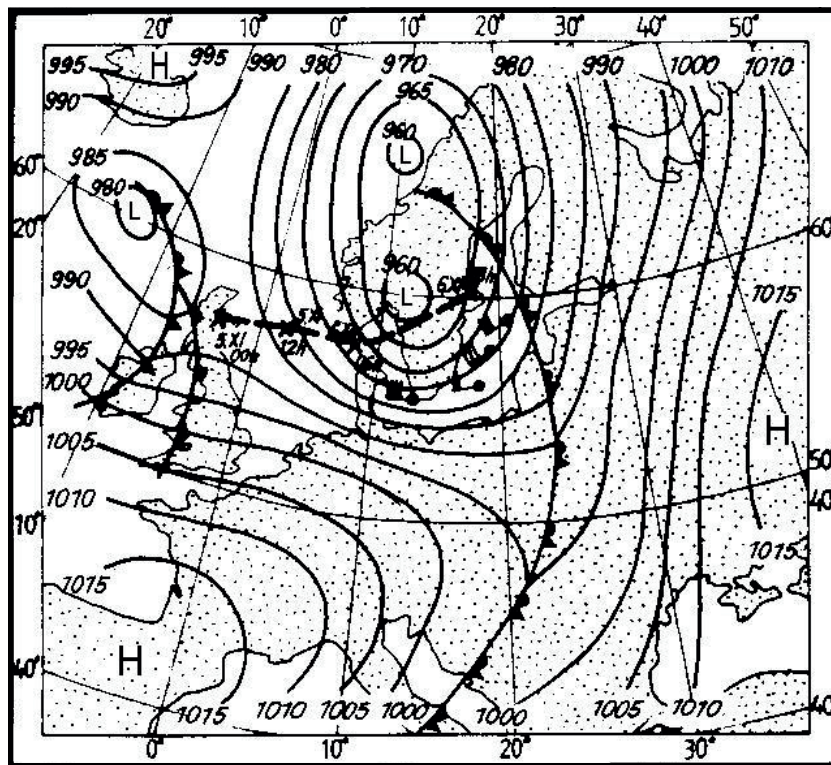


Abb. 5.11 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 5. November 00 UTC bis 6. November 18 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 6. November 1985, 12 UTC

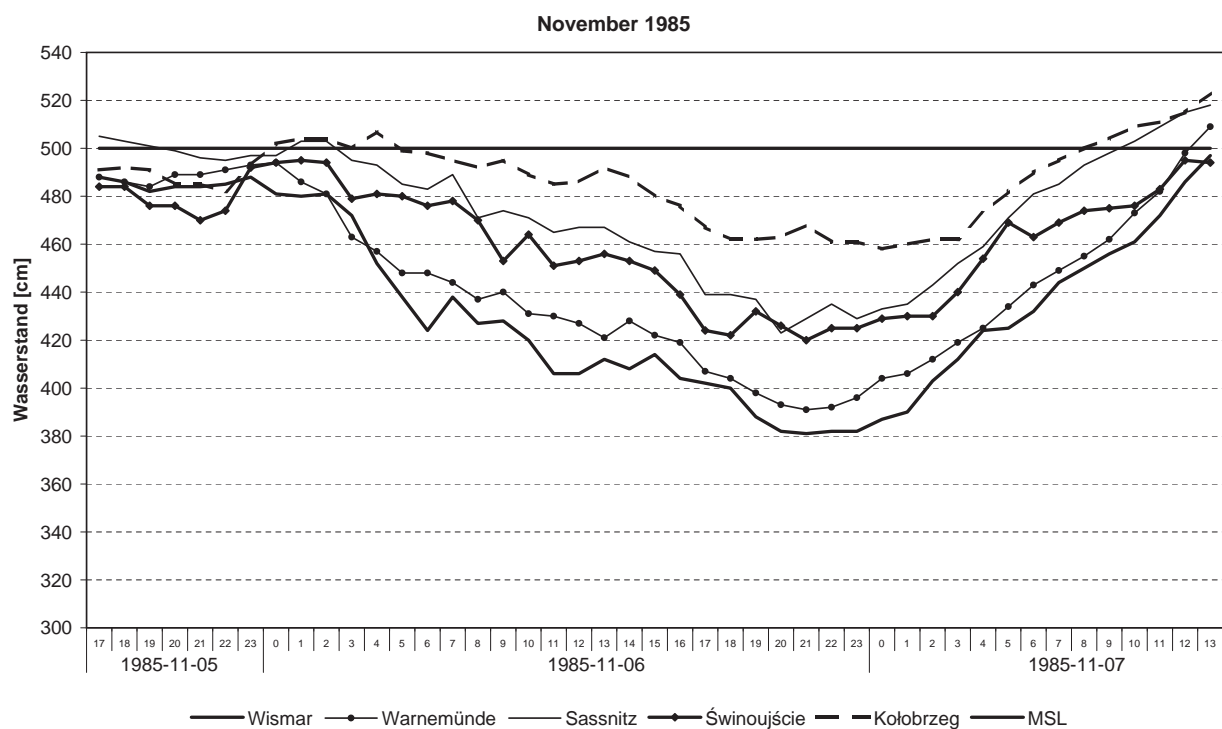


Abb. 5.11 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 6. November 1985

5.12 Januar 1990

Meteorologische Lage

Ein südöstlich von Grönland entstandenes aktives Tiefdruckgebiet zog am 24. Januar in Richtung Osten und erreichte Nordirland am 25. Januar. Während es weiter in östlicher Richtung zog, fiel der Luftdruck in seinem Kern stetig weiter und erreichte seinen tiefsten Wert von 949 hPa am 25. Januar um 18 UTC. Am 26. Januar mittags lag der Tiefdruckkern über dem südlichen Skandinavien und am 27. Januar morgens über Südfinnland (Abb. 5.12 a).

Vor dem von den britischen Inseln kommenden und in Richtung Südfinnland ziehenden Tiefdruckgebiet lag ein Feld mit einem sehr steilen Druckgradienten. Das Tief war anfangs von mäßigen südwestlichen Winden geprägt, die hinter der Kaltfront zeitweise drehten und später Sturmstärke erreichten. Am Nachmittag des 25. Januar, während sich über dem Ärmelkanal und an der südlichen Nordseeküste ein Orkan aus südwestlichen Richtungen mit Windstärken von 11–12 Bft entwickelte, herrschte an der Südwestküste von Norwegen ein Oststurm mit Windstärken um 9–10 Bft. Hinter der Kaltfront tobte der Orkan in den Frühstunden des 26. Januar über Ostengland hinweg (NW-W-Winde, 9–10 Bft) sowie über die südliche Nordsee und ihre Küsten (SW-Orkan, 12 Bft), Dänemark (SW-Orkan rückdrehend, 10–11 Bft) und über die westliche und südliche Ostsee (SW-Orkan, 9–11 Bft, leicht drehend). Erst in den späten Abendstunden des 26. Januar begann der Sturm abzuflauen, erreichte aber an den südlichen Ostseeküsten am 27. Januar morgens in Böen immer noch stellenweise 7–8 Bft.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

In den ersten Stunden des 26. Januar bewegten sich die Wasserstände etwas oberhalb des mittleren Wasserstandes. Schon bald jedoch, zwischen 03 und 07 UTC, während das Frontensystem rasch über das Gebiet hinwegzog, bewegten sich starke Störungen in Richtung des W-SW-Orkans entlang der südwestlichen Küste. Die erste Reaktion darauf war ein vorübergehendes schnelles Absinken der Wasserstände. Zwischen 03 und 04 UTC sank der Wasserspiegel in Wismar um ca. 50 cm/h und in Świnoujście um ca. 35 cm/h (Abb. 5.12 b). An den anderen Pegeln lag dieses Ereignis zwischen den Ablesungen. Es folgte ein kurzfristiger Anstieg der Pegel zwischen 04 und 07 UTC, als hinter der Kaltfront der Wind drehte. In den folgenden Stunden drehte der küstenparallele Orkan wieder in ablandige Richtung, und die Wasserstände sanken auf sehr flache Minima: im westlichen Bereich der Küste zwischen 17 und 22 UTC, und weiter östlich zwischen 17 UTC am 26. Januar und 02 UTC am 27. Januar. Der Tiefstwert von 335 cm wurde am 26. Januar um 16 UTC in Wismar registriert, wo die Wasserstände 6 Stunden lang unter 340 cm lagen. Am 26. Januar um 19 UTC betrug der Tiefstwert in Warnemünde 375 cm, um 16 UTC in Sassnitz 418 cm, um 19 UTC in Świnoujście 415 cm und um 17 UTC in Kołobrzeg 461 cm.

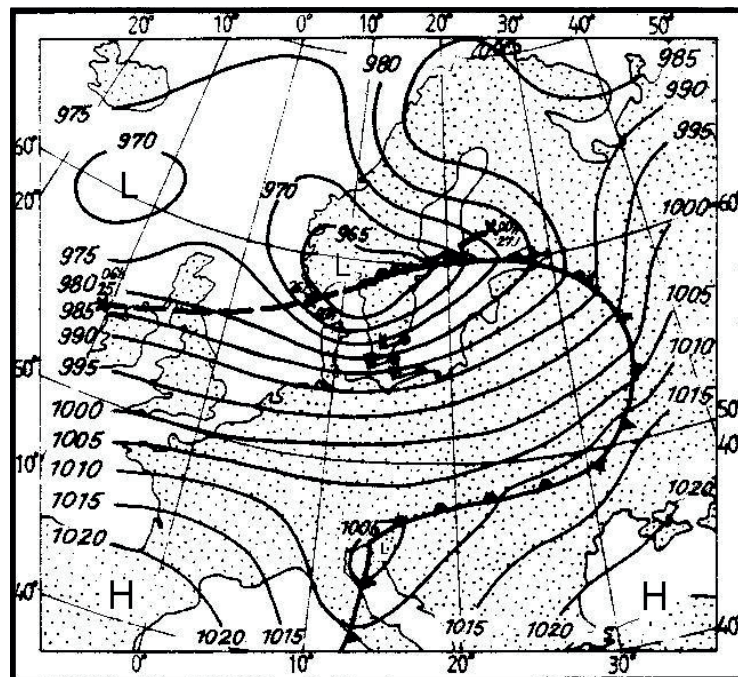


Abb. 5.12 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 25. Januar 00 UTC bis 27. Januar 00 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 26. Januar 1990, 12 UTC

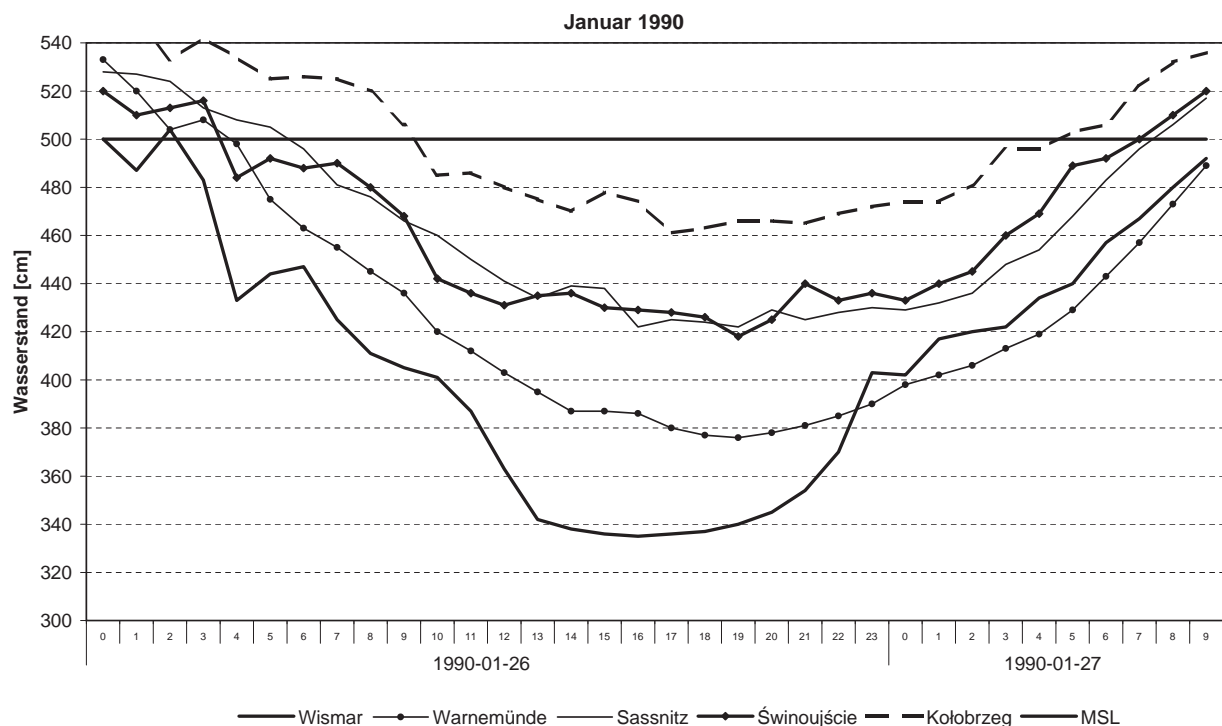


Abb. 5.12 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 26.–27. Januar 1990

5.13 Februar 1990

Meteorologische Lage

Europa befand sich seit mehreren Tagen unter dem Einfluss einer westlichen bis südwestlichen Luftströmung, die über der Ostsee auffrischte und zeitweise Sturmstärke erreichte.

Am Morgen des 26. Februar erschien westlich von Schottland ein aktives Tiefdruckgebiet mit einem Luftdruck von 963 hPa, das rasch ostwärts zog und bereits mittags den Eingang zum Skagerrak erreicht hatte. Es verlangsamte sich und erreichte Südschweden am selben Tag gegen 18 UTC, die Åland-Inseln erst am 27. Februar um ca. 06 UTC. Hier fiel der Druck in dem nun quasi stationären Tiefdruckgebiet am 27. Februar um 09 UTC auf seinen tiefsten Stand von 939 hPa. Trotz seiner Langsamkeit wies das Tiefdruckgebiet eine außerordentlich hohe Dynamik auf. Ihm voran ging ein großes Luftdruckfeld mit stark negativer Tendenz, stellenweise mehr als -13 hPa/3h . Das Eindringen arktischer Kaltluft am südlichen Rand des Tiefs hinter der Kaltfront ließ den Luftdruck wieder ansteigen. Die positive Tendenz hinter der Kaltfront erreichte z. T. über 15 hPa/3h . Infolgedessen bildete sich über einem Gebiet, das sich vom Ärmelkanal über die südliche Nordseeküste und ganz Jütland bis zur Ostsee erstreckte, ein sehr steiler Druckgradient. Das Windfeld entwickelte sich entsprechend den Luftdruckänderungen. Ab 26. Februar mittags frischte der Südwestwind auf und erreichte im Kattegat und über Dänemark mehr als 8–9 Bft. Am Nachmittag desselben Tages breitete sich der schwere Sturm nach Osten hin aus: in den dänischen Sunden und im südlichen Teil der Ostsee nahm er auf 11 Bft zu und wurde mit einströmender arktischer Kaltluft zunehmend böig. Am Morgen des 27. Februar stürmte es immer noch unvermindert, jetzt aber küstenparallel aus westlichen, leicht auflandigen Richtungen. Der Sturm breitete sich über das gesamte Gebiet der Ostsee aus: vom Kattegat bis Palanga und von Łeba bis Gotska Sandön.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Am 26. Februar schwankten die Wasserstände bei zunehmendem südwestlichem Sturm um den mittleren Wasserstand. Erst spät am Abend begann das Wasser zu fallen: am schnellsten in Wismar, am westlichsten Teil der Küste gelegen, und nach Osten hin langsamer. Die sinkenden Wasserstände schwankten weiterhin entsprechend den wechselnden Windrichtungen des böigen ablandigen bis küstenparallelen Sturms. Alle Küstenpegel verzeichneten ungleichmäßig fallende Wasserstände, so dass die Tiefststände an den einzelnen Stationen zu unterschiedlichen Zeiten registriert wurden. Die Kurvenschwankung war flach. In Wismar z. B. lag zwischen zwei Minima eine ganze Reihe sehr niedriger Werte: das erste Minimum von 395 cm wurde um 02 UTC gemessen, und das zweite mit 394 cm um ca. 08 UTC. Zwischen diesen beiden Tiefstwerten stiegen die Wasserstände niemals über 405 cm. In Warnemünde betrugen die Höchstwerte in einem siebenstündigen Zeitraum 414 cm um 03 UTC und 412 cm um 10 UTC, wobei der Tiefstwert von 398 cm um 07 UTC gemessen wurde.

In Sassnitz wurde der Tiefststand von 403 cm ungefähr um 04 UTC gemessen, in Świnoujście 407 cm um 03 UTC, und in Kołobrzeg 443 cm um ca. 05 UTC. Die Wasserstände stiegen erst wieder am 27. Februar ab 10 UTC gleichmäßig an und erreichten abends fast den mittleren Wasserstand.

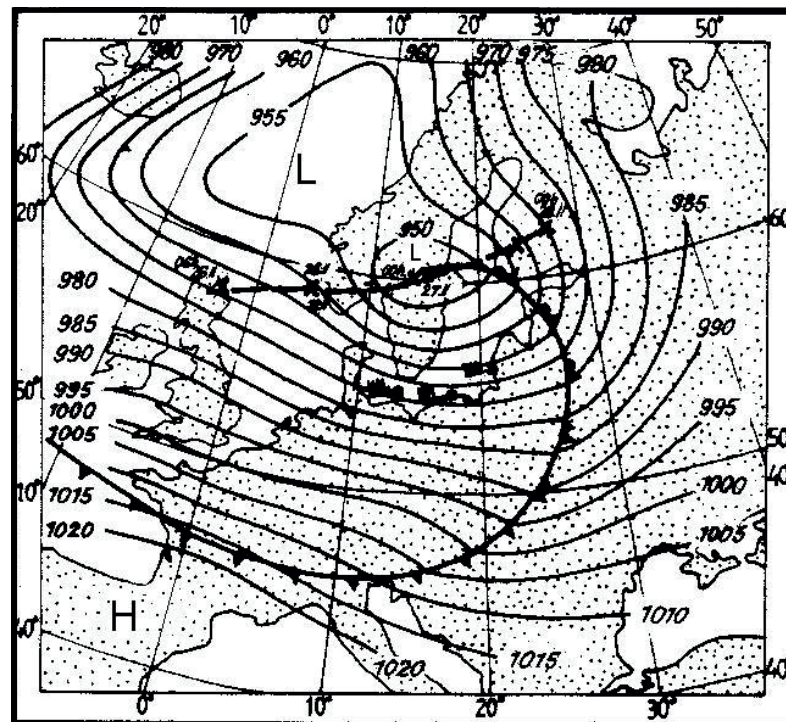


Abb. 5.13 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 26. Februar 00 UTC bis 28. Februar 00 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 27. Februar 1991, 00 UTC

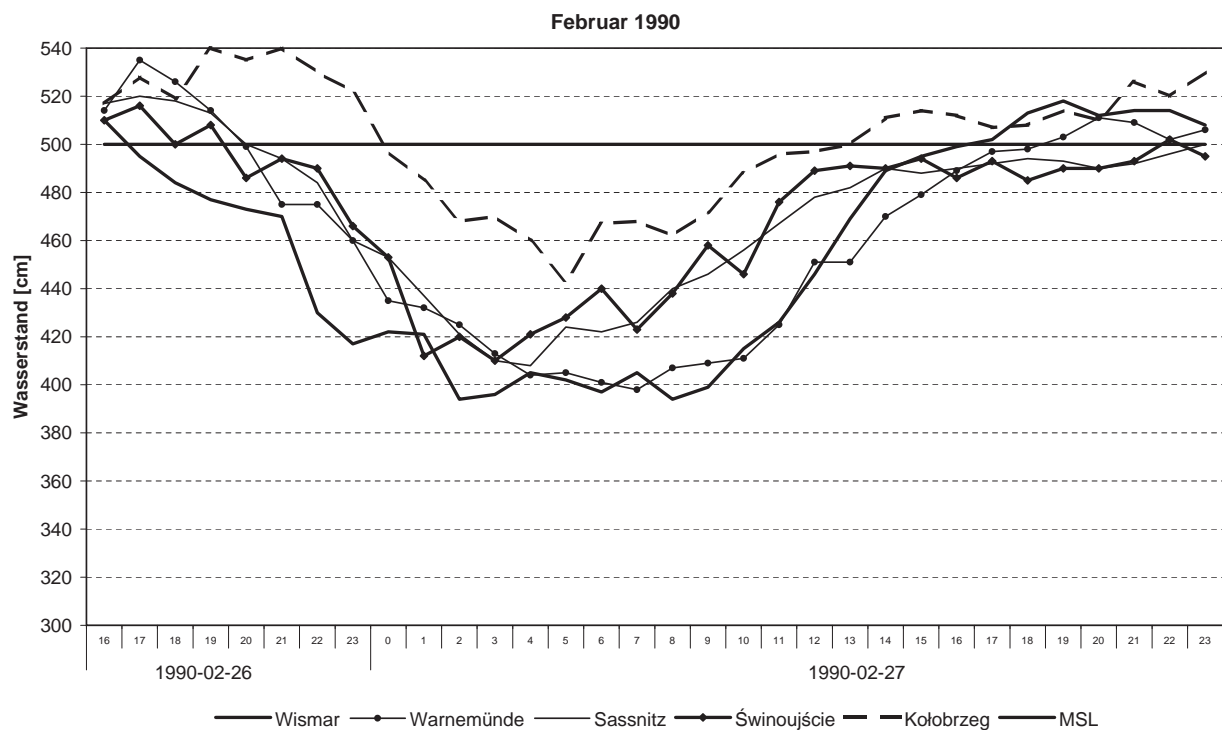


Abb. 5.13 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 26.–27. Februar 1990

5.14 Januar 1993

Meteorologische Lage

Während ein Hoch über dem südlichen Europa lag, befand sich Nordeuropa unter dem Einfluss eines Tiefs. Am Morgen des 13. Januar näherte sich den Britischen Inseln von Südwesten her ein über dem Atlantik entstandenes aktives Tiefdruckgebiet. Das sich rasch verstärkende Tief und seine Fronten zogen in nordöstliche Richtung und erreichten in der Nacht das Kattegat. In den Morgenstunden des 14. Januar überquerte das Tief Südschweden und die zentrale Ostsee, wo es sich verlangsamte und Estland um 09 UTC erreichte. Am selben Tag um 15 UTC lag der Kern des Tiefs über St. Petersburg, von wo aus es weiter nach Osten zog und sich über dem Gebiet südlich des Onegasees auffüllte. Am 13. Januar herrschte über der gesamten südlichen Ostsee starker westlicher, nach SW rückdrehender Wind. Am 14. Januar morgens, während der Kern des Tiefdruckgebiets und seine Fronten über die Ostsee hinwegzogen, entwickelte sich der stürmische Wind zu einem schweren Sturm, der zwischen 02 und 06 UTC über der südlichen Ostseeküste Orkanstärke erreichte. Bevor der Trog des Tiefs am Morgen des 14. Januar den Ostseeraum verließ, bewirkte er eine vorübergehende Ablenkung des Sturms in west-nordwestliche Richtung (Abb. 5.14 a), wodurch der immer noch starke und böige Wind rückdrehte und sehr langsam abflaute.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

An den Tagen vor dem Niedrigwasser führten starke südwestliche Winde zu wesentlich niedrigeren Wasserständen als normal. Am Pegel Wismar z. B. wurden am 13. Januar etwa 6 Stunden lang Pegel unterhalb von 420 cm gemessen. In der darauffolgenden Nacht sanken die Wasserstände (zwischen 00 und 03 UTC) zuerst leicht, bedingt durch Störungen und die im Vorfeld der herannahenden Luftdruckfronten herrschende Windrichtung und -geschwindigkeit, um dann zwischen 02 und 06 UTC vorübergehend rasch wieder anzusteigen. Der höchste Wasserstand von ca. 560 cm wurde am Pegel Kołobrzeg gemessen, in Warnemünde betrug er eine Stunde früher 530 cm, und in Świnoujście wurden um 05 UTC ca. 535 cm gemessen.

Dem Pegelanstieg folgte ein viel stärkerer Pegelrückgang: in Świnoujście fiel der Wasserstand in 4 Stunden um 130 cm, in Kołobrzeg in 3 Stunden um 120 cm und in Wismar in 6 Stunden um 110 cm. Der Rückgang hörte abrupt auf, als der Wind in leicht auflandige Richtung drehte. Die folgenden Tiefststände wurden gemessen: Kołobrzeg 439 cm um 08 UTC, Świnoujście 400 cm um 09 UTC, Wismar 367 cm um 10 UTC, Sassnitz 386 cm um 14 UTC und 404 cm in Warnemünde. Nach Erreichen der Tiefststände stiegen die Wasserstände wieder rasch an, allerdings äußerst ungleichmäßig wegen der sehr veränderlichen Luftströmung.

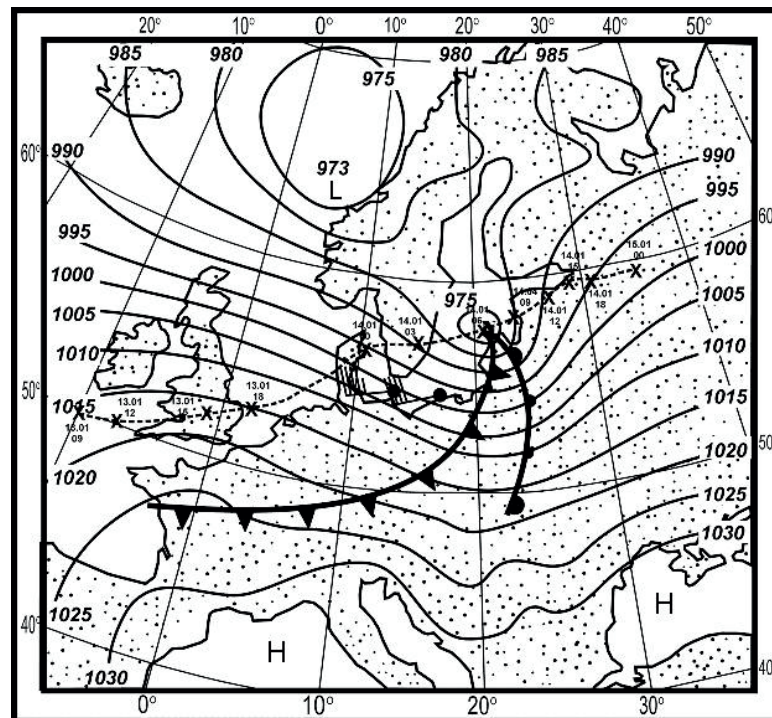


Abb. 5.14 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 13. Januar 09 UTC bis 15. Januar 1993, 00 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 14. Januar 1993, 06 UTC

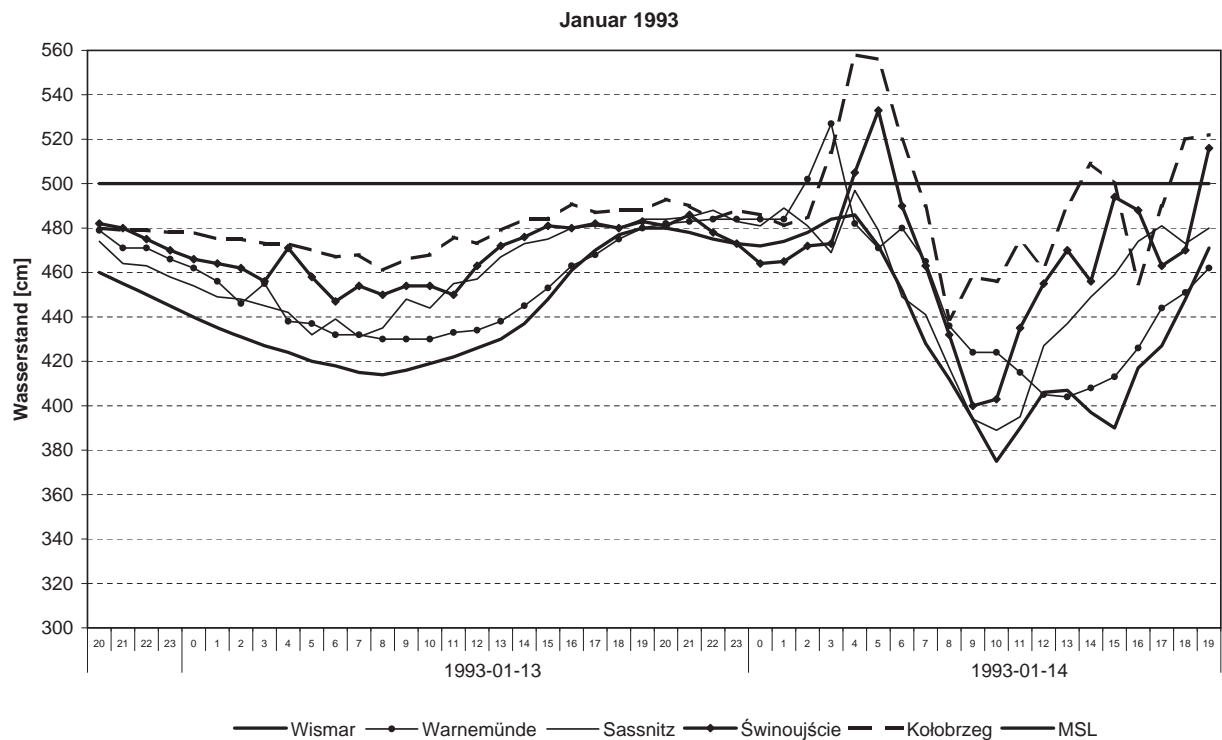


Abb. 5.14 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 13.-14. Januar 1993

5.15 Februar 1996

Meteorologische Lage

Am 15. Februar zogen zwei Tiefdruckgebiete in Richtung Ostsee. Das erste Tief aus Richtung Nordnorwegen zog am Morgen des 16. Februar über Finnland hinweg in südöstlicher Richtung, während es sich auffüllte. Das andere Tief näherte sich unter stetiger Verstärkung von Island her und überquerte die Norwegische See. Sein Kern überquerte Südkandinavien und erreichte am Abend des 16. Februar mit einem Luftdruck von 974 hPa das Ostseegebiet. Am 17. Februar morgens zog der Tiefdrucktrog mit seinem Frontensystem über Gotland hinweg bis Lettland, drehte dann ostwärts und füllte sich auf.

Am 15. Februar entstand im Bereich des steilen Druckgradienten, der das erste der beiden Tiefs kennzeichnete, ein Weststurm der Stärke 9 Bft, der schon bald auf SW drehte. Im westlichen Teil der Küste wurden z. T. über 9 Bft gemessen. Am Morgen des 16. Februar, als der Tiefdrucktrog die Ostsee erreicht hatte, drehte der Sturm hinter der Kaltfront zeitweise W-NW, zuerst im östlichen und später im westlichen Teil der Küste. Diese Windrichtung herrschte im östlichen Teil der Küste bis mittags, im westlichen Teil bis zum Nachmittag. In den Nachmittagsstunden des 16. Februar, während der Tiefdrucktrog mit seinem Frontensystem über die Ostsee hinwegzog, drehte die Richtung des stürmischen Winds zwischen W (zeitweise NW) und SW. Hinter der Okklusionsfront, die das Gebiet am 17. Februar gegen Mittag überquerte, drehte der Wind dann NW bis NO.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

An den Tagen vor dem Niedrigwasser verzeichneten die Pegel niedrige Wasserstände um 460 cm, die der südwestliche ablandige Sturm am 15. Februar weiter absinken ließ. Die Tiefststände wurden dann um Mitternacht gemessen: 409 cm in Kołobrzeg, 405 cm in Świnoujście und 383 cm in Sassnitz, alle zwischen 22 und 23 Uhr am 15. Februar; weiter westlich, in Wismar, fiel der Pegel am 16. Februar um 01 UTC auf 363 cm und um 02 UTC in Warnemünde auf 379 cm. Der sich anschließende Wiederanstieg der Wasserstände wurde durch westlich drehende Winde beschleunigt. Bereits am 16. Februar mittags drehte der Wind bei Annäherung des anderen Tiefdrucktrogs zurück, woraufhin die Wasserstände wieder sanken. Im östlichen Teil der Küste fielen die Pegel zuerst, schon ab 13 UTC, und weiter westlich dann ab 17 UTC. Die Tiefststände folgten demselben zeitlichen Muster: der Tiefststand von 425 cm in Sassnitz wurde am 17. Februar um 04 UTC gemessen; in Warnemünde und Wismar betrugen die Minima um ca. 08 UTC knapp unter 440 cm. Im östlichen Teil der Küste waren die Tiefststände kaum zu erkennen, weil der Wind zwischen 03 und 04 UTC auf NW-NO drehte und die Wasserstände sofort wieder steigen ließ.

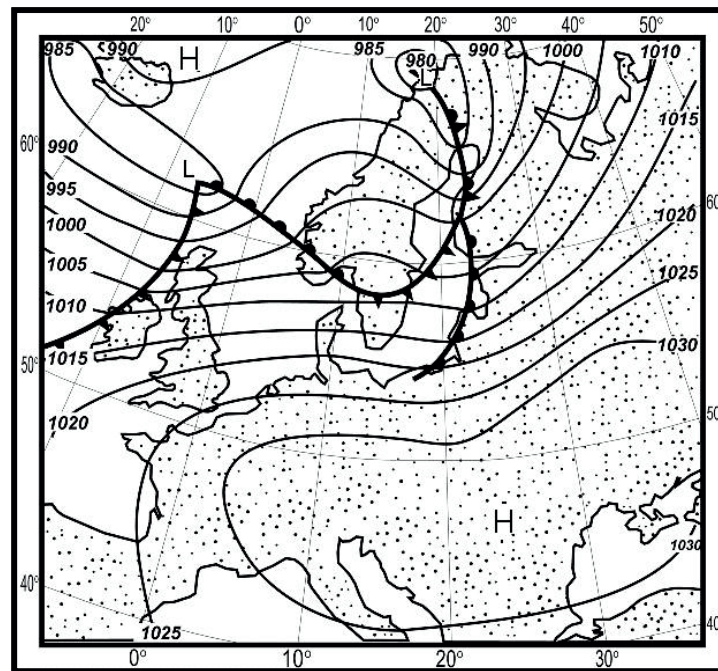


Abb. 5.15 a Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 16. Februar 1996, 00 UTC

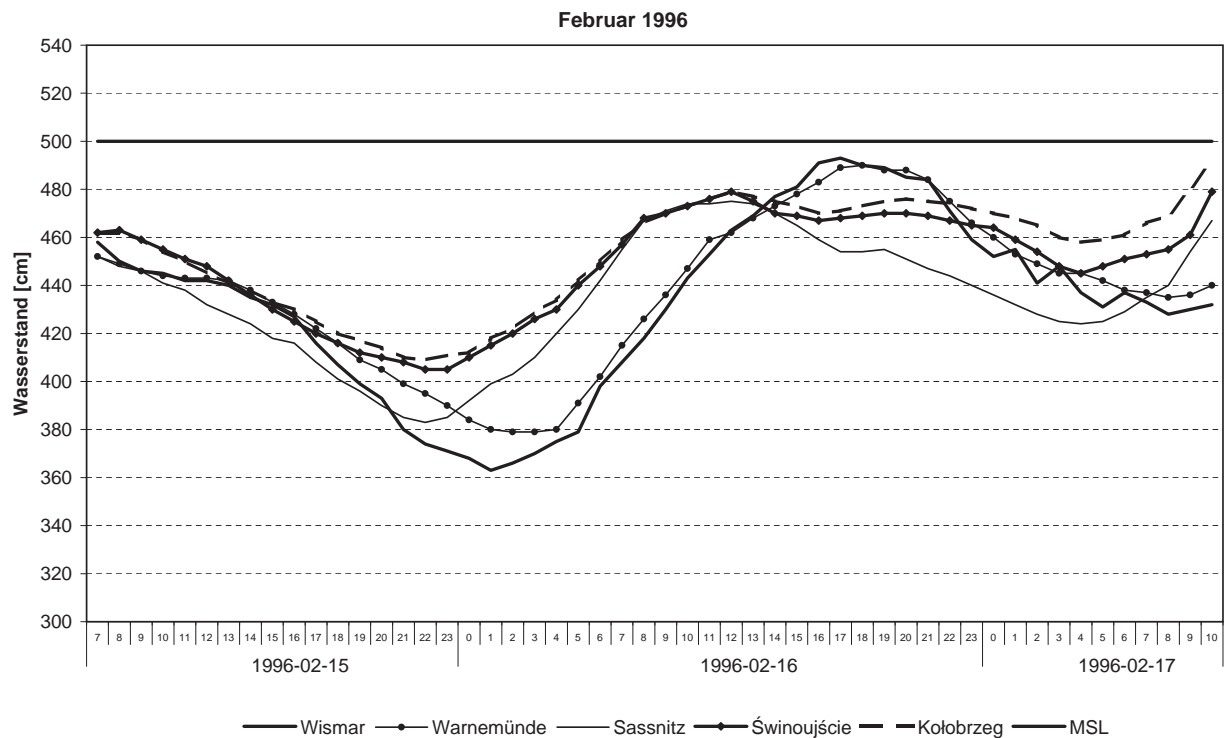


Abb. 5.15 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 15.–17. Februar 1996

5.16 Dezember 1999

Meteorologische Lage

Ende November, während ein stationäres Hoch über Südeuropa lag, zog eine Folge von Tiefdruckgebieten über den Norden Europas hinweg. Dies führte über der nördlichen Ostsee zu sehr starken, nur vorübergehend abflauenden Winden.

Am 1. Dezember zog ein sich verstärkendes Tiefdruckgebiet in östlicher Richtung über das mittlere Skandinavien und den Bottnischen Meerbusen hinweg. Der Luftdruck im Kern des Tiefs betrug 953 hPa, als es um 09 UTC Finnland erreichte. Das Tiefdruckgebiet bewegte sich dann weiter in Richtung Weißes Meer und füllte sich auf. Bereits in der Nacht des 30. November führte der Tiefdrucktrog mit seinen Fronten zu einem südlichen bis südwestlichen Sturm mit Windstärken über 8 Bft. Am Nachmittag des 1. Dezember drehte der Wind hinter der Kaltfront auf W-NW und wurde zunehmend böig (Abb. 5.16 a). Am 2. Dezember und in den Morgenstunden des 3. Dezember drehte der Wind zurück und flaute auf 7–5 Bft ab. Inzwischen war am 3. Dezember nach Mitternacht ein weiteres aktives Tiefdruckgebiet mit einem Kerndruck von 995 hPa nordwestlich von Irland aufgetaucht. Es zog rasch in östlicher Richtung über Schottland und die Nordsee hinweg und erreichte mit einem Druck von nur noch 953 hPa den Skagerrak am 3. Dezember um 21 UTC. Das Tiefdruckzentrum wurde langsamer und kam über Dänemark zum Stillstand, wo es sich weiter verstärkte. Es zog anschließend über Südschweden und die Ostsee hinweg und begann sich erst aufzufüllen, als es auf seiner Zugbahn nach Osten am 4. Dezember um 06 UTC die Küste von Lettland erreicht hatte (Abb. 5.16 b).

Auf seinem ganzen Weg über die Nordsee, Skandinavien und die Ostsee wurde das Tief von orkanartigem Wind begleitet. Bei Durchzug des Frontensystems entstand ein Süd-Südweststurm. Nach Abzug der Kaltfront am 4. Dezember gegen Mittag drehte der Sturm über W nach NW und wurde erheblich böiger. Über der gesamten südwestlichen Ostsee von den Sunden bis zur Küste von Kołobrzeg erreichte der Sturm Windstärken von 9–10 Bft, stellenweise auch darüber. Im östlichen Teil der Küste war der Sturm weniger heftig. Erst am Abend des 4. Dezember ließ der Sturm langsam nach.

Am 5. Dezember herrschte im Ostseegebiet mäßiger Westwind, der später wechselhaft wurde. Am 6. Dezember näherte sich von den Britischen Inseln her ein weiteres großes Tiefdruckgebiet. Am Morgen des 6. Dezember drehte der Wind auf SW zurück und nahm über der gesamten Ostsee auf 8–9 Bft zu, in Böen 10 Bft. Um Mitternacht am 7. Dezember flaute der Wind ab und drehte langsam (Abb. 5.16 c).

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Gegen Ende November schwankten die Wasserstände im westlichen Teil der Ostseeküste um den mittleren Wasserstand. Am Nachmittag des 30. November begannen die Wasserstände infolge stark ablandiger Winde zu fallen. Die Pegel blieben bis in die Frühstunden des 1. Dezember, als der Wind abflaute und in auflandige Richtung drehte, auf ihren Tiefstständen. Die Minima wurden zuerst im östlichen Teil der Küste erreicht: in Kołobrzeg 416 cm zwischen 02 und 06 UTC, Świnoujście 385 cm um 08 UTC, Sassnitz 377 cm um ca. 03 UTC, Warnemünde 359 cm zwischen 9 und 10 UTC und Wismar 332 cm um 09 UTC.

Der Sturm vom 3./4. Dezember führte zu noch niedrigeren Minima. Im westlichen Teil der Küste begannen die Pegel früher als im Osten zu fallen, weil der orkanartige ablandige Wind an der westlichen Küste länger anhielt. Wie immer verzeichneten die westlichen Pegel die tieferen Minima: 309 cm bzw. 333 cm in Wismar und Warnemünde zwischen 09 und 10 UTC, 364 cm in Sassnitz und 379 cm in Świnoujście zwischen 07 und 08 UTC. In Kołobrzeg, wo der Wind schwächer war und früher drehte, wurde der Tiefstand von 456 cm zwischen 05 und 06 UTC erreicht.

Diesen beiden sehr abrupt fallenden Wasserständen folgte kaum zwei Tage später ein dritter Tiefstand. Als der mäßige westliche Wind, der am 5. Dezember abgeflaut war und in wechselhafte Richtungen gedreht hatte, am Morgen des 6. Dezember wieder nach SW rückdrehte und auf 8–9 Bft zunahm, reagierten die Wasserstände unmittelbar und begannen am 6. Dezember gegen Mittag zu fallen. Der Tiefstand in Wismar war ca. 380 cm, in Warnemünde knapp 400 cm. An den anderen Pegeln wurden Wasserstände zwischen 415 cm und 450 cm gemessen. Der nachfolgende Wiederanstieg der Pegel wurde durch leicht drehende Winde unterstützt.

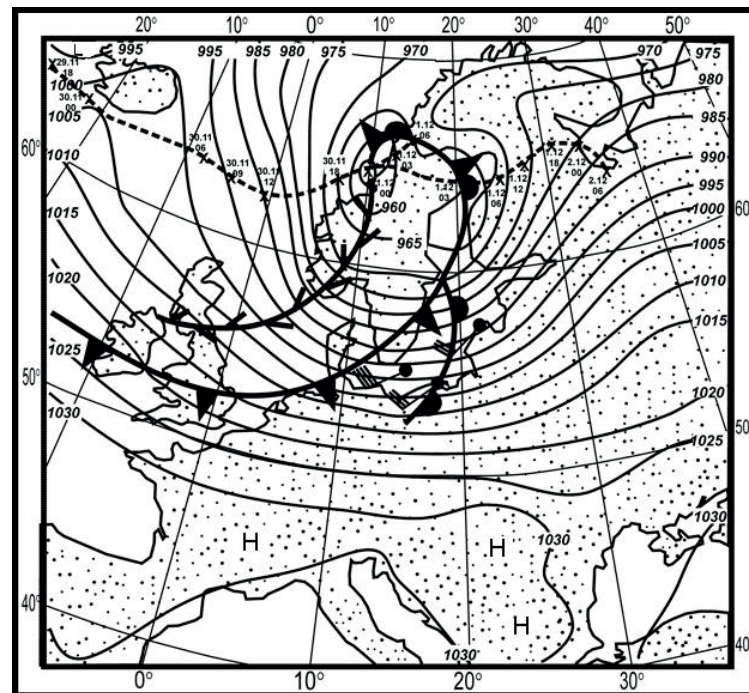


Abb. 5.16 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 29. November 18 UTC bis 2. Dezember 06 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 1. Dezember 1999, 00 UTC

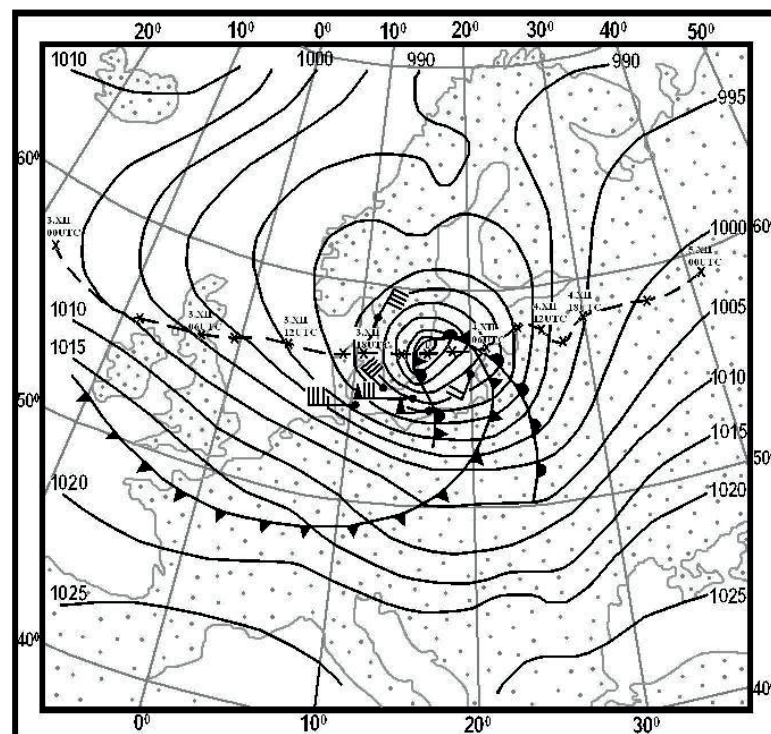


Abb. 5.16 b Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 3. Dezember 00 UTC bis 5. Dezember 00 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 4. Dezember 1999, 00 UTC

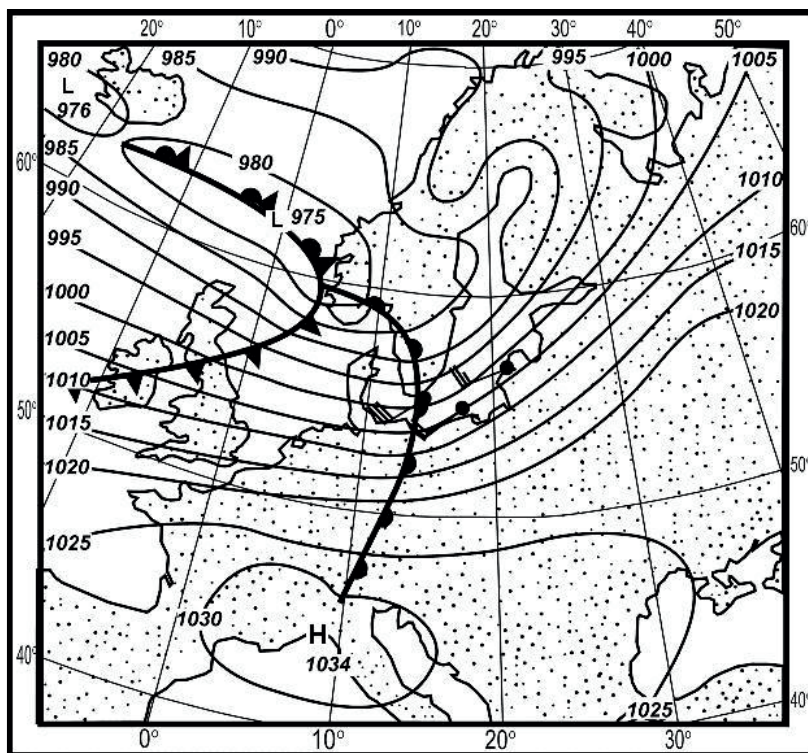


Abb. 5.16 c Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 6. Dezember 1999, 18 UTC

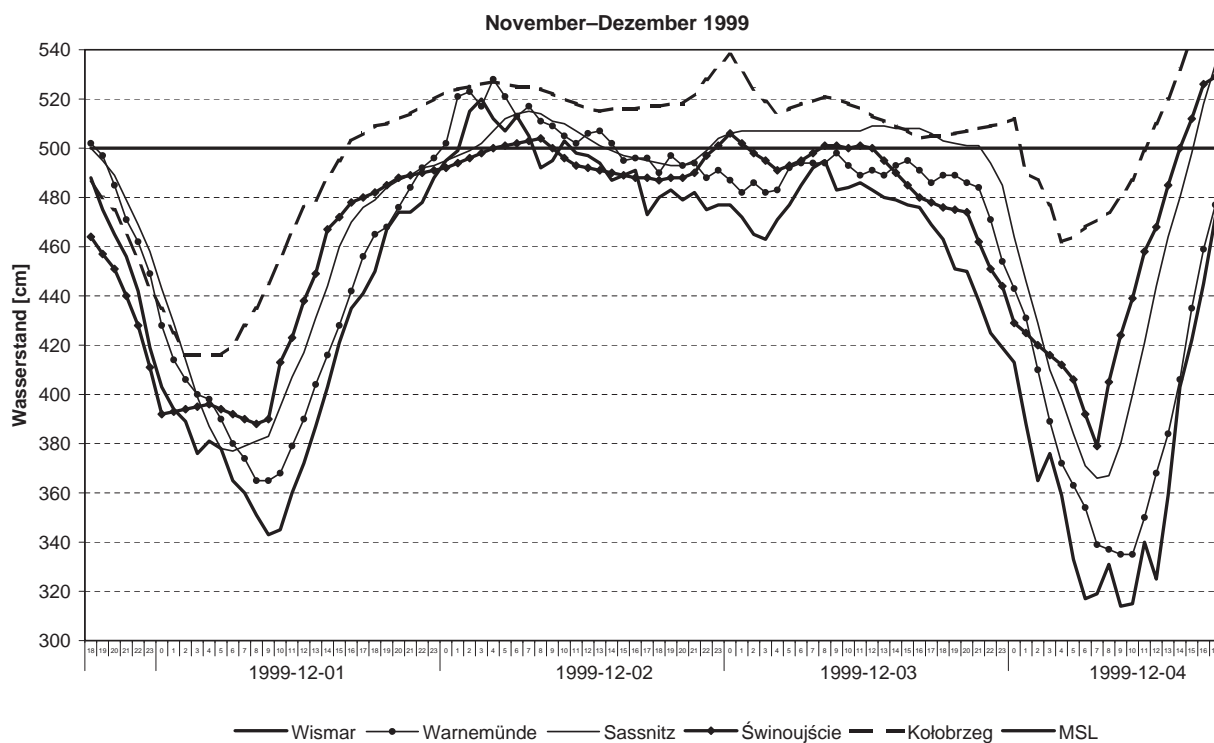


Abb. 5.16 d Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 1.–4. Dezember 1999

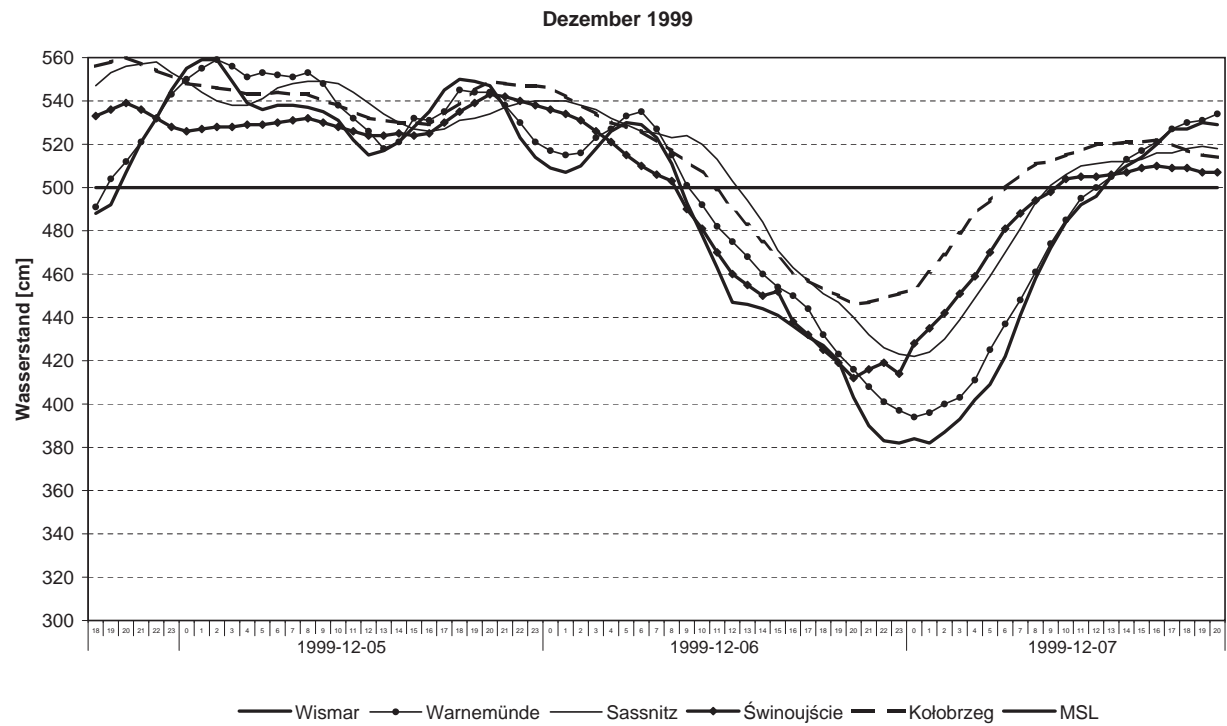


Abb. 5.16 e Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 6.–7. Dezember 1999

5.17 November 2001

Meteorologische Lage

An den Tagen vor dem Niedrigwasser herrschte über der Ostsee eine nordwestliche Luftströmung, als sich nahe der Südostküste von Grönland ein Tiefdruckgebiet bildete. Das Zentrum des Tiefs zog erst ostwärts und dann rasch südostwärts in Richtung Nordnorwegen.

Anschließend überquerte es den nördlichen Teil des Bottnischen Meerbusens und bis zum Abend des 15. November das Gebiet von Zentralfinland, um seinen Weg in südöstliche Richtung fortzusetzen. Es überquerte den Ladoga-See und füllte sich südöstlich davon am 16. November mittags auf.

Während der Trog dieses Tiefdruckgebiets über Skandinavien und die Ostsee hinwegzog, drehten die im westlichen Ostseeraum herrschenden mäßigen nördlichen Winde über W nach SW und nahmen an Stärke zu. Am Morgen des 15. November erreichte die Windstärke im gesamten Ostseeraum 7 Bft und bald darauf 8–9 Bft. Am 15. November zwischen 14 und 22 UTC überquerte die Kaltfront die südliche Ostseeküste, zuerst im Osten und ca. 9 Stunden später dann im Westen. Hinter der Kaltfront drehte der Wind auf NW in auflandige Richtung und flaute über der westlichen Ostsee und Teilen der südlichen Ostsee ab, während die zentrale Ostsee sowie die nördlichen und östlichen Ostseegebiete weiterhin unter dem Einfluss der stürmischen nördlichen Winde blieben (Abb. 5.17 a).

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Als der Tiefdrucktrog am 15. November morgens in südöstliche Richtung zog, drehte der stürmische Wind in ablandige Richtung, was ein langsames, fast gleichzeitiges Absinken der Wasserstände an der gesamten südlichen Ostseeküste, zuerst an den am weitesten östlich gelegenen Pegeln, zur Folge hatte.

Der Tiefstwert in Kołobrzeg um ca. 15 UTC betrug 456 cm, in Świnoujście 421 cm und in Sassnitz 407 cm, beide um ca. 18 UTC. In Warnemünde wurden um ca. 20 UTC 396 cm gemessen und in Wismar um 21 UTC 365 cm (Abb. 5.17 b).

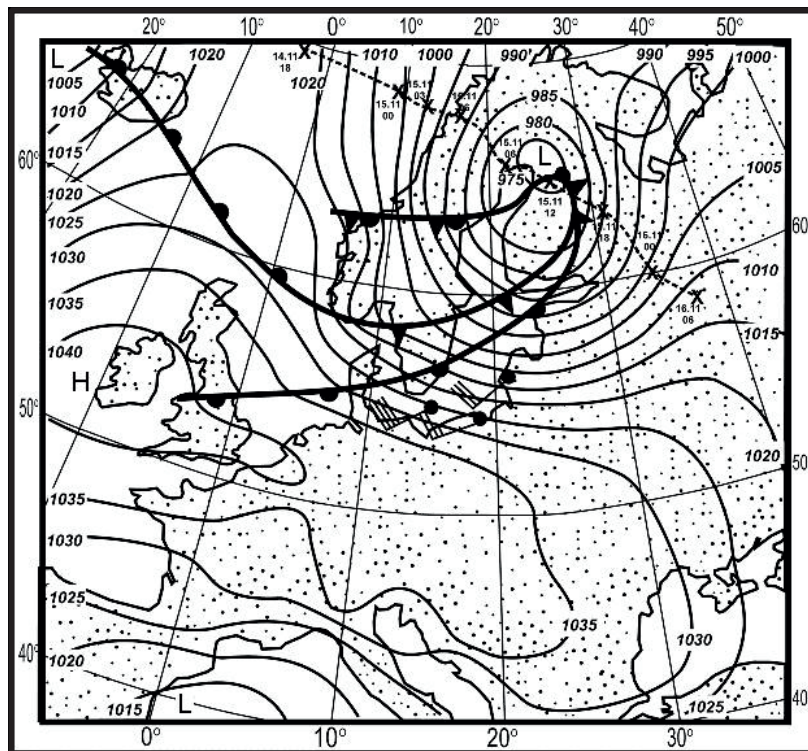


Abb. 5.17 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 14. November 18 UTC bis 16. November 06 UTC, 2001;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 15. November 2001, 12 UTC

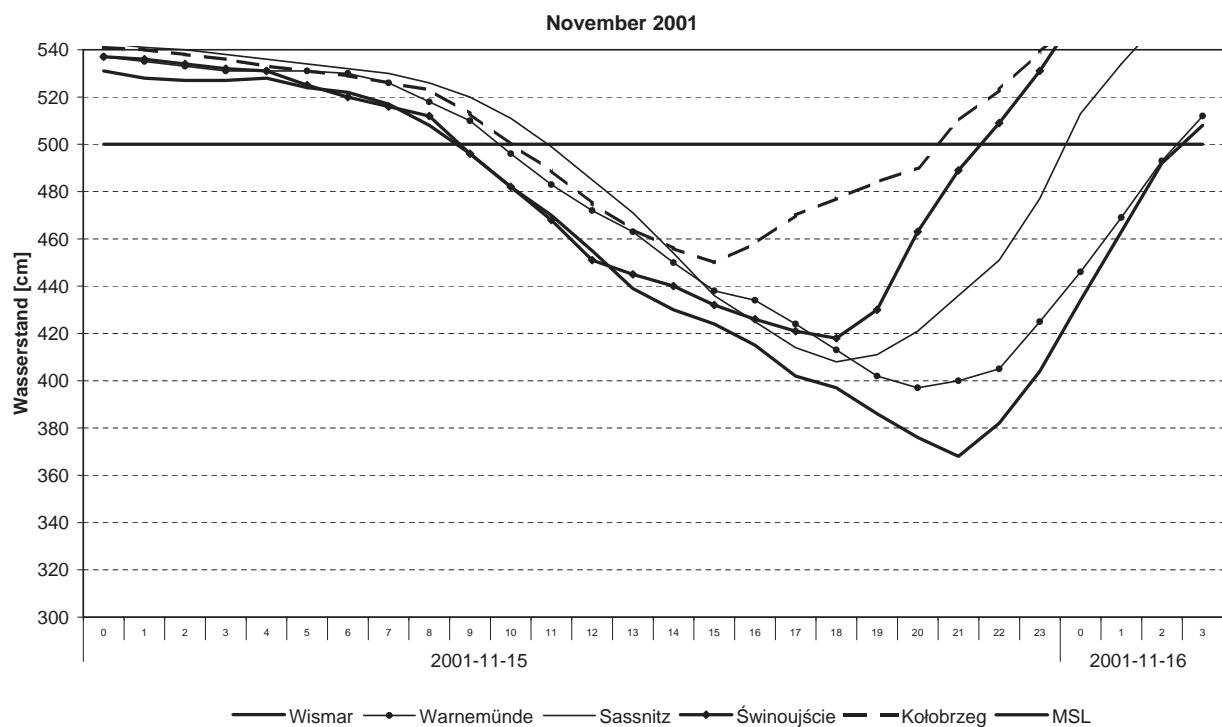


Abb. 5.17 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 15.-16. November 2001

5.18 Dezember 2001

Meteorologische Lage

Am 20. Dezember herrschte über Skandinavien und der Ostsee eine mäßige nordwestliche Luftströmung. Im Laufe des Tages zog ein sich verstärkendes Tiefdruckgebiet langsam mäandrierend von der Norwegischen See in südöstlicher Richtung. Am 21. Dezember um 00 UTC erreichte es Südnorwegen und Südschweden und zog darüber hinweg. Von Südschweden bis zum südlichen Rigaer Meerbusen brauchte das langsam ziehende Tief weitere 24 Stunden. Am 22. Dezember änderte der Kern des Tiefs seine Richtung nach O-NO und verlagerte sich nach Westrussland, wo es sich auffüllte. Der ausgeprägte Trog des Tiefs und sein Frontensystem erzeugten am 20. Dezember einen Sturm aus nördlicher Richtung, der am Nachmittag und Abend dieses Tages über der westlichen und südlichen Ostsee nach W-SW rückdrehte. Während über den südwestlichen Becken der Ostsee der Südweststurm auf 7–9 Bft zunahm, herrschten im nordöstlichen Teil immer noch westliche bis nordwestliche Windrichtungen vor. Erst am Morgen des 21. Dezember drehte der Wind über dem gesamten Gebiet auf NW, zuerst über den östlichen Ostseebecken.

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Am Nachmittag des 20. Dezember drehte der Sturm von N auf W in küstenparallele Richtung und flaute im südwestlichen Teil der Ostsee etwas ab. Daraufhin begannen die vor der Küste gestauten Wassermassen zurückzuströmen, was langsam sinkende Wasserstände zur Folge hatte. Als der Wind in stärker ablandige Richtung drehte, sanken die Wasserstände schneller, und die Tiefststände in diesem Teil der Küste wurden am 21. Dezember zwischen 06 und 12 UTC erreicht, zuerst an den weiter östlich gelegenen Pegeln. Das Minimum von 427 cm in Kołobrzeg wurde zwischen 05 und 06 UTC gemessen; in Świnoujście waren es 393 cm um ca. 06 UTC, in Sassnitz 407 cm um 07 UTC, in Warnemünde und Wismar 375 cm bzw. 356 cm zwischen 08 und 09 UTC.

Die Minima waren ziemlich flach, weil der Wind erst gegen Mittag zunahm und in auflandige Richtung drehte, was zu einem Anstieg der Wasserstände führte.

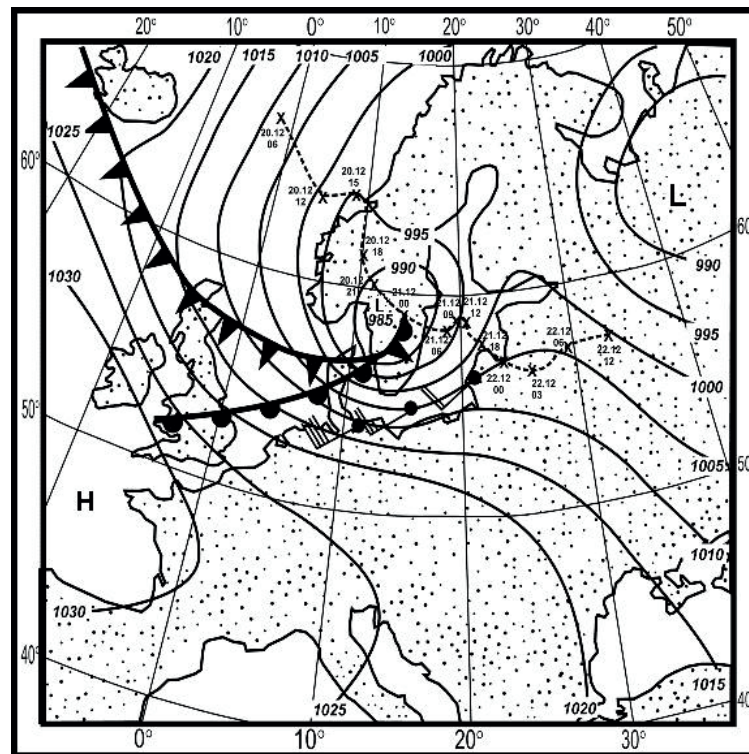


Abb. 5.18 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 20. Dezember 06 UTC bis 22. Dezember 2001, 22 UTC;
Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 21. Dezember 2001, 00 UTC

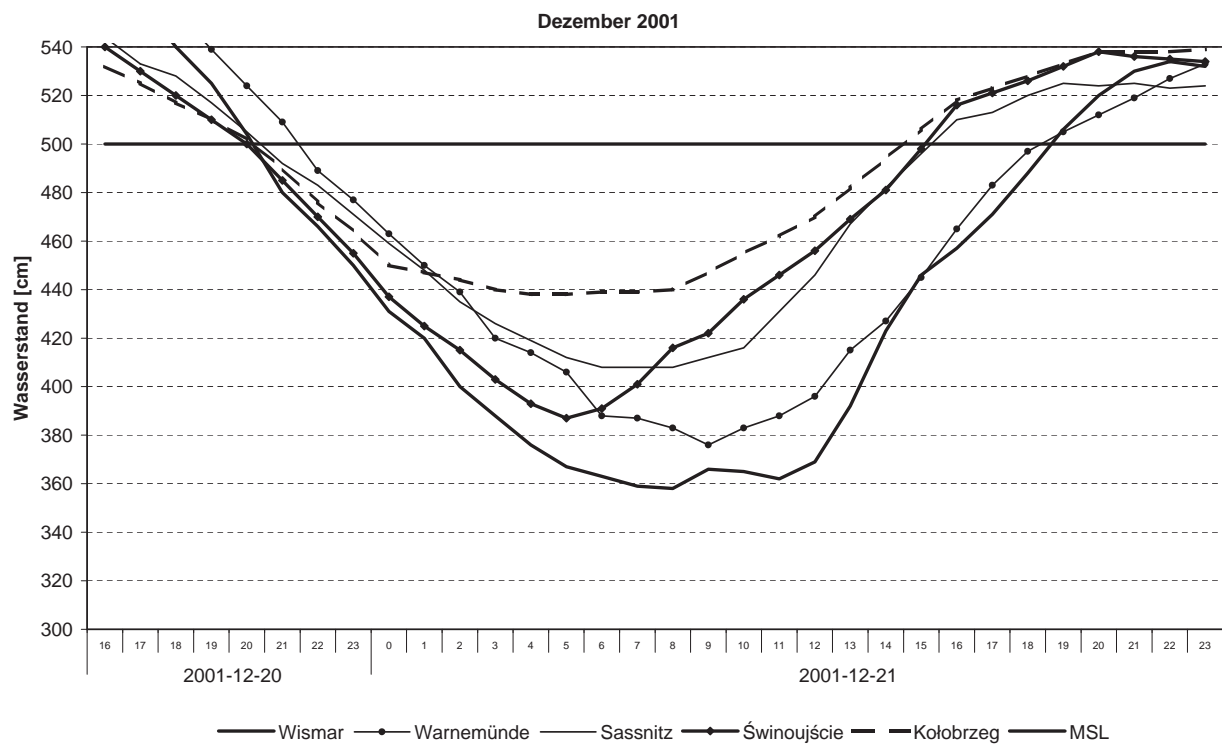


Abb. 5.18 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 20.–21. Dezember 2001

5.19 Januar 2005

Meteorologische Lage

Am Abend des 7. Januar bildete sich im Bereich einer über Europa herrschenden westlichen Strömung westlich von Irland ein aktives Tiefdruckgebiet. Es überquerte im Laufe des 8. Januar die Norwegische See, Südnorwegen und das mittlere Schweden, während es sich weiter verstärkte, und erreichte am 9. Januar um 00 UTC mit einem Kerndruck von 961 hPa die Åland-Inseln. Um 03 UTC erreichte das Tiefdruckzentrum Südfinnland, wo es langsamer wurde und sich mäandrierend in Richtung Ladogasee verlagerte. Es erreichte das Gebiet nördlich des Ladogasees gegen 12 UTC, drehte dann in südöstliche Richtung und füllte sich rasch auf.

Das mit dem Tief verbundene Frontensystem blieb beim Überqueren des Ostseegebiets zunächst ohne Einfluss auf die Windrichtung. Hinter der Warmfront, die am Morgen des 7. Januar über die Ostsee hinwegzog, drehte der starke Westwind jedoch schnell zurück. Am 8. Januar verstärkte sich das rasch ziehende Tief innerhalb kurzer Zeit und der Druckgradient wurde steiler, was zu einer allmählichen Zunahme des Südweststurms führte. Während die Okklusionsfront nach Osten wanderte, nahm der Sturm zwischen 21 UTC am 8. Januar und 03 UTC am 9. Januar auf 10 Bft zu. Später drehte der Wind auf W und schwächte sich gegen Abend langsam ab (Abb. 5.19 a).

Hydrologische Reaktion des Wasserstands

Trotz des starken Winds blieben die Wasserstände bis zum 8. Januar mittags im Bereich des mittleren Wasserstandes. Nachdem der Wind auf SW gedreht hatte, begannen die Pegel gegen 18 UTC zu fallen. Als Reaktion auf die heftigste Phase des W-SW-Sturms hinter der Okklusionsfront blieben die Wasserstände in den westlichen Küstenabschnitten am 9. Januar von 00 UTC bis 10 UTC unter 380 cm.

Die Tiefststände waren wie folgt: Wismar 352 cm um 07 UTC, Warnemünde und Sassnitz 379 cm bzw. 403 cm um ca. 04 UTC und Świnoujście 410 cm um 05 UTC. Die Wasserstandsschwankungen in Kołobrzeg zwischen dem 8. Januar 12 UTC und dem 9. Januar 12 UTC konnten wegen eines Pegelausfalls nicht gemessen werden.

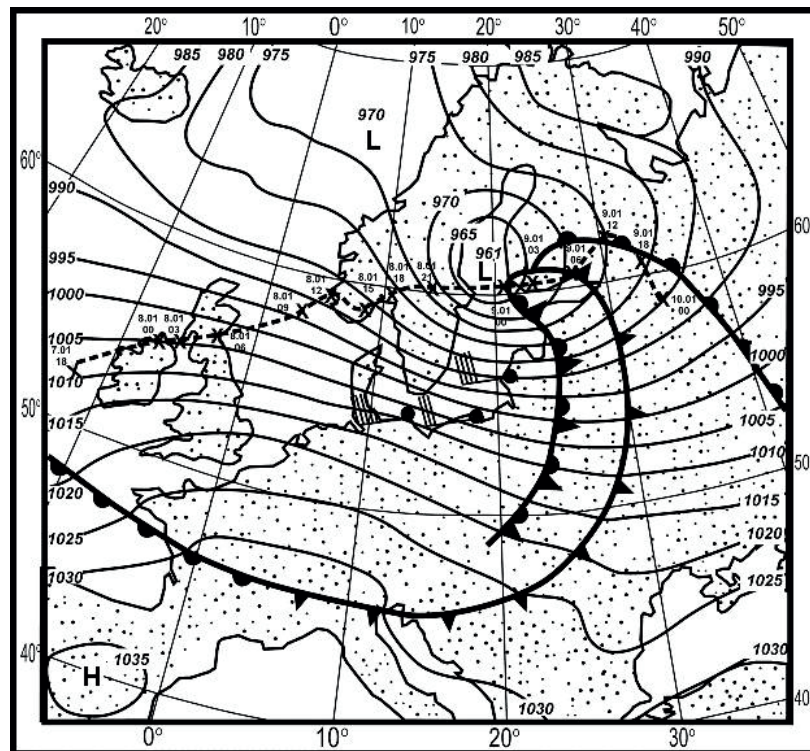


Abb. 5.19 a Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 7. Januar 18 UTC bis 10. Januar 00 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 9. Januar 2005, 00 UTC

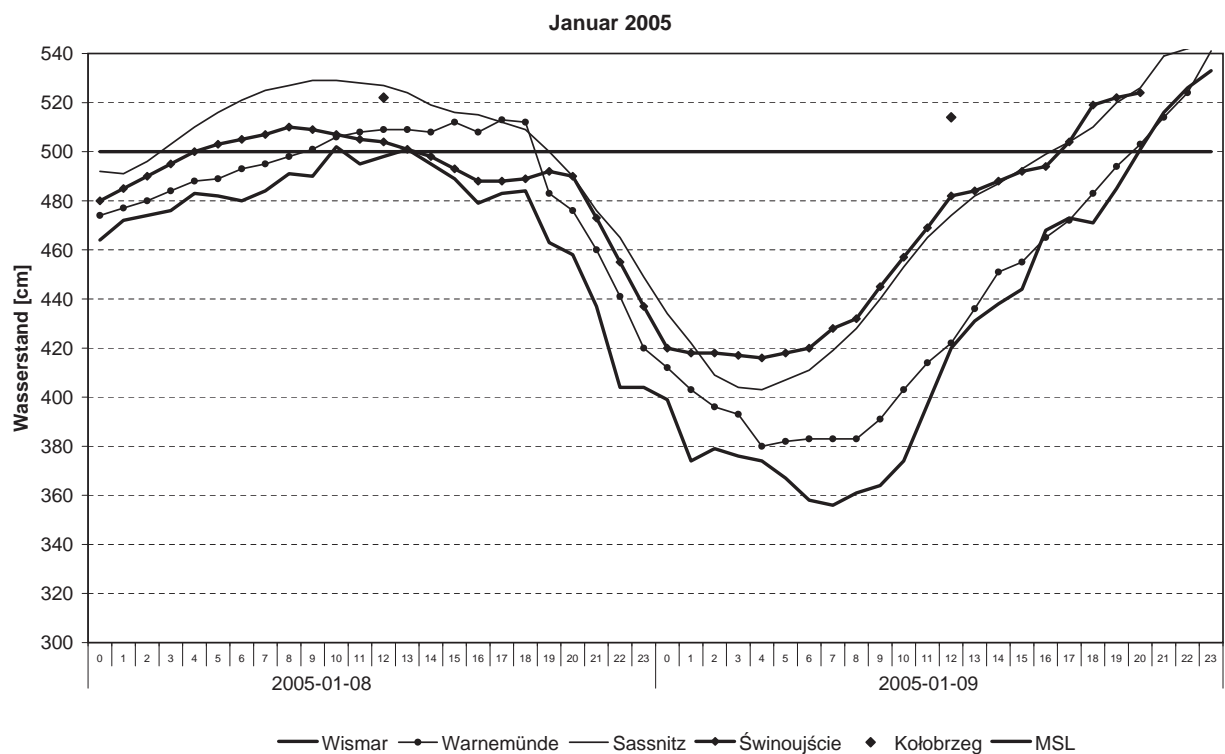


Abb. 5.19 b Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 8.–9. Januar 2005

Literaturverzeichnis

Baerens, C.; Hupfer, P.; Nöthel, H.; Stigge, H.-J.: Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste Teil II: Sturmniedrigwasser; Spezialarbeiten aus der Arbeitsgruppe Klimaforschung, Nr. 9, Humboldt-Universität, Berlin, 1995

Gerstengarbe, F.-W.; Werner, P.: Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky; PIK Report, Institut für Klimaforschung, Potsdam, 2005

Hupfer, P.; Harff, J.; Sterr, H.; Stigge, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste – Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel; Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Die Küste Heft 66, 2003

Lisitzin E.: Sea-level changes, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam – Oxford – New York, 1974.

Majewski A.: Hydrological characteristic of the Pomorska Bay, Wyd. Kom. i Łączn., (in Polish), Warszawa, 1974.

Majewski A.: General characteristic of sea level changes on the Southern Baltic Sea, Bull. PIHM 4, Warszawa, 1961.

Majewski A.; Dziadziuszko Z.; Wiśniewska A.: The catalogue of storm surges on the Polish coasts in the years 1951–1975, Wyd. Kom. i Łączn., (in Polish), Warszawa, 1983.

Majewski. A.; Dziadziuszko Z.: Low Sea Levels on the Southern Baltic Sea, Monogr. IMGW, (in Polish), Warszawa, 1985.

Mewes, D.: Untersuchung von Langzeitvariationen der Sturmniedrigwasserstände an der DDR-Küste und deren Ursachen, Diplomarbeit, Humboldt-Universität, Berlin, 1987

Schmager, G.: Richtlinien zur Nutzung der Windstaudiagramme für die Bestimmung der aperiodischen Wasserstandsschwankungen im Übergangsgebiet zwischen Ostsee und Nordsee, Hydrometeorologische Arbeitsgruppe, 1985

Schmager, G.: Extreme Wasserstandsschwankungen an der DDR-Küste – ihre Bedeutung für die maritimen Zweige der Volkswirtschaft der DDR und Möglichkeiten ihrer Vorhersage, Abhandlungen Meteorologischer Dienst DDR Nr. 141, 1989

Stanisławczyk I.: Meteorological conditions of storm surges on the southern Baltic Coast in period 1976-2000, Conf. NT “Maritime Safety and Protect of Natural Environment”, NOT Koszalin, pp 95–102, 2002.

Stanisławczyk I.: Very Low Sea Levels in Świnoujście, V Symp. Maritime Safety and Protect of Natural Environment, (in Polish) NOT Koszalin, pp 301–309, 2001.

Stanisławczyk I.: Low sea levels as the factor of navigation safety on Świnoujście - Szczecin waterway, X Int. Conf., Marine Traffic Engineering, Świnoujście-Szczecin, Maritime University, pp 221–228, 2003.

Stanisławczyk I.: Low Sea Levels in Kołobrzeg, IV Int. Conf. Human Protect in Maritime Environment, Maritime University Szczecin, (in Polish), 213–220, 2001.

Stanisławczyk I.: Water changes on the Polish Baltic Coast during heavy storm on Dec. 1999, Wiadomości IMGW, XXIV, Warszawa, pp 19–25, 2001.

Stigge, H.-J.: Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns; Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Die Küste Heft 56, 1994

Stigge, H.-J.: Forecasting Baltic Storm Surges by Throwing Dice?; Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Volume 47 No. 4, Hamburg-Rostock, 1995

Stigge, H.-J.: Nullpunktkorrektur für alle DDR-Küstenpegel (Mitteilung der Wasserwirtschaftsdirektion Küste); Beitrag Meereskunde Berlin; 1989

Stigge, H.-J.: Meeresspiegelanstieg der südwestlichen Ostsee in Vergangenheit und Zukunft; Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg, 1997

Sztobryn, M.; Stigge, H.-J.; Wiebliński, D.; Weidig, B.; Stanisławczyk, I.: Sturmfluten in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil), Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 39, Hamburg und Rostock, 2005

Sztobryn M., Assessment of probability of low sea level occurrence in Świnoujście area, IV Int. Conf. Human Protect in Maritime Environment, Maritime University Szczecin, (in Polish), pp 221-228, 2001.

Sztobryn M., Low Sea Level Forecasting- Neural Network Model, V Symp. Maritime Safety and Protect of Natural Environment, NOT Kołobrzeg, (in Polish), pp 293-300, 2001.

Wielbińska D., Influence of atmospheric situation on sea level.. Bull. PIHM 2, 1964

Wróblewski A., Occurrence of annual minimum sea level - Southern Baltic, Przegląd Geofizyczny, (in Polish), XV/XXIII, 1970

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------------------|--|----|
| Abb. 1.3 a | Die Geographie der westlichen und südlichen Ostsee hat die Form einer Bucht, die sich von 25 sm in Wismar über 45 sm in Warnemünde, 60 sm in Sassnitz und 90 sm in Świnoujście auf 120 sm in Kołobrzeg erweitert | 9 |
| Abb. 1.3 b | Wasserstandsschwankung an der südlichen Ostseeküste am 3. und 4. Dezember 1999 | 10 |
| Abb. 1.3 c | Wasserstände an der Küste zwischen Wismar und Hel, 06 UTC am 4. Dezember 1999 (Abstände zwischen den Pegelstationen sind nicht maßstabsgerecht) | 10 |
| Abb. 2.1 | Differenz zwischen stündlichen und 4-stündlichen Daten am Pegel Warnemünde | 12 |
| Abb. 3.1 a | Niedrigster Wasserstand, jährlicher Mittelwert und Median des Wasserstandes; Werte, bei denen der Wasserstand für mindestens 24, 72 und 240 aufeinander folgende Stunden gefallen ist an den Pegeln Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg | 17 |
| Abb. 3.1 b | Jährliche Wasserstandsminima an den Pegeln Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg | 18 |
| Abb. 3.1 c | Langzeitvariabilität der Niedrigwasserereignisse ≤ 440 cm an den Pegelstationen Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg | 19 |
| Abb. 3.2 a | Monatliche Verteilung der Wasserstände am Pegel Warnemünde | 20 |
| Abb. 3.2 b | Mittlere Verteilung der Wasserstände an allen Pegelstationen im Juni. Die Y-Achse ist logarithmisch eingeteilt, um die Verteilung am Anstieg besser darzustellen, die horizontale Achse ist in 5 %-Schritten dargestellt | 20 |
| Abb. 3.2 c | wie in Abb. 3.2 b, aber für den Monat Januar | 21 |
| Abb. 3.2 d | Jahreszeitliche Verteilung der Wasserstände ≤ 440 cm an den Pegeln Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Świnoujście und Kołobrzeg | 21 |
| Abb. 3.3 a | Gumbel-Verteilungen | 22 |
| Abb. 3.3 b | Niedrigwasser in m als Funktion statistischer Wiederkehr | 23 |
| Abb. 3.3 c | Perzentilverteilung der monatlichen Niedrigwasser an den 5 Pegelstationen | 24 |
| Abb. 3.3 d | Tiefstwerte der jährlichen Wasserstände zwischen 1910 und 2005 | 24 |
| Abb. 4.1 | Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen bei Wasserständen ≤ 440 cm, 1955–2005 | 25 |
| Abb. 4.3 | Wasserspiegelschwankungen in Kołobrzeg und Warnemünde während einer langen Hochdruckphase im Februar 1954 | 27 |
| Abb. 4.4 a | Häufigkeit des Zusammentreffens bestimmter atmosphärischer Lagen mit Niedrigwasserereignissen ≤ 440 cm an der südlichen Ostseeküste in den Jahren 1955–2005 (innerer Rahmen: Klassifizierung der Großwetterlagen über Europa nach G. Hess und H. Brezowsky) | 28 |
| Abb. 4.4 b | Zirkulationsform Wz (zyklonale Westlage), bei der die meisten Niedrigwasser an der südlichen Ostseeküste auftreten (Karte der Luftdruckanomalien nach G. Cawley) | 29 |
| Abb. 4.4 c | Großwetterlage SEa (antizyklonale Südostlage) der meridionalen Zirkulationsform. Wetterlagen dieses Typs haben lang anhaltende Niedrigwasserstände ≤ 440 cm an der südlichen Ostseeküste verursacht (Karte der Luftdruckanomalien nach G. Cawley) | 29 |
| Abb. 5.1 a | Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 25. November 1956 um 12 UTC | 31 |
| Abb. 5.1 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 25.–26. November 1956 | 31 |
| Abb. 5.2 a | Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 19. Januar 1960 um 00 UTC | 33 |
| Abb. 5.2 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 18.–19. Januar 1960 | 33 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Abb. 5.3 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 29. Januar 18 UTC bis 31. Januar 1961; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 30. Januar 1961, 00 UTC | 35 |
| Abb. 5.3 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 27.–31. Januar 1961 | 35 |
| Abb. 5.4 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 11. Februar 18 UTC bis 12. Februar 1962, 12 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 12. Februar 1962, 12 UTC | 37 |
| Abb. 5.4 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 11.–12. Februar 1962 | 37 |
| Abb. 5.5 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 5. Dezember 06 UTC bis 6. Dezember 18 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 6. Dezember 1965, 00 UTC | 39 |
| Abb. 5.5 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 5.–6. Dezember 1965 | 39 |
| Abb. 5.6 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 16. Oktober 18 UTC bis 18. Oktober 18 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 17. Oktober 1967, 18 UTC | 41 |
| Abb. 5.6 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 17.–18. Oktober 1967 | 41 |
| Abb. 5.7 a | Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 9. März 1969, 00 UTC | 43 |
| Abb. 5.7 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 8.–9. März 1969 | 43 |
| Abb. 5.8 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 6. Januar 12 UTC bis 7. Januar 12 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 7. Januar 1979, 12 UTC | 45 |
| Abb. 5.8 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 6.–8. Januar 1979 | 45 |
| Abb. 5.9 a | Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 4. November 1979, 12 UTC | 47 |
| Abb. 5.9 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 3.–5. November 1979 | 47 |
| Abb. 5.10 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 23. November 12 UTC bis 25. November 1981, 06 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 24. November 1981, 00 UTC | 49 |
| Abb. 5.10 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 24.–25. November 1981 | 49 |
| Abb. 5.11 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 5. November 00 UTC bis 6. November 18 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 6. November 1985, 12 UTC | 51 |
| Abb. 5.11 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 6. November 1985 | 51 |
| Abb. 5.12 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 25. Januar 00 UTC bis 27. Januar 00 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 26. Januar 1990, 12 UTC | 53 |
| Abb. 5.12 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 26.–27. Januar 1990 | 53 |
| Abb. 5.13 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 26. Februar 00 UTC bis 28. Februar 00 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 27. Februar 1991, 00 UTC | 55 |
| Abb. 5.13 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 26.–27. Februar 1990 | 55 |
| Abb. 5.14 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 13. Januar 09 UTC bis 15. Januar 1993, 00 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 14. Januar 1993, 06 UTC | 57 |
| Abb. 5.14 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 13.–14. Januar 1993 | 57 |
| Abb. 5.15 a | Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 16. Februar 1996, 00 UTC | 59 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Abb. 5.15 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 15.–17. Februar 1996 | 59 |
| Abb. 5.16 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 29. November 18 UTC bis 2. Dezember 06 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 1. Dezember 1999, 00 UTC | 61 |
| Abb. 5.16 b | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 3. Dezember 00 UTC bis 5. Dezember 00 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 4. Dezember 1999, 00 UTC | 61 |
| Abb. 5.16 c | Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 6. Dezember 1999, 18 UTC | 62 |
| Abb. 5.16 d | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 1.–4. Dezember 1999 | 62 |
| Abb. 5.16 e | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 6.–7. Dezember 1999 | 63 |
| Abb. 5.17 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 14. November 18 UTC bis 16. November 06 UTC, 2001; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 15. November 2001, 12 UTC | 65 |
| Abb. 5.17 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 15.–16. November 2001 | 65 |
| Abb. 5.18 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 20. Dezember 06 UTC bis 22. Dezember 2001, 22 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 21. Dezember 2001, 00 UTC | 67 |
| Abb. 5.18 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 20.–21. Dezember 2001 | 67 |
| Abb. 5.19 a | Zugbahn des Tiefdruckgebiets vom 7. Januar 18 UTC bis 10. Januar 00 UTC; Luftdruck und Windfeld über der Ostsee am 9. Januar 2005, 00 UTC | 69 |
| Abb. 5.19 b | Unterschiedlich fallende Wasserstände während des Sturms vom 8.–9. Januar 2005 | 69 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------------------|---|----|
| Tabelle 2.2 a | Niedrigwasser im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste von 1958 bis 2005 (Daten aus den 1 h/4 h-Zeitreihen, bei denen an mindestens 4 Pegelstationen Wasserstände unter 440 cm gemessen wurden) | 13 |
| Tabelle 2.2 b | Niedrigste Wasserstände im westlichen und mittleren Teil der südlichen Ostseeküste | 15 |
| Tabelle 3.1 a | Statistische Indikatoren für mittlere und niedrige Wasserstände: linearer Regressionskoeffizient und Korrelation mit der Zeitreihe der jährlichen mittleren Wasserstände | 16 |
| Tabelle 3.1 b | Korrelationskoeffizient zwischen den Stationen: unten links, jährliche mittlere Wasserstände; oben rechts, jährliche 240-Stunden-Niedrigwasserstände | 18 |
| Tabelle 3.1 c | Korrelationskoeffizient zwischen den Stationen: unten links, jährliche mittlere Wasserstände; oben rechts, jährliche 72-Stunden-Niedrigwasserstände | 18 |
| Tabelle 3.3 a | Gumbel-Wahrscheinlichkeit niedriger Wasserstände in m unter dem mittleren Wasserstand (MWST = 5 m), berechnet 2007/2008 für Wiederkehrintervalle T (Jahre) | 22 |

Abkürzungen

| | |
|----------------|--|
| BSH | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DDR | Deutsche Demokratische Republik |
| HN | Höhennull |
| IMGW-OM | Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Morski – Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft, Ostsee |
| MWST | mittlerer Wasserstand |
| NAVTEX | Navigational Warnings by Telex – Schifffahrtswarnungen per Telex |
| NN | Normalnull |
| P | Häufigkeit |
| PN | Pegelnul |
| T | Wiederkehrintervall |
| UTC | koordinierte Weltzeit |

Autoren

| | | |
|-----------------------|------------------|-------------------------------|
| Marzenna Sztobryn | +48-58-6288-141 | Marzenna.Sztobryn@imgw.pl |
| Bärbel Weidig | +49-381-4563-784 | baerbel.weidig@bsh.de |
| Ida Stanisławczyk | +48-58-6288-142 | Ida.Stanislawczyk@imgw.pl |
| Jürgen Holfort | +49-381-4563-780 | juergen.holfort@bsh.de |
| Beata Kowalska | +48-58-6288-147 | Beata.Kowalska@imgw.pl |
| Monika Mykita | +48-58-6288-146 | Monika.Mykita@imgw.pl |
| Alicja Kańska | +48-58-6288-146 | Alicja.Kanska@imgw.pl |
| Katarzyna Krzysztofik | +48-58-6288-146 | Katarzyna.Krzysztofik@imgw.pl |
| Ines Perlet | +49-381-4563-783 | ines.perlet@bsh.de |

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Neptunallee 5
18057 Rostock

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Oddział Morski
Waszyngtona 42
81-342 Gdynia, Polska

Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

Verzeichnis der veröffentlichten Arbeiten

- 1 (1994) Sy, A., Ulrich, J. North Atlantic Ship-of-Opportunity XBT Programme 1990 – Data Report, 134 pp.
- 2 (1994) Hagen, E., Mittelstaedt, E., Feistel, R., Klein, H. Hydrographische Untersuchungen im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991–1992, 49 pp.
- 3 (1994) Oliczewski, J., Schmidt, D. Entwicklung einer Bestrahlungsapparatur zum photochemischen Aufschluß von Meerwasserproben zur Bestimmung von Schwermetallen, 70 pp.
- 4 (1994) BSH [Hrsg.] Das UN-Seerechtsübereinkommen tritt in Kraft: Inhalte und Konsequenzen für die Bundesrepublik Deutschland, 71 pp.
- 5 (1995) BSH [Hrsg.] Nationale Folgerungen aus dem Inkrafttreten des UN-Seerechtsübereinkommens, 103 pp.
- 6 (1995) Haffer, E., Schmidt, D. Entwicklung eines Probenvorbereitungsverfahrens zur Bestimmung von Arsen im Meerwasser mit der Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse, 109 pp.
- 7 (1995) BSH [Hrsg.] Global Ocean Observing System – Statusbericht, 100 pp.
- 8 (1996) Mittelstaedt, E., Meincke, J., Klein, H. WOCE-Current measurements: The ACM8 array – Data Report, 150 pp.
- 9 (1996) BSH [Hrsg.] GOOS Workshop – Anforderungen an ein wissenschaftliches Konzept für den deutschen Beitrag, 60 pp.
- 10 (1997) Sterzenbach, D. Entwicklung eines Analyseverfahrens zur Bestimmung von chlorierten Kohlenwasserstoffen in marinen Sedimenten und Schwebstoffen unter besonderer Berücksichtigung der überkritischen Fluidextraktion, 233 pp.
- 11 (1997) Jonas, M., Richter, R. Stand und Entwicklungstendenzen nautischer Systeme, Anlagen und Geräte an Bord von Seeschiffen, 37 pp.
- 12 (1997) Wedekind, C., Gabriel, H., Goroncy, I., Främke, G., Kautsky, H. „Meteor“-Reise Nr. 71/1985, Norwegen–Grönlandsee – Datenbericht, 44 pp.
- 13 (1998) BSH [Hrsg.] HELCOM Scientific Workshop – The Effects of the 1997 Flood of the Odra and Vistula Rivers, 46 pp.
- 14 (1998) Berger, R., Klein, H., Mittelstaedt, E., Ricklefs, K., Ross, J. Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum-Tief – Datenreport, 260 pp.
- 15 (1998) Röske, F. Wasserstandsvorhersage mittels neuronaler Netze. 212 pp.
- 16 (1998) Ross, J., Mittelstaedt, E., Klein, H., Berger, R., Ricklefs, K. Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum-Tief – Abschlußbericht, 98 pp.
- 17 (1998) Klein, H. OPUS-Current Measurements: Mecklenburg Bight and Fehmarnbelt – Data Report, 150 pp.
- 18 (1999) BSH [Hrsg.] Deutscher Programmbeitrag zum Globalen Ozeanbeobachtungssystem (GOOS), 67 pp.
- 19 (1999) BSH [Hrsg.] German Programme Contribution to the Global Ocean Observing System (GOOS), 71 pp.
- 20 (1999) Sztobryn, M., Stanislawczyk, I., Schmelzer, N. Ice Conditions in the Szczecin and Pomeranian Bay During the Normal Period from 1961–1990, 36 pp.
- 21 (1999) Nies, H., Karcher, M., Bahe, C., Backhaus, J., Harms, I. Transportmechanismen radioaktiver Substanzen im Arktischen Ozean – Numerische und experimentelle Studien am Beispiel der Barents- und Karasee, 134 pp.
- 22 (2000) Lorbacher, K. Niederfrequente Variabilität meridionaler Transporte in der Divergenzzone des nordatlantischen Subtropen- und Subpolarwirbels – Der WOCE-Schnitt A2, 156 pp.

- 23 (2000) Klein, H. The Subsurface Eastern Boundary Current of the North Atlantic between 32° N and 53° N – Data Report, 240 pp.
- 24 (2000) Klein, H. Strömungen und Seegangsverhältnisse westlich der Insel Hiddensee – Datenreport, 59 pp.
- 25 (2001) Goedecke, E. Der hydrographische Aufbau in der Deutschen Bucht vornehmlich dargestellt auf Grund der vorliegenden Unterlagen über Temperatur, Salzgehalt und Dichte, 202 pp.
- 26 (2001) Klein, H., Mittelstaedt, E. Strömungen und Seegangsverhältnisse vor Graal-Müritz und in der Tromper Wiek – Datenreport, 162 pp.
- 27 (2001) Klein, H., Mittelstaedt, E. Gezeitenströme und Tidekurven im Nahfeld von Helgoland, 24 pp. und Anhang.
- 28 (2001) Behnke, J., Berking, B., Herberg, J., Jonas, M., Mathes, S. Functional Scope and Model of Integrated Navigation Systems – A Tool-box for Identification and Testing, 181 pp.
- 29 (2001) Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S., Klein, H., Komo, H. The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation, 49 pp.
- 30 (2002) Sy, A., Ulrich, J., Weichert, H.-J. Upper Ocean Climate Ship-of-Opportunity Programme of BSH – A Status Report, 45 pp.
- 31 (2003) Dahlmann, G. Characteristic Features of Different Oil Types in Oil Spill Identification, 48 pp.
- 32 (2003) Nies, H., Gaul, H., Oestereich, F., Albrecht, H., Schmolke, S., Theobald, N., Becker, G., Schulz, A., Frohse, A., Dick, S., Müller-Navarra, S., Herklotz, K. Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht, 81 pp.
- 33 (2003) Loewe, P., Becker, G., Brockmann, U., Frohse, A., Herklotz, K., Klein, H., Schulz, A. Nordsee und Deutsche Bucht 2002 – Ozeanographischer Zustandsbericht
- 34 (2004) Schulz, G. Geomagnetic Results Wingst 1996, 1997, 1998 and 1999 including the complete Wingst data set since 1939 on CD-ROM
- 35 (2004) Gouretski, V. V., Koltermann, K. P. WOCE Global Hydrographic Climatology
- 36 (2004) Gayer, G., Dick, S., Pleskachevsky, A., Rosenthal, W. Modellierung von Schwebstofftransporten in Nord- und Ostsee
- 37 (2004) Schmelzer, N., Strübing, K., Stanisławczyk, I., Sztobryn, M. Die Eiswinter 1999/2000 bis 2003/2004 an der deutschen Nord- und Ostseeküste/Ice Conditions in the Szczecin Lagoon and Pomeranian Bay During the Winters 1999–2002
- 38 (2005) Loewe, P., Schmolke, S., Becker, G., Brockmann, U., Dick, S., Engelke, C., Frohse, A., Horn, W., Klein, H., Müller-Navarra, S., Nies, H., Schmelzer, N., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N., Weigelt, S. Nordseezustand 2003
- 39 (2005) Sztobryn, M., Stigge, H.-J., Wielbińska, D., Stanisławczyk, I., Kańska, A., Krzysztofik, K., Kowalska, B., Letkiewicz, B., Mykita, M., Weidig, B. Sturmfluten in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)/ Storm Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts)
- 40 (2006) Loewe, P., Schmolke, S., Becker, G., Brockmann, U., Dick, S., Frohse, A., Herrmann, J., Klein, B., Klein, H., Nies, H., Schrader, D., Schulz, A., Theobald, N., Weigelt, S. Nordseezustand 2004
- 41 (2007) Bork, I., Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S. Tsunami – a study regarding the North Sea coast
- 42 (2007) Schrum, C., Schmelzer, N. (Eds.) Fifth Workshop on Baltic Sea Ice Climate Hamburg, Germany, 31 August–2 September 2005

- 43 (2008) Müller, L. Sauerstoffdynamik der Nordsee – Untersuchungen mit einem dreidimensionalen Ökosystemmodell
- 44 (2009) Loewe, P. (Ed.) System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen
- 45 (2009) Sztobryn, M., Weidig, B., Stanisławczyk, I., Holfort, J., Kowalska, B., Mykita, M., Kańska, A., Krzysztofik, K., Perlet, I. Niedrigwasser in der südlichen Ostsee (westlicher und mittlerer Teil)/ Negative Surges in the Southern Baltic Sea (Western and Central Parts)