

Veränderungen in der Häufigkeit von Sturmhochwassern an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns und deren mögliche Ursachen

Von BJÖRN-RÜDIGER BECKMANN und GERD TETZLAFF

Zusammenfassung

Sturmhochwasser an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns verursachen meistens starke Veränderungen des Küstenstreifens innerhalb kürzester Zeit. Aus diesem Anlass haben wir die Veränderung in der Häufigkeit verschiedener sturmhochwasserverursachender Prozesse untersucht, um die zunehmende Häufigkeit von Sturmhochwassern in dieser Region zu erklären.

Ein Teil dieser zunehmenden Häufigkeit hat seine Ursache in dem säkularen Meeresspiegelanstieg entlang der Mecklenburg-Vorpommerschen Küste. Der weitaus größere Anteil wird durch Veränderungen im Windfeld über der Ostsee hervorgerufen.

In der Regel wird ein Sturmhochwasser an der Mecklenburg-Vorpommerschen Ostseeküste durch zwei nacheinander ablaufende meteorologische Prozesse verursacht. Mitunter können Eigenschwingungen der Ostsee die durch die Windfelder verursachten Wasserstandsänderungen verstärken.

Zunächst wird über eine Dauer von zehn bis fünfzehn Tagen bevor ein Sturmhochwasser eintritt, Nordseewasser durch stärkere westliche Winde in die Ostsee befördert. Dieses hat zur Konsequenz, dass der Wasserstand der Ostsee im Mittel um etwa 15 cm ansteigt. Der hauptsächlich Wasserstandsanstieg an der Küste zu einem Sturmhochwasserereignis wird durch N- bis NE-Stürme mit einer langen Fetch über der zentralen Ostsee verursacht.

Es zeigt sich, dass die Häufigkeit von Perioden länger andauernder stärkerer westlicher Winde in der Vergangenheit zugenommen hat. Eine signifikante Veränderung in der Häufigkeit von Stürmen aus N bis NE lässt sich hingegen nicht nachweisen. Dieses wird an Hand mehrerer Höhenwindzeitreihen im Ostseegebiet und einer über hundert Jahre langen homogenisierten und normierten Bodenwindzeitreihe Mecklenburg-Vorpommerns verdeutlicht. Daraus schließen wir, dass die zunehmende Häufigkeit von Sturmhochwassern in erster Linie durch die zunehmende Häufigkeit von länger andauernden stärkeren westlichen Winden verursacht wurde und nicht durch Häufigkeitsveränderungen von N- bis NE-Stürmen.

Summary

Storm surges in the Baltic Sea can lead to rapid and significant changes of the coast line of Mecklenburg-Vorpommern. In order to explain the increasing frequency of occurrence of storm surges in this region we analysed various processes exciting these storm surges. One source of this trend can be found in the secular rise of the mean sea level. However, changes of the wind field over the Baltic Sea are of much greater importance.

Storm surges at this part of the Baltic coast are generally caused by two subsequent meteorological processes the effect of which can be increased by seiches or oscillations in the Baltic Sea. Preceding a storm surge, water from the North Sea is pushed into the Baltic by strong westerly winds for a duration of up to 15 days. Consequently, the overall water level rises by approximately 15 cm. The main level increase during a storm surge, however, is caused by storms from N to NE with a long fetch over the central Baltic.

Apparently, periods of stronger westerly winds with longer durations have become more frequent in the recent past. Yet, a significant change in the frequency of occurrence of storms from N to NE cannot be shown. This becomes evident by looking at several time series of aerological

winds in the Baltic region and at a time series of homogenized surface winds in Mecklenburg-Vorpommern of more than 100 years duration.

In conclusion, the increasing number of storm surges in the Baltic is caused by the increase in frequency of occurrence of long-duration stronger westerly winds filling the Baltic rather than of those coming from N to NE and causing the major water level increase.

I n h a l t

1. Einleitung	74
2. Klassifikation und Statistik der Sturmhochwasser	75
2.1 Klassifikation	75
2.2 Veränderungen in der Häufigkeit von Sturmhochwassern	76
3. Sturmhochwasser verursachende Wetterlagen	77
4. Veränderungen in der Windverteilung	78
5. Schluss	86
6. Danksagung	87
7. Schriftenverzeichnis	87

1. Einleitung

Der Verlauf des Küstenstreifens Mecklenburg-Vorpommerns steht in engem Zusammenhang mit den geomorphologischen Veränderungen, wie Abrasion und Akkumulation. Hierfür verantwortlich sind einwirkende meteorologische und hydrodynamische Prozesse.

Küstenrückgänge haben ihre Ursache einerseits in der langzeitigen und kontinuierlichen Wirkung von Seegang und Strömung bei mittleren Wasserständen. Andererseits führen kurzzeitig auftretende Sturmhochwasser mit extremen Wasserstandsanstiegen und hoher Seeangensenergie zu starken Veränderungen der Küstenlinie.

Auf Grund sozio-ökonomischer Aspekte solcher Veränderungen des Küstenstreifens besteht ein großes Interesse daran, Kenntnisse über die Veränderungen in der Häufigkeit von Sturmhochwassern zu erweitern.

Die Sturmhochwasserstatistik Warnemündes (STIGGE, 1994a) zeigt eine zunehmende Häufigkeit solcher Ereignisse seit 1901. Es stellt sich die Frage, ob die Zunahme eine Folge des säkularen Meeresspiegelanstiegs von 1 bis 2 mm pro Jahr ist oder sich aus veränderten hydrodynamischen Randbedingungen oder durch Klimavariationen erklären lässt.

Um die zunehmende Häufigkeit von Sturmhochwassern zu untersuchen, benötigen wir einerseits homogenisierte Pegelzeitreihen und Kenntnisse über die Veränderungen in der Häufigkeit meteorologischer Prozesse, welche für Sturmhochwasser verantwortlich sind.

Die am häufigsten auftretenden Sturmhochwasserwetterlagen, welche für den nötigen N- bis NE-Sturm über der zentralen Ostsee sorgen, werden z. B. von KOHLMETZ (1967) beschrieben. Diese Sturmwetterlagen verursachen dann einen Wasserstau an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns.

In der Regel ist während des Auftretens eines Sturmhochwasserereignisses der Wasserstand der Ostsee um 15 cm höher als der mittlere (BAERENS u. HUPFER, 1995). Ein nennenswertes Füllen der Ostsee – hier vor einem Sturmhochwasserereignis – dauert etwa 10 bis 15 Tage (BAERENS u. HUPFER, 1995). Länger andauernde stärkere westliche bis nordwestliche Winde über Nord- und Ostsee sind Ursache für den Füllprozess. Typische Wetterlagen, die einen Einstrom in die Ostsee verantworten, wurden z. B. von HEYEN et al. (1996) beschrieben.

Anhand homogener Pegelzeitreihen soll überprüft werden, inwiefern der Säkulartrend Ursache für die Zunahme in der Häufigkeit von Sturmhochwassern ist. Zweitens soll untersucht werden, ob es Veränderungen in der Häufigkeit Sturmhochwasser verursachender Wetterlagen gibt. Zu diesem Zweck soll eine Windverteilung des Untersuchungsgebietes Aufschluss darüber geben, ob es in der Vergangenheit zu Veränderungen in der Häufigkeit von Stürmen aus N bis NE und ob es zu Veränderungen in der Häufigkeit von länger andauernden und stärkeren westlichen Winden gekommen ist.

Die Veränderungen in der Windklimatologie werden durch eine Analyse der Höhenwindzeitreihen im 850 hPa Niveau der aerologischen Stationen Kopenhagen, Greifswald, Tallinn und Riga untersucht. Die Greifswälder Zeitreihe ist ab 1949 verfügbar, die restlichen ab 1969. Um Zeitreihen mit ähnlicher Länge wie die Zeitreihe der Sturmhochwasser zu untersuchen, kann man auf Bodenwindzeitreihen zurückgreifen.

Jedoch existiert für dieses Gebiet keine durchgehende hundertjährige homogene Windzeitreihe. Für die Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns existieren lediglich Bodenwindzeitreihen von WUSTROW für 1876 bis 1920, für Warnemünde ab 1920 und für Arkona (Insel Rügen) ab 1950. Zusätzlich wechselte der Messstandort in Warnemünde im Jahre 1946, und die Bebauung in der Umgebung des zweiten Messstandortes veränderte sich mehrmals. Es ist zu erwähnen, dass diese gemessenen Rohdaten nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden können, weil lokale und regionale Bodeneigenschaften die Messdaten dieser Bodenstationen beeinflussen. Eine brauchbare Zeitreihe kann nur durch Homogenisieren der Rohdaten und anschließende Normierung auf einheitliche Bodeneigenschaften erfolgen. Die Berechnung des Einflusses von Orographie, Rauigkeit und Hindernissen der umgebenden Messstation auf die Messwerte (Homogenisierung) und die Normierung auf einheitliche Bodeneigenschaften und einheitliche Messhöhe erfolgt mittels eines kleinskaligen Modells (MORTENSEN et al., 1993). Trenduntersuchungen dieser synthetischen Zeitreihe sollen Informationen über Veränderungen in der Vergangenheit über längere Zeitskalen in der Häufigkeit mittlerer als auch extremer Windgeschwindigkeiten geben.

2. Klassifikation und Statistik der Sturmhochwasser

2.1 Klassifikation

Ein extremer Wasserstand wird an der deutschen Ostseeküste als Sturmhochwasser bezeichnet, wenn der Pegel 1 m über NN (Normal Null) überschreitet. In Tab. 1 ist die Klassifikation des Bundesamtes für Seeschifffahrt (BSH) von Sturmhochwassern an der deutschen Ostseeküste angegeben.

Tab. 1: Klassifikation der Sturmhochwasser an der deutschen Ostseeküste nach dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

1,00 m bis 1,24 m über NN	leichtes Sturmhochwasser
1,25 m bis 1,49 m über NN	mittleres Sturmhochwasser
1,50 m und mehr über NN	starkes Sturmhochwasser

2.2 Veränderungen in der Häufigkeit von Sturmhochwassern

Zur Erstellung der Statistik der Sturmhochwasser dient der Pegel Warnemünde, weil dieser als repräsentativ für die Region angenommen werden kann. Damit ist gemeint, dass im Falle eines Sturmhochwassers in Warnemünde es in der Regel an anderen Pegeln entlang der Mecklenburg-Vorpommerschen Ostseeküste ebenfalls zu Registrierungen von Sturmhochwassern kommt. Eine Häufigkeitsverteilung von Sturmhochwassern ermittelt aus Pegel­daten von Warnemünde wird in Abb. 1 gezeigt. Diese sind in der Abb. 1 nach der Klassifikation des BSH in leichte, mittlere und starke Ereignisse unterteilt. Die Sturmhochwasserdaten Warnemündes, die von STIGGE (1994b) entnommen wurden, sind vor der Analyse bzgl. des Säkular­rends mittels eines linearen Ansatzes (STIGGE, 1994a) mit 1900 als Referenzjahr homogenisiert worden. Der lineare Ansatz zur Homogenisierung der Sturmhochwasserdaten bezogen auf das Jahr 1900 wird in folgender Gleichung beschrieben:

$$(1) \quad \text{BHW}_i = \text{HW}_i + s \cdot (1900 - i)$$

Dabei bedeuten BHW_i der homogenisierte Sturmhochwasserpegel, HW_i der nicht homogenisierte Sturmhochwasserpegel und s der lineare säkulare Pegelanstieg. Für Warnemünde beträgt der lineare Säkularanstieg 0,12 cm pro Jahr (DIETRICH, 1994). Die Ursachen des Säkularanstieges sind eustatische als auch isostatische Prozesse (siehe z. B. KLUG, 1980).

Die Abb. 1 zeigt, dass sich die Häufigkeit pro Jahrzehnt starker und mittlerer Sturmhochwasserereignisse seit 1900 nicht signifikant verändert hat. Die Häufigkeit von leichten

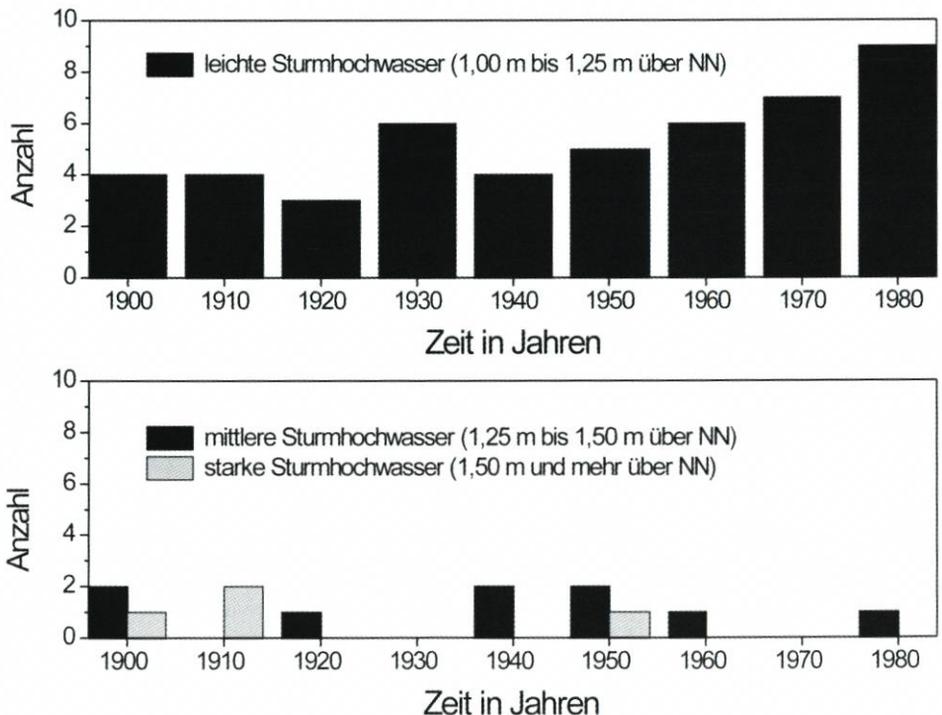


Abb. 1: Anzahl von starken, mittleren und leichten Sturmhochwassern in Warnemünde seit 1900 homogenisiert bzgl. des Säkular­rends in Bezug auf das Jahr 1900

Sturmhochwassern veränderte sich in der Zeit von 1900 bis 1940 nur geringfügig. Danach ist eine signifikante Zunahme in der Häufigkeit leichter Ereignisse trotz der Subtraktion des Säkulartrends zu verzeichnen. Daraus ist zu schließen, dass der mittlere Pegelanstieg nicht der einzige Grund für die zunehmende Häufigkeit der leichten Sturmhochwasser sein kann. Die verbleibende Häufigkeitszunahme wird in einer veränderten Windklimatologie vermutet. Aus diesem Grund sollen die Veränderungen in der Häufigkeit von Sturmhochwassern, insbesondere der leichten, mit Veränderungen im Windfeld über der Ostsee verglichen werden. Dazu müssen im ersten Schritt die meteorologischen Prozesse, d. h. Wetterlagen, die Ursache für ein Sturmhochwasser sind, betrachtet werden.

3. Sturmhochwasser verursachende Wetterlagen

Ein Sturmhochwasser an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns wird durch mehrere Prozesse verursacht.

In der Regel weist die Ostsee vor dem Auftreten eines Sturmhochwassers einen erhöhten Wasserstand auf. Das Phänomen des Auffüllens der Ostsee vor einem Sturmhochwasserereignis wurde in dem KLIBO-Teilprojekt von BAERENS und HUPFER deutlich herausgearbeitet und soll hier der Vollständigkeit wegen kurz erläutert werden. Das Auffüllen der Ostsee – hier vor einem Sturmhochwasserereignis – beansprucht etwa 10 bis 15 Tage (BAERENS u. HUPFER, 1995). Nach dieser Periode des Auffüllens ist der Wasserstand der Ostsee etwa 15 cm höher als der mittlere (BAERENS u. HUPFER, 1995). Dieses haben sie am Pegel Landsort nachgewiesen. Dieser befindet sich südlich von Stockholm in der zentralen Ostsee. Der Pegel Landsort wird für gewöhnlich als Maß des Wasserstandes der Ostsee genutzt, weil er nahezu von den Eigenschwingungen der Ostsee unbeeinflusst ist. Ursache für das Auffüllen der Ostsee sind länger andauernde und stärkere Winde aus westlicher bis nordwestlicher Richtung über Nord- und Ostsee. BAERENS und HUPFER (1995) zeigen dieses anhand von 10 täglichen Bodendruckanomalieprofilen für 10 Tage vor Auftritt eines Sturmhochwassers. Die Anomalieprofile sind aus knapp 200 verschiedenen Zeitperioden von 10 Tagen vor Auftritt eines Sturmhochwassers ermittelt worden. Als Datengrundlage diente ihnen ein 5° x 5°-Gitterpunktdatensatz des National Center of Atmospheric Research (NCAR) in Boulder. Typische Wetterlagen, die Ursache für einen Einstrom in die Ostsee sind, werden z. B. auch von HEYEN et al. (1996) beschrieben.

Die aerologischen Zeitreihen von Göteborg und Kopenhagen im 850 hPa-Niveau illustrieren, dass vor Auftreten eines Sturmhochwassers länger andauernde und stärkere Winde aus westlichen Richtungen kommen. Dieses kann durch einen Vergleich des Betrages des mittleren Windvektors in 850 hPa und des Betrages des mittleren Windvektors, der aus 10 Tage vor Auftreten eines Sturmhochwassers gemessenen Daten ermittelt wurde (Untersuchungszeitraum von 1978 bis 1994), gezeigt werden. Die Definition des Betrages des mittleren Windvektors lautet folgendermaßen:

$$(2) \quad v = \frac{1}{N} \cdot \left[\left(\sum_i u_i \right)^2 + \left(\sum_i v_i \right)^2 \right]^{1/2}$$

In der Gleichung 2 sind N die Anzahl der Ereignisse und u_i und v_i die Windkomponenten gemeint. Der Betrag des mittleren Windvektors in 850 hPa beträgt in Kopenhagen 4,4 m/s. Der Betrag des mittleren Windvektors für 10 Tage vor Auftritt eines Sturmhochwassers beträgt im Vergleich dazu 8,4 m/s. Das Verhältnis des Betrages des mittleren Wind-

vektors und der mittleren Windgeschwindigkeit kann als Maß für die Persistenz der Windrichtung angesehen werden. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt in Kopenhagen in 850 hPa innerhalb des Zeitraumes von 1978 bis 1994 10,3 m/s. Zehn Tage vor Auftritt eines Sturmhochwassers beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit 13,5 m/s. Das Verhältnis des Betrages des mittleren Windvektors und der mittleren Windgeschwindigkeit beträgt 0,43 und für zehn Tage vor einem Sturmhochwasser 0,62. Die Verhältnisse für Göteborg betragen 0,39 und 0,56. Die Untersuchungen der aerologischen Zeitreihen von Kopenhagen und Göteborg belegen, dass die Persistenz von Westwinden und die Windgeschwindigkeit zehn Tage vor einem Sturmhochwasser höher sind als im Mittel.

Der überwiegende Anteil des Pegelanstiegs zu einem Sturmhochwasser wird durch Stürme aus N bis NE über der zentralen Ostsee verursacht. Diese Stürme sind für das Erreichen bzw. Überschreiten des Sturmhochwasserswellwertes von 1 m über NN verantwortlich. Verschiedene typische Wetterlagen, welche Ursache für das Auftreten von Sturmhochwassern sind, werden z. B. von KOHLMETZ (1967) beschrieben.

Daraus können wir schließen, dass der anomale Pegelstand an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns während eines Sturmhochwassers eine Kombination aus dem etwa 15 cm betragenden überall ansteigenden Wasserstand der Ostsee und dem durch N- bis NE-Stürme hervorgerufenen lokalen Pegelanstieg ist.

Es ist anzumerken, dass ein Teil des Wasserstandes durchaus auch auf die Eigenschwingungen der Ostsee zurückzuführen ist. Die Amplitude der Eigenschwingung erster Ordnung kann bis zu 1 m betragen. Es ist offensichtlich, dass der Wasserstand an der deutschen Ostseeküste bei einem Sturmhochwasser besonders hoch ausfällt, falls Eigenschwingungen die Wirkungen des Winddruckes verstärken. Eigenschwingungen der Ostsee wurden z. B. von WÜBBER und KRAUSS (1979) untersucht.

Im nächsten Kapitel analysieren wir die zunehmende Häufigkeit von leichten Sturmhochwassern anhand der Windverteilung. Wir betrachten einerseits die Veränderungen in der Häufigkeit von länger andauernden und stärkeren westlichen Winden und andererseits die Veränderungen in der Häufigkeit von N- bis NE-Stürmen.

4. Veränderungen in der Windverteilung

Die Windzeitreihen im 850 hPa-Niveau der aerologischen Stationen von Kopenhagen, Greifswald, Tallinn und Riga wurden analysiert, um Informationen über Veränderungen in der Windklimatologie zu erhalten. Es ist anzumerken, dass Höhenwindmessungen nicht von der umgebenden Topographie des Messstandortes beeinflusst sind. Bodenwindmessungen hingegen unterliegen dem Einfluss der Topographie. Die Greifswalder Zeitreihe steht von 1949 bis 1994 und die restlichen stehen von 1969 bis 1994 zur Verfügung.

Um die Veränderungen in der Häufigkeit von westlichen Winden zu bestimmen, wurden die jährlichen relativen Häufigkeiten für Windrichtungen innerhalb des Sektors von 225° bis 315° für die vier verschiedenen Standorte bestimmt. Für alle Stationen kann mittels einer linearen Regression eine Zunahme der Häufigkeit dieser Windrichtungen nachgewiesen werden. Die Häufigkeit von Windrichtungen innerhalb dieses Sektors zwischen 225° und 315° hat zwischen etwa $\frac{1}{6}$ in Greifswald und etwa $\frac{1}{10}$ in Tallinn in den letzten 25 Jahren zugenommen. Für die Greifswalder Zeitreihe wurde herausgefunden, dass es zu einer Zunahme westlicher Winde sowohl im Zeitraum von 1949 bis 1994 als auch von 1969 bis 1994 kam (siehe Abb. 2). Eine signifikante Veränderung in der Häufigkeit von Windgeschwindigkeitsregistrierungen innerhalb des Nord- und Ostsektors zwischen 315° und 135° konnten we-

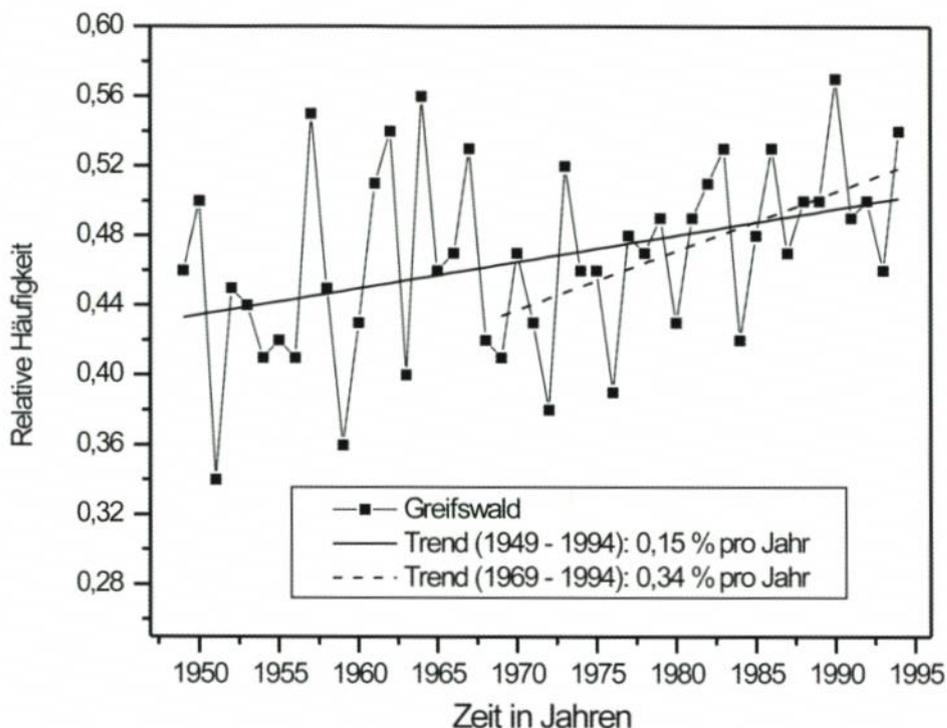


Abb. 2: Jährliche prozentuale Häufigkeit von Windrichtungen zwischen 225° und 315° im 850 hPa-Niveau der aerologischen Station Greifswald von 1949 bis 1994 und linearer Trend für den gesamten Zeitraum und für 1969 bis 1994

der in den vier Zeitreihen von 1969 bis 1994 noch in der Zeitreihe von Greifswald von 1949 bis 1994 nachgewiesen werden. Die Untersuchung von länger andauerndem Wind innerhalb eines Windrichtungssektors zeigt, dass die jährliche Häufigkeit von westlichen Winden zwischen 225° und 315° über eine Periode von 5 Tagen und mehr zugenommen hat. Die Zunahme in der Häufigkeit von länger anhaltenden Winden innerhalb des westlichen Windrichtungssektors folgt aus der zunehmenden Häufigkeit von Messungen innerhalb dieses Sektors, weil das letztere Phänomen mit einer Zunahme des Aufenthalts von Winden in dem Westsektor verknüpft ist.

Weiterhin werden für die Greifswalder Zeitreihe von 1949 bis 1994 die Veränderungen in der Häufigkeit von verschiedenen Klassen der Windgeschwindigkeit und verschiedenen Sektoren der Windrichtung für die Monate November bis Februar ermittelt, um genauere Details in der Veränderung der Windverteilung zu erhalten. Diese Monate wurden gewählt, weil Sturmhochwasser überwiegend während dieses Zeitraumes auftreten. Die Klassen der Windgeschwindigkeit betragen 0 bis 10 m/s, 10 bis 20 m/s und größer oder gleich 20 m/s. Die Sektoren der Windrichtung sind die vier Sektoren mit einer Breite von 90° rund um die Hauptwindrichtungen N, E, S und W.

Die Signifikanz der Trends wurde mittels eines t-Tests bestimmt, welcher die Signifikanz des Vorzeichens und die Abweichung von Null des Regressionskoeffizienten angibt. In dieser Arbeit wird eine Signifikanz oberhalb von 95 % als hoch signifikant und oberhalb von 90 % als signifikant angenommen.

Die Abb. 3, 4, 5 und 6 zeigen die Häufigkeiten in Prozent für die verschiedenen Klassen der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen für die Monate November bis Februar. Wir fanden heraus, dass es keine signifikanten Veränderungen in der Häufigkeit in allen Klassen der Windgeschwindigkeit innerhalb des Nord- und des Ostsektors von 1949 bis 1994 gab (s. Abb. 3 u. 4). Im Süd- und im Westsektor ist es in der Vergangenheit zu Veränderungen in der Häufigkeit gekommen (s. Abb. 5 u. 6). Die Häufigkeit von Windgeschwindigkeiten größer oder gleich 20 m/s veränderte sich nicht signifikant im Südsektor, während Windgeschwindigkeiten kleiner als 20 m/s in der Häufigkeit abnahmen. Im Westsektor haben Winde zwischen 10 und 20 m/s und mehr als 20 m/s in der Häufigkeit zugenommen und Winde kleiner als 10 m/s haben in diesem Sektor leicht abgenommen. Die Zunahme westlicher Winde ≥ 20 m/s geschah in erster Linie auf Kosten von südlichen Winden zwischen 0 und 20 m/s. Die Zunahme in der Häufigkeit von starken westlichen Winden beträgt etwa einen $\frac{3}{4}$ Tag pro Jahr für die untersuchten Monate November bis Februar.

Trends, die aus Häufigkeiten über das gesamte Jahr ermittelt wurden, zeigen das gleiche Vorzeichen für die verschiedenen Klassen der Windgeschwindigkeit und verschiedenen Sektoren der Windrichtung wie diejenigen für November bis Februar.

Eine weitere Methode zur Analyse und Präsentation von Windzeitreihen bieten die Perzentile. Ein p% Perzentil repräsentiert die Windgeschwindigkeit, welche mit einer Wahrscheinlichkeit von p% überschritten wird. Die zum p% Perzentil zugehörige Windgeschwindigkeit kann bestimmt werden, wenn die Verteilung in der Form der Überschreitungswahrscheinlichkeit gegeben ist. Gewöhnlich werden das 1, 10 und 50% Perzentil ermittelt, da diese eine gute Information über die Verteilung geben. Zeitreihen der 1, 10 und

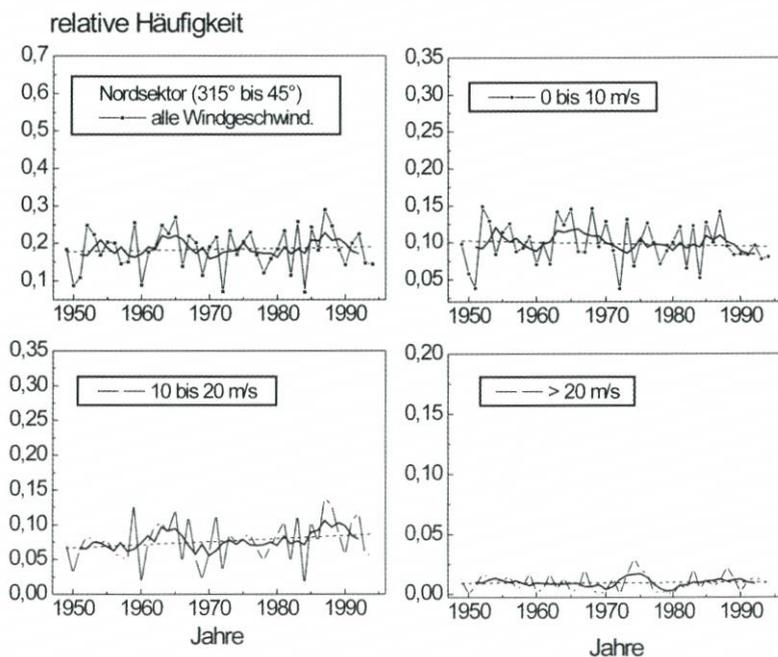


Abb. 3: Relative Häufigkeit verschiedener Klassen der Windgeschwindigkeit für den Nordsektor (315° bis 45°) in Greifswald in 850 hPa für die Monate November bis Februar

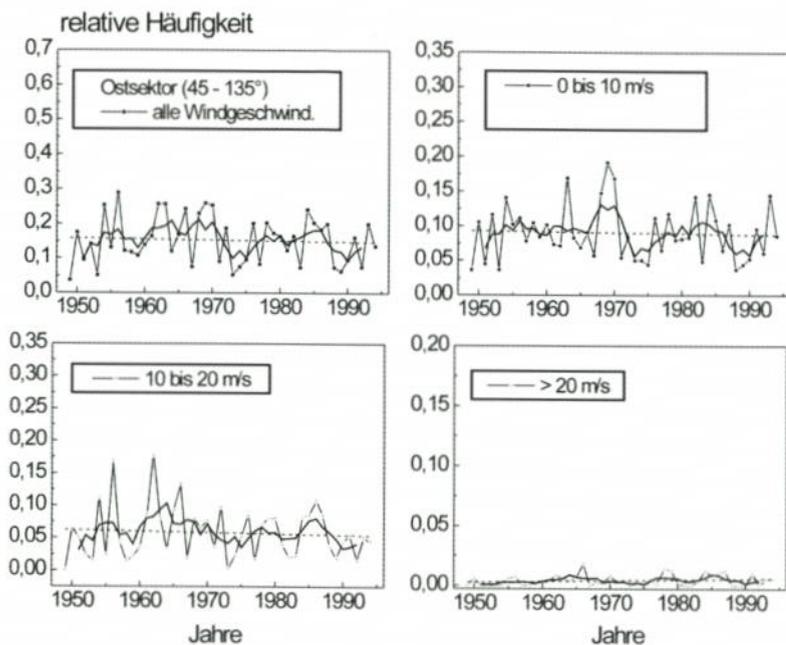


Abb. 4: Relative Häufigkeit verschiedener Klassen der Windgeschwindigkeit für den Ostsektor (45° bis 135°) in Greifswald in 850 hPa für die Monate November bis Februar

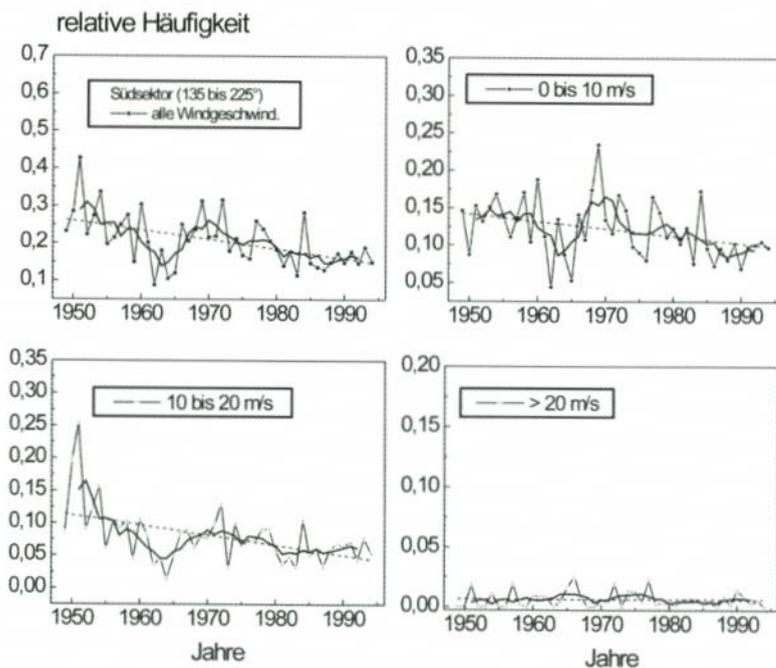


Abb. 5: Relative Häufigkeit verschiedener Klassen der Windgeschwindigkeit für den Südsektor (135° bis 225°) in Greifswald in 850 hPa für die Monate November bis Februar

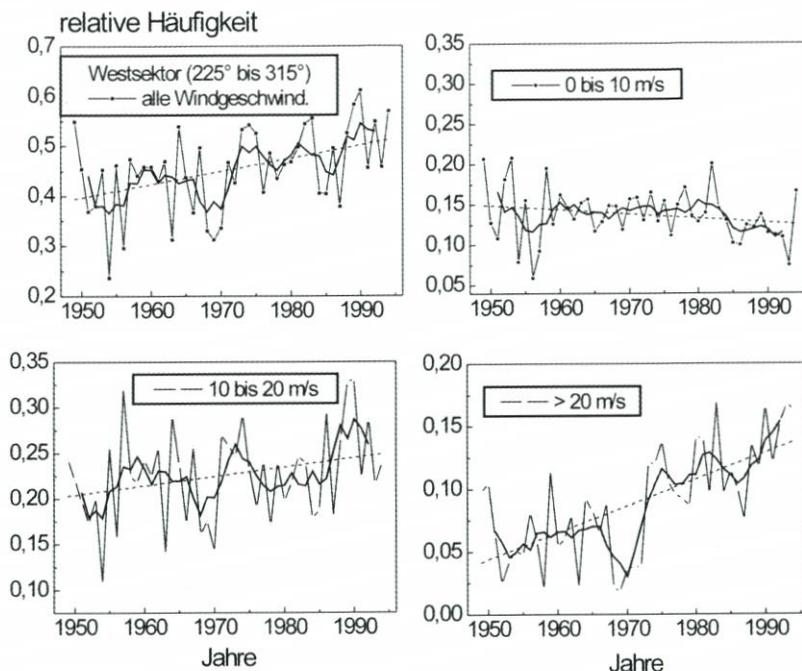


Abb. 6: Relative Häufigkeit verschiedener Klassen der Windgeschwindigkeit für den Westsektor (225° bis 315°) in Greifswald in 850 hPa für die Monate November bis Februar

50 % Perzentile ermittelt aus den jährlichen Häufigkeitsverteilungen sind aus denselben aerologischen Windzeitreihen für den Zeitraum von 1969 bis 1994 bestimmt worden (s. Abb. 7). Das 1 % Perzentil gilt als extrem. Die Zunahme der Trends der 1 % Perzentile variiert zwischen + 0,06 m/s pro Jahr in Tallinn und + 0,2 m/s pro Jahr in Greifswald. Die Trends der 50 % Perzentile fallen kleiner aus als die Trends der 1 % Perzentilzeitreihen. Die Trends, die für die Zeitreihen der 50 % Perzentile ermittelt wurden, variieren zwischen - 0,03 m/s pro Jahr in Tallinn und + 0,04 m/s pro Jahr in Greifswald. Die ermittelten Trends der Zeitreihen der 50 % Perzentile für Kopenhagen und Riga sind positiv. Der Grund für die positiven Trends bei den Perzentilen ist eine zunehmende Häufigkeit von stärkeren Winden, die sich hier in einer zunehmenden Häufigkeit von starken westlichen Winden auf Kosten von schwächeren südlichen Winden bemerkbar macht. Die Greifswalder Zeitreihe von 1949 bis 1994 wurde derselben Analyse unterzogen. Die Trends betragen + 0,1 m/s pro Jahr für die 1 % Perzentile, + 0,08 m/s pro Jahr für die 50 % Perzentile und + 0,03 m/s pro Jahr für die 50 % Perzentile. Zur Analyse der zunehmenden Häufigkeit der leichten Sturmhochwasser wurden Zeitreihen der Perzentile ermittelt aus Häufigkeitsverteilungen für die Monate November bis Februar innerhalb des Sektors Nord bis Ost (0 bis 90°) untersucht. Diese sollen zusätzliche Informationen von möglichen Veränderungen in der Häufigkeit extremer Windgeschwindigkeiten liefern (s. Abb. 8). Jedoch zeigen Abb. 8 und die Signifikanzstatistik keine Veränderungen in der Häufigkeit von mittleren als auch von extremen Windgeschwindigkeiten. Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit der Analyse von Häufigkeiten von verschiedenen Klassen der Windgeschwindigkeit im Nord- und Ostsektor während dieser Wintermonate.

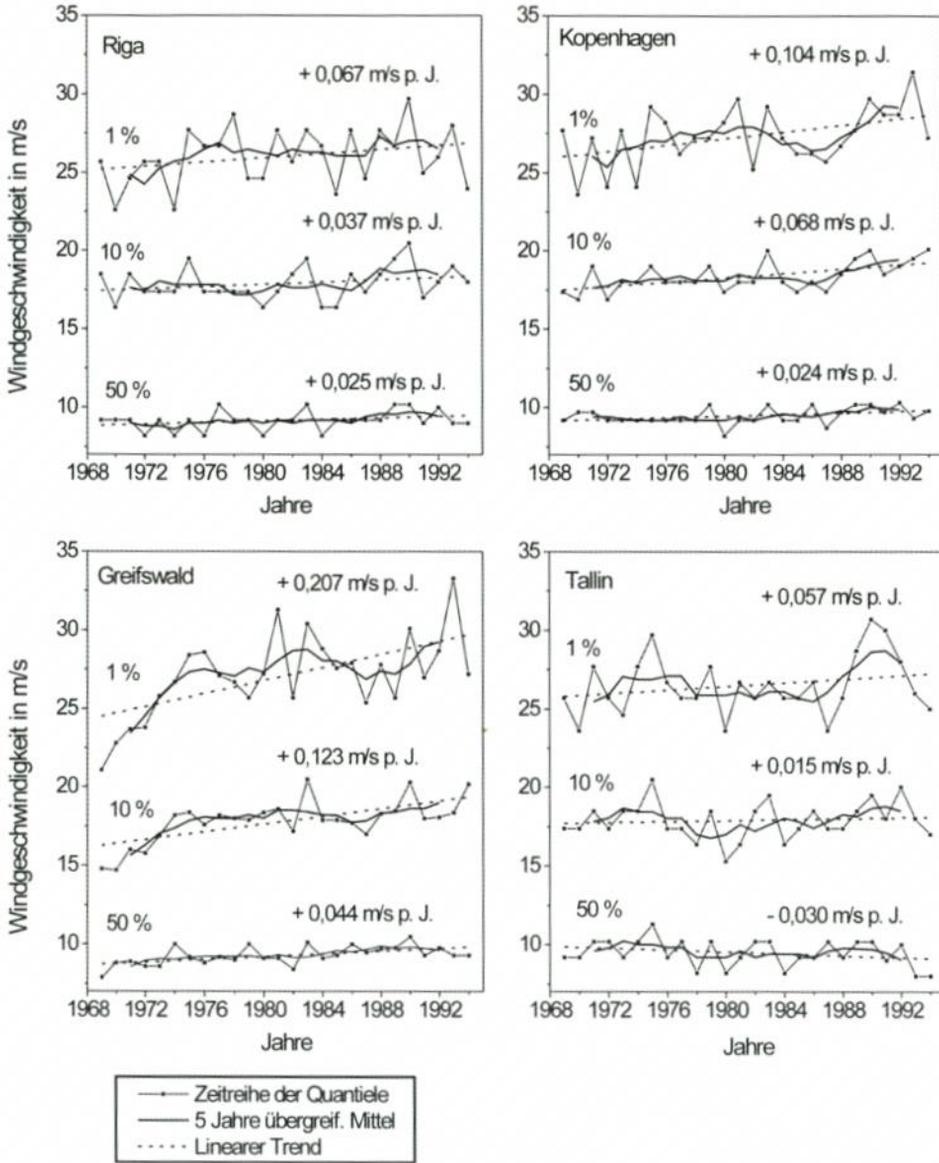


Abb. 7: Zeitreihen der 1, 10 und 50 % Perzentile ermittelt aus den jährlichen Verteilungen der Windgeschwindigkeit in 850 hPa für die Standorte Kopenhagen, Tallinn, Riga und Greifswald

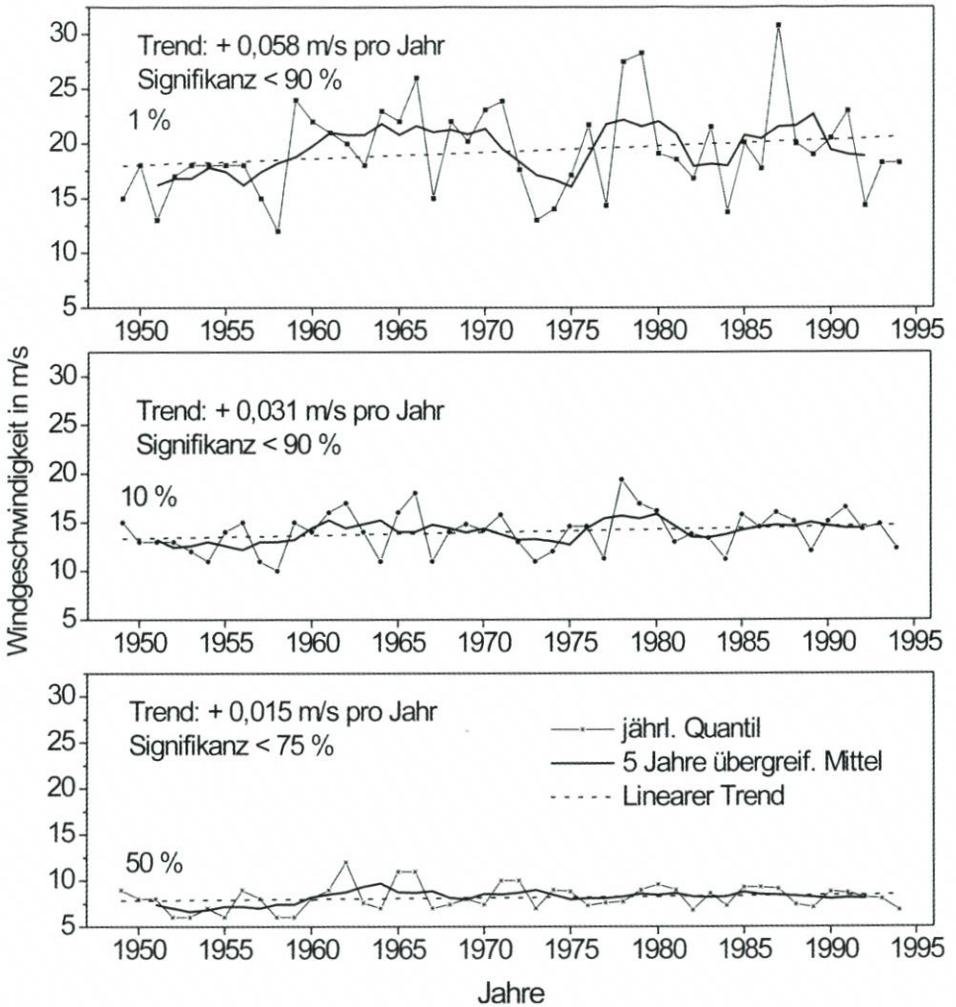


Abb. 8: Zeitreihen der 1, 10 und 50 % Perzentile ermittelt aus Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit für Windrichtungen zwischen 0° und 90° und für die Monate November bis Februar

Zur Untersuchung langer Windzeitreihen mit ähnlicher Länge wie die Zeitreihe der Sturmhochwasser verwenden wir Bodenwindzeitreihen. Jedoch existieren für unser Untersuchungsgebiet keine durchgehenden und homogenen Windzeitreihen mit einer Länge von etwa 100 Jahren. Die einzige historische zur Verfügung stehende Bodenwindzeitreihe ist die von der Seefahrtsschule in Wustrow von 1876 bis 1920. Es handelt sich hier bereits schon um Zehnminutenmittelwerte, die mit einem Anemometer auf dem Dach der Schule gemessen wurden. Von 1920 bis 1945 sind lediglich geschätzte Daten (Beaufort) von Warnemünde erhältlich. Diese Schätzwerte wurden mittels der Beaufortequivalentskala von LINDAU (1994) in Windgeschwindigkeitsdaten transformiert. Seit 1946 werden Zehnminutenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung von der Wetterstation in Warnemünde gemessen. Doch bedauerlicherweise veränderte sich des öfteren die umgebende Bebauung rund um

den Messstandort. Eine weitere geeignete Windzeitreihe gibt es von Arkona (Insel Rügen), die ab 1950 zur Verfügung steht. Es muss erwähnt werden, dass eine gemeinsame Auswertung aller dieser Rohdaten ab 1880 nicht ohne weiteres erfolgen kann, weil die gemessenen Bodendaten dem Einfluss der lokalen und regionalen Bodeneigenschaften unterliegen. Eine für wissenschaftliche Zwecke zu verwendende Zeitreihe kann nur durch Homogenisierung und Normierung der gemessenen Rohdaten auf einheitliche Bodeneigenschaften erstellt werden. Die Homogenisierung der Zeitreihen von Wustrow, Warnemünde und Arkona in Bezug auf die Orographie, die Rauigkeit und die Hindernisse des umgebenden Messstandortes und die anschließende Normierung auf einheitliche Bodeneigenschaften und eine einheitliche Messhöhe erfolgen mittels eines kleinskaligen Modells (MORTENSEN et al., 1993). Für die einheitliche Bodeneigenschaft haben wir eine Wasseroberfläche mit einer Rauigkeitslänge von 0,0002 m und eine Höhe von 10 m gewählt. Das kleinskalige Modell berechnet aus den gemessenen Zeitreihen und der vorgegebenen Beschreibung des Messstandortes (Orographie, Rauigkeit und Hindernisse) die für die ausgewählte Wasseroberfläche entsprechend geltenden Weibull-Parameter. Die Weibull-Häufigkeitsverteilung ist eine generell anerkannte zweiparametrische Verteilung zur Beschreibung von Windverteilungen. Damit die empirischen Verteilungen möglichst gut durch die Weibull-Verteilungen approximiert werden, wurden von uns Zeitreihenabschnitte von fünf Jahren als Stichprobe gewählt. Von 1880 bis 1995 wurden dann für Perioden von fünf Jahren Weibull-Verteilungen bestimmt. Diese Verteilungen dienten dann zur Bildung von Zeitreihen der 1, 10 und 50 % Perzentile (s. Abb. 9). Die Trendanalyse zeigt für die drei Zeitreihen der Perzentile, gebildet aus Weibull-Verteilungen von Wustrow und Warnemünde, nur minimale Veränderungen. Der Trend der Zeitreihe des 1 % Perzentils beträgt $-0,014$ m/s in fünf Jahren mit 95 % Signifikanz. Der Trend der 10 % Per-

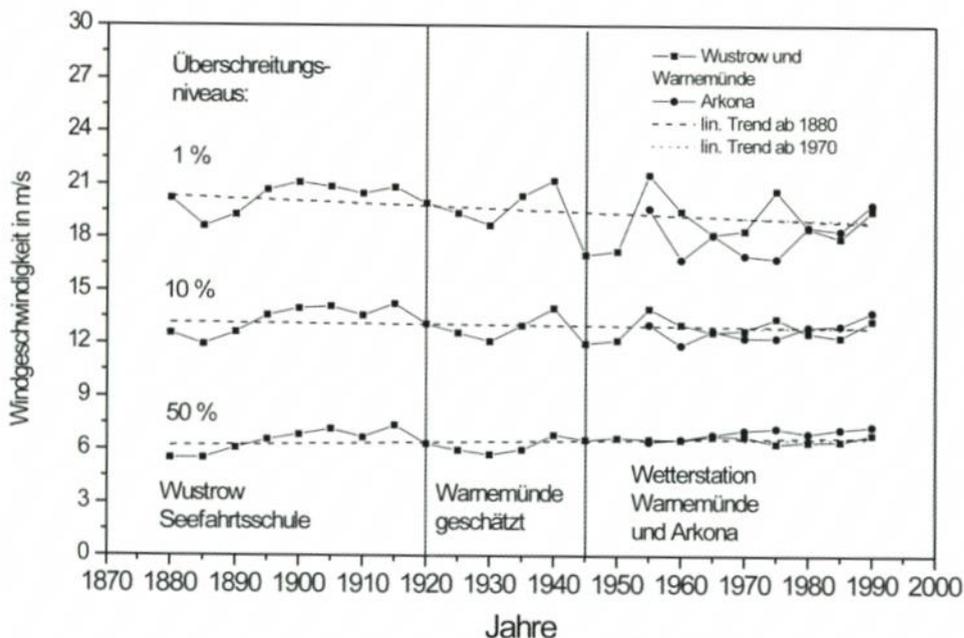


Abb. 9: Zeitreihen der 1, 10 und 50 % Perzentile ermittelt aus den fünfjährigen korrigierten (normiert auf Seeoberflächeneigenschaften) Weibull-Häufigkeitsverteilungen von Wustrow, Warnemünde und Arkona

zentilzeitreihe beträgt $-0,002$ m/s in fünf Jahren. Jedoch ist dieser Trend nicht signifikant ($< 90\%$). Der Trend der 50 % Perzentilzeitreihe beträgt $+0,005$ m/s in fünf Jahren und kann mit 90 % Signifikanz angegeben werden. Es ist festzustellen, dass diese Trends kleiner sind als die aus den kürzeren aerologischen Zeitreihen abgeleiteten. Ein Vergleich der Zeitreihen der Perzentile, gebildet aus den korrigierten Weibull Verteilungen von Warnemünde und Arkona, bestätigt die hier angewendete Methode zur Korrektur von Bodenwindzeitreihen mittels eines kleinskaligen numerischen Modells. Ein direkter Vergleich der beiden Originalzeitreihen von Warnemünde und Arkona ist nicht möglich, weil die beiden Messstandorte sich sehr unterscheiden. Der Messstandort Warnemünde ist von einer starken Bebauung nahezu ohne Orographie umgeben, während der Messstandort Arkona unmittelbar an einer 42 m hohen Steilküste liegt und von einer hügeligen Orographie mit wenig Bebauung umgeben ist.

5. Schluss

Untersuchungen der aerologischen Zeitreihen von Greifswald (1949 bis 1994) und drei weiteren aerologischen Zeitreihen im Ostseeraum von Kopenhagen, Tallinn und Riga (1969 bis 1994) zeigen keine signifikanten Veränderungen in der Häufigkeit von nördlichen und östlichen Winden. Häufigkeiten von westlichen Winden mit Windgeschwindigkeiten oberhalb von 10 m/s haben in 850 hPa in erster Linie auf Kosten von südlichen Winden bis 20 m/s zugenommen. Die zunehmende Häufigkeit von starken westlichen Winden kann auch in leichten positiven Trends aus Zeitreihen verschiedener Perzentile beobachtet werden. Jedoch zeigen die Zeitreihen der 1, 10 und 50 % Perzentile keine signifikanten Trends für den Windrichtungssektor zwischen Nord und Ost. Zeitreihen verschiedener Perzentile, ermittelt aus den für jeweils fünf Jahre geltenden korrigierten Weibull-Verteilungen von Wustrow und Warnemünde, zeigen keine nennenswerten Veränderungen in der Häufigkeit von mittleren als auch extremen Windgeschwindigkeiten in der Vergangenheit seit 1880.

Aus unseren Untersuchungen können wir erkennen, dass die zunehmende Häufigkeit leichter Sturmhochwasser an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns gut mit der zunehmenden Häufigkeit westlicher Winde von 1949 bis 1994 korrespondiert und nicht mit Veränderungen in der Häufigkeit von extremen Windereignissen aus nördlichen und östlichen Richtungen in Verbindung zu bringen ist. In der Regel ist ein Anstieg des allgemeinen Wasserstandes der Ostsee eine Vorbedingung für das Auftreten leichter Sturmhochwasser. Je höher der Wasserstand der Ostsee vor einem Sturmhochwasser ausfällt, um so geringere Auswirkungen müssen die N- bis NE-Stürme auf den Pegelanstieg haben, damit der kritische Pegelwert von 1 m über NN erreicht wird. Die zunehmende Häufung erhöhter Wasserstände der Ostsee, induziert durch starke westliche Winde, vergrößerte trotz nicht wesentlich veränderter Auftrittshäufigkeit extremer Windgeschwindigkeiten aus nördlichen und östlichen Richtungen die Auftrittswahrscheinlichkeit leichter Sturmhochwasser. Bei einem starken und mittleren Sturmhochwasser ist der vorherige Wasserstand der Ostsee meistens nicht ganz so entscheidend wie bei einem leichten Ereignis, weil in diesen Fällen der durch den Sturm verursachte Pegelanstieg an der Mecklenburg-Vorpommerschen Ostseeküste die entscheidende Rolle spielt. Dieses wird in den Häufigkeiten der N- bis NE-Stürme und in denen von mittleren und starken Sturmhochwassern gezeigt. Keine der beiden Zeitreihen zeigt einen signifikanten Trend zwischen 1949 bis 1994.

