

DEUTSCHER WETTERDIENST

Seewetteramt

ISSN 0072 - 1603

Einzelveröffentlichungen

Nr. 108

**Meteorologische Untersuchungen über
Stürme an der deutschen Nordseeküste**

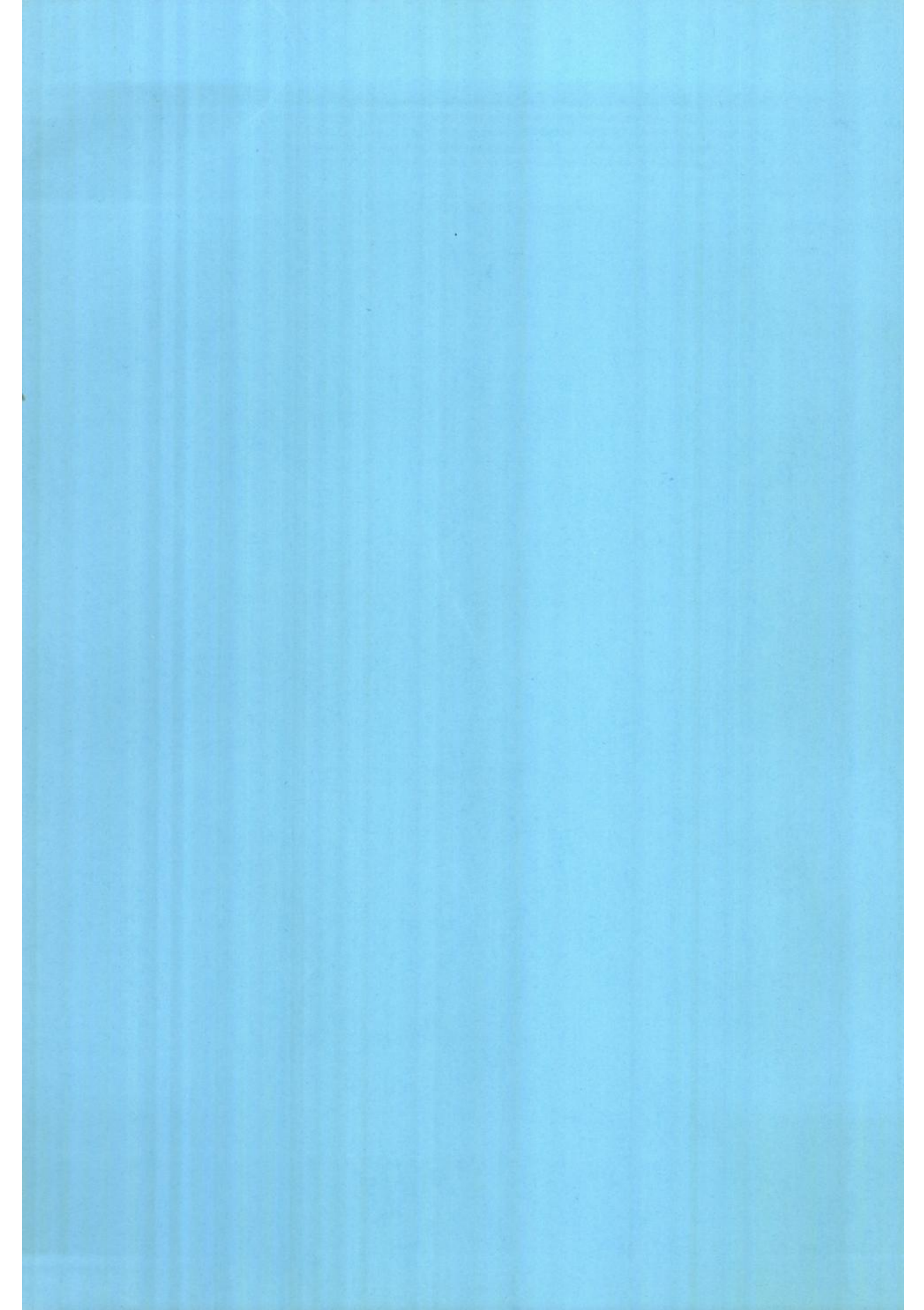
von

G. Duensing, O. Höflich, L. Kaufeld,
H. Schmidt, G. Olbrück und B. Brandt



Hamburg

1985



DEUTSCHER WETTERDIENST

Seewetteramt

ISSN 0072 - 1603

Einzelveröffentlichungen

Nr. 108

**Meteorologische Untersuchungen über
Stürme an der deutschen Nordseeküste**

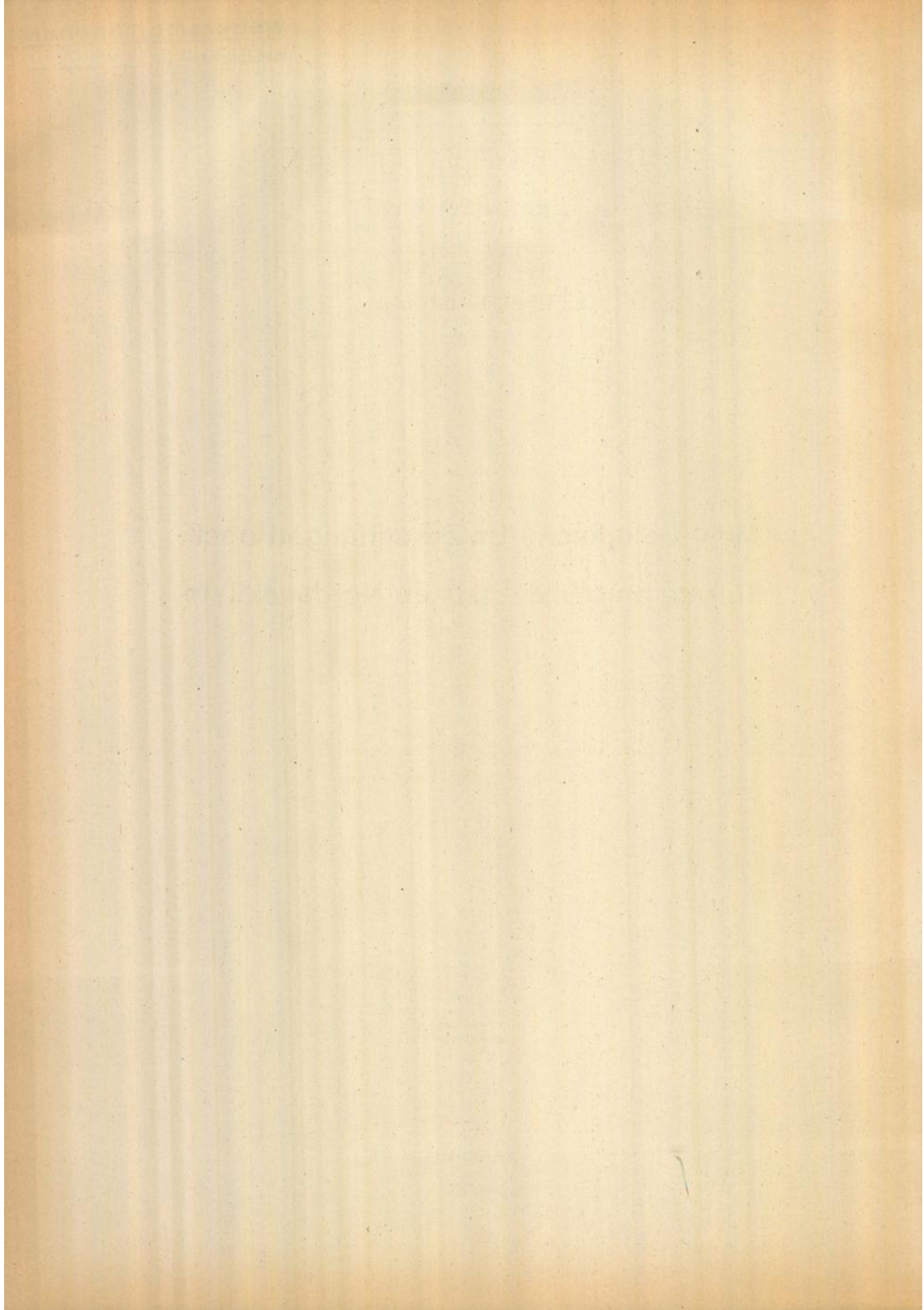
von

G. Duensing, O. Höflich, L. Kaufeld,
H. Schmidt, G. Olbrück und B. Brandt



Hamburg

1985



Zusammenfassung

Stürme und Sturmfluten haben die deutschen Küsten immer wieder heimgesucht. Sie brachten häufig großes Leid über das Land. Daher ist es ein uraltes Bemühen der Küstenbewohner, ihre Küste zu schützen. Die vorliegende Arbeit behandelt für die deutsche Nordseeküste die meteorologischen Zusammenhänge in den Themenkreisen:

1. Klimatische Schwankungen der Sturmhäufigkeiten
2. Häufigkeiten von Sturm und hohen Wellen
3. Luftdruck- und Windfelder bei Sturmweatherlagen
4. Optimale Schiffsrouten bei Sturmlagen in der Nordsee
5. Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten hoher Windgeschwindigkeiten an den norddeutschen Küsten

Die vorliegenden meteorologischen Meßreihen zeigen mit mathematisch-statistischer Sicherheit keine periodischen Vorgänge oder Trends. Meteorologische Vorgänge treten in einzelnen Zeitabschnitten "zufällig häufig" auf.

Nicht die Gesamtzahl der Stürme, sondern die Häufigkeit von Nordweststürmen und in geringem Maße auch von Südweststürmen ist entscheidend für die Häufigkeit von Sturmfluten. Weder aus den Winddaten der Feuerschiffe, noch aus den längeren Reihen der Küstenstationen oder auch der Häufigkeit von Nordwestweatherlagen der letzten 100 Jahre läßt sich eine Zunahme von nordwestlichen Starkwinden und Stürmen zu Lasten der anderen Windrichtungen oder Geschwindigkeiten nachweisen.

An der deutschen Nordseeküste sind die Schifffahrtswege zu den Häfen in den letzten Jahren durch meteorologische Vorgänge und hohen Seegang nicht gefährlicher geworden. Die Seegebiete vor der niederländischen Küste sind sturmgefährdeter als diejenigen vor der deutschen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Windgeschwindigkeiten ist an der deutschen Nordsee in einem Küstenstreifen von ca. 30 km sowie im westlichen Niedersachsen und in Nordfriesland besonders hoch.

Summary

Storms and storm surges have plagued the German coast over and over again. They frequently wrought much havoc in the land. For that reason it is an old habit for the coastal inhabitants to strive to protect their coasts. This publication deals with the meteorological relationships for the German North Sea coast under the themes:

1. Climatic variations of the frequency of storms
2. Frequencies of storm and high waves
3. Air pressure and wind fields during stormy weather conditions
4. Optimum ship routes during storm conditions in the North Sea
5. Probabilities of the occurrence of extreme wind velocities on the north German coasts

The existing meteorological time series indicate within the limits of mathematical-statistical certainty no periodicity or trends. Meteorological processes occur "randomly frequent" in individual periods of time.

Not the total number of storms, but the frequency of northwest storms and - to a lesser extent - also of southwest storms is decisive for the frequency of storm surges. Neither the wind data of the light vessels, nor the longer time series of the coastal stations, or even the frequency of northwest weather conditions of the past 100 years, provide evidence of an increase of northwesterly strong winds and storms to the detriment of the other wind directions or wind velocities.

On the German North Sea coast the shipping routes to the ports have not become more dangerous, during the past years, owing to meteorological processes and high states of the sea. The sea areas off the Netherland's coast are more subject to storms than those off the German coast. The probability of the occurrence of extreme wind velocities over the German part of the North Sea - in a coastal strip of about 30 km - as well as in western Lower Saxony and in North Friesland - is particularly high.

Übersicht

- 1 Einleitung
- 2 Klimatische Schwankungen der Sturmhäufigkeiten
 - 2.1 Häufigkeiten von Starkwinden, Stürmen und Orkanen über der Deutschen Bucht
 - 2.2 Beziehungen zwischen Stürmen und Sturmfluten
 - 2.3 Fluktuationen und Scheinperioden im Auftreten von Stürmen und Sturmfluten
 - 2.4 Trend in Häufigkeiten von Sturm und Sturmfluten
- 3 Vergleich der Häufigkeiten von Sturm und hohen Wellen zwischen der Deutschen Bucht und der südwestlichen Nordsee
 - 3.1 Regionale Einteilung
 - 3.2 Vergleich der Sturmhäufigkeiten
 - 3.3 Häufigkeit hoher Wellen
- 4 Luftdruck- und Windfelder bei Sturmweatherlagen
 - 4.1 Datenmaterial
 - 4.2 Andauerzeiten und Beginn längerer Starkwind- und Sturmperioden
 - 4.3 Atmosphärische Einflüsse auf Tiden
 - 4.4 Die geostrophische Windbeziehung
 - 4.5 Das Windfeld bei Sturmlagen
- 5 Optimale Schiffsrouten bei Sturmlagen in der Nordsee
- 6 Extremalwindgeschwindigkeiten an der deutschen Küste
 - 6.1 Beschreibung des Verfahrens
 - 6.2 Datenmaterial
 - 6.3 Ergebnisse und ihre Interpretation
 - 6.4 Die jahreszeitliche Variation der Extremalwinde
 - 6.5 Die regionale Verteilung der Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit
- 7 Literatur
- 8 Abbildungen

1 Einleitung

Die Sturmfluten im Januar 1976 gefährdeten nicht nur die Hauptdeiche der Küste, sondern schädigten auch sehr stark die Deiche in den Mündungstrichtern der deutschen Flüsse. Nach den großen Fluten von 1962, 1973 und 1976 regten die Küstenländer Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein Untersuchungen über die Ursachen der scheinbaren Häufung von schweren Sturmfluten und der höher auflaufenden Fluten an. Vor allem aus Wirtschaftskreisen wurde die Verbesserung des Sturm- und Sturmflutwarndienstes an der deutschen Küste gefordert.

Die Küstenländer förderten verschiedene wasserbauliche Untersuchungen über die Wirkungen von Ausbaumaßnahmen an den Flüssen bei extremen Sturmfluten. Auch Versuche mit Vertikalpendeln, die vor der Küste vorhandene große Wassermassen bei bevorstehenden schweren Sturmfluten anzeigen sollten, wurden unter anderem gefördert. Diese Wassermassen werden durch das herrschende Windfeld aufgestaut. Es ist deshalb naheliegend, zunächst die meteorologischen Zusammenhänge vor und bei Sturmfluten wissenschaftlich zu untersuchen.

Dem Deutschen Wetterdienst obliegt die gesetzliche Aufgabe, vor starken Winden und Stürmen zu warnen. Im Seewetteramt, Abteilung Maritime Meteorologie, wurden die Anregungen aus Wirtschaft und Politik aufgegriffen und das Zusammenspiel zwischen Sturmhäufigkeiten und großen Fluten untersucht. Mögliche meteorologische Ursachen für die heute gegenüber früher anscheinend höher auflaufenden Fluten könnten in Änderungen der Zugbahnen, in der Entwicklung oder dem Verhalten von Sturmzyklonen oder auch im Sturmablauf liegen.

Für alle Planungs- und Investitionsprogramme der Landes- und Raumordnung sowie für Infrastrukturmaßnahmen und der Abschätzung der Konkurrenzfähigkeit der deutschen Export- und Import-Industrie bei einer Verschiffung über deutsche Häfen ist es wichtig, die Sturmgefährdung der deutschen Küste gegenüber anderen europäischen Küstenregionen zu erkennen. Deshalb wurde ein Vergleich der augenblicklichen Häufigkeiten von Stürmen und hohen Wellen zwischen der Deutschen Bucht und den Seegebieten vor der niederländischen Küste durchgeführt. Außerdem wurde aus Wirtschaftskreisen die Frage nach Änderungen in der Vergangenheit und nach der zukünftigen Entwicklung der Sturmhäufigkeiten gestellt.

Das Projekt behandelt die Themenkreise:

- Klimatische Schwankungen der Sturmhäufigkeiten
- Vergleich der Häufigkeiten von Sturm und hohen Wellen zwischen der Deutschen Bucht und der südwestlichen Nordsee
- Luftdruck- und Windfelder bei Sturmweatherlagen
- Wahrscheinlichkeit für das Auftreten hoher Windgeschwindigkeiten.

Die Sturmforschung soll in den nächsten Jahren fortgesetzt werden. Sehr hilfreich hierzu ist das meteorologische Küstenexperiment PUKK, das im Herbst 1981 durchgeführt wurde.

2 Klimatische Schwankungen der Sturmhäufigkeiten

2.1 Häufigkeiten von Starkwinden, Stürmen und Orkanen über der Deutschen Bucht

Extreme Witterungsverhältnisse werfen immer wieder die Frage auf, ob sich das Klima einer Landschaft grundlegend ändert. Einige Autoren weisen auf einen grundlegenden Wandel der Wetterverhältnisse seit 1960 hin. Nach Ansicht dieser Autoren sollen folgende langfristige Veränderungen zweifelsfrei beobachtet worden sein:

1. Ausdehnung der Eisgrenze in der Arktis und eine größere Anhäufung von Eisbergen und Treibeis in den Gewässern um Neufundland ab 1970, verursacht durch einen deutlichen Rückgang der Temperaturen in der Arktis.
2. Erhöhte Temperaturunterschiede zwischen der Arktis und den Subtropen.
3. Erhöhte Luftdruckunterschiede zwischen den nördlichen Breiten und der gemäßigten Zone.

Größere Temperatur- und Luftdruckunterschiede müssen zwangsläufig verstärkte Tiefdrucktätigkeiten nach sich ziehen. Als Folge dieser Entwicklung sollen für den Bereich der Nordsee und auch des Nordatlantiks verstärkt Nordwest-Wetterlagen auftreten und sich die Neigung zur Bildung energiereicher Zyklonen erheblich verstärkt haben.

Derartige Anomalien treten aber unregelmäßig auf, dauern unterschiedlich lange an und verlaufen untereinander anders. Eine Prognose für die nächsten Jahre ist daraus nicht zu erstellen.

Zur Beurteilung von Sturmhäufigkeiten im Bereich der deutschen Küsten und der Nordsee stehen meteorologische Beobachtungen seit über 100 Jahren, tägliche Wetterkarten seit 1876 und Windbeobachtungen von deutschen Feuerschiffen seit 1924 bereit. Registrierungen des Windes sind nur seit etwa 1950 verfügbar. Pegelregistrierungen in Cuxhaven seit 1843 ergänzen die meteorologischen Daten sehr wertvoll.

Viel schwieriger ist es, Informationen aus der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts und von noch früher zu bekommen. Deshalb konzentrieren sich die im Seewetteramt durchgeführten Arbeiten auf die Analyse von vorliegenden Meß- und Beobachtungsdaten.

Das Seewetteramt veröffentlichte 1967 für das Feuerschiff "Elbe 1" die geglätteten jährlichen Häufigkeiten von Winden ≥ 6 Bft und 8 bis 12 Bft aus dem Zeitraum 1924 bis 1966. In Abbildung 2.1 sind diese gemeldeten Werte unkorrigiert dargestellt.

Da die Einzelwerte stark streuen, wurde die Beobachtungsreihe für beide Windstärkegruppen durch fünfjährig übergreifende Mittelbildung geglättet. In diesen Serien scheint in den ersten 30 Jahren eine zehnjährige Schwankung vorhanden zu sein mit hohen Anzahlen um 1927, 1937, 1947 und niedrigen Anzahlen um 1933, 1943 sowie 1953. Nach dem letzten Zyklus gehen die Werte über die früheren Beträge hinaus und erreichen das 2,3-fache des früheren Mittels. Nach diesen Ergebnissen wäre auf eine erhebliche Zunahme der Starkwinde in der Deutschen Bucht zu schließen. Dagegen steigen die Anzahlen der Sturmstärken nicht signifikant.

Eine Zunahme der Starkwinde kann aber nicht direkt aus den Meßreihen gefolgert werden. Die z.T. seit 1924 vorliegende Reihe der Winddaten der Feuerschiffe weist einen Bruch auf. Vor dem 1.1.1957 handelt es sich um Schätzungen nach der Beaufort-Skala, danach um Messungen. Diese wurden mittels der mit Mängeln behafteten, aber international gültigen Beaufort-Äquivalentskala (1) umgerechnet. Weil in der alten Skala die untere Grenze des Starkwindes (6-7 Bft) bei 22 kn liegt, eigentlich aber 24 kn betragen müßte, ergibt sich für die in Beaufort-Stärken umgerechneten Windmessungen eine zu große Häufigkeit von Starkwind. Umgekehrt ist es bei schweren Stürmen und Orkanen (≥ 10 Bft), da die Äquivalentskala 48 kn als untere Grenze angibt, es jedoch 46 kn sein müßten. Stürme (≥ 8 Bft) sind nicht betroffen, da deren untere Grenze (34 kn) in der Umrechnungsskala richtig angegeben ist. So erscheinen seit Beginn der Messungen (1957) die Häufigkeiten der Starkwinde (6-7 Bft) stark erhöht, die der Windstärken 10 Bft gegenüber früher stark reduziert (Abb. 2.5), obgleich die Anzahl mittlerer und schwerer Sturmfluten seit diesem Termin schwach zugenommen hat, wie Abbildung 2.8 zeigt.

Alle Schlußfolgerungen, die diesen Bruch in der Reihe nicht berücksichtigen, sind deshalb falsch, so z.B. die Aussage, die auf den Beobachtungen der deutschen Feuerschiffe der Jahre 1953 bis 1969 basiert, daß die Häufigkeit der Beaufortstärken ≥ 10 abgenommen habe. Bei den niederländischen Feuerschiffen hingegen ist eine solche Abnahme nicht zu bemerken, wie der Vergleich der Abbildungen 2.2 und 2.3 beweist.

Die Verknüpfung zwischen Beaufort-Werten, die nach dem Aussehen der See geschätzt werden, und gemessenen Windgeschwindigkeitswerten wurde schon kurz nach 1900 ermittelt. Diese alte Äquivalentskala ist nach neueren Vergleichen in einigen Bereichen nicht ganz korrekt, aber dennoch international in Gebrauch. In Abb. 2.4 sind oben die jährlichen Sturmhäufigkeiten (\geq Bft 8) in Prozent für List von 1949 bis 1969 dargestellt, unten diejenigen für Feuerschiff "Elbe 1" von 1924 bis 1980 (fett durchgezogene Kurven). Die dünn durchgezogene Kurve stellt den Anteil der Stürme aus Nordwest ($280^\circ - 340^\circ$), die dünn gestrichelte diejenigen aus Südwest ($210^\circ - 250^\circ$), die dünn punktierte diejenigen der übrigen Richtungen dar. In dieser Abbildung ist auch in Säulenform die Anzahl der Sturmfluten ($\geq 1,0$ m über dem mittleren Hochwasser) in Cuxhaven (Zeitraum 1924 - 1980) bzw. in List (1950 - 1969) eingetragen.

Abbildung 2.5 enthält die jährlichen Häufigkeiten schwerer Stürme und Orkane (\geq Bft 10) oben für List (Sylt), unten für Feuerschiff "Elbe 1".

In den Abbildungen 2.4 und 2.5 erkennt man sturmreiche Zeitabschnitte bei Feuerschiff "Elbe 1", wie z.B. von Beginn der Beobachtungen bis 1930, 1935 bis 1938, 1945 bis 1949, 1962 bis 1969 und sturmarme Zeitabschnitte: 1932 bis 1933, 1942 bis 1943, 1950 bis 1955. Ähnliches gilt für die Jahre nach 1949 auch für List. Die Verteilung sturmreicher und sturmarmen Zeitabschnitte über den 33-jährigen Zeitraum von 1924 bis 1956 läßt keinen statistisch gesicherten Trend erkennen. Die noch kürzeren Reihen von Feuerschiff "Elbe 1" seit 1957 und von List sind noch weniger geeignet, einen Trend anzuzeigen. Das gilt auch dann, wenn man alle Windbeobachtungen und nicht nur die Stürme berücksichtigt.

Die in den Abbildungen 2.6 und 2.7 nach Weiss und Lamb (2) wiedergegebenen Kurven bezeichnen Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung für die Feuerschiffe "P 8" (Position: 54.3°N, 7.2°E) und "Elbe 1" von 1953 bis 1969, geordnet nach Streichrichtungen des Windes. Die eingezeichneten gestrichelten Linien bei "Elbe 1" sollen eine Zunahme des Nordsee-Fetches (Windrichtung aus 250° bis 300°) und eine Abnahme des Skagerrak-Fetches andeuten. Eine derartige Annahme ist willkürlich und unsinnig, da sie nicht für die ganze Reihe gilt und in längeren Zeitreihen auch nicht bei benachbarten Stationen zu finden ist, wie Abb. 2.4 deutlich zeigt. Eine derartige Regressionsgerade, wie in Abb. 2.7 gezeichnet, stellt keinen Trend dar, sondern gilt nur für den kurzen Abschnitt von 1953 bis 1969, für den sie errechnet wurde. Selbst für diesen Abschnitt kann sie durch kein statistisches Prüfverfahren abgestützt werden.

Aus den Abbildungen 2.4 und 2.5 geht hervor: Sowohl aus den Zeiträumen von 1924 bis 1956 als auch von 1957 bis 1980 der Beobachtungen und Messungen von Feuerschiff "Elbe 1" und aus den Daten von 1950 bis 1969 der Wetterstation List läßt sich keine Zunahme der Nordwestrichtungen der Stürme, die hohe Wellen und Sturmfluten erzeugen, zu Lasten der anderen Windrichtungen erkennen.

Dieser Tatbestand wird durch den Vergleich der Stürme mit den Sturmfluten, die Analyse der Sturmfluthäufigkeiten (Kap. 2.2 und 2.3) und durch die Trendanalyse (Kap.2.4) untermauert.

2.2 Beziehungen zwischen Stürmen und Sturmfluten

Als Sturmfluten werden alle Wasserstände bezeichnet, die das Mittlere Hochwasser (MHW) um 1 m oder mehr übersteigen. Diese sind unabhängig von der sogenannten "säkularen Wasserstandshebung", die nach Laucht (3) vor 1930 jährlich 0,3 cm, in letzter Zeit jährlich etwa 0,1 cm beträgt, so daß sich der Meeresspiegel relativ zum Pegel seit 1924 um etwa 6 cm gehoben hat. Dies wird einerseits durch das Abschmelzen großer Eismassen der Antarktis und Grönlands, das inzwischen aber nicht mehr stattfindet, andererseits durch langsames Absinken des Landes hervorgerufen.

Sowohl die Daten von List als auch von "Elbe 1"/Cuxhaven zeigen, daß in Jahren mit großer Sturmhäufigkeit auch die meisten Sturmfluten waren (s. Abb. 2.4). Es gibt jedoch Abweichungen von dieser Regel, da nicht nur die Windstärke, sondern auch die Andauerzeit und die Richtung der Stürme eine Rolle spielen. So zeigt sich z.B. im Jahre 1959 in List und 1965 bei Feuerschiff "Elbe 1" sowie in Cuxhaven und List, daß trotz einer sehr großen Sturmhäufigkeit nur verhältnismäßig wenig Sturmfluten auftraten, da die Winde nicht aus Südwest oder Nordwest, sondern aus anderen Richtungen kamen. Abb. 2.4 lehrt, daß nicht die Gesamtzahl der Stürme, sondern die Häufigkeit von Nordweststürmen (dünn durchgezogene Kurve) und in geringerem Maße auch von Südweststürmen (dünn gestrichelte Kurve) entscheidend für die Häufigkeit von Sturmfluten sind.

Beispiele für den Einfluß der Nordweststürme bieten die Jahre 1935, 1938 und 1949 in "Elbe 1"/Cuxhaven. Ebenso wird dieser beim Vergleich der Häufigkeit aller Stürme und der Häufigkeit von Nordweststürmen mit der Anzahl der Sturmfluten in den Jahren 1937, 1965 und 1967 deutlich. Das gleiche zeigen die Jahre 1954 gegenüber 1959 sowie 1964 gegenüber 1967 in List.

In Abb. 2.8 ist die jährliche Anzahl von Sturmfluten im Zeitraum 1843 - 1980, die in Cuxhaven das MHW um 2 m und mehr überstiegen, als offene Säulen dargestellt. Diese werden im folgenden als "mittlere und schwere Sturmfluten" bezeichnet. Der Anteil von ihnen, der 2,50 m und mehr über dem MHW lag, ist ausgefüllt gezeichnet, er wird zukünftig "schwere Sturmfluten" genannt. In ähnlicher Weise wurde bei List (Zeitraum 1900 - 1976) verfahren. Als Grenze zur mittleren Sturmflut wurde hier 1,67 m über dem MHW, als Beginn der schweren Sturmflut 1,97 m über MHW gewählt, da die Anzahl vor 1950 aus der Arbeit von Nasner und Partensky (4) übernommen wurde. Die so entstehenden Häufigkeiten von mittleren sowie schweren Sturmfluten lassen sich gut mit den Cuxhavener Werten vergleichen. So ereigneten sich von 1900 bis März 1976 in Cuxhaven 25 schwere Sturmfluten; in List gab es 29. Zusammen mit den mittleren waren es in Cuxhaven 78, in List 62.

Betrachtet man die 138-jährige Reihe von Cuxhaven, so erkennt man, daß mittlere und schwere Sturmfluten unregelmäßig verteilt sind. Zeiträume mit großer Häufigkeit wechseln mit ruhigen Abschnitten, in denen gar keine auftraten, ab. So können die Jahre von 1856 bis 1861, 1864 bis 1872, 1885 bis 1893, 1907 bis 1910, 1931 bis 1935 und 1942 bis 1953 als ruhig gelten. Unruhig waren die Zeiten 1845 bis 1855, 1880 bis 1884, 1894 bis 1906, 1911 bis 1930, 1936 bis 1941, 1954 bis 1967 und 1973 bis 1977. Ähnliches gilt auch für die Station List von 1900 bis 1976.

Eine sehr gute Übereinstimmung bezüglich der Häufigkeit aller Sturmfluten ≥ 1 m über dem MHW besteht zwischen den beiden Stationen Cuxhaven und List, wobei die Anzahl in Cuxhaven, bedingt durch örtliche Verhältnisse, etwa 1,6mal so groß ist wie in List. Die Korrelation der mäßigen und schweren Sturmfluten zwischen beiden Stationen beträgt 0,84, die der schweren Stürme allein 0,41; die Zufallsgrenze des Korrelationskoeffizienten liegt für eine statistische Sicherheit von 99 % bei 0,34. Besonders der erste Wert ist daher weit überzufällig, so daß die für Cuxhaven gefundenen Ergebnisse auch für Sylt gelten.

2.3 Fluktuationen und Scheinperioden im Auftreten von Stürmen und Sturmfluten

Periodizitäten sind bei Zufallsprozessen nicht persistent, sie werden im folgenden deshalb als "Scheinperioden" bezeichnet.

Bildet man aus den Häufigkeiten der Stürme (≥ 8 Bft, Abb. 2.4) sowie denen der schweren Stürme und Orkane (≥ 10 Bft, Abb. 2.5) fünfjährige und 25-jährige übergreifende Mittel, so erhält man geglättete Kurven, die in Abbildung 2.9 dargestellt sind.

Die Fünfjahresmittel bei "Elbe 1" zeigen Maxima der Sturmhäufigkeit in den Jahren 1928, 1936, 1947 und 1965, Minima 1932, 1941, 1953 und 1976. Die verhältnismäßig kurze Reihe von List verläuft ähnlich, das Maximum liegt lediglich etwa 3 Jahre früher als das von "Elbe 1". Aus diesen Daten eine 10-jährige Periode herleiten zu wollen, wäre falsch, da es sich nur um Scheinperioden handelt, die zufallsbedingt sind, nur eine gewisse Zeit andauern und dann verschwinden (wie z.B. nach 1955). Auf solche Scheinperioden kann man keine Vorhersage stützen.

Ähnlich wie die Häufigkeit der Stürme (≥ 8 Bft) verhält sich die der schweren Stürme und Orkane (≥ 10 Bft), bei denen allerdings das Vorkommen an "Elbe 1" ab 1957 wegen des Bruches in der Reihe (s. Kap. 2.1) stark reduziert erscheint, was an der Station List nicht der Fall ist.

Die 25-jährigen Mittel beim Sturm ändern sich im vorliegenden Zeitraum nicht wesentlich, allenfalls läßt sich ein etwas ruhigerer Zeitabschnitt von 1942 bis 1952 feststellen, der auch in den 25-jährigen Summen der mittleren und schweren Sturmfluten in Cuxhaven (Abb. 2.10) erkennbar ist. Vom Beginn der Reihe bis 1950 ist ein Rückgang der schweren Stürme und Orkane (≥ 10 Bft) zu verzeichnen (Abb. 2.9), der eine Parallele im Rückgang der schweren Sturmfluten findet. Ein Anstieg der Sturmzahlen ab etwa 1960, der bei List (Abb. 2.9 oben) in der Kurve über die fünfjährigen Mittelwerte zu sehen ist, würde (wie bei den Cuxhavener Sturmfluten) zu einem Anstieg der 25-jährigen Mittelwerte ab 1959 führen. Wegen des in Abschnitt

2.1 beschriebenen Bruches in den Beobachtungen und Messungen am Feuerschiff "Elbe 1" tritt dieser Anstieg jedoch nicht in Erscheinung. Da eine Korrektur der Originaldaten z.Zt. unmöglich ist, ist der bis zum Ende der fünf- und 25-jährigen Reihen abfallende Trend nur vorgetäuscht. Ein Anstieg ab etwa 1960, der bei List (Abb. 2.9 oben) an den fünfjährigen Mittelwerten zu sehen ist, würde (wie bei den Cuxhavener Sturmfluten) zu einem Anstieg der 25-jährigen Mittelwerte ab etwa 1959 führen. Die vorgenommenen Auswertungen benachbarter Küstenstationen beweisen keinen Trend in der Häufigkeit schwerer Stürme und Orkane. Um längere Reihen als die von "Elbe 1" und List analysieren zu können, wurden die Sturmfluten in Cuxhaven und List untersucht. Ihr Auftreten ist eng mit dem der Nordweststürme (s. Kap. 2.2) verknüpft.

Faßt man die Anzahl der Sturmfluten aus Abb. 2.8 zu fünfjährigen übergreifenden Summen zusammen, so ergibt sich für die schweren Sturmfluten die dünn durchgezogene Kurve der Abb. 2.10; nimmt man die mittleren Sturmfluten hinzu, so erhält man die dünn gestrichelte Kurve. Zusätzlich wurde das übergreifende Fünfjahresmittel aller Sturmfluten aus Abb. 2.4 (≥ 1 m über dem MHW, dünn gepunktet) eingetragen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß das Jahrfünft von 1973 bis 1977 in List nicht vollständig ist, so daß hierin also nur die Werte von 1973 bis März 1976 enthalten sind.

Es zeigt sich kaum eine Ähnlichkeit zwischen der Kurve der Fünfjahressummen aller Sturmfluten und denen der mittleren oder schweren (s. Abb. 2.10).

Aus den Fünfjahressummen der schweren Sturmfluten werden kürzere Fluktuationen sichtbar, z.B. in Cuxhaven die ruhigen Jahrfünfte um 1860, 1870, 1890, 1900, 1910, 1945 bis 1955 und 1970 und die unruhigen um 1850, 1875, 1895, 1905, 1917, 1928, 1965 und 1974. Auch bei diesen Fluktuationen handelt es sich nur um Scheinperioden, wie das plötzliche Verschwinden der "10-jährigen Periode" nach 1915 beweist.

Die 25-jährigen übergreifenden Summen zeigen, daß der Abschnitt von 1860 bis 1880 ruhig, d.h. arm an schweren Sturmfluten war. Es folgte ein langsamer Anstieg ihrer Häufigkeit bis 1925, danach ein rascherer Abfall. Die Jahre 1945 bis 1960 waren die ruhigsten seit Beginn der Messungen, danach ist ein rapider Anstieg der Häufigkeiten schwerer Sturmfluten zu verzeichnen.

Ähnliches sagen auch die Daten von List aus. Lediglich in den Jahren um 1955 weichen die Werte in List stärker von den Cuxhavener Werten ab. Zu dieser Zeit war in Cuxhaven nur eine Zunahme der mäßigen Sturmfluten zu verzeichnen. In List wurde aber die Grenze zur schweren Sturmflut dreimal überschritten. Hierdurch entsteht die Spitze in der Kurve der 25-jährigen übergreifenden Summen um das Jahr 1945. In List ist die Häufigkeit schwerer Sturmfluten in den 50er Jahren nicht so gering wie vor 1920.

2.4 Trend in Häufigkeiten von Sturm und Sturmfluten

Die Ausgangsdaten einer geophysikalischen Zeitfunktion zeigen häufig rasche statistische Schwankungen, die einem ausgeprägten, langsamen Gang (Trend) überlagert sind. Dieser kann innerhalb der Stichprobenlänge entweder monoton steigend oder fallend sein, oder die Form einer Schwingung haben, deren Periodenlänge etwa von der Größenordnung der Stichprobenlänge ist. Ein langsamer Gang entspricht einer Variation mit sehr großer Erhaltungsneigung. Er kann entweder die Erscheinung eines nichtstationären Prozesses oder das Abbild für starke, sehr niedrige Frequenzen (lange Schwingungen) im Spektrum eines stationären Zufallsprozesses sein. Im ersten Fall eines nicht stationären Prozesses müssen physikalische Gründe vorliegen, um eine stetige Zu- oder Abnahme der Sturmhäufigkeiten zu erklären. Derartige Gründe lassen sich nicht mit Hilfe der mathematischen Statistik finden und absichern. Die nachgewiesenen Perioden gehören mit großer Wahrscheinlichkeit langen Schwingungen im Spektrum eines stationären Zufallsprozesses an.

Die Zunahme der Häufigkeit schwerer Sturmfluten seit der Mitte des 20. Jahrhunderts beruht allein auf der großen Häufigkeit von 1973 und 1976 und ist nicht signifikant. Die Wiederholungsfrequenzen sind rein zufällig. Auch unter Hinzunahme der letztgenannten Jahre hält dieser sogenannte Trend einer statistischen Prüfung (t-Test der Studentischen Verteilung des englischen Statistikers Gosset) nicht stand. Mit diesem Test, der für kleine Stichproben aus einem normal verteilten Kollektiv gilt, lassen sich Mittelwerte vergleichen, ob sie zum gleichen Kollektiv gehören und innerhalb einer vorgegebenen Zufallsgrenze voneinander abweichen oder ob sie mit entsprechender statistischer Sicherheit unterschiedlichen Kollektiven angehören, die Abweichungen also statistisch reell sind.

Für die schweren Sturmfluten beträgt $t = 0,70$; nimmt man die mittleren Sturmfluten hinzu, erhält t den Wert $0,66$. Um eine statistische Sicherheit von mehr als 95 % zu erhalten, müßte $t \geq 1,98$ sein. Daher kann der "Trend" sowohl für die Häufigkeit schwerer als auch mittlerer Sturmfluten nicht als signifikant nachgewiesen werden. Bei endlich langer Beobachtungsreihe kann schwierig die Entscheidung über die Stationarität oder Nichtstationarität des beobachteten Prozesses getroffen werden. Der vorliegenden Auswertung von Beobachtungen nichtstationärer Prozesse liegen mehrere Stichproben vor, die mehreren Realisierungen des gleichen Zufallsprozesses entnommen sind.

Autokorrelations- und Spektralanalysen der Häufigkeit von Nordwest- und Südwestlagen in Norddeutschland zeigen Energiespitzen im Spektrum, die im Zufallsbereich liegen, wie auch der Vergleich der Reihe mit Zufallszahlen beweist. Die Wiederholungsfrequenzen sind nicht signifikant. Ein Trend ist nicht feststellbar. Deshalb ist eine Zunahme der Sturm bringenden Nordwestlagen für Norddeutschland nicht beweisbar. Die sich aus der Harmonischen Analyse ergebenden Perioden sind Scheinperioden, die nicht in die Zukunft extrapoliert werden dürfen.

Nicht die Gesamtzahl der Stürme, sondern die der Nordweststürme und in geringerem Maße auch die der Südweststürme ist entscheidend für die Häufigkeit von Sturmfluten. Weder aus den Winddaten von Feuerschiff "Elbe 1", noch aus denen von List, noch aus der Häufigkeit der Nordwestlagen der letzten 100 Jahre läßt sich eine Zunahme von nordwestlichen Starkwinden und Stürmen in den letzten Jahren auf Kosten der anderen Windrichtungen erkennen.

Nach einer ungewöhnlich ruhigen Periode in den 50er Jahren herrschten in den 60er Jahren Verhältnisse wie von 1920 bis 1930 und von 1935 bis 1941.

Bezüglich der Häufigkeit mittlerer und schwerer Sturmfluten läßt sich dennoch kein Trend nachweisen. Bei den Fluktuationen handelt es sich um Scheinperioden, die eine gewisse Zeit andauern und dann verschwinden. - Derartige Scheinperioden können nicht zu Vorhersagen verwendet werden.

3 Vergleich der Häufigkeiten von Sturm und hohen Wellen zwischen der Deutschen Bucht und der südwestlichen Nordsee

3.1 Regionale Einteilung

Von besonderem Interesse für die Schiffssicherheit sind Stürme, die auf Grund ihrer Dauer und wegen einer langen Windwirkstrecke (Fetch) eine hohe See aufwerfen und in der Regel auch zu Sturmfluten führen. Diese sind es vor allem, die die Schifffahrt behindern oder gar gefährden. Daher wurde neben den Sturmhäufigkeiten auch das Vorkommen hoher Windsee-Wellen untersucht. Die Dünung erreicht in der Nordsee nicht solche Höhen wie die Windsee. Sie konnte daher vernachlässigt werden.

In jüngster Zeit werden von Schifffahrt und Schifffahrtsverwaltungen die Anteile der Dünung in Höhe und Periode am Seegang erfragt. Diese Anteile lassen sich leider aus den vorliegenden Beobachtungen der Handelsschiffe nur teilweise ableiten. Hierzu wären Messungen des Seegangs notwendig.

Sowohl die Feuerschiffe an der Küste als auch die Handelsschiffe, die auf den Schifffahrtswegen der Nordsee in großer Anzahl vorhanden sind, lassen eine gute Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Dünungshöhen zu. - Leider gibt es wenige Beobachtungen der Dünungsperioden.

Um die Gefährdung der Schifffahrt vor der niederländischen und deutschen Nordseeküste abschätzen zu können, wurden 3 Seegebiete getrennt untersucht. Die Lage der Seegebiete A - C sowie von Feuerschiff "Elbe 1" geht aus Abbildung 3.1 hervor.

3.2 Vergleich der Sturmhäufigkeiten

Aus den zahlreichen Handelsschiffsbeobachtungen wurden die monatlichen Häufigkeiten von Sturm (≥ 8 Bft) und schwerem Sturm (10-11 Bft) ermittelt und in Abb. 3.2 dargestellt. Alle Werte betreffen 10-Minuten-Mittel des Windes, aber keine Böen.

Im Jahresmittel hat das Seegebiet B vor der holländischen Küste die meisten Stürme ≥ 8 Bft, nämlich 4,7 %, die Deutsche Bucht (A) 4,0 %, das Seegebiet C zwischen Rhein- und Themse-Mündung 3,0 %. Das Feuerschiff "Elbe 1" in der Inneren Deutschen Bucht weist die geringste Sturmhäufigkeit von nur 1,9 % auf, was durch die Landnähe hervorgerufen wird.

In allen Seegebieten ist die Sturmhäufigkeit im Mai minimal; das Maximum erreicht sie meist im November, im Seegebiet C erst im Januar.

Schwere Stürme (10-11 Bft), die zahlreiche Orkanböen enthalten, gibt es im Sommer nur sehr selten, im Herbst und Winter jedoch öfter (Abb. 3.2, oben).

Am meisten sind es im Seegebiet B im November/Dezember mit 1,7 %. Besonderheiten im Jahresgang sind das Fehlen dieser gefährlichen Wettererscheinungen im Mai im Seegebiet C, das sekundäre Minimum im Januar und ein kleines Maximum im Juni in der Deutschen Bucht (A). Vom September zum Oktober steigt die Häufigkeit der Windstärken 10-11 Bft überall rasch an. Im Jahresmittel hat B 0,6 % schwere Stürme, C nur halb so viel. Die gesamte Deutsche Bucht (A) weist 0,5 % auf, das Feuerschiff "Elbe 1" 0,2 %.

Orkane (12 Bft) gibt es kaum. Von April bis August treten sie im Nordsee-Bereich nirgends auf. In der Deutschen Bucht wurde von Oktober bis März eine Orkanmeldung auf 6000, in der Inneren Deutschen Bucht nur eine auf etwa 15000 Wetterbeobachtungen gemeldet. Dies entspricht etwa einem Orkan in 10 Jahren.

Im Seegebiet B erreicht die Orkanhäufigkeit von Oktober bis Dezember etwa 0,05 % (1 pro 2000 Meldungen), im September und Januar/Februar 0,03 % (1 pro 3500). Zwischen Rhein- und Themse-Mündung gibt es von September bis Februar Orkane, und zwar etwa einen auf 5000 Beobachtungen.

Verglichen mit anderen Seegebieten des Nordatlantiks (s.Tab. 3.1) ist die Behinderung und Gefährdung der Schifffahrt durch Stürme und Orkane in der Deutschen Bucht und der südwestlichen Nordsee gering. Dabei weist die Innere Deutsche Bucht gegenüber den Seegebieten vor der niederländischen Küste weniger Stürme (≥ 8 Bft) sowie schwere Stürme und Orkane (≥ 10 Bft) auf.

3.3 Häufigkeiten hoher Wellen

Bei allen Angaben der Wellenhöhen handelt es sich um die kennzeichnende Wellenhöhe, die auch in den Wettertelegrammen gemeldet wird. Als kennzeichnende Wellenhöhe wird der mittlere Wert der Wellenhöhen (Wellenhöhe = senkrechter Abstand zwischen Wellenkamm und -tal) nur von den größeren, gut ausgebildeten Wellen des Wellensystems genommen; dieser entspricht der mittleren Höhe des obersten Drittels aller Wellen in einem Beobachtungszeitraum. Gelegentliche Einzelwellen - outside waves - können diese kennzeichnenden Höhen in der Regel um gut $\frac{2}{3}$ überschreiten.

Stürme von 8 Bft und mehr erzeugen in der Nordsee Windsee-Wellen von 4 m und höher, wenn sie nicht von Land her kommen. Da dies bei einem Teil der Stürme der Fall ist, gibt es weniger Meldungen von Wellenhöhen ≥ 4 m als von Stürmen. Dies zeigt ein Vergleich der Abbildungen 3.2 und 3.3. Im Jahresmittel kommen im Seegebiet B mit 3,7 % am meisten dieser Wellen vor, bei "Elbe 1" mit 1,3 % am wenigsten (s.Abb. 3.3, unten). Seegebiet A hat 2,7 %, C 1,8 %.

Der Jahresgang entspricht dem der Stürme ≥ 8 Bft. Bei C liegt das Maximum jedoch im Dezember, bei A tritt ein sekundäres Minimum im Januar - wie bei den schweren Stürmen - hervor.

5 m und höher (Abb. 3.3 oben) ist die Windsee nur selten, im Jahresmittel zu 0,4 % bei "Elbe 1" und im Gebiet C, sowie zu 0,7 % in A und zu 0,85 % in B. Wie beim Wind ist also B das unruhigste der betrachteten Felder. Im Mai/Juni kommen solche Wellenhöhen z.T. gar nicht vor; im November (in C im Dezember) sind sie am häufigsten, vor Holland mit 2,6 %, in der Deutschen Bucht mit 2,0 %.

Eine Höhe von 6 m und mehr erreichen die Wellen der Windsee von Mai bis August nirgends, sonst nur sehr selten. Am ehesten kommt dies in den Herbstmonaten, bei "Elbe 1" jedoch im Winter (s.Tab. 3.2) vor.

Vor der Rheinmündung (C) sind solche Sturmwellen-Höhen noch seltener als in der Inneren Deutschen Bucht. Im Seegebiet B vor der holländischen Küste treten sie am häufigsten auf.

Tabelle 3.1 Häufigkeiten von schweren Stürmen und Orkanen (≥ 10 Bft) und von Windsee-Wellen ≥ 5 m von November bis März in Prozent

<u>Seegebiet</u>	<u>≥ 10 Bft</u>	<u>≥ 5 m</u>
A	0,8	1,1
FS Elbe 1	0,3	0,6
B	1,2	1,5
C	0,6	0,6
Westausgang Kanal	2,0	3,0
südlich von Island	3,1	16,8
nördlich Bermudas	3,4	ca. 4,0
34-38°N, 62-68°W		

Tabelle 3.2

Häufigkeit von Wellen ≥ 6 m in Prozent

<u>Seegebiete</u>	<u>I</u>	<u>II</u>	<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>V</u>	<u>VI</u>	<u>VII</u>	<u>VIII</u>	<u>IX</u>	<u>X</u>	<u>XI</u>	<u>XII</u>	<u>Jahr</u>
A	0,1	0,2	0,1	0	-	-	-	-	0	0,3	0,4/	0,3	0,1
Elbe 1	0,2	0,3/	0,1	-	-	-	-	-	0	0,1	0,2	0,1	0,1
B	0,3	0,2	0,2	0	-	-	-	-	0	0,4	0,5/	0,4	0,2
C	0	0	0	-	-	-	-	-	0	0,1	0,1/	0,1	0

0: sehr selten, -: nicht aufgetreten, / : Maximum unterstrichen

4 Luftdruck- und Windfelder bei Sturmwetterlagen

4.1 Datenmaterial

Der Deutsche Wetterdienst hat die Aufgabe, bei Starkwind- und Sturmwetterlagen entsprechende Warnungen herauszugeben. Hierzu müssen die mittlere Richtung und Geschwindigkeit sowie die zugehörige Spitzengeschwindigkeit (Böen) des Windes möglichst genau vorhergesagt werden. Eine Windprognose ist auch für die Bestimmung der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste erforderlich.

Die feldmäßige Erfassung der Windeinwirkung auf die Wasseroberfläche stößt jedoch auf erhebliche praktische Schwierigkeiten. Die Ausgangsbedingungen beruhen auf Windmessungen des synoptischen Beobachtungsnetzes, das in der Regel aus Küsten- und Inselstationen sowie aus Feuerschiffen im unmittelbaren Küstenbereich besteht. Diese Stationen setzen in regelmäßigen Zeitabständen von drei Stunden ihre meteorologischen Messungen und Beobachtungen ab.

Über dem offenen Meer muß das Windfeld entweder aus dem Bodendruckfeld der synoptischen Analyse oder aus Schiffsmeldungen bzw. den Beobachtungen von stationären Plattformen ermittelt werden. Die zeitliche und räumliche Änderung der Windeinwirkung bei Sturmlagen bestimmt den Wasserstau an der Küste. Die zur Erfassung dieser Strukturen erforderlichen feinmaschigen Modelle, mit denen das Windfeld über der Deutschen Bucht für den nicht-stationären Fall bestimmt werden könnte, liegen zur Zeit im Seewetteramt nicht vor.

Nach den schweren Januar-Sturmfluten des Jahres 1976 wurde damit begonnen, Datenmaterial aus den Beobachtungs- und Kartenarchiven aufzubereiten, um damit einen Einblick in den Ablauf des Druck- und Windfeldes bei Sturmflutlagen aus dem Zeitraum 1950 - 1978 zu gewinnen. Die Jahre vor 1950 wurden wegen der geringen Stationsdichte und der überwiegend 24-stündigen Kartenfolge nicht berücksichtigt, obwohl die vorliegenden Bodenanalysen bis 1876 zurückreichen. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden die seit 1899 für den nordatlantisch-europäischen Raum vorliegenden Gradnetzwerke des Luftdrucks. Dagegen wurden 583 Luftdruckfelder von 25 Sturmfluten zwischen 1950 und 1978 im Bereich 50 Grad Nord bis 60 Grad Nord und 10 Grad West bis 10 Grad Ost in dem vorliegenden Gitter (Abb. 4.1) mit 11 x 11 Gitterpunkten pro synoptischer Termin erfaßt; d.h. 70 543 Druckwerte wurden aus den Bodenanalysen der Sturmfluten aufgenommen. Zusätzlich sind für jeden synoptischen Termin 16 Temperaturwerte T als Mittel aus einem Gitterfeld mit 2,5 Grad Breite und 5 Grad Länge bestimmt worden. Die Auswahl der Sturmflutlagen in dem angegebenen Zeitraum erfolgte nach dem eingetretenen Höchstwasserstand, wobei alle schweren (≥ 2 m ü.MHW) und sehr schweren (≥ 3 m ü.MHW) Sturmfluten berücksichtigt wurden:

Außerdem wurden für die Untersuchung folgende Daten verwendet:

- a) Stundenmittel des Windes an den Stationen Cuxhaven, List und Norderney aus dem Zeitraum 1950 - 1978;
- b) 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit von den Feuerschiffen "Elbe 1", "Weser", "TW Ems", "Deutsche Bucht" und "Borkumriff" aus dem Zeitraum 1972 - 1976;
- c) 10-Minuten-Mittel des Windes mit stündlichen Spitzenböen bei Sturmflutlagen an den Küstenstationen Cuxhaven, List und Norderney;
- d) aktuelle Wind- und Luftdruckwerte aus den synoptischen Beobachtungen an den Küstenstationen und auf den Feuerschiffen.

Die Winddaten mußten teilweise von Registrierstreifen neu abgelesen und aufbereitet werden.

4.2 Andauerzeiten und Beginn längerer Starkwind- und Sturmperioden

Die meisten und höchsten Sturmfluten in der Nordsee treten im Gebiet der deutschen Nordseeküste auf. Tomczak (1952) begründet diesen Tatbestand mit den vorherrschenden Westwind-Wetterlagen und dem flachen, der deutschen Nordseeküste vorgelagerten Wattgebiet, in dem auflandige Winde einen durch den Seegang begünstigten Wassertransport zur Küste hin bewirken. Es ist zu untersuchen, welche kritischen Windrichtungen bei den vorliegenden Sturmflutlagen auftraten und mit welchen Windgeschwindigkeiten der Anstau des Wassers erfolgte.

Die Untersuchung über Andauer und Beginn von Starkwind (6-7 Bft) und Sturm (≥ 8 Bft) im Bereich der Deutschen Bucht wurde mit den Beobachtungsdaten von drei Küstenstationen und drei Feuerschiffen durchgeführt. Dabei wurden unabhängig von den registrierten 25 Sturmflutlagen die genannten Windserien vollständig analysiert, um auch die Starkwind- und Sturmphasen zu erfassen, die ohne wesentlichen Einfluß auf den Windstau an der deutschen Nordseeküste blieben.

Insel- und Küstenstationen:

Norderney	(53°43'N, 7°09'E) :	246 857	Windbeobachtungen
List	(55°01'N, 8°25'E) :	253 969	" "
Cuxhaven	(53°52'N, 8°42'E) :	249 710	" "

Feuerschiffe:

"Borkumriff"	(53°48'N, 6°22'E) :	41 836	Windbeobachtungen
"Deutsche Bucht"	(54°11'N, 7°27'E) :	32 555	" "
"Elbe 1"	(54°00'N, 8°24'E) :	40 955	" "

Infolge der unterschiedlichen Länge der ausgewerteten Beobachtungsreihen ist nachzuweisen, daß die Häufigkeitsverteilung des Windangebots in dem kürzeren Zeitraum 1972 - 1976 und diejenigen des längeren Zeitraums aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Dies gelingt, indem für die Inselstationen List und Norderney beide Zeitabschnitte analysiert werden. Hierbei zeigt sich, daß in der kürzeren Zeitreihe der Station Norderney der %-Anteil von Winden ≥ 6 Bft gegenüber dem Zeitraum 1950 - 1978 um nahezu 1 % höher ausfällt. Dieses Ergebnis spiegelt den hohen Anteil von Sturmlagen im Jahr 1973 wider, der sich jedoch lediglich vor der ostfriesischen Küste bemerkbar macht, da die nordfriesische Station List keinen wesentlichen Anstieg aufweist. Auf Grund dieser unterschiedlichen Differenz zwischen 29- und fünfjähriger Stichprobe an den beiden Inselstationen ist eine einheitliche Angleichung der kürzeren Beobachtungsreihen der Feuerschiffe an den Zeitraum 1950 - 1978 nicht möglich. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, daß die für den kürzeren Zeitraum bestimmten Prozentzahlen der Feuerschiffe wegen des erwähnten Ereignisses eher höher als niedriger ausfallen. Unter der Voraussetzung, daß die von den Stationen List und Norderney vorliegenden Verteilungen auf Windmessungen beruhen, die als überhöht bekannt sind, kann ein Differenzbetrag von 10 % zwischen den %-Werten der Feuerschiffe und der Inselstationen ausgewiesen werden. Die %-Werte der Feuerschiffe bestätigen somit den bekannten Trend einer deutlichen Reduzierung der Windgeschwindigkeiten beim Übergang von See auf Land. Der geringe Anteil von weniger als 2 % Starkwind und Sturm bei Cuxhaven weist bei dieser Küstenstation bereits auf den hohen Anteil kontinentaler Anströmungsrichtungen hin, die sich auch noch in dem Windaufkommen am FS "Elbe 1" bemerkbar machen.

Stat.	ff	≥ 6 Bft	6-7 Bft	≥ 8 Bft
Cuxhaven		1,84 %	1,79 %	0,05 %
List		6,74 % (6,79 %)	6,23 %	0,51 % (0,57 %)
Norderney		7,99 % (8,77 %)	6,96 %	1,03 % (1,22 %)
Elbe 1		(13,22 %)	(12,33 %)	(0,89 %)
Deutsche Bucht		(17,48 %)	(16,11 %)	(1,37 %)
Borkumriff		(17,88 %)	(15,75 %)	(2,13 %)

Tab. 4.1 - Anteil von Starkwind und Sturm in der Beobachtungsreihe 1950 - 1978; der Zeitraum 1972 - 1976 wurde in Klammern gesetzt.

Damit erstreckt sich das See-Land-Gefälle der Windgeschwindigkeit über einen breiten Küstensaum, so daß lediglich die Feuerschiffe "Deutsche Bucht" und "Borkumriff" wegen ihrer küstenfernen Position angenähert maritime Windverteilungen aufweisen. So besteht im Mittel während 1390 Stunden pro Jahr eine Warnsituation im Westteil der Deutschen Bucht. Dagegen wird die 6-Bft-Schwelle im Seegebiet zwischen Helgoland und der Elbmündung durchschnittlich für 1120 Stunden überschritten. An der Station Cuxhaven herrschen Windstärken über 5 Bft im Mittel während 160 Stunden im Jahr; deshalb entspricht die Warnsituation für die Deutsche Bucht nur noch in 11 % der Fälle dem in Cuxhaven gemessenen Wind. Bei der Abfassung und Überprüfung der Warnsituation in der Deutschen Bucht sind die Windbeobachtungen der Küstenstationen und der küstennahen Feuerschiffe bzw. ihrer Ersatzsysteme entsprechend zu berücksichtigen. Eine Warnung muß deshalb berücksichtigen, daß auf freier See der Wind meist wesentlich stärker als an der Küste ist.

Die Darstellung der Andauerzeiten (Abb. 4.2) geht von zwei unterschiedlich großen Stichproben aus. Das Wertetripel der drei genannten Feuerschiffe - 13,22 %, 17,48 %, 17,88 % - bildet den Stichprobenumfang, für den die relativen Häufigkeiten der Andauerzeiten nach Überschreitung des festgelegten Schwellenwertes von 6 Bft bestimmt werden. Bei den Inselstationen ergibt sich entsprechend dem größeren Zeitraum 1950 - 1978 ein wesentlich umfangreicheres Wertekollektiv. Der gleichgerichtete Verlauf der %-Anteile aus beiden Stichproben ermöglicht es, die vorgefundene Abhängigkeit mit einem einzigen Kurvenzug darzustellen. Der hohe Anteil von 1- bis 3-stündigen Starkwind- und Sturmphasen an der Gesamtzahl aller Fälle mit ≥ 6 Bft spiegelt die kurzzeitige Windzunahme beim Durchgang von Fronten und Trögen wider.

In der nachfolgenden Aufstellung (Tab. 4.2) werden extreme Andauerzeiten von Windgeschwindigkeiten oberhalb festgelegter Schwellenwerte für die vorliegenden Stationen wiedergegeben. Ein unmittelbarer Vergleich zwischen den Andauerzeiten bei Feuerschiffen und Inselstationen läßt sich jedoch nur für die Jahre 1972 - 1976 durchführen, da hier für die meisten Stationen stündliche Mittelwerte des Windes vorliegen.

Die Abb. 4.3 läßt erkennen, daß allgemein kein großer Unterschied in den Andauerzeiten von Stürmen auf Inseln oder der freien See zu bestehen scheint. Lediglich das Feuerschiff "Borkumriff" zeigt für einige Sturmlagen gegenüber anderen Stationen ein extremes Verhalten. Dies entspricht den in Tab. 4.1 ausgewiesenen Anteilen von ≥ 8 Bft an der Gesamtzahl der Beobachtungen im Kurzzeitraum 1972 - 1976. Auch hier weist das Feuerschiff "Borkumriff" den höchsten %-Anteil von Sturmstärken auf. Die Messungen der Inselstationen sind also auf Grund ihrer überhöhten Windstärken bei Sturmlagen den Feuerschiffen vergleichbar. Dies gilt offenbar nicht für Starkwindlagen, da hier der %-Anteil der Inselstationen deutlich hinter den Feuerschiffen zurückbleibt, weil der Schwellenwert ≥ 6 Bft später überschritten und früher unterschritten wird.

Tab. 4.2 - Extreme Andauerzeiten für Windstärken über festen Schwellenwerten

 Extreme Andauerzeiten für Windgeschwindigkeiten über 24 kn:

List	12 Fälle	48 Stunden	von 1950 - 1978
Norderney	16 "	"	"
Cuxhaven	2 "	"	"
Elbe 1	5 "	"	1972 - 1976
Borkumriff	17 "	"	"
Dtsch.Bucht	11 "	"	"

 Extreme Andauerzeiten für Windgeschwindigkeiten über 34 kn:

List	1 Fall mit	25 Stunden	zwischen 1950 - 1978
Norderney	1 " "	47 "	" "
Cuxhaven	1 " "	9 "	" "
Elbe 1	1 " "	21 "	1972 - 1976
Borkumriff	1 " "	32 "	" "
Dtsch.Bucht	1 " "	61 "	1972 - 1980

 Extreme Andauerzeiten für Windgeschwindigkeiten über 46 kn:

List	2 Fälle mit	5 Stunden	am 17.10.67, 15.01.68
	1 Fall "	6 "	" 23.02.67
	1 Fall "	7 "	" 03.01.76
Norderney	3 Fälle "	5 "	" 17.10.67, 15.01.68, 26.03.78
	2 Fälle "	6 "	" 23.12.54, 23./24.02.67
	2 Fälle "	7 "	" 19.11.73, 06./07.12.73
	1 Fall "	13 "	" 03.01.76
Cuxhaven	2 Fälle "	2 "	" 13.11.72, 03.04.73
Elbe 1	1 Fall "	4 "	" 03.01.76
Borkumriff	1 Fall "	13 "	" 03.01.76
Dtsch.Bucht	2 Fälle "	2 "	" 13.11.72, 25.01.75

 Extreme Andauerzeiten für Windgeschwindigkeiten über 59 kn:

List	1 Fall mit	1 Stunde	am 17.10.67
Norderney	3 Fälle "	1 "	" 23.02.67, 17.10.67, 16.12.67
	2 Fälle "	2 Stunden	" 21.02.56
	1 Fall "	6 "	" 03.01.76
Borkumriff	1 Fall "	1 Stunde	" 03.01.76

Windgeschwindigkeiten über 59 Knoten sind an den Stationen Cuxhaven, FS "Elbe 1" und FS "Deutsche Bucht" nur mit einer Dauer von weniger als einer Stunde aufgetreten. In Cuxhaven und auf "Elbe 1" wurden am 03.01.76 nur 56 Knoten maximale Windgeschwindigkeit registriert. Von dem Feuerschiff "Deutsche Bucht" liegen für den 03.01.76 keine Windregistrierungen vor.

Zur Beurteilung der Windverhältnisse an der deutschen Nordseeküste im Hinblick auf den möglichen Windstau ist auch der tageszeitliche Gang des Windangebotes von Interesse. Daher wurde zunächst nach dem Beginn von Starkwind- oder Sturmphasen gefragt. Die Anzahl der Fälle, bei denen eine Windstärke 6 Bft erreicht oder überschritten wurde, ist für jede Stunde des Tages aus dem Zeitraum 1950 - 1978 bestimmt worden. Dabei zeigte sich, daß an den Inselstationen (Abb. 4.4) Starkwind und Sturm bevorzugt in den Vormittagsstunden einsetzen; d.h. die Anzahl der Fälle mit Beginn von Windstärken 6 Bft liegt bei den Inselstationen in den Vormittagsstunden etwa um 50 % höher als in der Nacht. Am Nachmittag ergibt sich bereits ein merklicher Rückgang, so daß in allen vorliegenden Fällen in den Nachtstunden Werte unter dem jeweiligen Tagesmittel angetroffen wurden.

Megen der kurzen Zeitreihen, die für die Analyse der Feuerschiffsbeobachtungen vorliegen, ergibt sich bei den Seestationen ein weniger ausgeglichenes Bild (Abb. 4.5); es deutet sich eine zeitliche Verschiebung der Anfangszeiten von Starkwind- und Sturmphasen an, da in allen Windreihen eine Häufung von Eintrittsfällen um den 8-Uhr-Termin auftritt. In wieweit die vorliegenden Analysen als Zufallsverteilungen zu betrachten sind oder eine physikalische Erklärung finden, wird im Rahmen einer späteren Untersuchung zu prüfen sein.

Die 1977 begonnene Aufbereitung der Windmessungen von Feuerschiffen wird das Datenmaterial bereitstellen, um die hiermit anstehenden Fragen zu klären. Die Zeitreihe 1972 - 1976 ist bei der prozentual geringen Anzahl von Starkwind- und Sturmereignissen - 50 Fälle/Stunde/Jahr - nicht ohne weiteres geeignet, als Zufallsauswahl aus einer Grundgesamtheit zu gelten, für die eine abschließende Aussage über das tageszeitliche Einsetzen und Andauern von Starkwinden und Stürmen zu machen wäre. Wie das Beispiel Feuerschiff "Deutsche Bucht" jedoch zeigt, das entsprechend dem aktuellen Stand der Datenaufbereitung auch für den Zeitraum 1972 - 1980 analysiert werden konnte (strichpunktiert in Abb. 4.5), verändert sich die Grundverteilung für dieses Feuerschiff mit zunehmendem Stichprobenumfang nur unwesentlich. Das Maximum um 8 Uhr bleibt erhalten, und zwei weitere in den Abendstunden zeichnen sich deutlich ab.

An der inzwischen vorliegenden längeren Datenreihe (1972 - 1980) des Feuerschiffes "Deutsche Bucht" wurde untersucht, ob sich die aufgetretenen Maxima auch in der Häufigkeitsverteilung der Fälle mit Starkwind im Tagesverlauf abzeichnen. Dies ist nicht der Fall, da alle Klassen (= Tagesstunden) mit nahezu gleichen Anzahlen - 4,2 % der Gesamtzahl - besetzt sind. Wenn sich dennoch zu bestimmten Tageszeiten eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt, so sind hierfür nähere Gründe zu suchen. Zwischen Anfang und Ende einer Starkwind-/Sturmphase liegen oft nur wenige Stunden. Der Anteil

kurzfristiger - 1 bis 3 Stunden - Starkwind-/Sturmereignisse ist zu den Zeiten der Eintrittsmaxima, also um 08.00 h, 18.00 h und 22.00 h besonders hoch. Die in der Darstellung herausragende Anzahl beginnender Starkwind-/Sturmphasen ist also im wesentlichen auf die Passage von Fronten und Konvergenzen an der Station "Deutsche Bucht" zurückzuführen. Damit könnte der Grund für ein überzufällig häufiges Zunehmen des Windes zu bevorzugten Tageszeiten in dem Ablauf der Störungstätigkeit im Bereich des Seegebietes Deutsche Bucht zu sehen sein. Dieses Problem soll daher in einem Folgeprojekt untersucht werden.

4.3 Atmosphärische Einflüsse auf Tiden

Der meteorologisch bedingte Wassertransport, der über größeren Wassertiefen durch den Druckgradienteffekt bestimmt wird, folgt im unmittelbaren Küstenbereich bevorzugt der Windschubwirkung. Das Luftdruckgefälle über dem Meer bewirkt eine geringe Änderung der Wasserspiegellage, die über größeren Meerestiefen erhebliche horizontale Massentransporte auslöst. Der durch Turbulenzreibung der Atmosphäre mit dem Meer an der Wasseroberfläche verursachte Wind(Tangential-)schub führt ebenfalls zu einem horizontalen Wassertransport. Im reibungsfreien Modellfall stehen beide Bewegungen aufeinander senkrecht, da der Wind in Richtung der Isobaren weht und der Druckausgleich senkrecht dazu verläuft. Wie unter 4.4 aufgezeigt wird, ist besonders bei labiler Schichtung über dem Meer dieser geostrophische Ansatz eine durchaus realistische Näherung. Die genaue Bestimmung des Windfeldes in der Deutschen Bucht gewinnt damit für die Vorhersage des Windstaus an der Nordseeküste besondere Bedeutung.

Im Deutschen Hydrographischen Institut wurden aus den Pegelaufzeichnungen der Jahre 1950 - 1974 für die Stationen Borkum, Cuxhaven und Bismarck empirische Beziehungen aufgestellt, aus denen der Windstau entsprechend der vorliegenden Windrichtung und -geschwindigkeit bestimmt wird. Die gesamte Wasserbewegung wird jeweils aus den Gezeiten, dem Windschub, dem Luftdruckunterschied und der external surge (Fern-Flutwelle) ermittelt. Dennoch bleibt in der vorliegenden Aufstellung ein Rest, in dem sich der Beitrag höherer Wasserstände aus den Randbereichen der Deutschen Bucht widerspiegelt.

Ein anschauliches Beispiel hierzu liefert der Holland-Orkan, bei dem am 01.02.53 - 12.59 h in Borkum ein Stau von 1,88 m auflief. Nach den zugehörigen Windbeobachtungen auf dem Feuerschiff P8 - 360 Grad, 24 kn - war bei Borkum ein Windstau von 15 cm zu erwarten. Addiert man hierzu einen Stau von 21 cm durch den Druckgradienteffekt, so verbleiben für die Fernwelle und den Rest noch 152 cm. Der Beitrag der external surge liegt nach Erfahrungswerten des letzten Jahrzehnts zwischen 0,5 und 1,0 m. Selbst unter der Annahme, daß eine solche langperiodische Schwingung aus der Nordsee beteiligt gewesen ist, fällt der Anteil des Restes in diesem Falle noch recht deutlich aus.

Der Windstaudienst benötigt zur Bestimmung des Windstaus bei

Cuxhaven einen repräsentativen Wind aus dem Windfeld in der Deutschen Bucht. Mit Hilfe des "Anschlußverfahrens", TOMCZAK, 1952, kann hiermit in quasi-stationären Fällen auf die übrigen Pegel an der deutschen Nordseeküste extrapoliert werden. Es sind daher folgende Fragen zu beantworten:

- a) Ist bei Verwendung synoptischer Beobachtungen der Windwert eines Feuerschiffes ausreichend oder ist ein mittlerer Windwert aus den Beobachtungen mehrerer Feuerschiffe erforderlich?
- b) Wie stark streuen bei den einzelnen Sturmlagen die Feuerschiffsbeobachtungen um den Windvektor, der das mittlere Windfeld in der Deutschen Bucht wiedergibt?

Zunächst werden die vorliegenden Fälle schwerer Sturmfluten auf den Unterschied zwischen gemessenem Windstau und den nach den Windbeobachtungen der Feuerschiffe berechneten Windstau hin untersucht. Obwohl das verwendete Datenkollektiv nicht ausreicht, um eine Einteilung der einzelnen Feuerschiffe nach Windrichtung und Fluttermin vorzunehmen, wird bereits aus den 25 vorliegenden Beispielen deutlich, daß die Windbeobachtungen der Feuerschiffe bei jedem Sturm unterschiedliche Beiträge zur Bestimmung des aktuellen Windstaus an den ausgewählten Pegeln leisten.

Der zeitliche Abstand zwischen der synoptischen Beobachtung eines Feuerschiffes und dem Fluttermin an einer bestimmten Pegelposition ist von Einfluß auf die Höhe des eintretenden Windstaus. Um folglich den jeweiligen Anteil der Feuerschiffsbeobachtung bei der Berechnung des Windstaus zu ermitteln, ist eine Wichtung entsprechend der Entfernung Feuerschiff - Pegel ΔS , der Zeitdifferenz Δt zwischen synoptischer Beobachtung und Fluttermin sowie der Windgeschwindigkeit \bar{U} vorzunehmen. Der hiermit ableitbare dimensionslose Faktor $f = \bar{U} \Delta t / \Delta S$ wird dem wahren Ablauf des Wassertransportes jedoch nicht gerecht, da eine Phasenverschiebung $\Delta \varphi$ zwischen der Luftströmung und dem zugehörigen Windstau besteht. Die numerische Bestimmung des Windstaus mit aktuellen Beobachtungen erfordert somit zunächst eine eingehende Untersuchung dieser Abhängigkeit mit Hilfe der Zeitreihen von Wind- und Pegelregistrierungen. Im heute durchgeführten Windstaudienst wird diese Problematik umgangen, indem ein für den jeweiligen Hochwassertermin prognostizierter Wind verwendet wird. Dieser ist gegenüber den synoptischen Beobachtungen für die Prognose des Wasserstaus zum Fluttermin wesentlich brauchbarer und deckt darüber hinaus einen größeren Vorhersagezeitraum ab.

Zur Überprüfung dieses Tatbestandes wurden mit den synoptischen Windbeobachtungen der Feuerschiffe bis zu vier Stunden vor Fluttermin die Windstauwerte für Cuxhaven berechnet und mit den am dortigen Pegel registrierten Windstauwerten verglichen. Wie aus der nachstehenden Aufstellung (Tab. 4.3) deutlich wird, liefert ein mittlerer Wind aus drei Feuerschiffsbeobachtungen der Deutschen Bucht die besten Windstauwerte. Im Einzelfall führen die Berechnungen mit Windwerten der Feuerschiffe "TW Ems", "Deutsche Bucht"/"P12" und "Borkumriff" zu den geringsten Abweichungen

gegenüber dem eingetretenen Wasserstand. Hiermit wird ein Ungleichgewicht innerhalb der Deutschen Bucht deutlich, das den westlichen Randbereichen dieses Seegebietes eine größere Aussage bei der

Datum	Windstaudifferenz (cm) für die Feuerschiffe								Windstau (cm)
	B'riff	DB/P12	TWE	Weser	E1	E2	E3	MDB	
16.01.54	-	26	-	50	-68	-68	-68	-20	228
22.12.54	8	-50	-	-95	96	65	-47	20	238
19.01.56	-42	48	-	25	-42	-78	-89	-11	141
16.02.62	-11	-51	-	-11	14	27	-	-11	232
02.11.65	5	41	-	37	-58	67	-9	-5	229
01.12.66	100	-33	11	24	38	39	-	-34	119
24.02.67	18	5	-	-40	68	94	107	33	288
01.03.67	11	45	-	45	94	67	8	51	210
04.01.68	30	-30	-	-3	22	45	25	11	131
15.01.68	-11	-7	-	12	-25	8	41	-18	101
13.11.73	-41	55	-9	-8	22	-39	21	-27	164
16.11.73	12	-2	36	14	89	96	64	39	244
19.11.73	-96	-8	22	22	22	22	34	22	252
06.12.73	8	-45	-29	47	107	-	25	30	268
14.12.73	-37	-75	-16	-14	-95	-	-5	5	168
17.12.73	-66	-	19	59	-9	-	44	-32	130
18.12.74	-99	-41	9	-51	-47	-	-41	25	120
29.12.74	-22	27	-17	-14	27	-	90	14	135
03.01.76	0	-	-11	0	88	-	30	66	358
21.01.76	1	-	28	-	51	22	-	22	203
01.10.77	-79	-2	-53	-31	-17	-	-	-30	102
15.11.77	-48	-41	-32	-51	9	-	-	30	130
24.12.77	15	32	44	56	59	-	-	36	135
31.12.77	12	25	-51	-52	25	-	-	19	200
Mittel X	34	33	26	33	50	53	44	25	189

Tab. 4.3 Abweichungen - in cm - der mit Hilfe der Windbeobachtungen bei den Feuerschiffen für Cuxhaven berechneten Windstauwerte von den dort registrierten Windstauwerten; Abkürzungen der Feuerschiffe: Borkumriff (B'riff), Deutsche Bucht und P12 (DB/P12), TW Ems (TWE), Weser, Elbe 1 (E1), Elbe 2 (E2), Elbe 3 (E3) und Mittel aus den Windbeobachtungen der Feuerschiffe Borkumriff, Deutsche Bucht und Elbe 1 (MDB).

Windstauberechnung zuteilt; dennoch können Einzelbeobachtungen für die Bestimmung des Windstaus nicht verwendet werden, da die Streuung der prognostizierten Windstauwerte erheblich ist. Die Windbeobachtungen eines einzelnen Feuerschiffes sind nur in wenigen Fällen signifikant für das Windfeld über dem gesamten Seegebiet. Der Grund hierfür liegt sowohl in der horizontalen Struktur des Sturmfeldes als auch in der Verfälschung des Einzelwertes durch kurzzeitige Ereignisse.

Als Beispiel sei die 00.00 UTC-Beobachtung vom 18.12.74 auf dem Feuerschiff "Borkumriff" angeführt. Infolge eines Graupelschauers zum Beobachtungstermin war das 10-Min-Mittel der Windgeschwindigkeit auf 56 Knoten angestiegen, was bei Cuxhaven für Wind aus 280 Grad einem Windstau von 398 cm entspricht. Aus dem Windfeld über dem Westteil der Deutschen Bucht zum gleichen Termin ergab sich jedoch eine mittlere Windgeschwindigkeit von 40 - 44 Knoten, entsprechend einem Windstau von 196 cm bei Cuxhaven. Der tatsächliche Windstau betrug bei Cuxhaven 120 cm. Da ein kurzzeitiges Auffrischen des Windes keinen wesentlichen Beitrag zum Wasserstand an den Küstenpegeln gibt, verfälschen derartige synoptische Beobachtungen den berechneten Windstau.

Während die Verwendung einer Einzelbeobachtung zur Berechnung des Windstaus somit nicht möglich ist, führt die Berechnung des Windstaus mit einem mittleren Windvektor zu annehmbaren Ergebnissen. Wie die Tabelle 4.3 ausweist, liegt die mittlere Abweichung von den Windstauwerten bei Cuxhaven mit dieser Methode bei 25 cm. Das sind nur 5 cm mehr als die 20 cm, die im Deutschen Hydrographischen Institut über alle Flutprognosen der Jahre 1971 - 1980 errechnet wurden. Daher dürfte auch im Zusammenhang mit der Planung maritimer Meßnetze die Frage interessieren, welche Feuerschiffe mit ihren Windbeobachtungen dem mittleren Windvektor für die Deutsche Bucht am nächsten liegen. Zur Untersuchung dieser Frage werden für die Feuerschiffe die mittleren Abweichungen der Nord-Süd- (v-) bzw. West-Ost- (u-)Komponenten des aktuellen und mittleren Windes sowie die zugehörigen Streuungen für alle gespeicherten Sturmperioden berechnet. Der mittlere Wind wird hierbei jeweils aus den synoptischen Beobachtungen aller Feuerschiffe gebildet.

Station	DU	SU	DV	SV
Borkumriff	1,9	4,5	-1,0	5,4
TW Ems	1,3	4,0	-2,0	5,1
Deutsche Bucht	0,8	4,1	-0,4	5,3
Weser	-1,3	4,3	-0,4	5,3
Elbe 1	-1,7	4,2	2,2	5,3
Elbe 2	-1,4	4,8	0,1	6,2
Elbe 3	-0,4	4,7	2,9	5,6

Tab. 4.4 Mittlere Abweichung (DU, DV) und zugehörige Streuung (SU, SV) der synoptischen Windwerte (in Knoten) der Feuerschiffe von einem mittleren Windvektor, der das Flächenmittel der Deutschen Bucht aus den vorliegenden Beobachtungen wiedergibt.

In der Gesamtheit aller schweren Stürme (Tab. 4.4) aus dem Zeitraum 1950 - 1978 ergaben sich für die Windmessungen beim Feuerschiff "Deutsche Bucht" im Mittel die geringsten Abweichungen von einem mittleren Windvektor. Dem gegenüber stehen die Messungen der küstennahen Feuerschiffe, bei denen vor allem das Feuerschiff "Elbe 3" in der Nord-Süd-(V-)Komponente die größte Differenz zu einer mittleren Größe aufweist, während das Feuerschiff "Elbe 2" die stärkste Streuung in den Komponenten vorzeigt. Beides deutet auf den höheren Reibungseinfluß hin, der sich bei Seestationen in Landnähe auswirkt. Daher erweist sich die Position des Feuerschiffes "Deutsche Bucht" als günstig für die Messung von Windwerten, die im Einzelfall sogar repräsentativ für das Windfeld des gesamten Seegebietes Deutsche Bucht und damit für die Bestimmung des Windstauwertes an den Küstenpegeln sein können.

Auffällig ist der Vorzeichenwechsel bei den mittleren Abweichungen der Nord-Süd-(DV-) bzw. West-Ost-(DV-)Komponenten beim Übergang von Beobachtungspositionen der äußeren Deutschen Bucht zu den Positionen im Elbmündungsgebiet. Die positiven Abweichungen der u-Komponenten bei den Feuerschiffen "Borkumriff", "TW Ems" und "Deutsche Bucht" weisen auf das bereits genannte West-Ost-Gefälle der Windgeschwindigkeiten in der Deutschen Bucht hin. Sie enthalten jedoch auch die zeitliche Verzögerung, die beim Durchzug von Störungen im Ereignisablauf zwischen westlichen und östlichen Feuerschiffen besteht. Da alle analysierten Sturmzyklonen eine östliche Zugrichtung aufweisen, ist der Wind in den meisten Fällen auf allen westlichen Positionen stärker rechtgedreht, so daß hier bei den v-Komponenten negative Differenzen mit der mittleren Größe entstehen. Die Abweichungen in den u-Komponenten sind folglich in der Hauptsache auf Änderungen der Geschwindigkeit, die Abweichungen der v-Komponenten bevorzugt auf Richtungsänderungen während eines Sturmereignisses zurückzuführen.

Obwohl die Windmessungen des Feuerschiffs "Deutsche Bucht" für die Darstellung der mittleren Windverhältnisse in der Deutschen Bucht geeignet erscheinen, können im Einzelfall die Windwerte anderer Feuerschiffe für die Berechnung des Windstaus brauchbarer sein. Diese Situation wird durch die Verwendung eines Mittels aus mehreren Feuerschiffsbeobachtungen nicht wesentlich verbessert.

Eine Verbesserung des mittleren Windvektors ließe sich durch eine Wichtung der Winddaten entsprechend der Position und dem zeitlichen Abstand zum Fluttermin erreichen. Hierzu fehlt jedoch bislang eine Aussage über Phasenverschiebungen, die entsprechend der jeweiligen Windrichtung und -geschwindigkeit zwischen dem Wind und dem zugehörigen Windstau auftreten. Die Kenntnis der zeitlichen Verzögerung, mit der der Windstau einem bestimmten Windwert folgt, ist unbedingt erforderlich, um den täglichen Wechsel im Abstand zwischen synoptischem Termin und Fluttermin auszugleichen. Da dies jedoch nicht der Fall ist, kann eine Windstauvorhersage auf der Basis aktueller Beobachtungen nur bedingt durchgeführt werden. Hinzu kommt, daß der Vorhersagezeitraum zu kurz ausfällt, da entsprechend der Lage des Fluttermins Windstauprognosen bis zu 8 Stunden vor Eintritt des Hochwassers an die Verbraucher gegeben werden müssen.

Unter diesen Umständen ist bei Anwendung der empirisch-statistischen Windstaumethode die Prognose eines Windwertes erforderlich, der repräsentativ für die Windverhältnisse über der Deutschen Bucht zur Zeit des Fluttermins ist. Diesen Windwert kann man aus der Luftdruckverteilung über dem Meer als geostrophischen Mittelwind über der Deutschen Bucht berechnen. Die Anzahl der Windwerte wird durch die Dichte des Analysegitters über dem betreffenden Seegebiet bestimmt. Zur Lösung dieser Aufgabe ist es notwendig, die Änderung des geostrophischen Windes durch die Reibung an der Meeresoberfläche quantitativ zu beschreiben. Auch die numerische Bestimmung des Windstaus muß bei der Berechnung des Windschubs von einer gültigen Beziehung zwischen aktuellem Bodenwind und geostrophischem Wind ausgehen. Die hiermit angesprochene Abweichung des geostrophischen Windes vom wahren Wind soll im folgenden Abschnitt für den Bereich der Deutschen Bucht untersucht werden.

4.4 Die geostrophische Windbeziehung

Die numerische Bestimmung des Windstaus mit Hilfe der physikalischen Modelle der Atmosphäre und der Nordsee geht von den prognostizierten Druckverteilungen an der Wasseroberfläche aus. Die hiermit berechneten Windverteilungen sind Grundlage für die Ableitung des Tangentialschubs des Windes an der Meeresoberfläche. Dabei wird allgemein die schon von TAYLOR (1919) benutzte Beziehung für den Windschubvektor an der Meeresoberfläche verwendet.

$$\tau(x) = c_D \rho_L u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\tau(y) = c_D \rho_L v \sqrt{u^2 + v^2}$$

mit $c_D = (1,38 \pm 0,27) \cdot 10^{-3}$ - nach Brocks und Krügermeyer (1975) - als Schubspannungskoeffizient, ρ_L Dichte der Luft und u, v als Komponenten der Windgeschwindigkeit in x- und y-Richtung. Der angenähert quadratische Zusammenhang zwischen Schubspannung und Windgeschwindigkeit bedingt bei geringer Windzunahme bereits große Schubeffekte. Daher haben signifikante Abweichungen von der Beziehung zwischen aktuellem und geostrophischem Wind erheblichen Einfluß auf die berechneten winderzeugten Wassertransporte.

Die Änderung des geostrophischen Windes durch die Reibung an der Meeresoberfläche wird im wesentlichen durch die folgenden vier Faktoren bestimmt:

- a) Windgeschwindigkeit
- b) Stabilität der Schichtung
- c) Beschaffenheit der Wasseroberfläche
- d) Erdrotation

Die im Rahmen des Sturmprojektes aufbereiteten Druckfelder ermöglichen es, den Zusammenhang zwischen wahren und geostrophischem Wind auf der Basis einer statistischen Analyse von berechneten und

beobachteten Winden aufzuzeigen. Eine Lösung mit theoretischen Ansätzen auf der Grundlage der Widerstandsgesetze wird bewußt vermieden, da die hierzu erforderlichen Parameter nicht Bestandteil der synoptischen Datensätze sind. Auch von einer Verwendung des Gradientwindes an Stelle des geostrophischen Windes wird abgesehen, da die in der Deutschen Bucht während der großen Sturmflutlagen nahezu geradlinig verlaufenden Isobaren zu erheblichen Ungenauigkeiten bei der Berechnung des Krümmungsradius führen würden.

Als Datensätze liegen die Werte des Bodenluftdruckes an 121 Gitterpunkten im Bereich 50 °N bis 60 °N und 10 °W bis 10 °E vor. Um den Luftdruck innerhalb der Gitterquadrate zu berechnen, wurden zunächst zwei Interpolationspolynome getestet, indem die Differenzen zwischen den von synoptischen Küstenstationen und Feuerschiffen gemeldeten Druckwerten und den für diese Stationen berechneten Druckwerten bestimmt wurden (Abb. 4.6).

a) 12-Punkte-Polynom aus A. GROLL (1973):

$$P_{ij} = P(x_i, y_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_j + a_5 y_j^2 \quad (3)$$

b) 16-Punkte-Polynom aus L.S. GANDIN (1963):

$$P_{ij} = P(x_i, y_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_j + a_5 y_j^2 + a_6 x_i^3 + a_7 x_i^2 y_j + a_8 x_i y_j^2 + a_9 y_j^3 + a_{10} x_i^3 y_j + a_{11} x_i^2 y_j^2 + a_{12} x_i y_j^3 + a_{13} x_i^3 y_j^2 + a_{14} x_i^2 y_j^3 + a_{15} x_i^3 y_j^3 \quad (4)$$

Als Ergebnis dieses Vergleichs mit 4380 Wertepaaren aus Gleichung (3) und gleichviel aus Gleichung (4) ergaben sich folgende mittlere Druckdifferenzen $\overline{\Delta p}$ zwischen aktuellem und berechnetem Stationsdruck.

$$a) \overline{\Delta P}_{12} = 0,058 \pm 0,88 \text{ hPa} \quad b) \overline{\Delta P}_{16} = 0,076 \pm 0,88 \text{ hPa}$$

Addiert man mittlere Abweichung und Streuung, so resultiert aus den Ergebnissen beider Interpolationspolynome eine Ungenauigkeit von etwa 1 hPa. Dieser Fehler beruht im wesentlichen auf Ungenauigkeiten in der Analyse des Bodendruckfeldes, die bei der Aufnahme von Druckwerten an festen Gitterpunkten auf das Datenmaterial übertragen wurden.

Die Untersuchung der geostrophischen Windbeziehung wird mit dem 16-Punkte-Polynom durchgeführt, da das bikubische Interpolationspolynom für Stationen in den Randbereichen des Zentralquadrates

($-0,5 \leq x \leq 0,5$; $-0,5 \leq y \leq 0,5$) bessere Druckwerte als das 12-Punkte-Polynom gibt. Die Koeffizienten des 12-Punkte-Polynoms müßten also für Interpolationen außerhalb dieses Bereiches stets neu berechnet werden, während das 16-Punkte-Polynom das gesamte Seegebiet der Deutschen Bucht abdeckt. Dieses Polynom hat weiterhin die Eigenschaft, daß es in dem Gebiet jeder Masche ausschließlich ihres Randes bezüglich x und y stetig differenzierbar ist.

Die vielfach zur analytischen Berechnung des Luftdruckgradienten benutzte Differenzmethode wird durch die Differentiation des Interpolationspolynoms ersetzt. Die Komponenten des geostrophischen Windes im Gitterkoordinatensystem (Abb. 4.6) werden somit wie folgt bestimmt:

$$u_g = - \frac{1}{\rho \cdot f} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \quad (5)$$

$$v_g = - \frac{1}{\rho \cdot f} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

Die Verwendung dieses Differentialquotienten zur Bestimmung des geostrophischen Windes ermöglicht einen genaueren Vergleich zum wahren Wind, da nunmehr auch der berechnete Wind einen Stationswind darstellt. Demgegenüber wird der geostrophische Wind bei der Differenzmethode als Flächenmittel bestimmt. Die maschinelle Berechnung des geostrophischen Windes geht in dieser Arbeit von Druckwerten aus, die nach sorgfältiger Handanalyse aus Wetterkarten an festen Gitterpunkten entnommen wurden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in einer höheren Datenqualität, da eine maschinelle Bestimmung von Isobarenknicken wegen der Stetigkeit der Ableitungen schwer durchführbar ist.

Bei der nachfolgenden Untersuchung des Verhältnisses zwischen wahren und geostrophischem Wind sollen die Bereiche von Fronten und Bodenkonvergenzen ausgeklammert werden, weil für den geostrophischen Wind im Bereich von Unstetigkeiten im Druckfeld eine zeitliche Verzögerung zum aktuellen Wind besteht. Die Beziehung zwischen aktuellem und geostrophischem Wind wird also vorerst aus solchen Bodenluftdruckverteilungen ermittelt, in denen die analytische Berechnung des geostrophischen Windes zu einer ungestörten Beziehung mit dem wahren Wind führt, da keine signifikanten Änderungen im Aufbau der atmosphärischen Grundschicht auftreten.

Die Genauigkeit der Windbestimmung aus dem Druckfeld steht in engem Zusammenhang mit der Erfassung des wahren Luftdrucks für eine bestimmte Position. Wie der vorausgegangene Druckvergleich auf der Basis des 16-Punkte-Polynoms jedoch zeigt, streuen die berechneten Druckwerte mit 0,88 hPa um die mittlere Abweichung von 0,076 hPa im Sinne einer Gauß'schen Normalverteilung - zeitliche Zufallsverteilung. Hieraus ergibt sich mit einem um diesen Betrag veränderten Druckgradienten eine Geschwindigkeitsdifferenz von 0,06 m/s. Die leicht positive Verschiebung der Stationsdrucke gegenüber den errechneten Werten des Polynoms kann zufällig sein, oder sie ist in der Auswahl des Datenmaterials begründet, da

bevorzugt Wetterlagen mit auflandigen Winden verwendet werden. Zur Überprüfung eines möglichen Drucküberhangs durch Küstenstau wurden die Druckdifferenzen für die Küstenstationen (Norderney, List und Cuxhaven) und die Feuerschiffe ("TW Ems" und "Deutsche Bucht") getrennt betrachtet.

$$\Delta p_{k\ddot{u}} = 0,77 \pm 0,817 \text{ hPa (1433 Wertepaare)}$$

$$\Delta p_{FS} = 0,084 \pm 0,881 \text{ hPa (1012 Wertepaare)}$$

Das vorliegende Ergebnis bringt zu der ohne Frage keine abschließende Klärung. Somit muß davon ausgegangen werden, daß die synoptischen Analysen der Sturmlagen ein geringfügig zu tiefes Druckniveau im Mittel vorgeben.

Wie aus der Gegenüberstellung von aktuellem und geostrophischem Wind - WAKT/WGEOS - hervorgeht, besteht für Sturmlagen bei allen Feuerschiffen eine nahezu lineare Beziehung zwischen den beiden Parametern (Abb. 4.7 - 4.9). Dies unterstreicht auch die Darstellung des Gesamtkollektivs (Abb. 4.10) von allen Feuerschiffen und die zur Angleichung der berechneten Klassenmittel bestimmte Ausgleichsfunktion. Da das quadratische Glied keinen wesentlichen Beitrag zum Funktionswert liefert, kann das geostrophische Windverhältnis WAKT/WGEOS durch eine lineare Gleichung bestimmt werden.

Auf Grund dieser einfachen Beziehung verwenden viele Autoren bei der Umwandlung des geostrophischen Windes in den aktuellen Wind lediglich einen Umrechnungsfaktor F , der sich als Quotient WAKT/WGEOS ergibt. Dieser für einzelne Geschwindigkeitsklassen bestimmte Faktor ist, vergleichbar dem Verhalten des Reibungskoeffizienten, zunächst abhängig von der Stabilität der Ekman-Schicht, darüber hinaus in geringem Maße auch von der Windgeschwindigkeit und der Rauigkeit der Wasseroberfläche. Da bei thermisch instabiler Schichtung ein stärkeres "Durchgreifen" des geostrophischen Windes aus der Höhenströmung erfolgt, ist dieser Faktor infolge der hiermit verbundenen höheren aktuellen Windgeschwindigkeit größer als bei stabiler Schichtung mit reduziertem turbulentem Austausch. Entsprechend dem Stabilitätsparameter Wassertemperatur minus Lufttemperatur wurden für die vorliegenden Sturmlagen folgende Faktoren ermittelt:

- a) $F = 0,633$ (0,630) für labile und stabile Lagen
- b) $F = 0,608$ (0,606) für stabile Lagen ($T_w - T_L < 0$)
- c) $F = 0,658$ (0,654) für labile Lagen ($T_w - T_L > 0$)

Als Datenmaterial für die Bestimmung des Umrechnungsfaktors sowie nachfolgend des Ablenkungswinkels konnten 3031 Wertepaare - WAKT/WGEOS - erzeugt werden. Hiervon wurden die Fälle ausgeschlossen, die

- i) eine Winddrehung über 30° zwischen den synoptischen Beobachtungsterminen
- ii) eine aktuelle Windgeschwindigkeit unter 10 Knoten
- iii) eine Differenz WAKT-WGEOS von $<-40^\circ$ oder $>10^\circ$

aufwiesen; damit verblieben für die Analyse noch 1981 Wertepaare. Die Ergebnisse aus der Analyse des ungereinigten Datenmaterials wurden in Klammern hinzugefügt. Der Gegensatz zwischen ablandigen und auflandigen Windrichtungen und die hiermit verbundene Ausbildung oder Auflösung einer maritimen Grenzschicht blieben bei der Analyse vorwiegend westlicher Winde unberücksichtigt.

Da nach den vorliegenden Ergebnissen eine nahezu lineare Beziehung zwischen aktuellem und geostrophischem Wind besteht, kann eine lineare Regression von WAKT bezüglich WGEOS in dem durch das gefilterte Datenmaterial festgelegten Geschwindigkeitsbereich (WAKT: 10-50 kn) vorgenommen werden (Abb. 4.11 - 4.13). Der für den jeweiligen Regressionskoeffizienten bestimmte Vertrauensbereich, der in den vorgestellten Beispielen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erhalten wird, weist darauf hin, daß die gefundenen Näherungswerte die unbekanntes Steigungen der zugehörigen Grundgesamtheiten in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich ausreichend repräsentieren. Die Gegenüberstellung der Regressionsgeraden aus labilen und stabilen Wetterlagen (Abb. 4.14) zeigt eine geringe Verschiebung der beiden Geraden bei nahezu gleicher Steigung (labil: 0,39; stabil: 0,41). Die gesuchte Beziehung zwischen aktuellem und geostrophischem Wind ist durch die Regressionsgeraden für den Übergangsbereich von Starkwind und Sturm am sichersten repräsentiert, da im Geschwindigkeitsbereich 30 - 39 Knoten 40 % des Datenkollektivs liegen.

Die Abhängigkeit von der Stabilität der niedertroposphärischen Schichtung wirkt sich nicht nur auf das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten, sondern auch auf die Richtung des Windes aus. Als Maß dieser Differenz zwischen aktueller und geostrophischer Windrichtung wird der ageostrophische Winkel verwendet (Abb. 4.15). Negative Winkel zeigen die infolge der Bodenreibung auftretende Abweichung zum tiefen Druck an.

Die starke Streuung des ageostrophischen Winkels in den unteren Geschwindigkeitsbereichen bleibt unberücksichtigt, da lediglich Windgeschwindigkeiten über 10 Knoten für den Vergleich verwendet werden. Somit ergeben sich für die unterschiedlichen Schichtungen die folgenden ageostrophischen Winkel. Auch hier wurden die Ergebnisse aus der Analyse des ungefilterten Datenmaterials in Klammern hinzugefügt.

- a) $\alpha = -11,82^\circ \pm 10,42^\circ$ ($-13,52^\circ \pm 20,61^\circ$) stab.+lab.
- b) $\alpha = -13,85^\circ \pm 9,97^\circ$ ($-17,62^\circ \pm 18,70^\circ$) stab.
- c) $\alpha = -10,00^\circ \pm 10,48^\circ$ ($-9,97^\circ \pm 21,49^\circ$) lab.

Die Temperaturdifferenz Wasser/Luft wurde als Stabilitätsparameter zur Aufgliederung des Datenmaterials benutzt, wobei die neutralen Fälle den stabilen Lagen zugeschlagen wurden. Aus den vorliegenden Sturmlagen ergibt sich, daß bei labilen Schichtungen eine Korrektur von 10° auf die Richtung des geostrophischen Windes angewendet werden kann. In stabilen Situationen nimmt der ageostrophische Winkel im Mittel nur um $3,85^\circ$ gegenüber der Abweichung bei labilen Schichtungen zu, wobei sich die Streuung nur unwesentlich verändert. Damit kann über Seegebieten im ungestörten Strömungsfeld der geostrophische Wind durch Reduzierung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in einen zur Bestimmung des Windstaus erforderlichen aktuellen Wind überführt werden. Die Windrichtung liegt hierbei mit der zugehörigen Streuung von 10° im Bereich der bei Windmessungen geforderten Genauigkeit.

Allgemein besteht nur eine geringe Korrelation zwischen dem ageostrophischen Winkel und der Windgeschwindigkeit. Nach Hasse (1981) ist bei ablandigen Winden eine leichte Zunahme von α mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten zu beobachten, während bei auflandigen Winden ein umgekehrter Verlauf eintritt. Die aus verschiedenen Klassenmitteln für den Ablenkungswinkel α bestimmte Ausgleichsfunktion zeigt bei zunehmenden Windstärken nur eine geringe Abnahme des ageostrophischen Winkels. Wie aus der Aufteilung des Datenmaterials nach labilen (53 %) und stabilen plus indifferenten (47 %) Schichtungen hervorgeht, ist diese Tendenz aus dem stabilen Datenkollektiv in die Gesamtverteilung eingebracht worden, da hier die Funktion im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten deutlich abfällt.

Die Größe des ageostrophischen Winkels schwankt bei den einzelnen Autoren zwischen 5 und 25° , so daß der berechnete mittlere Ablenkungswinkel mit 12° im unteren Bereich dieser Autorenskala bleibt. Dies Ergebnis weist darauf hin, daß die turbulente Durchmischung der Grenzschicht bei Sturmlagen auch für den Fall eines stabilen Temperaturgradienten an der Wasseroberfläche zu einem vertikalen Austausch von Impulsgröße führt.

Schnapauff (1974) stellte für den Bereich der Deutschen Bucht ein Anwachsen von α mit zunehmender Windgeschwindigkeit fest. Dagegen belegt Behrendt (1976) mit einer Meßreihe über der Ostsee ein Kleinerwerden von α mit ansteigendem WGEOS. Dies entspricht auch den Ergebnissen von Hasse (1981), der für auflandige Winde in der Deutschen Bucht einen ähnlichen Verlauf beobachtete. Nach den vorliegenden Analysen, die auf einem wesentlich umfangreicheren Datenmaterial als die voraufgegangenen Arbeiten beruhen, darf angenommen werden, daß die unterschiedlichen Aussagen auf unterschiedlichen Stabilitätsbedingungen bei der Stichprobennahme beruhen, d.h. der Winkel α ist über alle Windgeschwindigkeiten nahezu konstant.

Obwohl die kurzzeitigen Windzunahmen keinen direkten Einfluß auf den Windstau haben, wirken Böen durch die Aufrauung der Wasseroberfläche dennoch indirekt auf den Wassertransport. Das mittlere Windfeld trifft hiernach auf eine vergrößerte Wasserfläche, in die hinein Bewegungsgröße aus der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht übertragen wird. Damit wird der Impulsfluß aus dem

Windmaximum weniger direkt in die mittlere Strömung eingespeist, sondern geht zunächst vor allem in den Seegang.

Der Böenfaktor (Abb. 4.16) ist der Quotient aus dem Windmaximum und dem 10-Min-Mittel des Windes. Die für die Inselstationen List und Norderney berechnete Ausgleichsfunktion aus den mittleren Böenfaktoren unterschiedlicher Geschwindigkeitsbereiche veranschaulicht die Abnahme der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Bö und dem 10-Min-Mittel mit höheren Windgeschwindigkeiten. Während im Geschwindigkeitsbereich um 10 Knoten die Windspitzen den doppelten Wert erreichen können, sind die Böen bei schweren Stürmen nur noch um 50 % gegenüber dem Mittel überhöht. Je stärker die Bodenreibung, desto stärker weichen Spitzenbö und Mittelwind voneinander ab. Daher läßt sich die Beurteilung einer Küstenstation als See- oder Landstation auch über den Böenfaktor erreichen. Im vorliegenden Beispiel belegt die Station Cuxhaven mit höheren Böenfaktoren gegenüber den beiden Inselstationen deutlich den Bereich zunehmender Bodenreibung.

4.5 Das Windfeld bei Sturmlagen

Das Bodenwindfeld in der Deutschen Bucht kann mit Hilfe der geostrophischen Windbeziehung und dem gefundenen Ablenkungswinkel aus dem geostrophischen Windfeld abgeleitet werden. Aus den Windfeldern, die für die synoptischen Termine unmittelbar vor dem Fluttermin der jeweiligen Sturmlagen berechnet wurden, sind diejenigen Gebiete analysiert worden (Abb. 4.17), die den zur Windstaubestimmung erforderlichen Windvektor innerhalb des Streubereiches $+ 5$ Grad und $+ 2$ Knoten aufwiesen. Der erforderliche Windvektor ist hierbei der Wind, der aus dem für die jeweilige Sturmlage bei Cuxhaven registrierten Windstau nach der empirisch-statistischen Windstaumethode nachträglich berechnet wurde.

Ähnlich der unterschiedlichen Wertigkeit der Feuerschiffsbeobachtungen bei der Windstaubestimmung in Abschnitt 4.3 ergeben sich hierbei von Fall zu Fall Windgebiete in unterschiedlicher Ausdehnung und Lage. Diese Gegebenheiten werden durch Faktoren wie Windrichtung und -geschwindigkeit, horizontale Struktur des Windfeldes und den genannten zeitlichen Unterschied zwischen synoptischem Termin und Fluttermin bestimmt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der geostrophischen Windbeziehung sind solche Lagen, bei denen ein nahezu divergenzfreies Strömungsfeld angetroffen wird. Zusätzliche Beschleunigungen durch Konvergenz und Divergenz der Isobaren sowie die Zentrifugalbeschleunigung bei gekrümmten Isobaren führen zu Abweichungen von der gefundenen geostrophischen Windbeziehung und verändern den Ablenkungswinkel.

Die zur Staubestimmung erforderlichen Windwerte konnten bei 24 Sturmlagen - außer dem Hollandorkan vom 01.02.54 - aus den in der Deutschen Bucht vor den Flutterminen vorliegenden Windfeldern nachträglich entnommen werden. Damit wurden alle Windfelder auf die Häufigkeit des Auftretens eines für die Staubestimmung brauchbaren Windes an festen Gitterpunkten untersucht (Abb. 4.18). Hierbei ergab sich, vergleichbar den Ergebnissen aus Abschnitt 4.3, daß der zur Windstaubestimmung erforderliche Wind in über 30 % der Fälle in den westlichen und nördlichen Randgebieten der Deutschen Bucht angetroffen wurde. Dagegen ist die Häufigkeit der zur Windstauberechnung verwendbaren Winde aus dem Windfeld im Inneren der Deutschen Bucht gering. Nimmt man hierzu die Ergebnisse numerischer Simulation, nach denen etwa 80 % des Windstaus an der deutschen Nordseeküste aus dem Windfeld der Deutschen Bucht stammen, so sind für die Vorhersage des Windstaus am Pegel Cuxhaven die Windverhältnisse in den westlichen und nördlichen Randgebieten der Deutschen Bucht besonders wichtig.

Der zur Berechnung des Windstaus benötigte Wind kann nach den vorliegenden Ergebnissen weder von einer einzelnen Schiffsbeobachtung noch von den berechneten Windwerten eines bestimmten Seegebietes geliefert werden. Da die Höhe des Windstaus sich aus dem gesamten Windfeld in der Nordsee ergibt, kann ein mittlerer Windvektor den Anteil aus dem Windfeld der Deutschen Bucht angenähert repräsentieren. Um diese Aussage zu prüfen, wurde aus 36 Gitterpunkten über der Deutschen Bucht ein mittlerer Windwert

berechnet, der mit dem für den Windstau bei Cuxhaven erforderlichen Wind verglichen wurde (Abb. 4.19).

Dieser erforderliche Wind wurde in seiner Richtung als Mittel aus den Beobachtungen aller Feuerschiffe vorgegeben. Mit Hilfe des bei den einzelnen Sturmlagen am Pegel Cuxhaven registrierten Windstaus konnte die zugehörige Windgeschwindigkeit nachträglich bestimmt werden. Die Vorgabe der Windrichtung ist notwendig, da die Bestimmung des Windvektors aus der empirisch-statistischen Windstau-beziehung nicht eindeutig ist, d.h. der vorliegende Windstau kann auch mit anderen Kombinationen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit erreicht werden.

Die hohe Übereinstimmung in den Windrichtungen und der damit verbundene enge Konfidenzbereich (+ 3 Grad) für den Regressionskoeffizienten belegen, daß der geostrophische Wind um den Ablenkungswinkel in der Richtung korrigiert und an Stelle aktueller Windmessungen verwendbar ist. Die Windgeschwindigkeit weist demgegenüber eine wesentlich stärkere Streuung auf, so daß eine mittlere Abweichung von 4,8 Knoten mit einer Streuung von + 3,3 Knoten zwischen berechnetem und erforderlichem Wind auftritt. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 95 % hat der Regressionskoeffizient der Windgeschwindigkeit ein Konfidenzintervall von 0,32 bis 0,68.

Die Lage der Regressionsgeraden für die Windgeschwindigkeiten weist darauf hin, daß bei Windgeschwindigkeiten über 45 Knoten der Windstau niedriger ausfällt. Die für den Fluttermin prognostizierten Winde sind diskrete Werte, die keine Aussage über den tatsächlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit geben. Daher sind Verbesserungen der Windstauvorhersage eng mit einer zusätzlichen Prognose des Windverlaufs über die Vorhersageperiode verbunden. Es sind entsprechende Kurzzeitmodelle zu entwickeln, die den mittleren Verlauf der Windgeschwindigkeit zwischen dem aktuellen Termin und dem Vorhersagetermin wiedergeben.

Die beste Übereinstimmung zwischen berechnetem und erforderlichem Wind ist in den Fällen zu verzeichnen, wo ein nahezu homogenes Windfeld im Zeitintervall zwischen synoptischem Termin und Fluttermin auf die Meeresoberfläche in der Deutschen Bucht einwirkt. Die gefundene geostrophische Windbeziehung und der analysierte Ablenkungswinkel werden bei der Aufbereitung der an den einzelnen Gitterpunkten berechneten geostrophischen Winde eingesetzt und führen zu einem mittleren Windvektor, der im ungestörten Druckfeld der Deutschen Bucht den zur Windstaubestimmung erforderlichen Windwert stellt. Damit kann die Vorhersage des Stauwindes objektiviert werden, wenn es gelingt, die benötigten Druckfelder mit ausreichender Genauigkeit bereitzustellen. Die Windstauvorhersage nach der empirisch-statistischen Methode kann damit für verschiedene Vorhersagezeiträume eingesetzt werden, wobei aktuelle Beobachtungen zu einem späteren Termin eine mögliche Verbesserung der vorliegenden Stauprognose erlauben.

5 Optimale Schiffsrouten bei Sturmlagen in der Nordsee

Die geostrophische Windbeziehung stellt brauchbare Windwerte für die Windstauvorhersage nach der empirisch-statistischen Methode sowie zur Ableitung des Tangentialschubs des Windes an der Meeresoberfläche beim Einsatz numerischer Vorhersagemethoden bereit. Sie ist auch im Routinedienst nützlich für eine Antwort auf die Frage, welche Seegebiete der Nordsee bei Sturmlagen besonders gefährdet sind und daher von Schiffen bei Sturm gemieden werden sollten.

Die Überquerung der Nordsee bei Sturmlagen mit Ziel- oder Ausgangshäfen an der deutschen Küste ist von der Lage und der Zugrichtung der Tiefdruckkerne abhängig. Entsprechend werden die 25 vorliegenden Sturmlagen zunächst in NW- (68 %), W- (20 %) und SW-Lagen (12 %) unterteilt. Bei den NW-Lagen bietet sich eine weitere Unterteilung entsprechend der Verlagerung des Tiefkerns über die Nordsee hinweg - Nordseetief (3 Fälle) -, in Richtung Skagerrak - Skagerrakzyklone (10 Fälle) - und nördlich der Nordsee - Nordmeertief (4 Fälle) - an. Die Skagerrakzyklonen stellen mit 40 % die Mehrzahl der Sturmlagen mit schweren Sturmfluten im Zeitraum 1950 - 1978. Die Intensität der Sturmzyklonen ist jedoch unabhängig von der Zugrichtung; so wurde die Hamburger Sturmflut (1962) von einer Nordmeerzyklone verursacht, während der Bermpohlorkan (1967) eine südwestliche Zugbahn aufwies.

Die Gefährdung der Schifffahrt in der Nordsee bei Sturmlagen wird aus der horizontalen Verteilung der berechneten Windmaxima während der analysierten Sturmlagen beurteilt. Die Bestimmung der hierzu erforderlichen Windfelder geht von der gefundenen geostrophischen Windbeziehung und dem für die Deutsche Bucht bestimmten Ablenkungswinkel aus.

Die Windmaxima werden als mittlere Windmaxima der ausgewählten Sturmkollektive berechnet und dargestellt. In der Abb. 5.1 werden die Landgebiete wie Seegebiete behandelt. Eine sinnvolle Anwendung der geostrophischen Windbeziehung ist jedoch nur über Wasserflächen gegeben.

a) das Nordmeertief (Abb. 5.1 a):

Bei der Verlagerung der Tiefdruckkerne vom Nordost-Atlantik gegen die norwegische Küste werden die zugehörigen Sturmfelder allgemein zügig über die Britischen Inseln hinweg in die Nordsee geführt. Mit der starken Reduzierung der Zuggeschwindigkeit bei Annäherung an die Gebirgskette Norwegens entsteht auf der Rückseite über der östlichen Nordsee ein nahezu stationärer Windstrich mit hohen Windstärken aus Nordwest.

Unter diesen Umständen kann die Empfehlung für alle aus deutschen Häfen auslaufenden Schiffe mit geringerer Tonnage oder gefährdeter Ladung, die nicht den Weg durch den Englischen Kanal nehmen, ein westlicher Ausweichkurs mit Fahrt entlang der schottischen Ostküste sein. Dabei sollte die Fahrtroute möglichst südlich der Doggerbank nach Westen

führen. Der ausgedehnte Fetch und die längere Einwirkdauer führen zu einer hohen Windsee über der östlichen Nordsee, während mit nach Westen abnehmenden Windstärken zusätzlicher Küstenschutz genutzt werden kann.

b) das Skagerraktief (Abb. 5.1 b):

Unter den vorliegenden Sturmlagen gehört vor allem die Serie der 73er-Sturmfluten zu den Tiefdruckgebieten mit einer Verlagerung des Tiefkerns aus Nordwesten in das Skagerrak. Dabei entsteht diagonal über die Nordsee von NW nach SE ein Extremwindband, das einen Direktkurs zu den Pentlands vor allem für kleinere Schiffe nicht möglich macht. Auch hier kann nur ein westlicher Ausweichkurs mit Fahrt entlang der schottischen Ostküste empfohlen werden, wobei in der Deutschen Bucht die widrigsten Seegangsbedingungen angetroffen werden. Im Vergleich zu den übrigen Seegebieten der Nordsee werden die deutschen Nordseeküsten und damit alle aus deutschen Häfen auslaufenden Schiffe von diesem Typ der NW-Lagen am stärksten betroffen, da zunächst keine Ausweichmöglichkeiten bestehen.

c) das Nordseetief (Abb. 5.1 c):

NW-Lagen vom Typ des Nordseetiefs, bei dem das Zentrum der Zyklone über die Nordsee hinweg gegen die jütländische Küste läuft, zeigen die höchsten Windstärken entlang der Ostküste der Britischen Inseln. Damit entfällt bei dieser Wetterlage der Umweg entlang der schottischen Küste, da nunmehr ein weit östlicher Ausweichkurs beim Überqueren der Nordsee gefahren werden sollte. Die vorgefundene Verteilung der mittleren Windmaxima rechtfertigt somit die getroffene Unterteilung bei NW-Lagen.

d) Westlagen (Abb. 5.1 d):

Neben den NW-Lagen des Skagerraktyps stellen die Westlagen mit einem breiten Extremwindband über der südlichen Nordsee die stärkste Behinderung des Seeverkehrs von und nach deutschen Nordseehäfen dar. Für die Überquerung der Nordsee kann kein Ausweichkurs empfohlen werden, so daß der direkte Weg zu den Pentlands oder der Norwegischen Rinne unter diesen Umständen als "optimal" angesehen werden muß. Eine ähnliche Situation ergibt sich für SW-Lagen bei einer Zugrichtung des Tiefkerns aus den Seegebieten Irlands ins Skagerrak oder gegen die norwegische Küste.

Da sich das verwendete Datenmaterial ausschließlich auf Sturmflutlagen beschränkt, sind die vorgelegten Verteilungen auch nur das Ergebnis weniger Extremsituationen. Es darf jedoch angenommen

werden, daß eine höhere Anzahl von Beispielen bei gleicher Aufgliederung der Sturmlagen zu ähnlichen Verteilungen führen würde. Daher ist bereits mit den vorliegenden Analysen eine Routenberatung für die Schifffahrt in Anlehnung an die jeweilige Zugbahn der Tiefdruckkerne möglich. Grundlage der Beratung sind hierbei die Bodendruckvorhersagen über mehr als 24 Stunden.

6 Extremalwindgeschwindigkeiten an der deutschen Küste

6.1 Beschreibung des Verfahrens

Im Rahmen mehrerer Projekte und Sonderuntersuchungen betreibt der Deutsche Wetterdienst die EDV-gerechte Aufbereitung von Registrierungen des Windes (Böen und Zehnminuten-Mittelwerte) in Norddeutschland. Daher konnte die regionale Verteilung von Extremalwindgeschwindigkeiten an der norddeutschen Küste kartenmäßig dargestellt werden. Die theoretischen Überlegungen hierzu wurden bereits veröffentlicht (1). Es wird deshalb auf eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens verzichtet.

Nicht nur für Küstenschutz und Seefahrt, sondern auch in der technischen Klimatologie, ist es erforderlich, Überschreitungshäufigkeiten bestimmter Schwellenwerte für Zeiträume anzugeben (abzuschätzen), die weitaus länger sind als die zugrundeliegenden Meßzeiträume. Hier tritt dann das Problem der Extrapolation empirischer Verteilungen auf, das im allgemeinen ohne die Kenntnis der zugrundeliegenden physikalisch-statistischen Zusammenhänge oder zumindest einer entsprechenden geeigneten plausiblen Hypothese nicht zu lösen ist. Für die Verteilungen der Windgeschwindigkeit sind wir auf eine solche Hypothese angewiesen, da es ein physikalisches Verteilungsgesetz (im Sinne eines Naturgesetzes) für den Wind nicht gibt.

Es wird daher postuliert, daß es sich bei den Windverteilungen im norddeutschen Flachland und auf See um zweidimensionale logistische Verteilungen handelt, die von Gumbel (3), (4) und Essenwanger (5) beschrieben wurden. Diese zeigen nach zweimaliger Integration die Eigenschaft, in unserer halblogarithmischen Darstellungsart mit abnehmender Häufigkeit in eine asymptotische Gerade überzugehen.

Ihre Anpassung an die empirischen Verteilungen wird mit Hilfe eines Iterationsverfahrens vorgenommen, das schrittweise eine optimale Annäherung durch Abweichungsminimierung (ähnlich der Methode der kleinsten Quadrate) durchführt. Von der empirischen Verteilung wurden aus Gründen der Rechenzeitkapazität nur jeder vierte Punkt zur Berechnung herangezogen. Vergleichsrechnungen zeigten, daß die Approximation davon praktisch unbeeinflusst bleibt. Diejenigen empirischen Überschreitungshäufigkeiten, die weniger als 4 pro Jahr betragen (das untere Ende der Verteilungen), werden wegen ihrer größeren statistischen Unsicherheit nicht berücksichtigt.

Das hier skizzierte Verfahren zur Extrapolation empirischer Häufigkeitsverteilungen der Gesamtheit der verfügbaren Windgeschwindigkeitsmessungen erlaubt lediglich die Bestimmung der mittleren Überschreitungshäufigkeiten bis etwa zum Jahrhundertwind. Es kann und soll die (insbesondere in der Bautechnik) übliche Methode der Extremwertstatistik nicht ersetzen, die eine Extrapolation der Verteilung der Jahreshöchstwerte an einer Station vorsieht. Aus Gründen der statistischen Sicherheit sind dazu die jährlichen Extrema der realen Meßwerte des Windes aus wenigstens 20-30 Jahren erforderlich, die aber nur für wenige Stationen vorliegen.

Dagegen liefert das hier vorgestellte Verfahren offenbar auch für

wesentlich kürzere Kollektive (z.T. nur 5 Jahre) bereits brauchbare Ergebnisse. Dies zeigt insbesondere der in (1) ausgeführte Vergleich der aus unterschiedlichen Zeiträumen stammenden Kollektive für mehrere Stationen. Die extrapolierten Jahrhundertwinde weichen allgemein weniger als 3 m/s voneinander ab, was bereits als gute Übereinstimmung betrachtet werden muß.

Überdies überschreiten selbst die jährlichen Extrema insbesondere der Böen an einigen Stationen der Nordseeküste regelmäßig die Meßgrenzen der verwendeten Meßgeräte. Diese Daten sind dann nur noch Schätzwerte und somit für eine Extremwertstatistik unbrauchbar! Bei unserem Verfahren der Extrapolation der Grundgesamtheit aber ist eine Beschränkung des Wertebereiches (auf etwa 25-30 m/s im Mittelwind und 40 m/s bei den Böen) praktisch bedeutungslos, da sich die Steigung der asymptotischen Geraden bereits bei geringerem Wind deutlich ausprägt. Der von uns gefundene Jahrhundertwert des Mittelwindes und der Böen liegt jedenfalls an fast allen norddeutschen Stationen außerhalb der Meßgrenzen der verwendeten Geräte!

Es ist ferner festzuhalten, daß eine Extrapolation bis zum "Jahrhundert-Wert" nur statthaft ist, wenn keine langzeitigen Klimaänderungen vorhanden sind. Statistisch gesprochen, muß die Stationarität des zugrundeliegenden stochastischen Prozesses vorausgesetzt werden und kann zumindest in dem hier gegebenen Rahmen nicht überprüft werden.

Die Frage nach langzeitigen Klimavariationen wird heute vielfach behandelt, Lamb und Weiss (15) postulieren beispielsweise einen Trend zu häufigerem Nordwestwind in den nächsten 70 bis 100 Jahren. Eine derartige Klimaänderung würde wegen der erhöhten Turbulenz zwangsläufig eine Veränderung der Böenverteilungen bewirken. Dennoch kann die angegebene Extrapolation zur Abschätzung des Risikos unter den derzeitigen Klimabedingungen verwendet werden.

Die statistische Sicherheit der angegebenen Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit nimmt ab mit geringer werdender Überschreitungshäufigkeit. Es kann angenommen werden, daß bis zu einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10/Jahr mit einer Sicherheit von + 1 m/s, darüber hinaus nur noch mit einer Sicherheit von + 2 m/s, beim "Jahrhundert-Wert" möglicherweise sogar nur + 3 m/s gerechnet werden muß.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich vor Fehlinterpretationen gewarnt. Es ist deutlich geworden, daß es entgegen der üblichen Ansicht einen absoluten Maximalwert nicht gibt, da die Überschreitungswahrscheinlichkeit stets größer als Null ist. Diese Tatsache gilt nicht nur für den Wind, sondern auch für Schneehöhen, Temperaturen, Niederschlagsintensitäten, Wellenhöhen u.a.

Außerdem kann z.B. die Überschreitung desjenigen Schwellenwertes, dessen Häufigkeit mit 1 pro 10 Jahren angegeben wird, schon im nächsten Jahr erfolgen oder mit gewissen Vorbehalten auch morgen. Es besteht also stets ein gewisses Rest-Risiko, auch wenn die Festigkeit einer Konstruktion für eine noch so hohe Grenzbelastung durch den Wind ausgelegt worden ist. Dieses Risiko ist jedoch (z.B.

nach den angegebenen Abbildungen und Tabellen) kalkulierbar. Der Konstrukteur muß "lediglich" noch entscheiden, welches das maximal verantwortbare Risiko ist.

In den Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit, die den Diagrammen und Tabellen zugrunde liegen, sind alle "normalen" meteorologischen Ereignisse enthalten. Ausgenommen sind lediglich die sehr seltenen, kurzlebigen und eine geringe Fläche überstreichenden Großtromben (Tornados). Diese wurden auch in Norddeutschland schon beobachtet. Es ist jedoch wenig über die tatsächlich in ihnen auftretenden Windgeschwindigkeiten bekannt.

6.2 Datenmaterial

Niedersachsen liegt mit seinem größten Teil in der norddeutschen Tiefebene. Dennoch ist eine Gliederung in recht unterschiedliche Naturräume zu verzeichnen:

1) Die ostfriesischen Marschengebiete einschließlich der vorgelagerten Inseln und Wattengebiete, die sich etwa 10-20 km breit an der Küste hinziehen und mit den Stromtälern der Elbe, Weser und Ems in gleicher Breite gut 50 km in das Inland vordringen. Diese Region ist fast völlig eben und nahezu ohne Baumbestand.

2) Bis zu einer Linie Stade-Rotenburg(Wümme)-Delmenhorst-Friesoythe-Dörpen(Ems) erstreckt sich dann ein noch weitgehend flaches Gebiet, das durch seine ausgedehnten Fenn- und Moorgebiete gekennzeichnet ist. Es umfaßt auch die weiten Niederungen der Oste, Wümme, Hamme, Hunte, Jade und Leda. Es schließt einige Geestgebiete (vor allem nördlich Bremen) mit ein.

3) Südlich und östlich der in 2) genannten Linie bis etwa zum Mittellandkanal beginnen die höheren Geest- und Heidegebiete, die östlich der trennenden Weser-Aller-Niederung weit ausgeprägter sind als westlich von ihr. Die orographische Gliederung und auch der Bestand an Bäumen (Wäldern) ist deutlich größer als in der Region 2.

4) Südlich des Mittellandkanals beginnt die Region der Mittelgebirge, die hier nicht weiter betrachtet wird.

Obgleich Schleswig-Holstein insgesamt der Norddeutschen Tiefebene hinzugerechnet wird, bedeutet dies nicht, daß das Bundesland orographisch einheitlich gegliedert oder gar insgesamt völlig eben ist. Vielmehr gliedert sich das Land in mehrere Naturräume. Von Westen nach Osten fortschreitend sind hier zu nennen (nach dem Klimaatlas für Schleswig-Holstein, 1967):

1) Die nordfriesischen Marschengebiete einschließlich der vorgelagerten Inseln etwa westlich der Linie Niebüll-Husum-Heide-Brunsbüttel, die fast völlig eben und nahezu ohne Baumbestand sind.

2) Der östlich anschließende breite Gürtel des hügeligen Geestgebietes, das ebenfalls intensiv landwirtschaftlich genutzt wird und einen relativ geringen Baumbestand aufweist. Die Geest ist westlich von Rendsburg und Schleswig durch das marschenähnliche Gebiet der Eider-Treene-Niederung unterbrochen. Die Südgrenze der

Geest stellen die Untere Elbemarschen dar, die sich von der Küste bis Geesthacht erstrecken.

3) Erst östlich der Linie Flensburg-Schleswig-Rendsburg-Segeberg-Geesthacht beginnt das eigentliche Hügelland. Es ist nördlich der Schlei weniger ausgeprägt, erstreckt sich aber südlich immer breiter werdend bis fast an die Ostsee und die östlichen Stadtgebiete Hamburgs. Das Hügelland geht jenseits der Grenze in die Mecklenburgische Seenplatte über.

4) Ein Küstenstreifen an der Ostsee, der im Norden schmal ist, im Süden dagegen die Halbinsel um Oldenburg/Holst. und die Insel Fehmarn, nicht aber die Lübecker Bucht mit einschließt.

Es wurde versucht, für alle Gebiete Schleswig-Holsteins und die Gebiete 1 und 2 Niedersachsens möglichst alle verfügbaren Windregistrierungen zur Auswertung zu erhalten. Insgesamt konnten in verschiedenen Projekten die folgenden Stationen aufbereitet werden:

- Nordholz	GeophysBDBw
- Oldenburg	GeophysBDBw
- Wittmund	GeophysBDBw
- Ahlhorn	GeophysBDBw
- Sengwarden	GeophysBDBw
- Jever	GeophysBDBw
- Rotenburg (Wü)	GeophysBDBw
- Leda-Sperrwerk	WSV
- Brake	WSV
- Minsener Oog	WSV
- Emden	DWD
- Bremen	DWD
- Wilhelmshaven	WSV
- Hohn	GeophysBDBw
- Störsperrwerk	WSV
- Itzehoe	GeophysBDBw
- Cuxhaven	DWD
- Helgoland	DWD
- Bremerhaven	DWD
- Norderney	DWD
- Borkum	WSV
- List/Sylt	DWD
- Meierwik	GeophysBDBw
- Schleswig-Jagel	GeophysBDBw
- Kiel-Holtenau	GeophysBDBw
- Westermarkelsdf	DWD
- Eidersperrwerk	WSV
- Büsum	ALW
- Travemünde	WSV
- Hbg-Fuhlsbüttel	DWD
- Borkum	WSV

sowie nur für den mittleren Wind die Feuerschiffe

- Elbe 1
- Weser
- Deutsche Bucht
- TW Ems
- Borkumriff

Dabei bedeuten die Abkürzungen:

WSV	- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung
GeophysBDBw	- Geophysikalischer Beratungsdienst Bundeswehr
DWD	- Deutscher Wetterdienst
ALW	- Amt für Land- und Wasserwirtschaft

Die Auswertung der Registrierungen wurde nach einem Verfahren vorgenommen, das schon für verschiedene Projekte des Deutschen Wetterdienstes am Seewetteramt Hamburg mit Erfolg verwendet wurde. Erfahrene Werkvertragsnehmer lesen nach einem vorgegebenen Schema die Originalregistrierungen ab und prüfen dabei die Registrierung auf mögliche Störungen und Verschiebungen. Die für verarbeitungswürdig befundenen Werte werden in Markierungsfomulare eingetragen (gekennzeichnet), die dann ohne weitere manuelle Bearbeitung direkt von einer EDV-Anlage gelesen werden können.

Die gelesenen Serien wurden einer EDV-Prüfroutine unterworfen, die die Einzelwerte auf Serienkonsistenz prüft und die insbesondere die unvermeidlichen Markierungsfehler (sog. "Fünfer-" und "Zehnerfehler" sowie Vertauschungen) weitmöglich erkennt sowie Sprungstellen und "Ausreißer" feststellt. Außerdem sind für diese spezielle Anwendung alle Windwerte von mehr als 30 m/s von einer zweiten Person überprüft worden. Die ermittelten Fehler wurden nachgebessert, die Serienabschnitte anschließend zeitlich sortiert und eventuelle Lücken durch Fehlkennungen aufgefüllt.

Es wurde ein Zeitraum von sechs Jahren aus der jüngeren Zeit (1972 bis 1977 einschließlich) gewählt. Als Basis für den Zeittakt stand nur das international übliche und gerätespezifisch fest eingebaute Zehnminuten-Intervall zur Verfügung. Eingehende Untersuchungen an schon vorhandenen Serien ergaben eine fast vollständige Unabhängigkeit der Form der resultierenden Häufigkeitsverteilung von der jeweiligen Ausleserate. Der Grund dürfte in der Erhaltungsneigung des Windes zu finden sein. Es ist also weitgehend unerheblich, ob man aus einem Zeitraum alle Werte, jeden sechsten (einen pro Stunde) oder gar einen pro drei Stunden benutzt, um eine Häufigkeitsverteilung zu erstellen, sie wird im wesentlichen gleich. Wir haben uns für die Ausleserate 1 pro Stunde entschieden. Die Datenserien jeder Station enthalten daher maximal 52600 Werte. Bisweilen fehlen kürzere Abschnitte, so daß die reale Länge etwa 50000 beträgt.

Bei dieser Auswertung wurde für alle Serien dasjenige Zehnminuten-Intervall verwendet, das sich von der 30. bis zur 40. Minute jeder Stunde erstreckt. Für dieses Intervall wurde der Zehnminuten-Mittelwert und der maximale Momentanwert der Windgeschwindigkeit abgelesen.

Aus den so gewonnenen Datenserien wurden relative Häufigkeitsverteilungen berechnet, aus diesen durch fortlaufende Summation von der höchsten gemessenen Windgeschwindigkeit an abwärts bis Null die Überschreitungswahrscheinlichkeiten $W(F)$ ermittelt. Diese Berechnung wurde für den Mittelwind und den maximalen Momentanwind getrennt durchgeführt. Zur Vereinfachung der Interpretation wurden die Überschreitungshäufigkeiten $N \cdot W(F)$ für ein mittleres Jahr umgerechnet. Ein mittleres Jahr hat 365.25 Tage und somit $N = 52596$ Zehnminuten-Intervalle.

Die räumliche Verteilung der Stationen kann der Abbildung 6.1 entnommen werden. Leider gibt es trotz dieser Fülle von Stationen noch wesentliche datenleere Gebiete. Wir haben sie in der Abb. 6.1 schraffiert. Innerhalb des Dreiecks Hamburg-Cuxhaven-Bremen gibt es erst seit 1980 einen Windmesser in Bremervörde. Leider standen uns für diese Untersuchung auch für das Gebiet südwestlich der Linie Emden-Jever-Cloppenburg keine Daten zur Verfügung.

Die Meßhöhe ist nicht einheitlich 10 m über Grund. Sie beträgt für die Stationen Brake 25 m, Minsener Oog 16 m, Störsperrwerk 21 m. Hier wird eine Höhenreduktion erforderlich, die hier nicht weiter beschrieben wird. Es stellte sich heraus, daß am Leda-Sperrwerk nur wenige Meter über einem Walmdach gemessen wird. Das führt zu einer derartigen Strömungsüberhöhung, daß diese Station nicht weiter berücksichtigt werden konnte. Die Überhöhung ist nicht reduzierbar. Die Station Wilhelmshaven konnte ebenfalls nicht benutzt werden, weil aufgrund eines Defektes die Böen größtenteils nicht mit dem Mittelwind in Einklang standen.

Schwerwiegend ist auch ein anderer Umstand. Das am weitesten verbreitete Windmeßgerät ist vom Typ Fuess 90Z. Die Registrierung der Zehnminuten-Mittelwerte und der Böen werden getrennt vorgenommen. Erstere stellt dabei durch Windwegzählung eine echte Integration (Mittelbildung) des böigen Windes dar. An einigen Stationen waren jedoch andere Geräte eingesetzt, die keine Mittelwindregistrierung besitzen. Wir haben uns daher beholfen, indem wir die Auswerter den Mittelwert aus den Böenregistrierungen schätzen ließen. Das menschliche Auge ist für derartige flächenausgleichende Mittelbildung recht gut geeignet. Dennoch sind bei hohen Windgeschwindigkeiten die absoluten Schwankungen des Windes so groß, daß sich hier subjektive Eigenheiten zu einem systematischen Fehler auswirken können. Er vergrößert sich nochmals bei der Extrapolationsprozedur.

Derartige Mittelwerte (Stationen Störsperrwerk, Wittmund, Jever, Brake und Rotenburg) sind in den Isoplethendarstellungen durch ein "ungefähr"-Zeichen gekennzeichnet. Sie wurden bei der Führung der Isotachen nur dann berücksichtigt, wenn sie über einen plausiblen Böenfaktor mit den Maximalböen in Verbindung stehen.

Auch hier sind ganzzahlig gerundete Windgeschwindigkeitsangaben eingetragen. Eine Ablesung der Werte auf 0.1 m/s genau wäre aus den Diagrammen wohl möglich, sollte jedoch wegen der weiter oben erwähnten Grenzen der statistischen Sicherheit grundsätzlich nicht erfolgen. Unterschiede von weniger als 1 bis 2 m/s sind statistisch nicht gesichert und dürfen infolgedessen nicht interpretiert werden.

Die meisten Windangaben dieser Studie beziehen sich auf die internationale Standardhöhe der meteorologischen Windmessungen auf Land: 10 Meter über Grund. Diese Meßhöhe liegt in der unteren Grenzschicht der Atmosphäre, in der die Strömung der Luft nicht nur vom horizontalen Gradienten des Luftdruckes abhängt. Das weite Feld der atmosphärischen Turbulenz, der damit verbundenen Transportvorgänge, ihrer Ursachen und Auswirkungen kann hier nicht ausgeführt werden. Daher sei auf die fundamentalen Arbeiten von Prandtl(6), Monin und Obuchow(7), Panowsky(8), Brocks und Krügermeyer(9) und anderen verwiesen.

6.3 Die Ergebnisse und ihre Interpretation

Die Abbildungen Nr. 6.2 - 6.15 zeigen die Überschreitungshäufigkeiten an den untersuchten Stationen. Die empirischen Verteilungen sind durch Kreise dargestellt. Sie wurden mit Hilfe des o.a. Verfahrens ausgeglichen und extrapoliert (ausgezogene Kurve).

Die Ordinate ist nach dem dekadischen Logarithmus der normierten Überschreitungshäufigkeiten $N \cdot W(F)$ geteilt. Da $N = 52596$ gewählt wurde, beginnen alle Verteilungen bei $F = 0$ mit $\log_{10}(\text{Anzahl}/\text{Jahr}) = 4.72$. Die empirischen Verteilungen enden im allgemeinen nahe der Überschreitungswahrscheinlichkeit 1/Jahr (lies: eins pro Jahr), d.h. eine Überschreitung pro Jahr. Die Extrapolation wurde bis 1/100 Jahre vorgenommen.

Die Abszisse ist nach dem Schwellwert der Windgeschwindigkeit F in Meter pro Sekunde geteilt. Die jeweils linke (innere) Kurve beschreibt die Verteilung der Zehnminuten-Mittelwerte, die rechte (äußere) Kurve die Verteilung der maximalen Momentanwerte der Windgeschwindigkeit ("Maximalböen") im gleichen Zehnminuten-Intervall.

Bestimmte Stufen der Überschreitungshäufigkeit (-wahrscheinlichkeit) sind als horizontale Linien in die Diagramme eingezeichnet und zwar:

1 Prozent, 0.1 Prozent, 10 pro Jahr, eins pro Jahr, eins pro 10 Jahre und eins pro 100 Jahre. An den Schnittpunkten dieser horizontalen Linien mit den eingepaßten Kurven sind die jeweils zugehörigen Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde als gerundete ganzzahlige Werte eingetragen.

Damit ergeben sich für den Gebrauch der Diagramme folgende zwei Möglichkeiten:

1) Bestimmung des Schwellenwertes zu einer vorgegebenen Häufigkeit: Vom Logarithmus der vorgegebenen Häufigkeit pro Jahr an der Ordinate horizontal an die entsprechende Kurve und von dort senkrecht an die Geschwindigkeitsachse.

2) Bestimmung der jährlichen Häufigkeit des Auftretens eines bestimmten Schwellenwertes: In umgekehrter Richtung wie bei 1.

Die Schwellenwerte, die zu den eingetragenen o.a. Stufen der Überschreitungshäufigkeit gehören, sind in den nachfolgenden

Tabellen 6.1 und 6.2 noch einmal für alle Stationen zusammengefaßt. Dabei bezieht sich die Tabelle 6.1 auf die Zehnminuten-Mittelwerte, die Tabelle 6.2 auf die maximalen Momentanwerte der Windgeschwindigkeit.

Tabelle 6.1

Schwellenwerte des Zehnminuten-Mittelwertes der Windgeschwindigkeit (m/s) für verschiedene Stufen der jährlichen Überschreitungshäufigkeit an diversen Orten.

(Zeitraum 1972 - 1977)

Stationen	Jährliche Häufigkeit von					Bemerkungen
	52.6	1.0	0.1	0.02	0.01	
Hooge	20	28	32	35	37	
Helgoland	21	28	33	36	37	
Leck	16	22	26	29	30	-
Hohn	16	23	26	29	30	* -
Itzehoe	14	20	24	27	28	* -
Stoersperrwerk	21	30	35	39	40	* + red
Borkum	22	30	35	39	40	
Norderney	23	32	37	41	43	+
Wittmund	18	26	31	34	35	* -
Minsener Oog	21	30	35	38	40	red
Jever	17	24	29	32	33	* -
Sengwarden	16	23	27	30	32	-
Bremerhaven	18	26	31	34	35	
Cuxhaven	18	25	29	32	33	-
Nordholz	18	25	30	33	34	-
Emden	18	26	30	33	35	
Oldenburg	14	20	24	26	27	-
Ahlhorn	13	19	22	24	25	
Brake	17	24	29	31	33	* red
Bremen	16	24	28	31	33	
Rotenburg	18	26	31	34	36	* +

Erläuterungen der Bemerkungen:

- * Der Mittelwind mußte aus der Böenregistrierung geschätzt werden. Die statistische Sicherheit der Schwellenwerte ist schwächer als üblich!
- + Überhöhte Windwerte (meist durch ungewöhnliche topographische Gegebenheiten des Aufstellungsortes bedingt).
- Erniedrigte Windwerte (größtenteils bedingt durch Waldgürtel um die Stationen oder andere topographische Gegebenheiten, die sonst für umgebende Landschaft untypisch sind)!
- red Die Windwerte wurden auf eine Höhe von 10 m reduziert (siehe Text).

Tabelle 6.2

Schwellenwerte des maximalen Momentanwindes im Zehnminutenintervall ("Maximalböe") für verschiedene Stufen der jährlichen Überschreitungshäufigkeit an verschiedenen Orten.

(Zeitraum 1972 - 1977)

Stationen	Jährliche Häufigkeiten von					Bemerkungen
	52.6	1.0	0.1	0.02	0.01	
Helgoland	29	42	48	52	54	
Leck	23	33	39	44	45	-
Höhn	22	31	36	40	42	-
Itzehoe	24	35	41	46	48	
Stoersperrwerk	25	36	42	47	49	red
Borkum	29	42	49	54	56	
Norderney	31	44	51	57	59	+
Wittmund	25	36	42	47	49	
Minsener Oog	27	39	46	50	52	red
Jever	23	33	39	43	45	
Sengwarden	24	35	42	46	48	
Bremerhaven	24	35	41	45	47	
Cuxhaven	26	37	43	48	50	
Nordholz	25	37	44	48	50	
Emden	24	35	41	45	47	
Oldenburg	22	32	38	42	44	
Ahlhorn	22	32	37	41	43	
Brake	23	34	40	44	45	red
Bremen	22	32	38	42	44	
Rotenburg	22	32	38	42	44	

Erläuterungen der Bemerkungen:

- + Überhöhte Windwerte (wie Tabelle 2)
- Erniedrigte Windwerte (wie Tabelle 2). Die Maximalböen scheinen durch umgebende schmale Waldgürtel weit weniger erniedrigt zu werden als der Mittelwind.
- red Die Windwerte wurden auf 10 m Höhe reduziert. Dieses Verfahren (s.Text) ist bei Maximalböen problematisch und führt zu erhöhter statistischer Unsicherheit der Schwellenwerte.

Tabelle 6.3

Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit für bestimmte Stufen der absoluten monatlichen Überschreitungshäufigkeit in der inneren Deutschen Bucht.

Kollektiv	Monat	monatliche Häufigkeit von			
		1.0	0.10	0.02	0.01
See	Januar	27	31	35	36
See	Februar	22	26	29	30
See	März	23	27	30	31
See	April	22	26	29	30
See	Mai	20	24	26	28
See	Juni	18	21	23	24
See	Juli	20	24	27	28
See	August	20	24	26	28
See	September	24	29	32	33
See	Oktober	22	26	28	29
See	November	26	31	34	35
See	Dezember	26	30	33	34
Land	Januar	26	32	36	37
Land	Februar	19	22	24	26
Land	März	21	26	29	30
Land	April	21	25	28	29
Land	Mai	17	20	22	23
Land	Juni	17	20	22	23
Land	Juli	17	21	23	24
Land	August	17	20	22	23
Land	September	23	28	31	32
Land	Oktober	22	26	29	30
Land	November	25	30	33	34
Land	Dezember	24	29	32	33

Das Kollektiv "See" wurde durch Zusammenfassen aus den Stationen FS "Elbe 1" und FS "Weser", das Kollektiv "Land" aus Helgoland, Bremerhaven und Cuxhaven gebildet. Für diese Stationen lagen kontinuierliche Serien von Zehnminutermittelwerten des Windes über 6 Jahre vor.

Die Verteilung des maximalen Momentanwindes (und damit auch die des Böenfaktors) ist neben den oben erwähnten meteorologischen und orographischen Einflüssen noch wesentlich vom Typ des verwendeten Windmeßgerätes abhängig. Der vorliegenden Untersuchung liegen Windmessungen mit der Meßanlage "Fuess 90Z" zugrunde. Diese ist mit einem Schalenkreuzanemometer ausgerüstet, das nach Untersuchungen des Instrumentenamtes Hamburg bei höheren Windgeschwindigkeiten eine Zeitkonstante von 1 bis 2 Sekunden besitzt. Windfluktuationen von kürzerer Dauer werden von diesem Gerät nicht mehr vollständig aufgelöst, die Fluktuationen werden geglättet. Man kann daher (mit einigen Vorbehalten) die maximalen Momentanwinde dieser Studie ungefähr als 2-Sekunden-Mittelwerte ansehen. Modernere und weniger träge Anemometer ergeben bei gleichen Turbulenzverhältnissen höhere Spitzenwerte und damit auch höhere Böenfaktoren.

Unterschiede der Zeitkonstanten bei der Anpassung der Umdrehungsgeschwindigkeiten des Anemometers an erhöhte bzw. erniedrigte Windgeschwindigkeiten bewirken eine gewisse Erhöhung der mittleren (angezeigten) Windgeschwindigkeit, das sogenannte "overspeeding". Es ist theoretisch und praktisch schwer faßbar, da es stark frequenzabhängig ist und sich insbesondere die Bestimmung der Unterschiede der Zeitkonstanten äußerst aufwendig gestaltet. Wegen fehlerhafter Bestimmung der Zeitkonstanten bei nachlassendem Wind wird das "overspeeding" oft überschätzt, es dürfte wenige Prozente nicht überschreiten. Die absolute Überhöhung ist beim "Jahrhundert-Wert" am größten, sie wird aber auch hier kaum größer als 2 m/s sein.

Ein wesentliches Charakteristikum der Ausgleichkurven der Diagramme (Abbildungen 6.2 - 6.15) ist der lineare Abfall bei höheren Windgeschwindigkeiten, wie weiter oben ausgeführt. Es zeigt sich, daß die Steigung der linearen Kurvenabschnitte für alle untersuchten Stationen ungefähr gleich ist. Pro Dekade der Überschreitungswahrscheinlichkeit (Abnahme auf 1/10) nehmen die Schwellenwerte des Mittelwindes um ca. 4 m/s, die des maximalen Momentanwindes um ca. 5 m/s zu.

Diese Tatsache kann auch folgendermaßen umgedeutet werden: Wird bei der Berechnung von Windlasten an Bauwerken im Küstenbereich ein Sicherheitszuschlag von 4 m/s beim Mittelwind (bzw. 5 m/s bei den Maximalböen) gegeben, so bewirkt dies eine Verminderung der Grundwahrscheinlichkeit (des Risikos) auf ein Zehntel. Eine Verdopplung des Sicherheitszuschlags auf 8 m/s (bzw. 10 m/s) vermindert das Risiko noch einmal auf ein Zehntel, also insgesamt auf ein Hundertstel.

Diese Aussage gilt, wohl bemerkt, nur für die statische Windlast. Dynamische Einflüsse durch zeitliche Variationen der Windlast unterliegen anderen Gesetzmäßigkeiten und sind hier nicht angesprochen.

6.4 Die jahreszeitliche Variation der Extremalwinde

Das Jahr ist die elementare Zeitbasis in dieser Untersuchung. Eine Aufgliederung der Wahrscheinlichkeiten nach Untereinheiten des Jahres (Quartale, Monate, Tage) konnte hier nicht generell vorgenommen werden. Doch muß wegen des regelmäßig vorhandenen Jahresganges der Windgeschwindigkeit auch die Überschreitungswahrscheinlichkeit

innerhalb des Jahres notwendigerweise inhomogen verteilt sein. Es ist daher nicht ohne weiteres zulässig, eine Überschreitungshäufigkeit von beispielsweise 365/Jahr als eine Überschreitung pro Tag zu interpretieren, da wegen des Jahresganges alle diese 365 Fälle in einem Halbjahr und auch darin auf wenige Tage konzentriert sein könnten.

Zur Untersuchung der jahreszeitlichen Variationen der Schwellenwerte des Windes bis herab zum "Jahrhundert-Wind" konnten die sonst in dieser Studie benutzten Datenkollektive nicht verwendet werden, da diese einen zu geringen Umfang besitzen. Es wurden daher für den Bereich der Deutschen Bucht zwei exemplarische Sonderkollektive durch Zusammenfassen von Stationen gebildet. Das "Land"-Kollektiv umfaßt Helgoland, Cuxhaven und Bremerhaven. Für diese Stationen lagen Zehnminuten-Mittelwerte des Windes in kontinuierlicher Folge für die Jahre 1972-1977 vor. Dieses Sonderkollektiv besteht so aus ca. 900000 Windwerten. Für jeden Monat sind das ca. 75000 Werte. Ein ähnliches Kollektiv ("See", 1972-1976) wurde von den Feuerschiffen "Elbe 1" und "Weser" gebildet. Es umfaßt ca. 500000 Werte, entsprechend etwa 40000 für die einzelnen Monate.

Die durch Aufspaltung dieser Kollektive nach Monaten resultierenden empirischen Überschreitungshäufigkeiten wurden mit dem gleichen Ausgleichs- und Extrapolationsverfahren bearbeitet wie oben beschrieben.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6.3 zusammengefaßt. Es ergibt sich ein ausgeprägter Jahresgang, der, wie zu erwarten war, ein breites Minimum in den Monaten Mai bis August und ein Maximum von November bis Januar zeigt. Warum sich im Oktober und vor allem im Februar relative Minima ergeben, ist nicht geklärt. Dies kann eine Folge der Kürze der Datenserie (6 Jahre im "Land"- und nur 5 Jahre im "See"-Kollektiv) sein. Der gegenüber den Scillies erhöhte Juli-Wert unserer Kollektive mag auf den Einfluß des "Europäischen Sommermonsuns" zurückzuführen sein, der in der Deutschen Bucht im Juli zu höheren Windwerten führt und im Bereich der Scillies nicht wirksam ist. Dazu ist zu bemerken, daß die statistische Sicherheit des 50-Jahreswert nicht höher als + 3 m/s sein dürfte. Die Schwankungen von Monat zu Monat dürfen Tinsolgedessen nicht überinterpretiert werden.

Der 50-Jahreswert des Zehnminuten-Mittels des Windes ist in seinem Jahresgang in der Abb. 6.16 dargestellt. Zum Vergleich wurden 50-Jahreswerte von den Scilly-Inseln dargestellt, die Carter und Challenor (16) aus den monatlichen Extrema von Stundenmitteln des Windes aus den 7 Jahren 1968-1977 mittels einer Gumbelverteilung (Fisher-Tippett Typ 1) berechnet haben.

Die Übereinstimmung ist qualitativ und quantitativ als sehr gut zu bezeichnen, wenn man die statistische Unsicherheit bedenkt und berücksichtigt, daß Stundenmittel wegen ihrer geringen Varianz immer (um etwa 10 %) kleinere Schwellenwerte des Windes bei gleicher Wahrscheinlichkeit ergeben als Zehnminuten-Mittelwerte. In allen Fällen ist der Jahresgang des 50-Jahreswindes erheblich. Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwind beträgt 12-15 m/s bei einem Maximalwert von 32-36 m/s.

6.5 Die regionale Verteilung der Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit in Niedersachsen

Trotz der oben aufgezeigten Unsicherheitsfaktoren bei der Bestimmung insbesondere bei geringen jährlichen Häufigkeiten wurde in den Abb. 6.17 - 6.22 der Versuch unternommen, die Schwellenwerte des Mittelwindes und der Maximalböen zu kartieren.

Besondere Schwierigkeiten bereitet dabei die ungleichmäßige und fast unzureichend dünne Belegung mit Meßpunkten in manchen Regionen (siehe dazu auch die datenleeren Gebiete der Abb. 6.1). Die eingezeichneten Isotachen orientieren sich daher außer an den Meßergebnissen weitgehend an großräumigen orographischen und ökologischen Gegebenheiten. Insbesondere kann angenommen werden, daß Gebiete mit stärkerer orographischer Gliederung und solche mit erhöhten Waldanteilen aufgrund ihrer relativ hohen hydrodynamischen Rauigkeit zu einer weitgehenden Erniedrigung der Windgeschwindigkeit führen.

Solche Gebiete sind in Niedersachsen die Moränen südlich der Elbe von Stade bis Lüneburg, die Lüneburger Heide (die von der Untersuchung jedoch nicht erfaßt wurde) und das Gebiet der Ahlhorner Heide bis westlich an die Ems. Als generelle Struktur ist das tiefe Eindringen hoher Windgeschwindigkeiten in die Urstromtäler der Ems, der Weser und der Elbe zu nennen. Dabei scheint das Gebiet der Weser-Wümme-Aller-Niederung ein besonders tiefes Eindringen zu gestatten. Es lassen sich bei einem Vergleich mit älteren Kollektiven (1) verschiedener Stationen aus Niedersachsen keine Hinweise dafür finden, daß dies ein Einfluß des sog. Capella-Orkanes ist. Er wird manchmal als Jahrhundertereignis bezeichnet und ist in dem Untersuchungszeitraum (1972 - 1977) enthalten. Die Schwellenwerte des Windes sind für frühere Zeiträume ebenso hoch.

Auffällig ist weiterhin ein Strich sehr hoher Windwerte entlang den ostfriesischen Inseln. Es kann hier nicht entschieden werden, ob es sich dabei um eine reale Erscheinung handelt. Denn einerseits sind alle diese Stationen (Borkum, Norderney und Minsener Oog) wohl mit einer gewissen orographischen Strömungsüberhöhung ausgestattet, andererseits sprechen die ebenfalls erhöhten Werte am Feuerschiff "Borkumriff" für ein Vorhandensein. Eine pauschale Erklärung kann das auch an anderen Küsten zu beobachtende Phänomen der "Küstenkonvergenz" bieten. Diese Küsten sind aber viel höher; so ist hier zurzeit keine definitive Aussage möglich.

Generell nimmt die Windstärke zum Binnenland hin ab. In dem dargestellten Teil Niedersachsens ist die Abnahme verhältnismäßig schwach. Eine stärkere Abnahme ist erst jenseits der Linie Lüneburg-Soltau-Cloppenburg zu erwarten. Ein solcher verstärkter Gradient deutet sich bei Ahlhorn an. Das Gebiet der Lüneburger Heide ist hier nicht mit Daten belegt, so daß insbesondere südlich und östlich von Bremen die Linienführung äußerst vage ist.

6.6 Die regionale Verteilung der Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit in Schleswig-Holstein

Die Rauigkeit des Untergrundes reduziert die mittleren Windgeschwindigkeiten im Binnenland. So finden sich die geringsten mittleren Windgeschwindigkeiten im Schleswig-Holsteinischen Hügelland, das die hydrodynamisch rauheste Region des Landes darstellt. Das Hügelland liegt, wie oben ausgeführt, vorwiegend in der östlichen Hälfte des Landes. Der nach Westen anschließende breite Streifen der Geest ist hydrodynamisch glatter, da er landwirtschaftlich genutzt wird und einen geringeren Baumbestand aufweist.

Das Gebiet mit der geringsten Rauigkeit ist die Marsch an der Westküste, die feuchten Urstromtäler längs der Eider, Treene und Scholmer Aue und das vorgelagerte Wattengebiet mit seinen Inseln. Als generelle Struktur des Isotachenfeldes ergibt sich folgendes Bild: Zwischen die hohen Windgeschwindigkeiten an der West- und Ostküste schiebt sich von Südosten aus dem Lauenburgischen heraus ein Keil geringerer Windgeschwindigkeiten entlang dem Hügelland nach Norden. Dabei nimmt die Windgeschwindigkeit beständig zu.

Die Ostseeküste zeigt generell etwas geringere Windgeschwindigkeiten als die Nordseeküste, insbesondere im Bereich der Eckernförder, Kieler und Lübecker Bucht. Die Gebiete um Flensburg, Schleimünde, Oldenburg /Holst. und Fehmarn besitzen ähnliche Windverhältnisse wie der breite Gürtel des Marschen- und Geestgebietes an der Nordseeküste etwa westlich der Linie Flensburg-Brunsbüttel.

In den Abb. 6.2 - 6.15 und den Tab. 6.1 und 6.2 sind für einige Stationen als Kommentare Plus- und Minuszeichen hinzugefügt. Das Minuszeichen soll andeuten, daß die Werte für die betreffende Station aus klimatologischen Erwägungen heraus als für die weitere Umgebung dieser Station zu niedrig erachtet werden. (Dabei sind die berechneten Werte an der Station durchaus objektiv "richtig"). Generell ist die Ursache der Erniedrigung in einer Aufstellung des Windmessers in einer für das weitere Umfeld untypischen Eigenheit seiner lokalen Umgebung zu suchen.

Besonders einschneidend macht sich z.B. der fast vollständig geschlossene Gürtel von dichten Tannewäldchen bemerkbar, der die Stationen Leck und Husum umgibt. Solche Wäldchen sind in der weiteren (fast baumlosen) Umgebung nicht zu finden. Die Erniedrigung des mittleren Windes geht dabei offenbar mit einer Verstärkung der Turbulenz einher, so daß die Böen weit weniger betroffen sind. Ähnliche Verhältnisse gelten in abgeschwächter Form auch für eine Reihe von anderen Stationen (z.B.: Eggebek, Hohn, Itzehoe, Cuxhaven (hier ist es die Stadt), Nordholz, Oldenburg).

Genau das Gegenteil bedeuten die Pluszeichen. Hier ist aufgrund der Lage des Windmessers auf Kuppen oder Gebäuden eine lokale Strömungsüberhöhung anzunehmen, die ebenfalls nicht für die weitere Umgebung der Station repräsentativ ist. Ein ganz besonderer Fall ist die oben erwähnte, ausgeschlossene Station Ledasperrwerk mit ihrem Windmesser über dem Walmdach.

Wir sehen uns aus wiederholt gegebenem Anlaß genötigt, in diesem Zusammenhang ausdrücklich zu betonen, daß kein mathematisch-statistisches Verfahren (und sei es noch so ausgefeilt) die fachwissenschaftliche klimatologische Erfahrung auszugleichen imstande ist. Es ist im allgemeinen sogar so, daß die unkritische Anwendung sophistizierter ("objektiver") statistischer Verfahren ohne Berücksichtigung der speziellen Besonderheiten des Aufstellungsortes der Windmesser und der allgemeinen klimatologischen Gegebenheiten des weiteren Umfeldes zu einer falschen Einschätzung der tatsächlichen Verhältnisse führen kann.

Literatur zu Kap. 2 und 3

(1) Kaufeld, L. (1981): The Development of a New Beaufort Equivalent Scale; Meteorol. Rundschau 34

(2) Weiss, I. und Lamb, H.H. (1970): Die Zunahme der Wellenhöhe in jüngster Zeit in den Operationsgebieten der Bundesmarine, ihre vermutlichen Ursachen und ihre voraussichtliche weitere Entwicklung; Porz-Wahn

(3) Laucht, H. (1967): Über hohe Sturmfluten und ihre Häufigkeit in Hamburg; Schriftenreihe der Behörde für Wirtschaft und Verkehr der Freien und Hansestadt Hamburg, Heft Nr.4

(4) Nasner, H., Partenscky, H.W. (1975): Sturmfluten in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste in diesem Jahrhundert; Die Küste, Heft 28

Literatur zu Kap. 4 und 5

(1) Gandin, L.S. (1963): Objective Analysis of Meteorological Fields; Leningrad (Translation Jerusalem 1965)

(2) Groll, A. (1973): Objektive Methode zur lokalen Bodenwindvorhersage; Fachliche Mitteilungen Nr.175, Amt für Wehrgeophysik, Porz-Wahn

(3) Hasse, L. (1974): Über den Zusammenhang zwischen Bodenwind und geostrophischem Wind auf See und die Stabilitätsabhängigkeit des Widerstandsgesetzes; Beiträge zur Physik der Atmosphäre, S. 45-55

(4) Hasse, L. (1981): On the Relationship between Surface and Geostrophic Wind in the Region of the German Bight; Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 54, S. 222-237

(5) Tomczak, G. (1952): Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers an der deutschen Nordseeküste zwischen Ems und Elbe; Dtsch. Hydr.Z., Bd.5, H.5./6., S. 277-284

(6) Tomczak, G. (1952): Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins; Dtsch. Hydr.Z., Bd.5, H.2./3., S. 114 - 131

Weitere Literatur s. PROMET 4/78 und 1/79: Sturmfluten und Seegang I/II

Literatur zu Kap. 6

(1) Schmidt, H. (1980): Zur Extrapolation empirischer Verteilungen der Windgeschwindigkeit für Standorte im Flachland und auf freier See; Meteorol. Rundsch. 33, pp. 129-137

(2) Duensing, G. und Schmidt, H. (1979): Extremalwindgeschwindigkeiten in Schleswig-Holstein; Abschlußbericht an IFBt, Berlin (unveröffentlicht)

(3) Gumbel, E.J. (1958): Statistics of Extremes; Columbia Univ. Press, Ed. 1967

(4) Gumbel, E.J. (1961): Bivariate Logistic Distributions; J. Am. Statistics. Assoc. 56, 335-349

(5) Essenwanger, O. (1976): Applied Statistics in Atmospheric Sciences; Elsevier Sci. Publ. Comp., Amsterdam-Oxford-New York

(6) Prandtl, L. (1932): Meteorologische Anwendungen der Strömungslehre; Beiträge Phys. Atm., Vol 19, 188-202

(7) Monin, A.S. und Obuchow, A.M. (1954): Fundamentale Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Vermischung in der bodennahen Schicht der Atmosphäre; Sammelband zur statistischen Theorie der Turbulenz, Berlin 1958, 199-226

(8) Panofsky, H.A. (1963) Determination of Stress from Wind and Temperature Measurements; Quart. J. Roy. Met. Soc. 89, 85-94

(9) Brocks K. und Krügermeyer, L. (1970): Die hydrodynamische Rauigkeit der Meeresoberfläche; Ber. d. Inst. f. Radiomet. u. marit. Met. an d. Univ. Hamburg, Nr. 14

(10) Krügermeyer, L., Grünwald, M. und Dunckel, M. (1978): The Influence of Sea Waves on the Wind Profile; Boundary Layer Met. 14, 403-414

(11) Wucknitz, J. (1976): Determination of Turbulent Fluxes of Momentum and Sensible Heat from Fluctuation Measurements and the Structure of Wind Field over Waves above the Tropical Atlantic during ATEX; "Meteor"-Forsch.erg., Reihe B, 11, 25-50, Berlin - Stuttgart

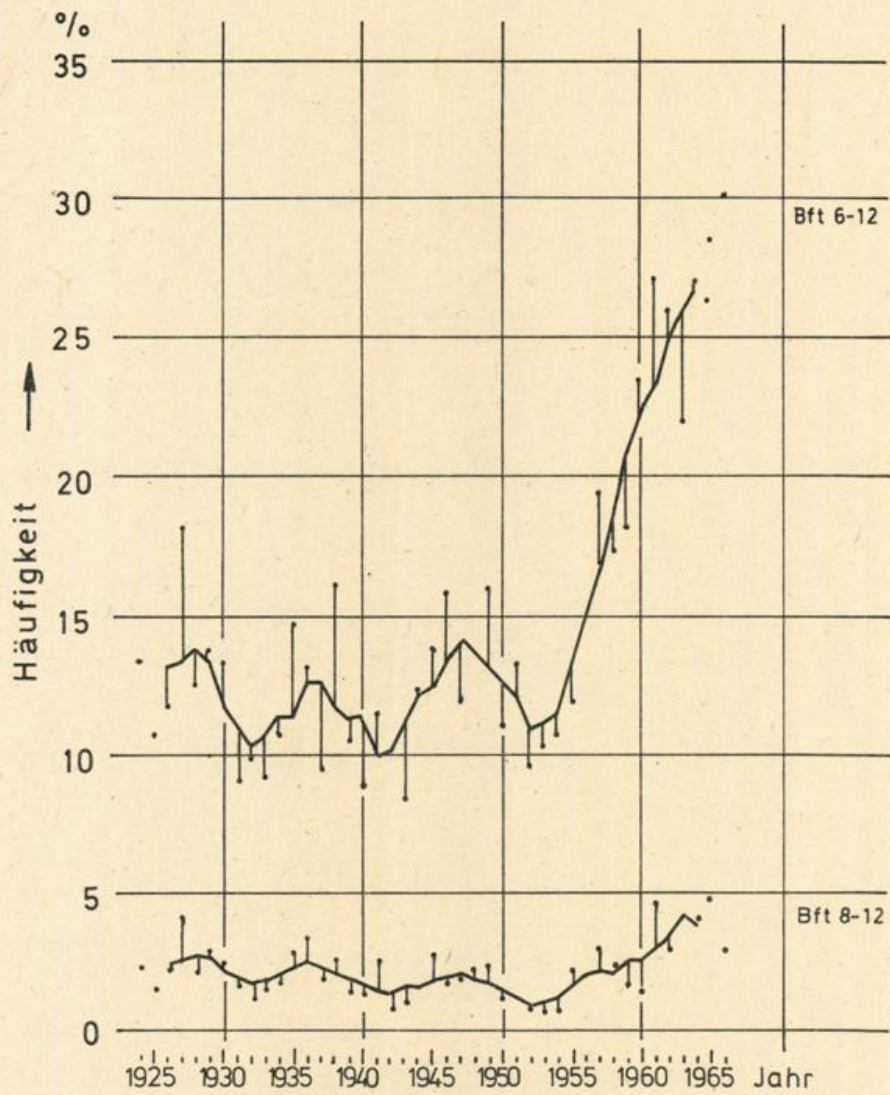
(12) Manier, G. und Dietzer, B. (1979): Untersuchungen über den Einfluß der Topographie der Erdoberfläche auf den Zusammenhang zwischen den Häufigkeitsverteilungen von Bodenwind und geostrophischem Wind; Meteorl. Rundschau 32, 35-44

(13) Hellmann, G. (1915): Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre; Meteor. Z. Bd. 32, Nr. 1, 1915

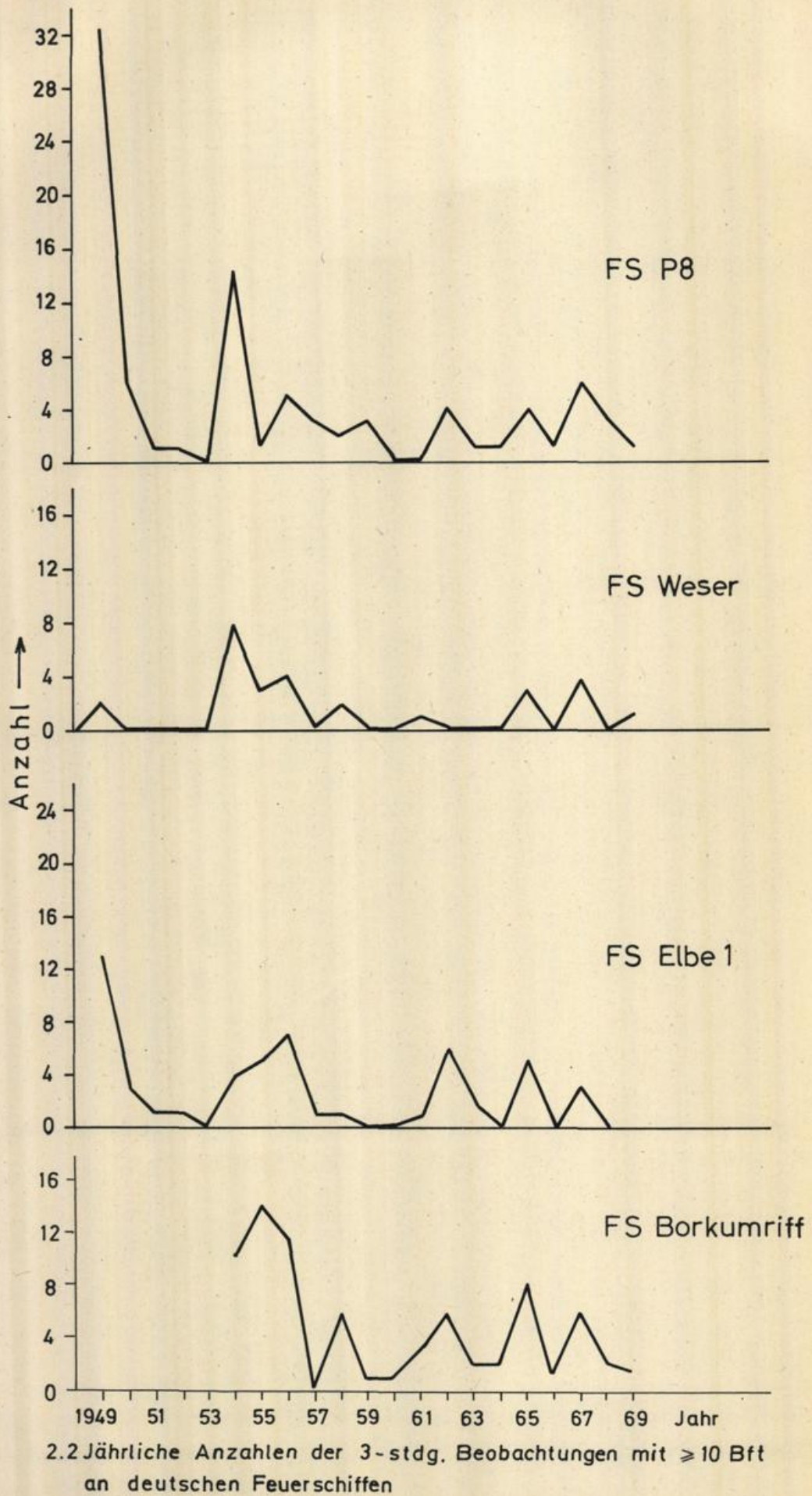
(14) Duensing, G. und Zöllner R. (1978): Die Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft (Teil 2 : Küstenvorfeld); Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147, Offenbach am Main

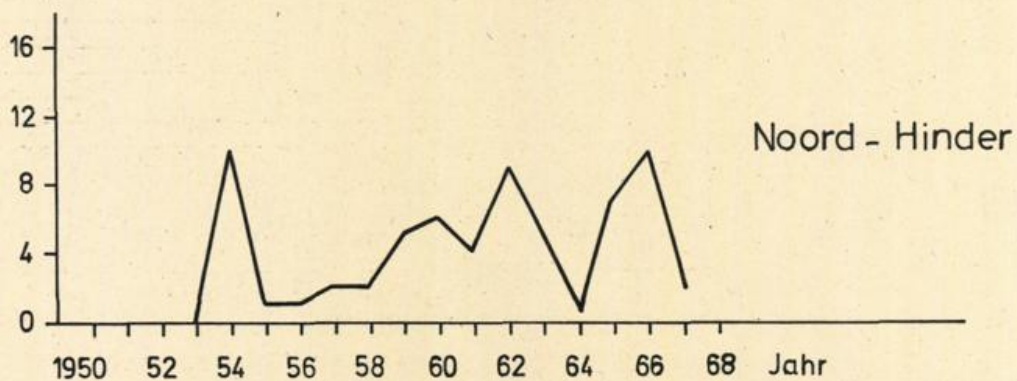
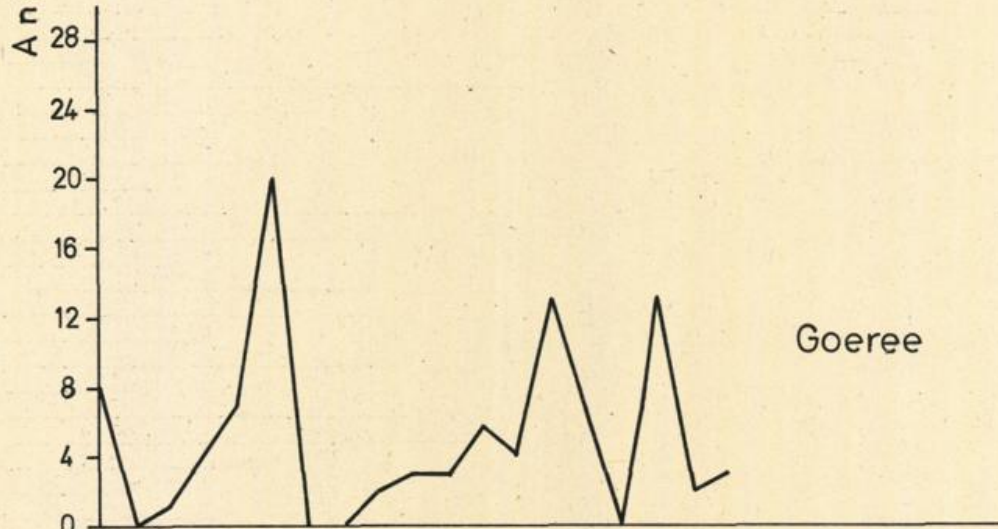
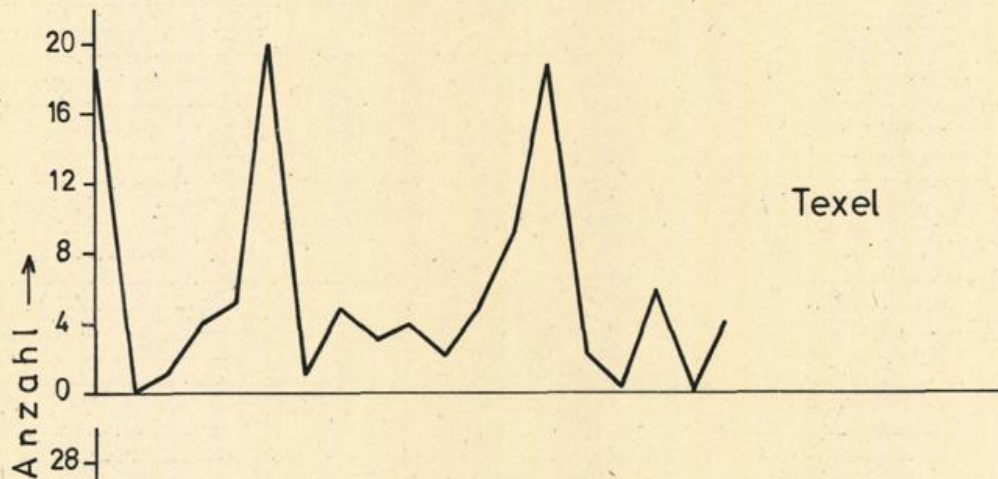
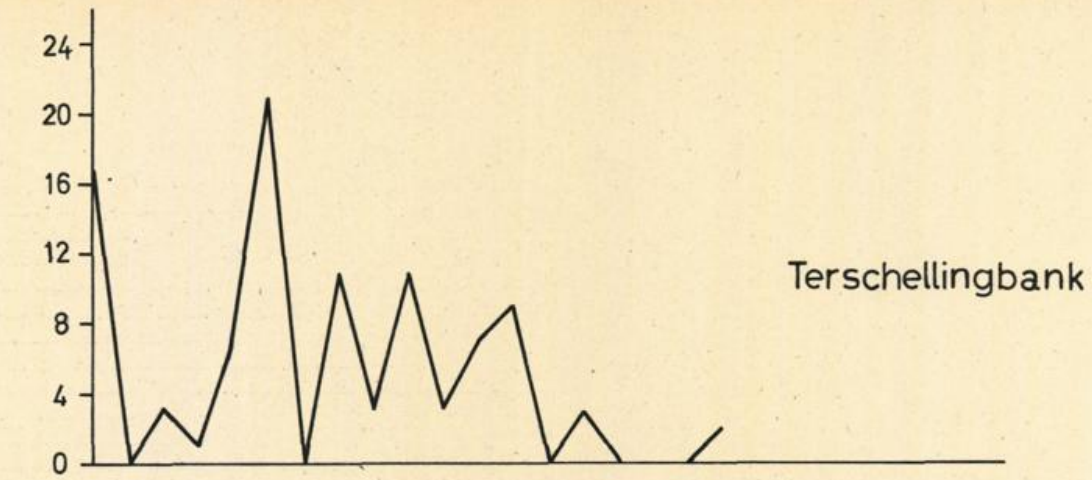
(15) Lamb H.H. und Weiss, I. (1979): "On Recent Changes of the Wind and Wave Regime of the North Sea and the Outlook"; Fachl. Mitteil. 194, Amt für Wehrgeophysik, Traben-Trarbach

(16) Carter D.J.T., und Challenor P.G.(1981): Estimating Return Values of Environmental Parameters; Quart. J.Roy. Met. Soc. 107, pp 259-266



2.1 Jährliche Häufigkeiten beobachteter Windgeschwindigkeiten von 6-12 Bft und 8-12 Bft am Feuerschiff "Elbe 1" (1924 - 1966)

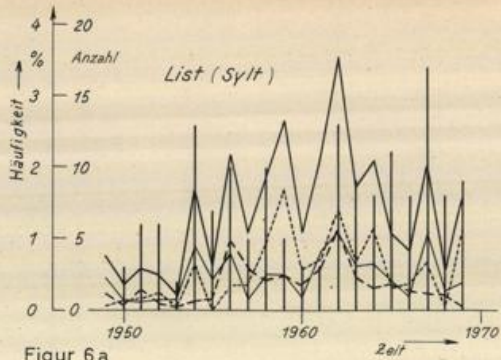




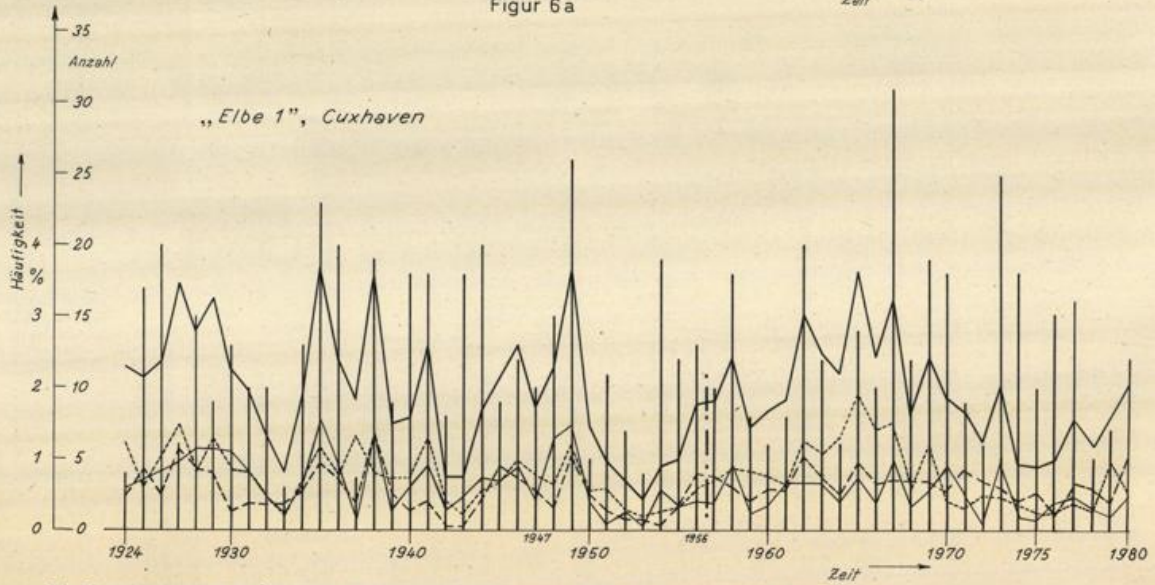
2.3 Jährliche Anzahlen der 3 - stdg. Beobachtungen mit ≥ 10 Bft an niederländischen Feuerschiffen

— Stürme alle Richtungen
 — " aus NW 280° - 340°
 - - - " " SW 210° - 250°
 ····· " " übrigen Richtungen

Säulen: Anzahl der Sturmfluten
 ≥ 1m über MHW



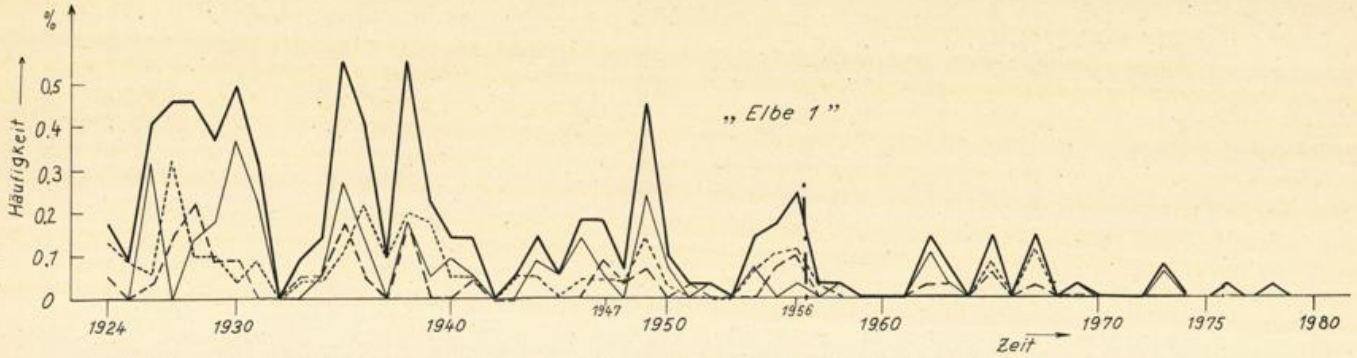
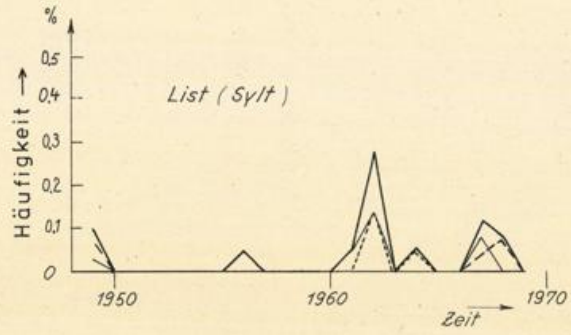
Figur 6a



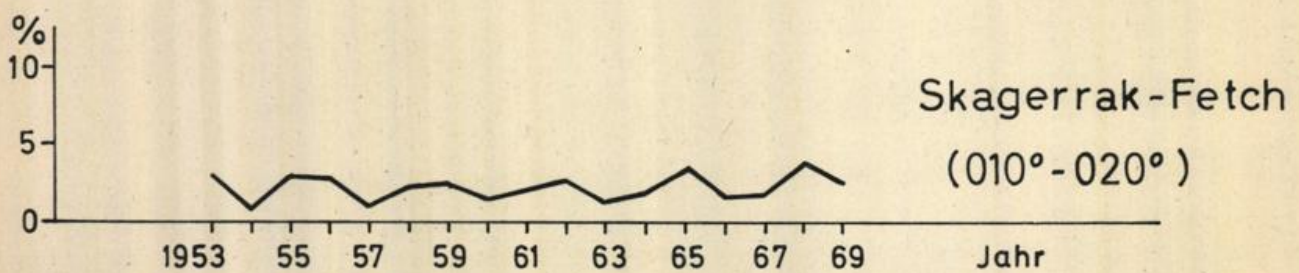
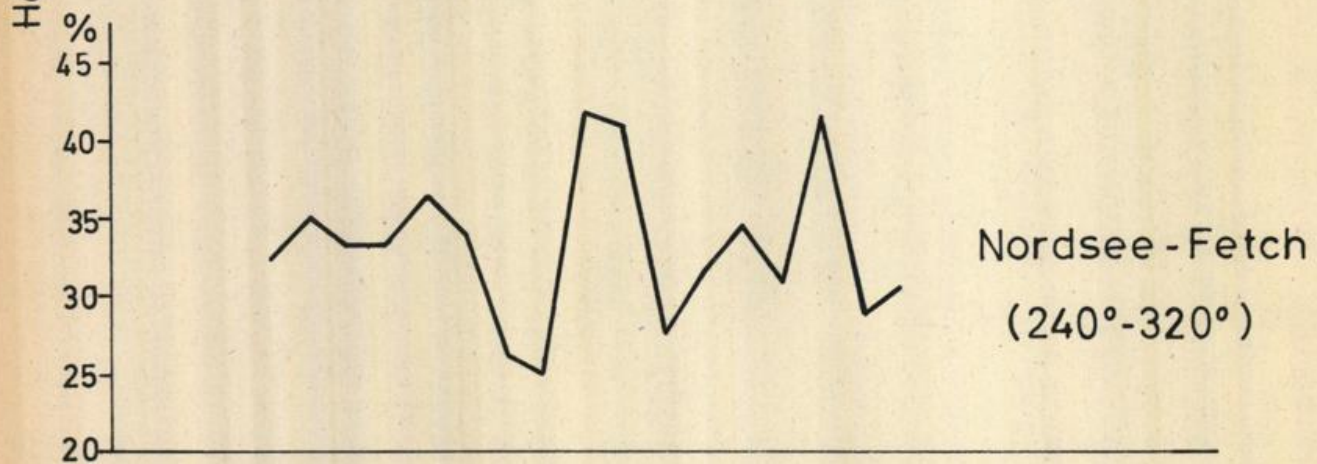
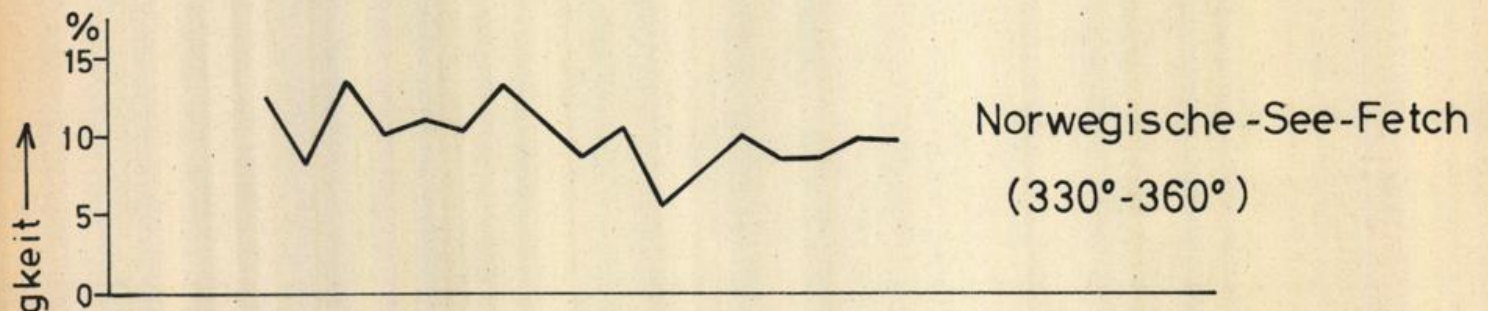
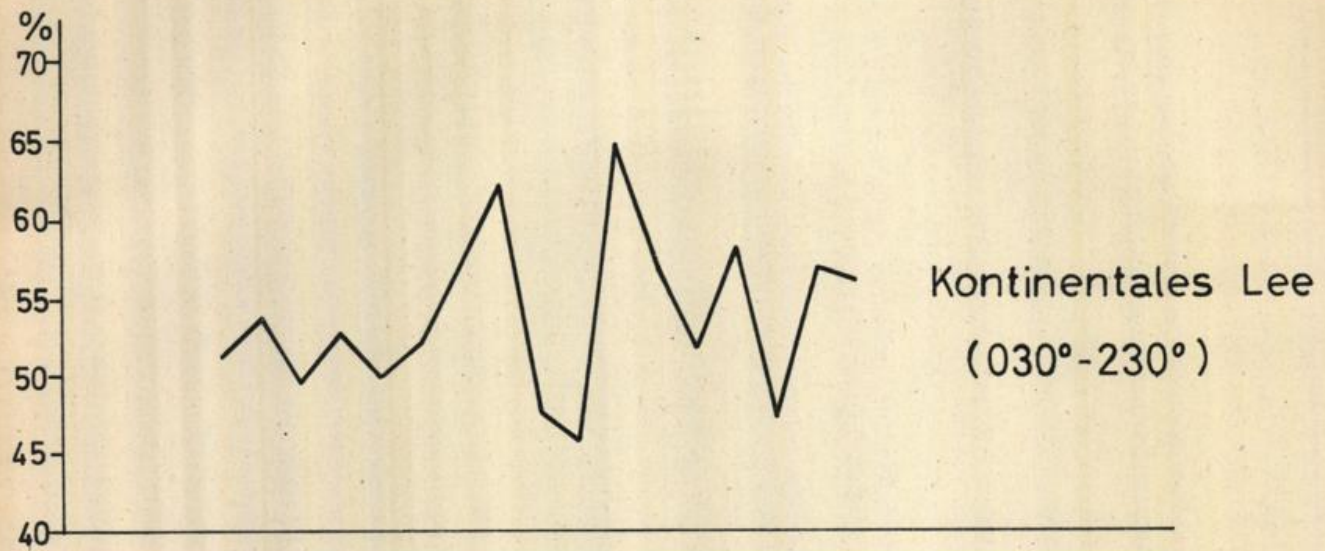
24 Sturmhäufigkeiten bei FS „Elbe 1“ und List (Sylt) sowie jährliche Anzahlen von Sturmfluten in Cuxhaven und List

Häufigkeit schwerer Stürme und Orkane
(≥ 10 Beaufort)

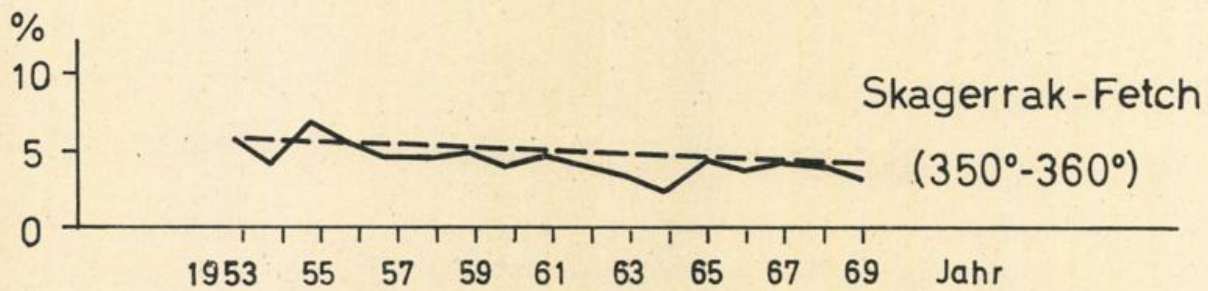
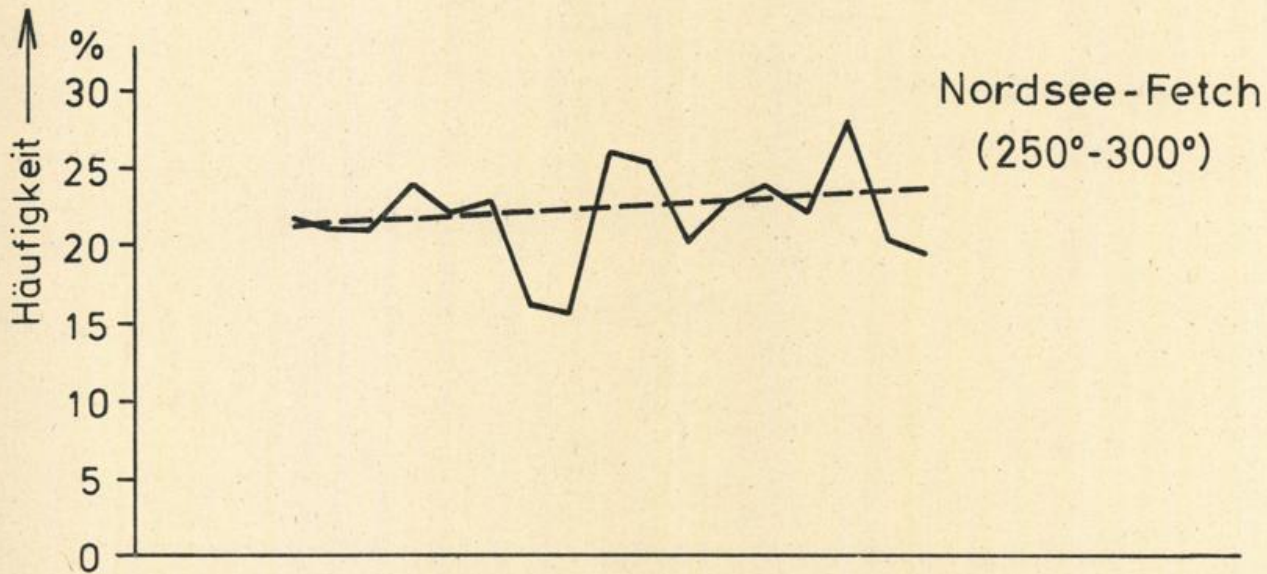
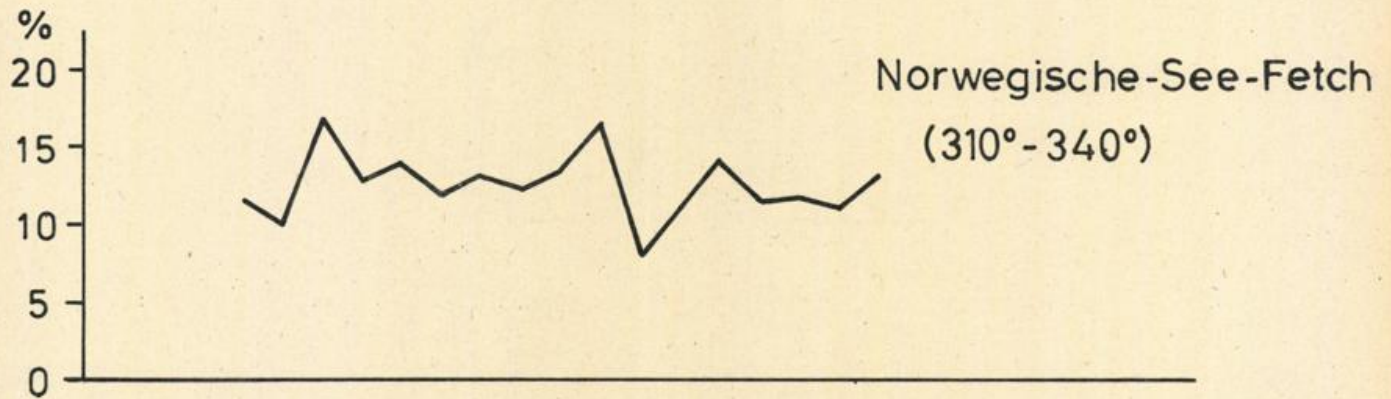
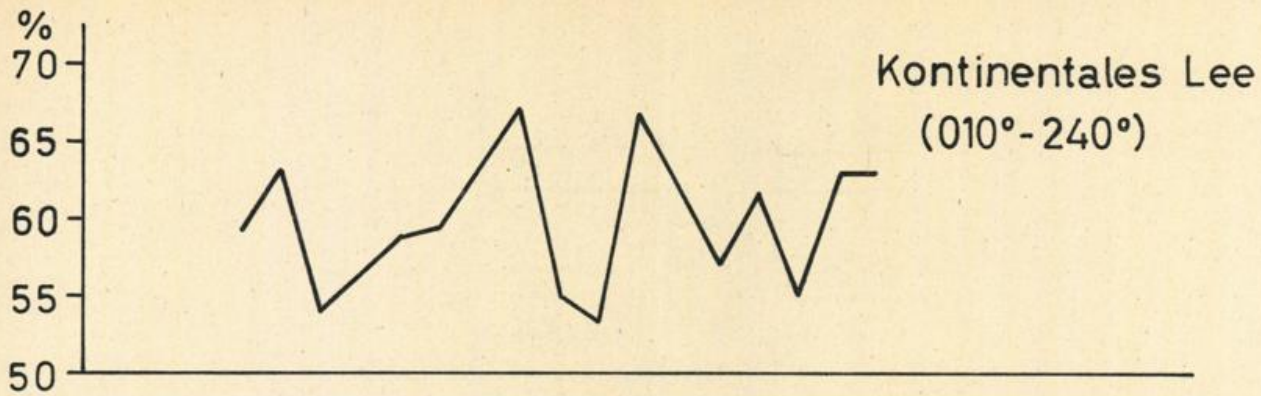
- alle Richtungen
- aus NW 280°-340°
- - - aus SW 210°-250°
- ⋯ übrige Richtungen



2,5 Jährliche Häufigkeiten schwerer Stürme und Orkane (≥ 10 Bft) für FS „Elbe 1“ und List



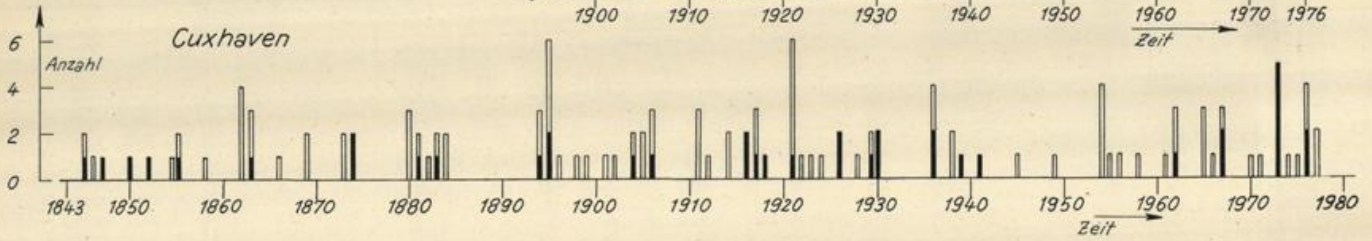
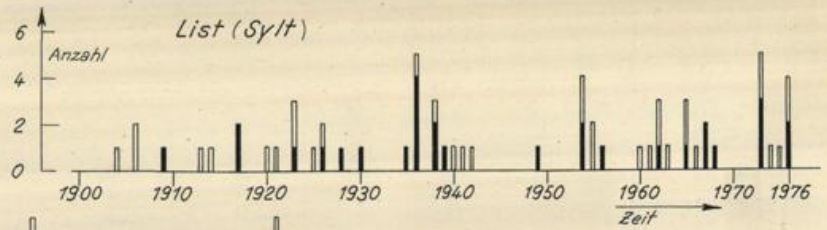
2.6 Jährliche Häufigkeiten der Windrichtung am Feuerschiff „P8“
(ohne Windstillen)



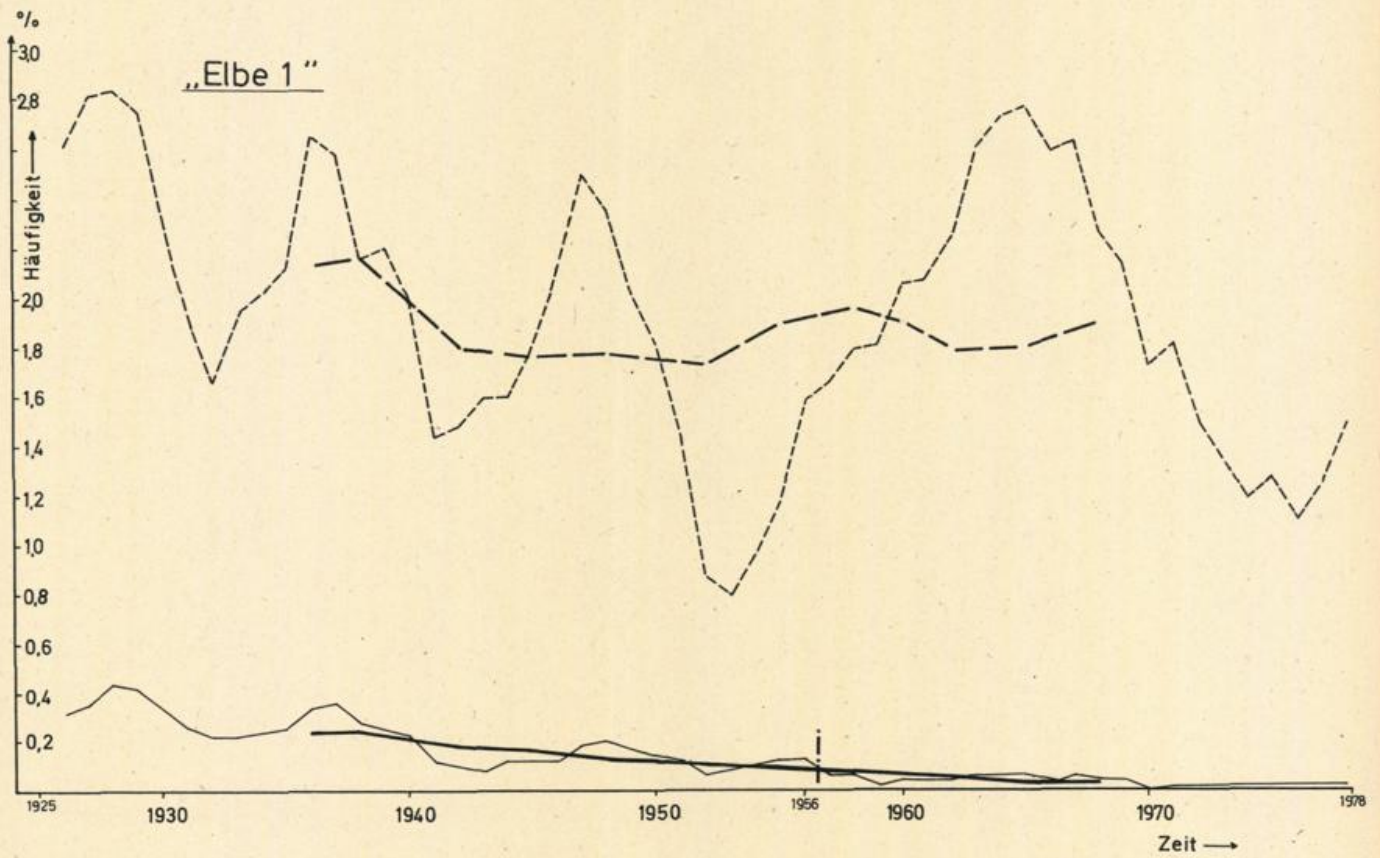
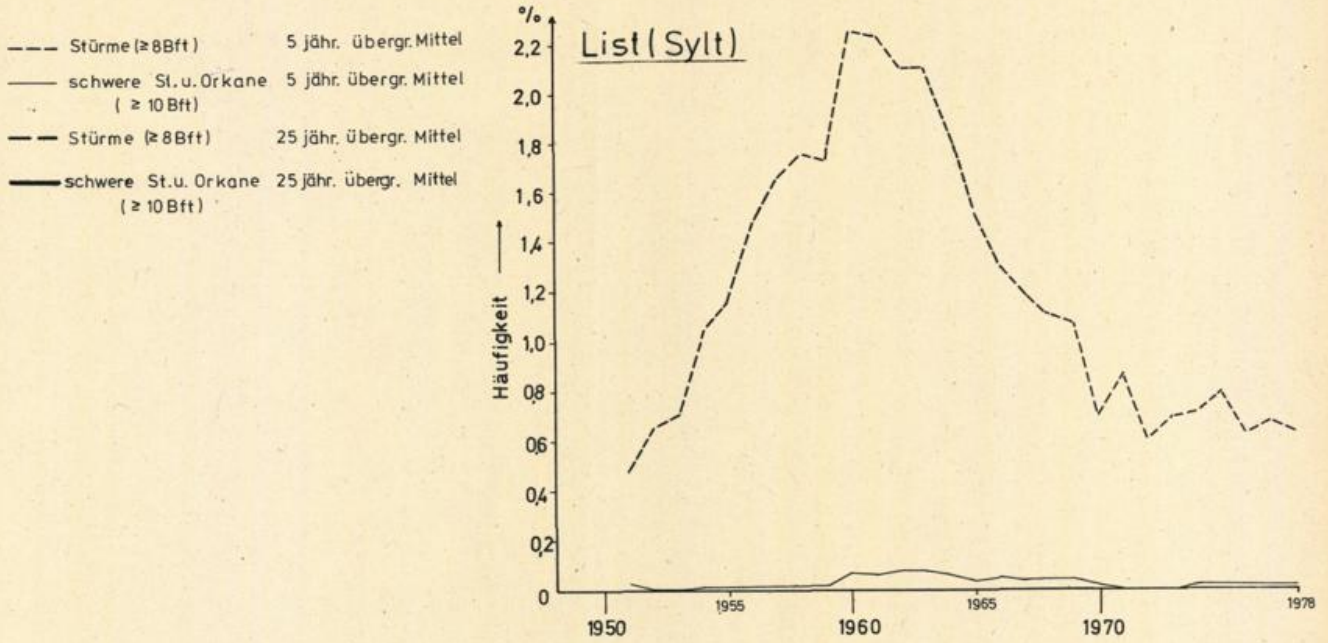
2.7 Jährliche Häufigkeiten der Windrichtung am
Feuerschiff „Elbe 1“ (ohne Windstillen)

Jährliche Anzahl
von Sturmfluten

Säulen offen = mittlere Sturmfluten
" geschlossen = schwere "



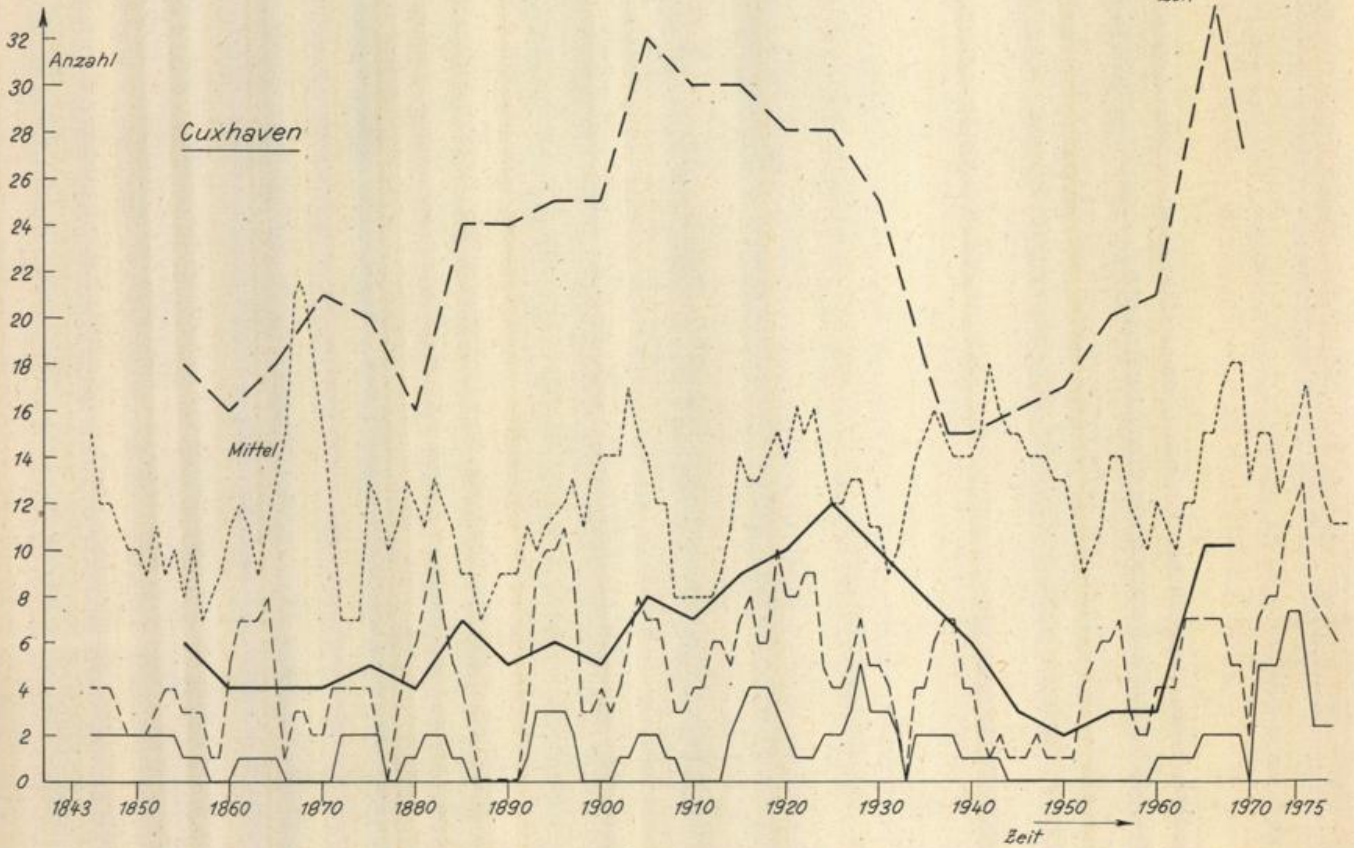
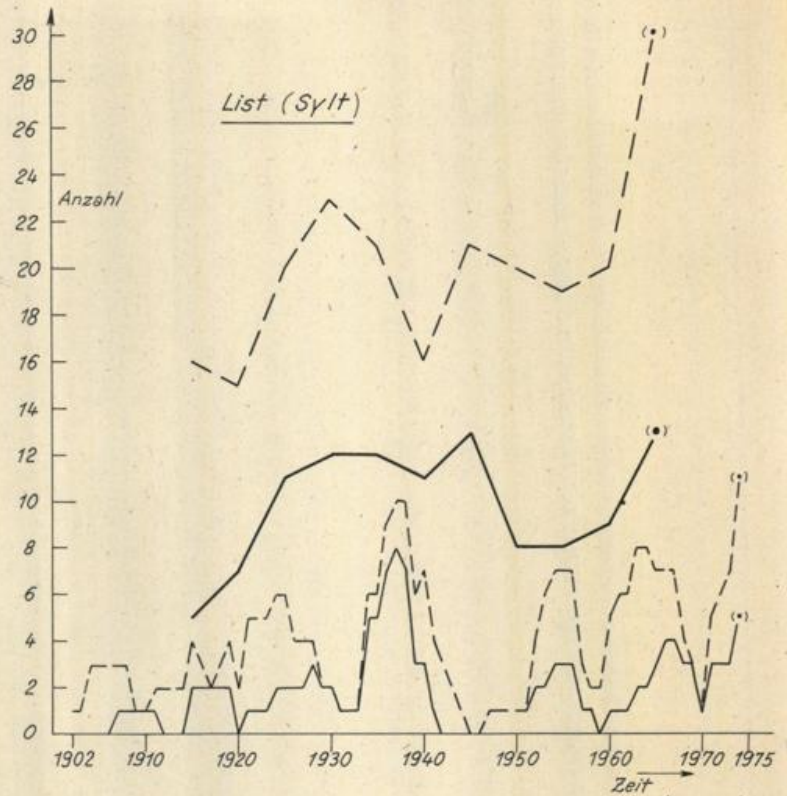
2,8 Jährliche Anzahlen mittlerer und schwerer Sturmfluten, List: 1900-1976, Cuxhaven: 1843-1980



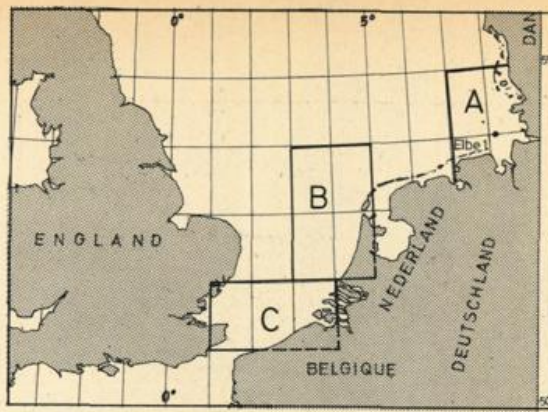
2.9 5- und 25-jährige übergreifende Mittel von Stürmen (≥ 8 Bft) sowie schweren Stürmen und Orkanen (≥ 10 Bft) für List und „Elbe 1“

Sturmfluten

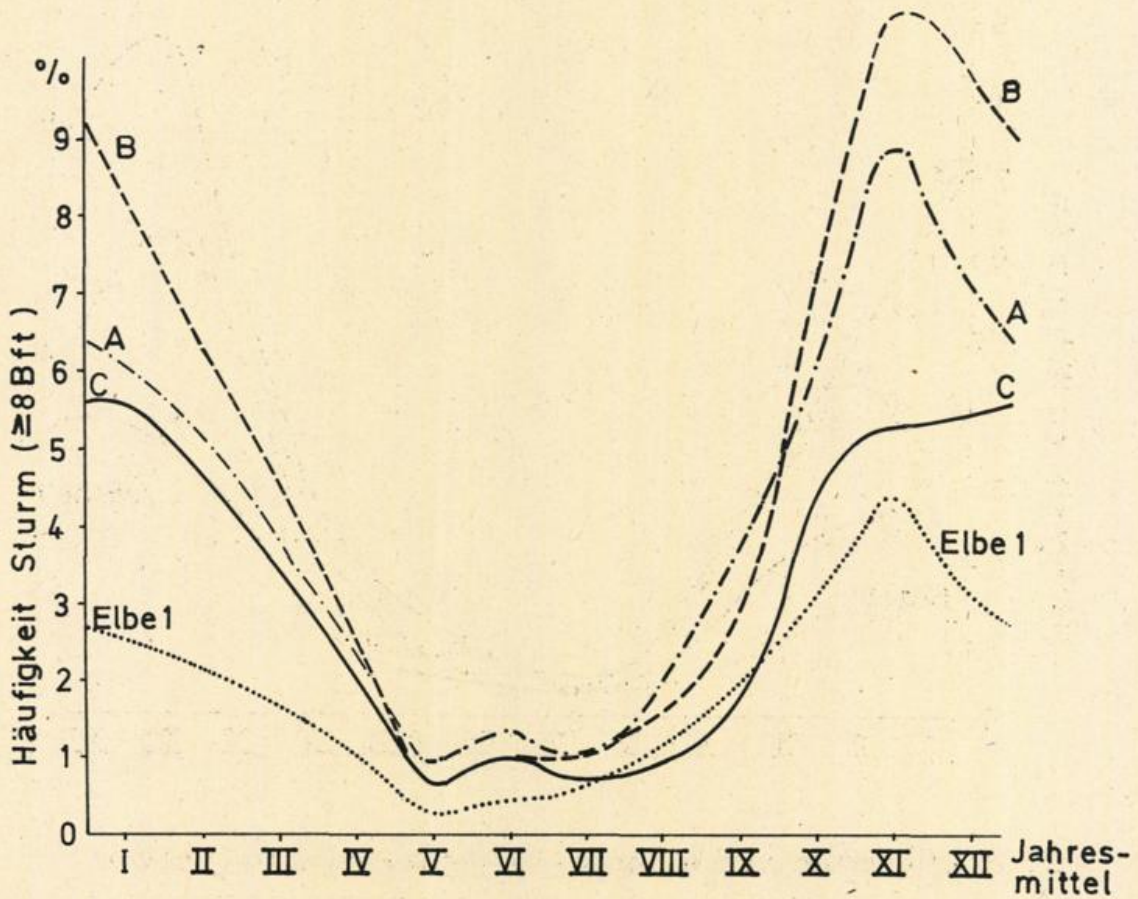
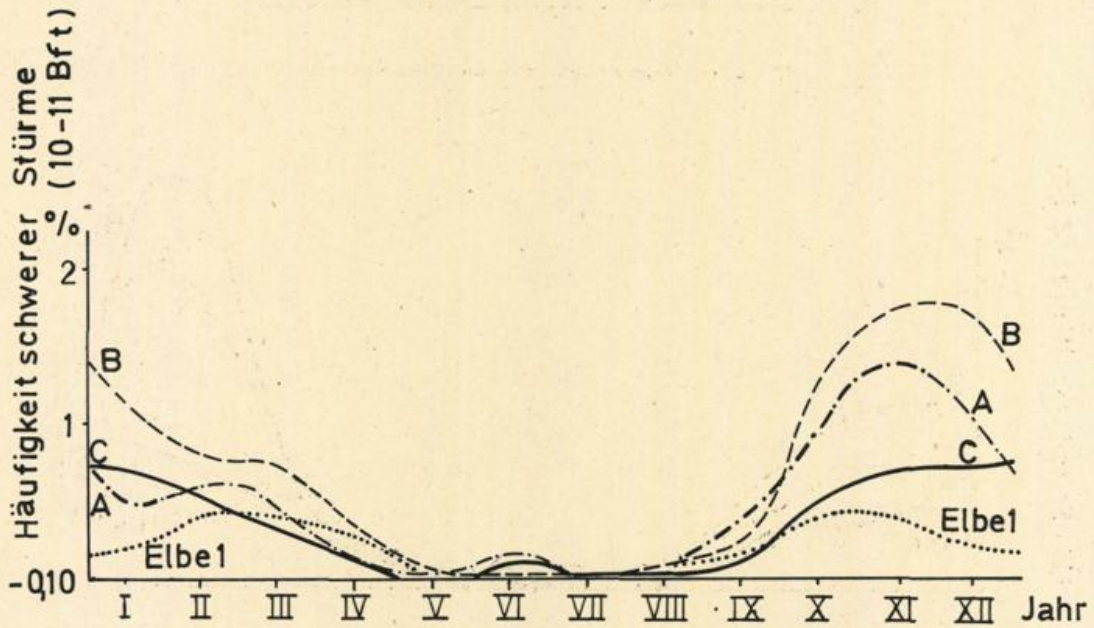
	jähr. übergr. Summen		
--- mittlere u. schwere	25	"	"
— schwer,	25	"	"
— schwer,	5	"	"
- - - mittlere u. schwere	5	"	"
- - - alle,	5	"	Mittel



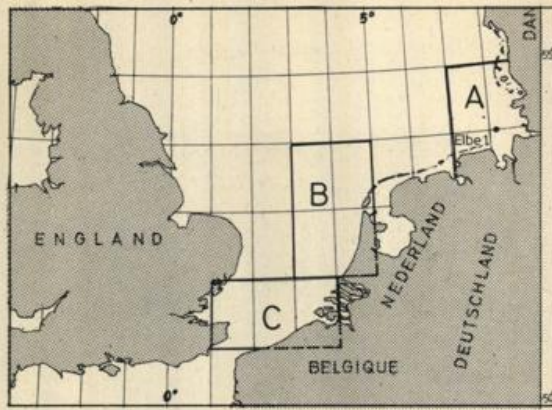
2.10 5- und 25-jährige übergreifende Summen bzw. Mittel von Sturmfluten in List und Cuxhaven



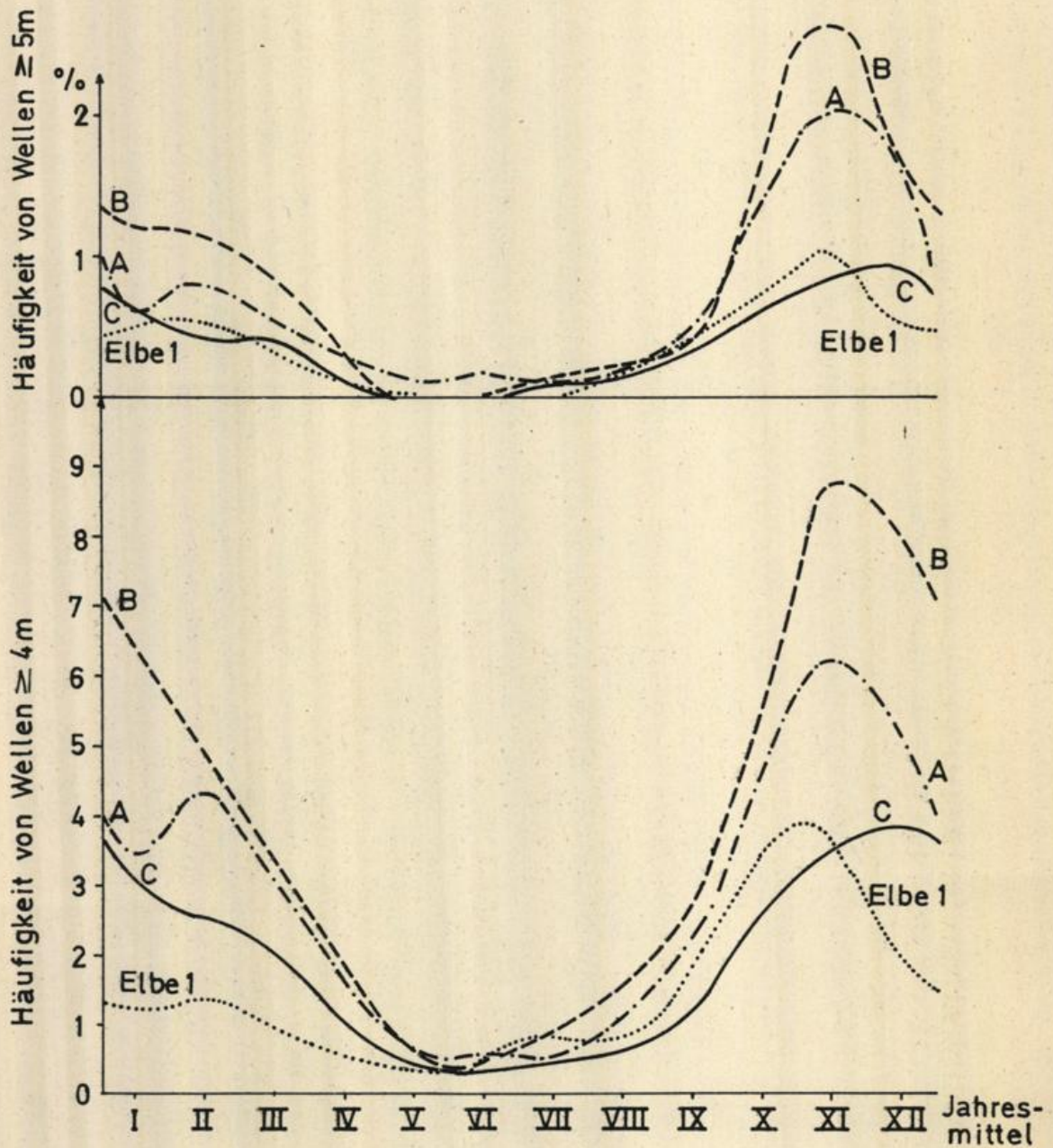
3.1 Lage der Seegebiete A-C sowie von Feuerschiff „Elbe 1“



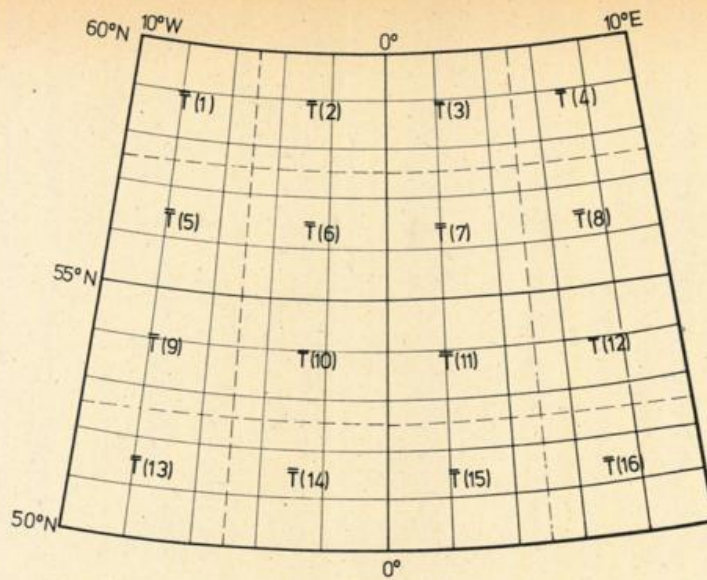
3.2 Jahresgang der Häufigkeiten von Sturm (≥ 8 Bft, unten) sowie schwerem Sturm (10-11 Bft, oben)



3.1 Lage der Seegebiete A-C sowie von Feuerschiff „Elbe 1“

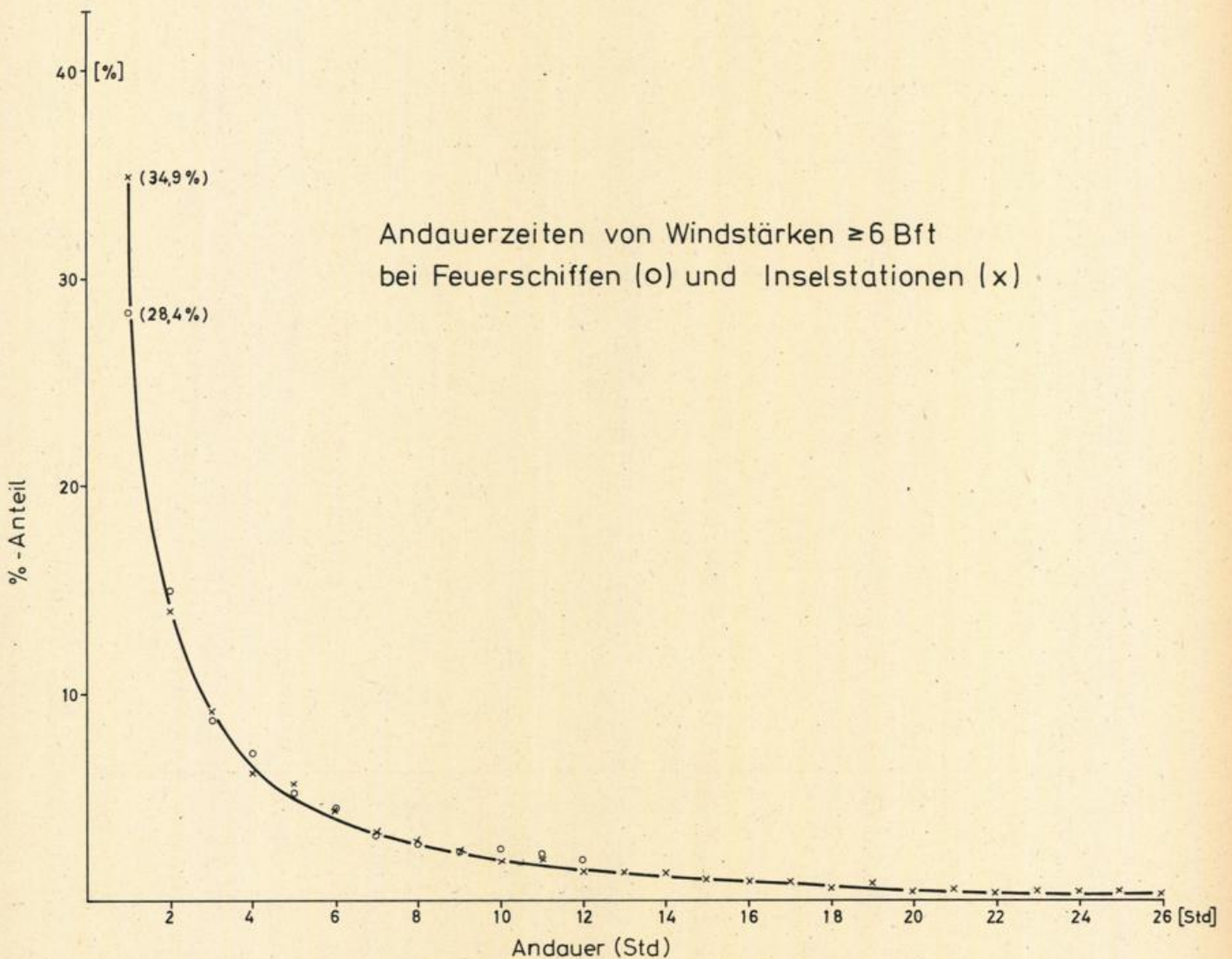


3.3 Häufigkeiten von Windsee - Wellen $\geq 4 m$ (unten) sowie $\geq 5 m$ (oben)



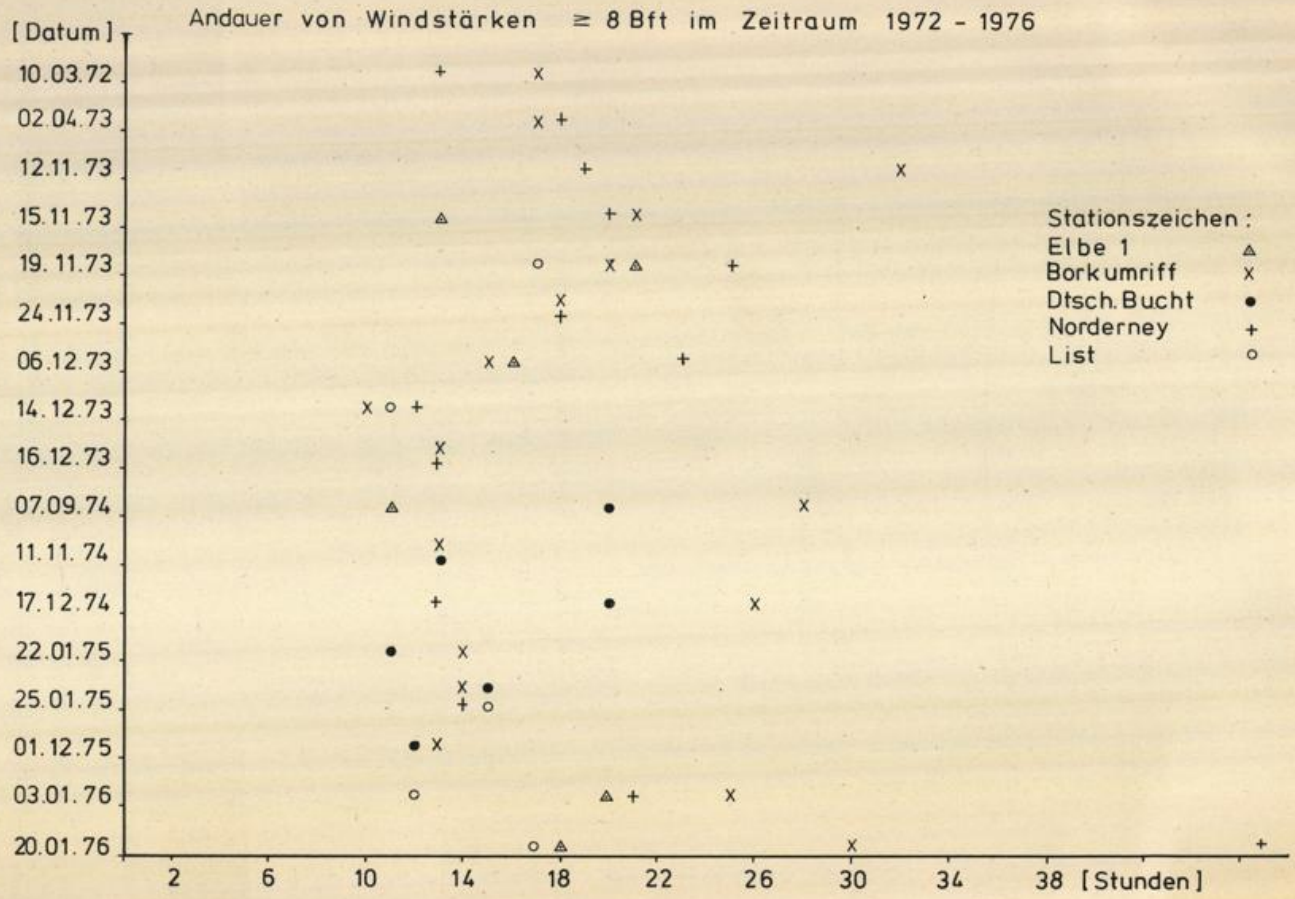
DW-CA1

4.1 Gitternetz für die Aufnahme der Bodendruckwerte von Sturmlagen im Bereich der Nordsee

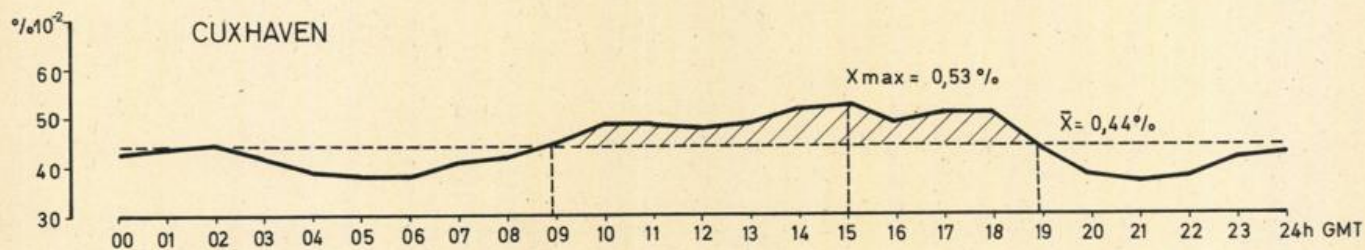
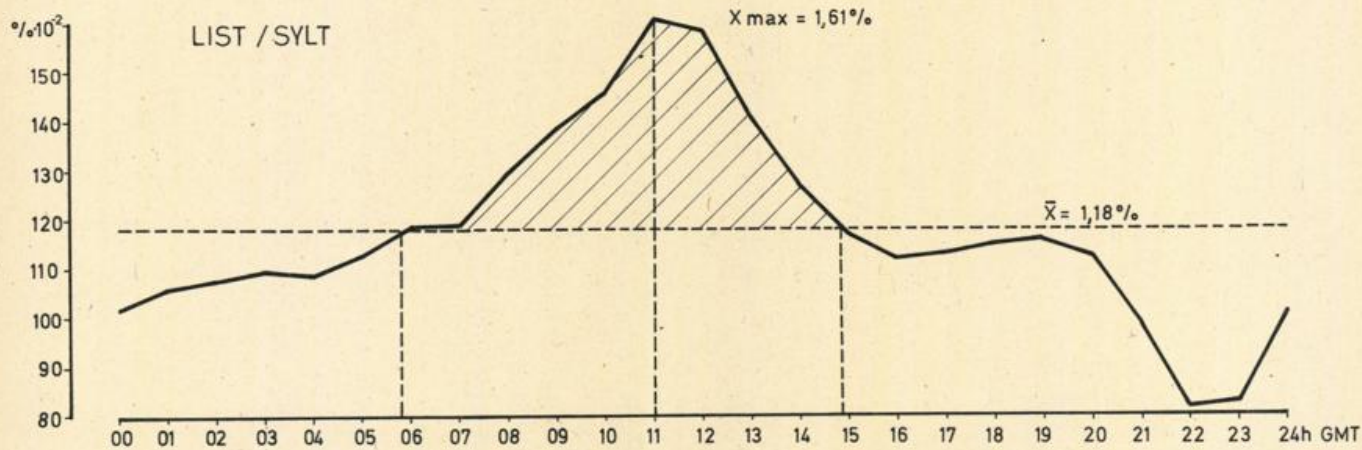
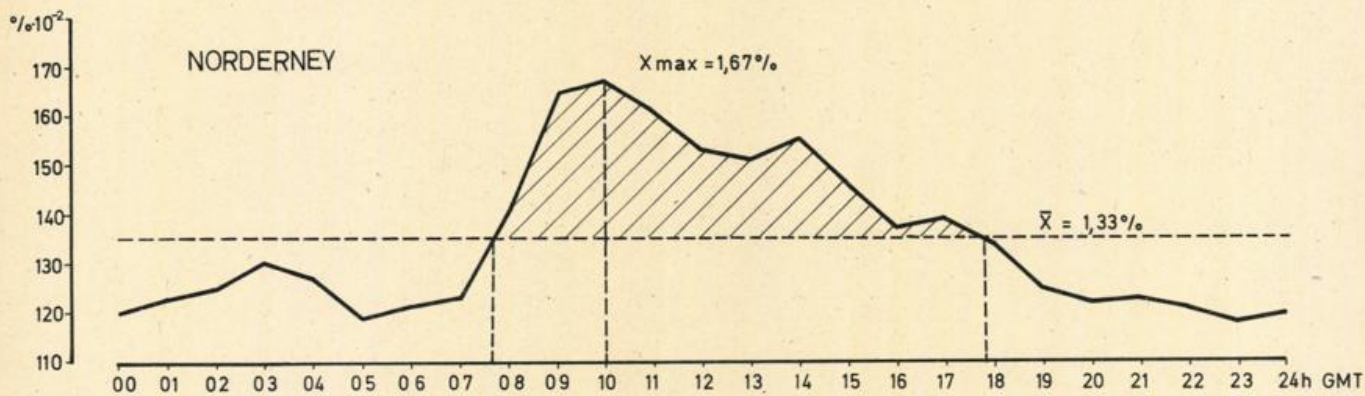


4.2 Andauerzeiten in % der Gesamtzahl aller Fälle mit ≥ 6 Bft aus dem Zeitraum 1950-1978 für die Inselstationen und 1972-1976 für die Feuerschiffe

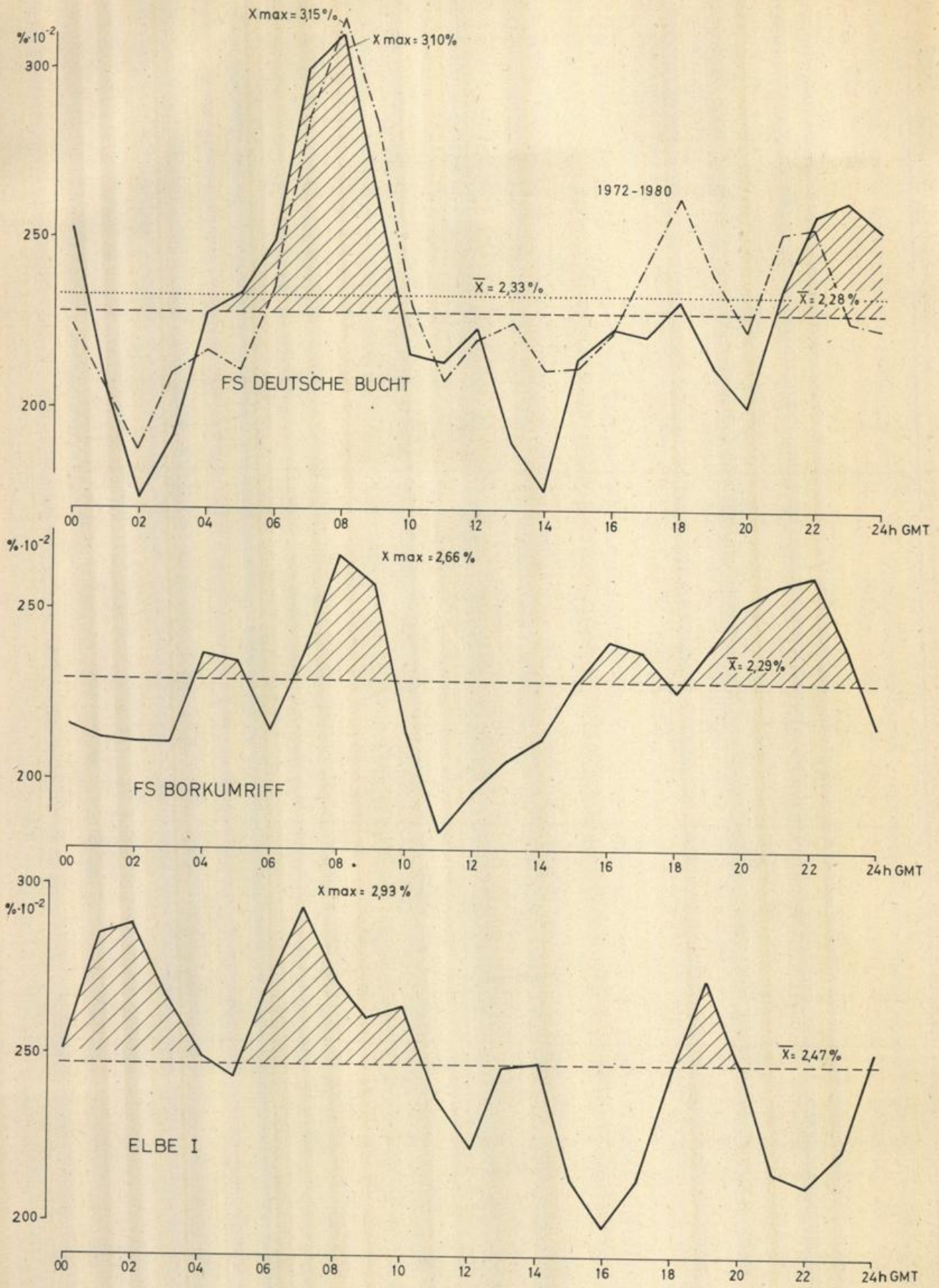
4.3 Extreme Andauerzeiten - über 10 Stunden - von
Windstärken ≥ 8 Bft in den Jahren 1972-1976



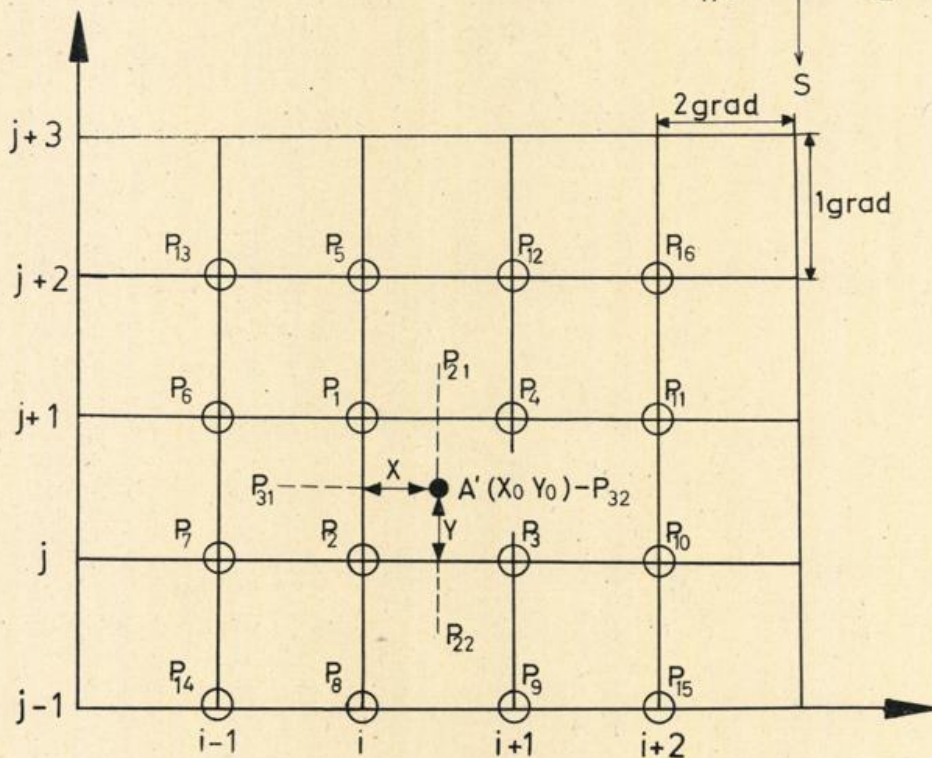
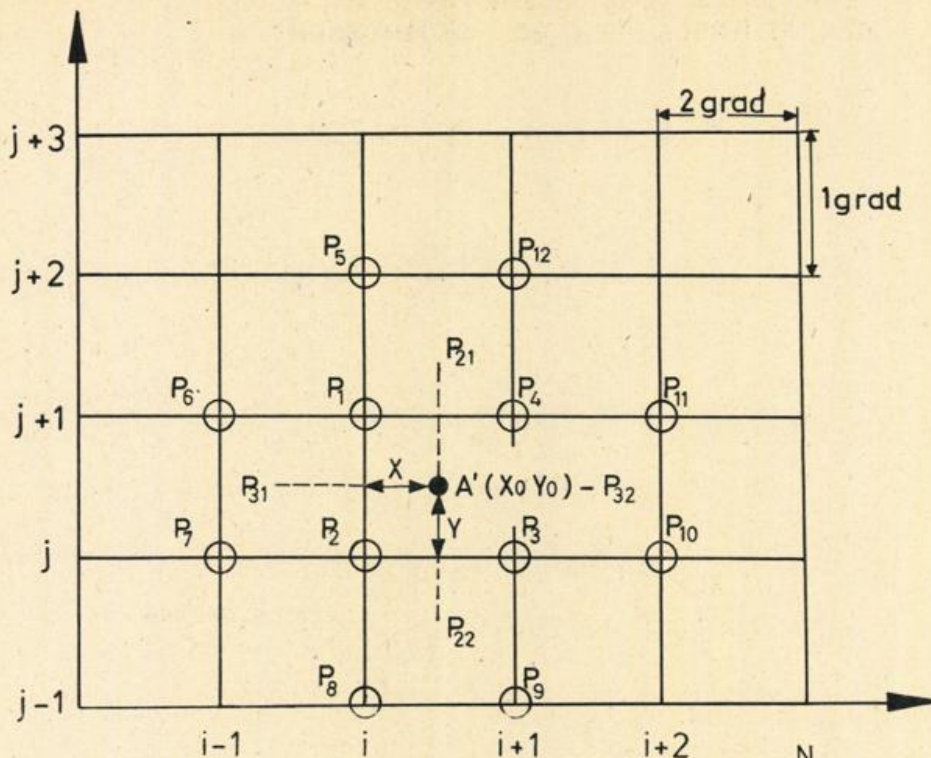
Häufigkeit des Auftretens von Windstärken ≥ 6 Bft in $\% \cdot 10^{-2}$
in Abhängigkeit vom tageszeitlichen Beginn



4.4 Häufigkeit des Auftretens von Windstärken ≥ 6 Bft in $\% \cdot 10^{-2}$
in Abhängigkeit vom tageszeitlichen Beginn



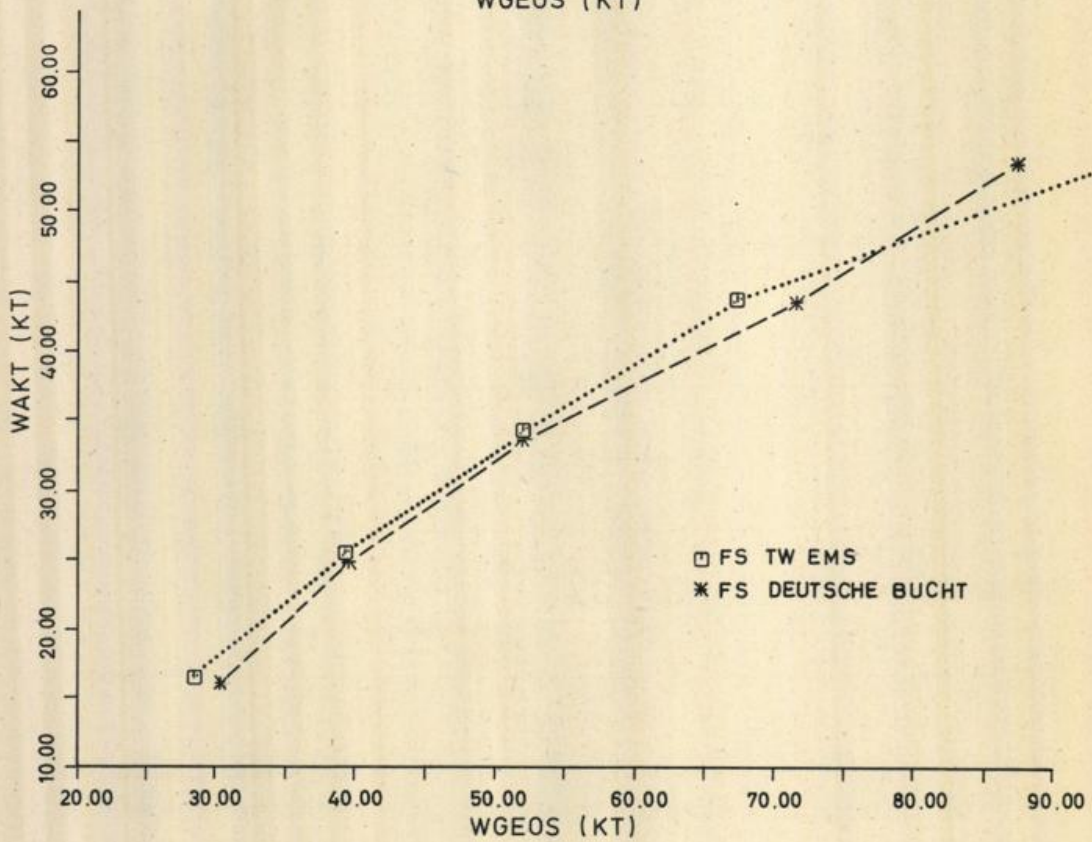
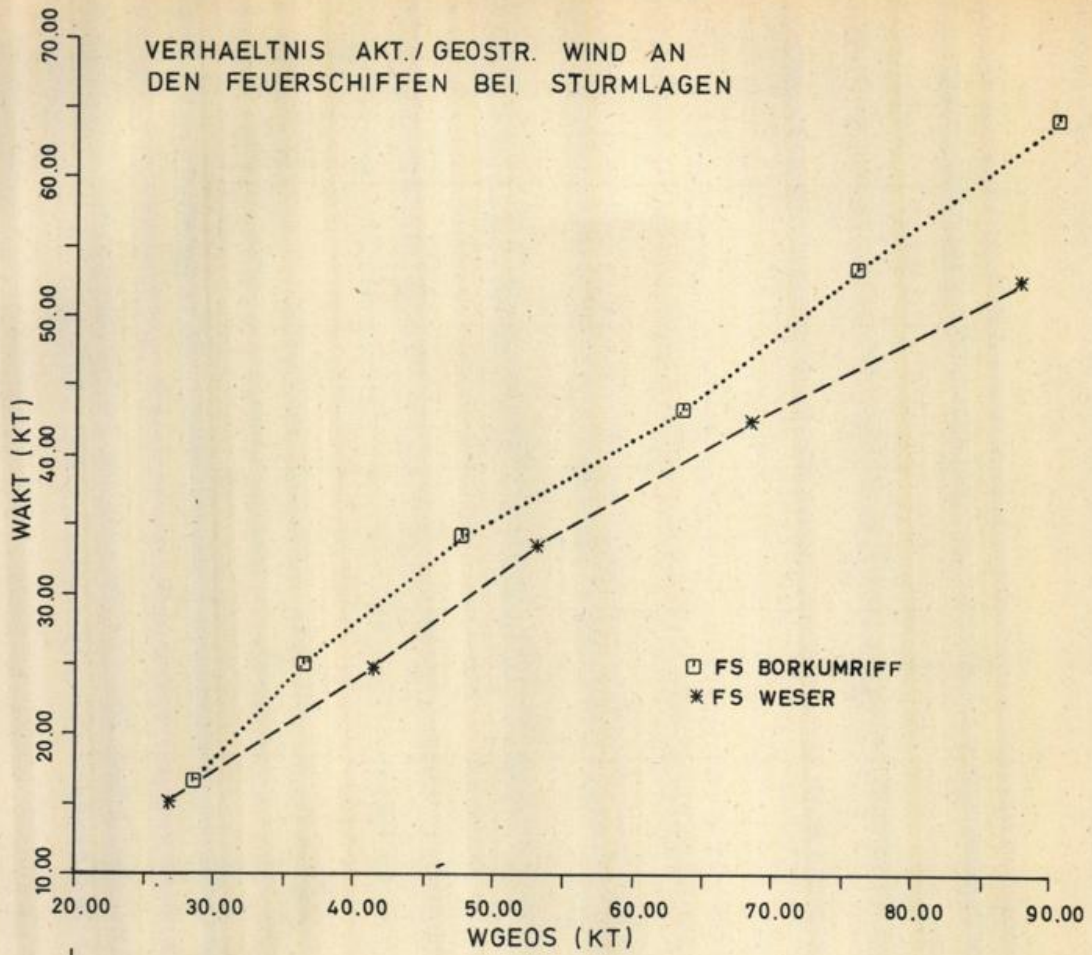
4.5 Häufigkeit des Auftretens von Windstärken ≥ 6 Bft in $\% \cdot 10^{-2}$ in Abhängigkeit vom tageszeitlichen Beginn



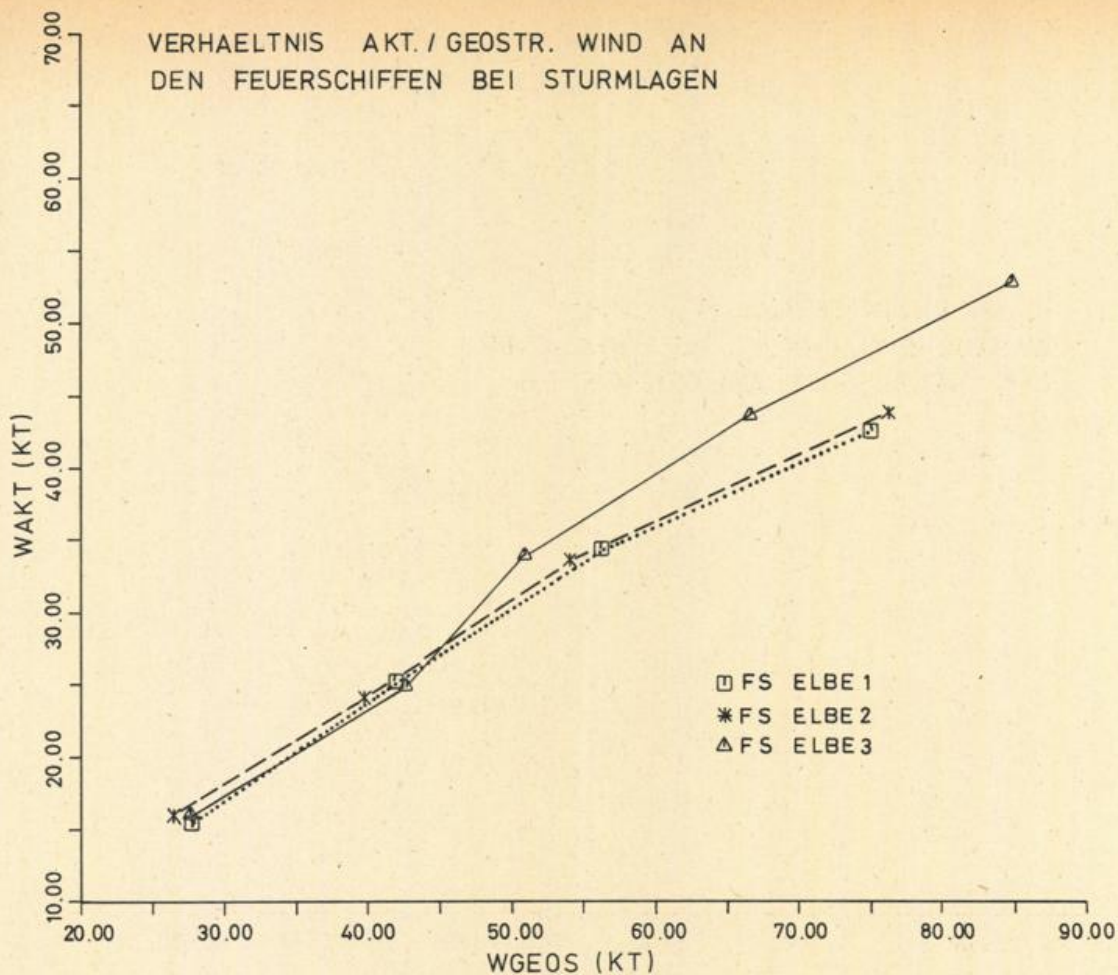
4.6 Schematischer Ausschnitt aus dem SWA-Gitter zur Erläuterung der Interpolationsformeln (3) und (4). Die Koeffizienten dieser Gleichungen werden durch die Werte an den durch einen Kreis eingefassten Gitterpunkten bestimmt

z. B. $P_{-1,2}$ = Druckwert am Gitterpunkt $(i-1, j+2) = P_{13}$

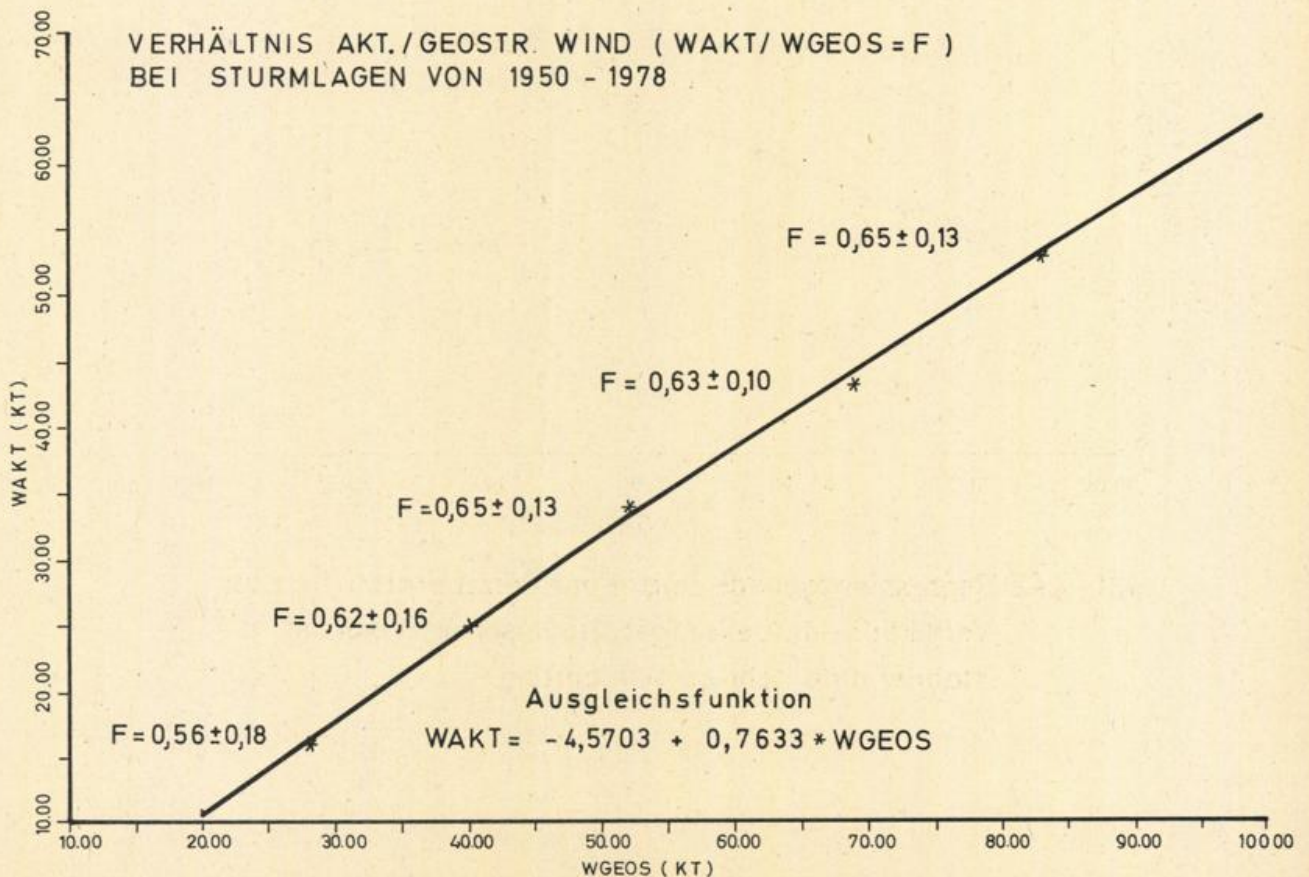
$P(x, y)$ = Druckwert am Punkt $A(x, y)$, z. B. P_{21}, P_{22}



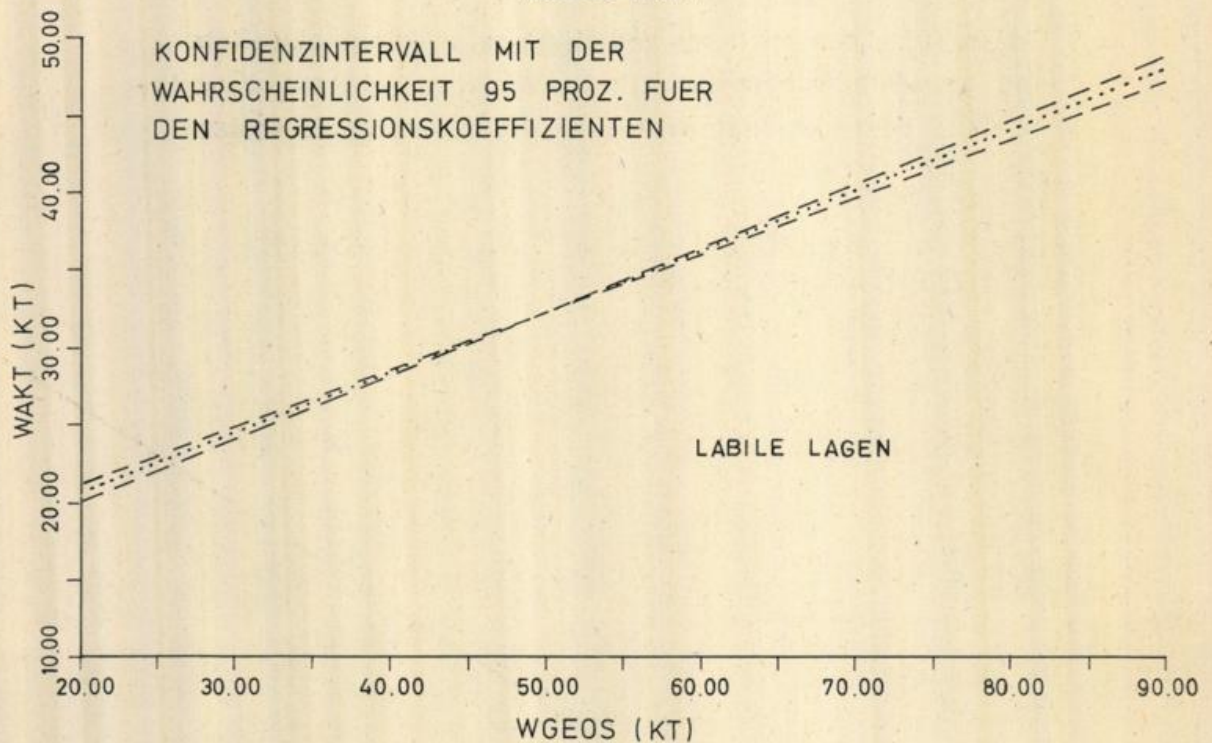
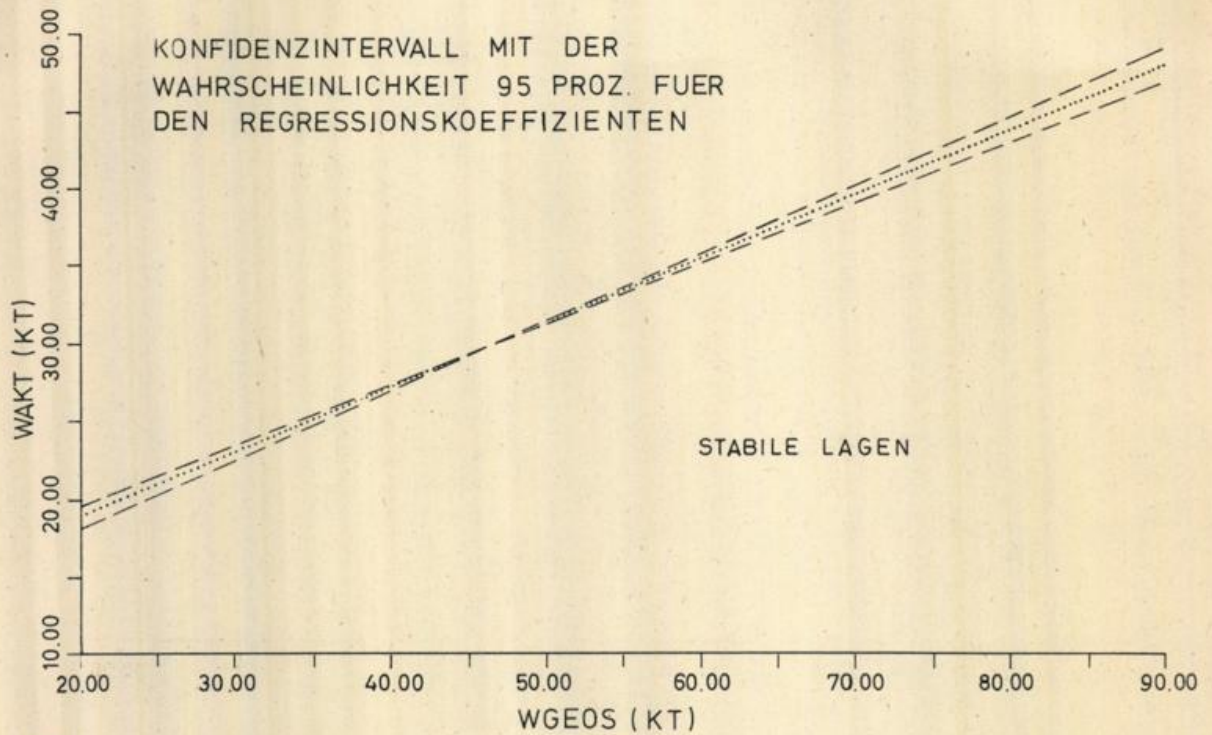
4.7 - 4.8 Darstellung des mittleren Verhältnisses zwischen aktuellem und geostrophischem Wind für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche des aktuellen Windes - Klassenbreite: 10 Knoten



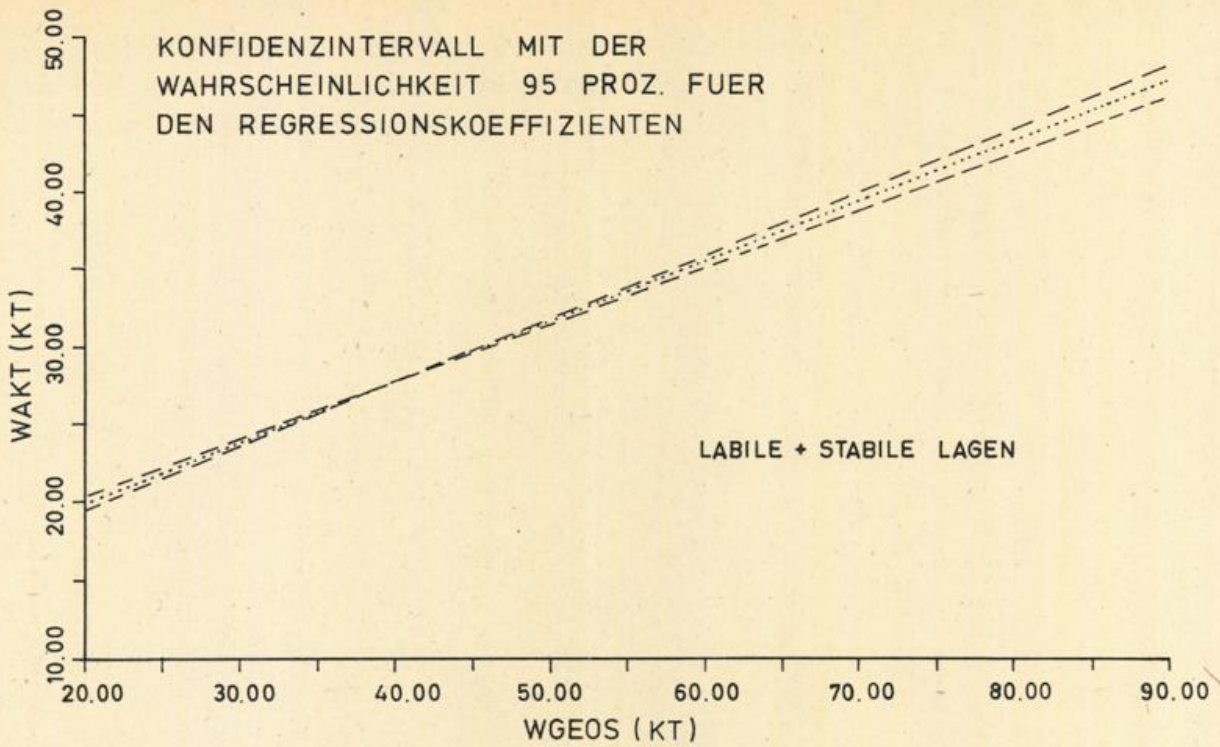
4.9 Darstellung des mittleren Verhältnisses zwischen aktuellem und geostrophischem Wind für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche des aktuellen Windes — Klassenbreite: 10 Knoten



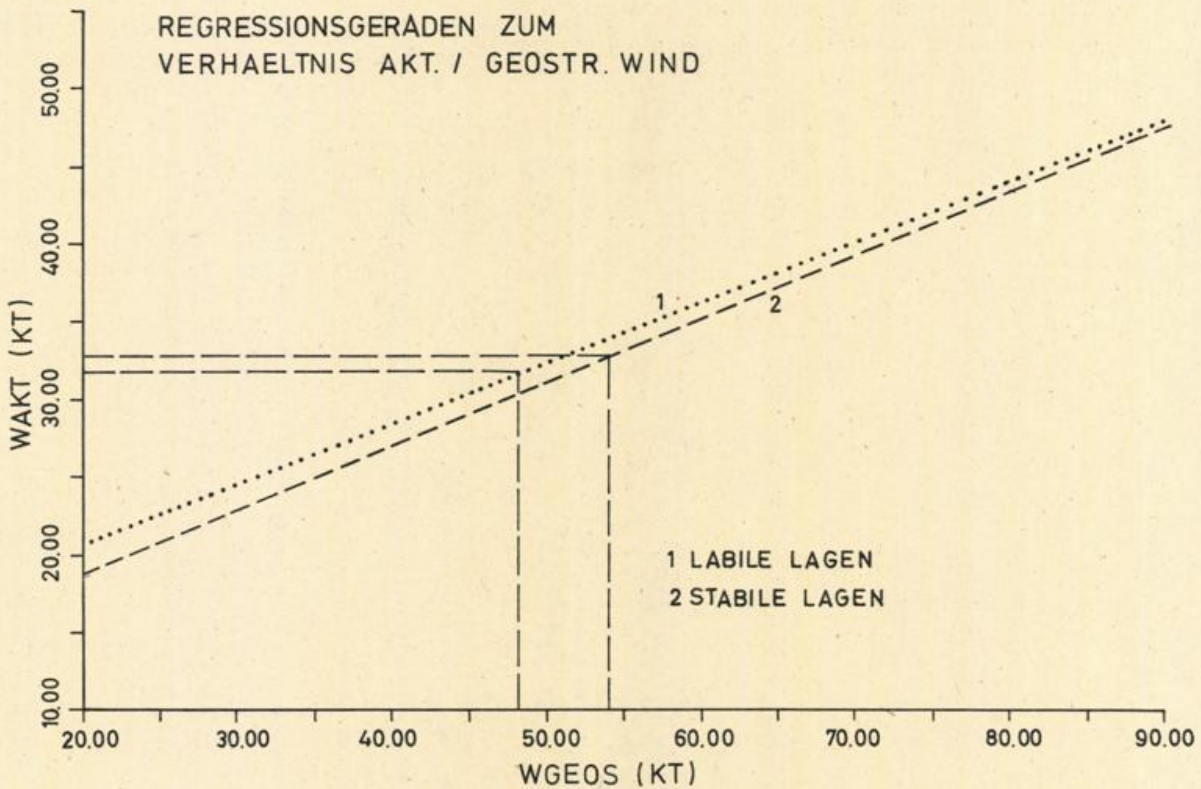
4.10 Es besteht eine nahezu lineare Beziehung zwischen aktuellem und geostrophischem Wind über alle Geschwindigkeitsbereiche



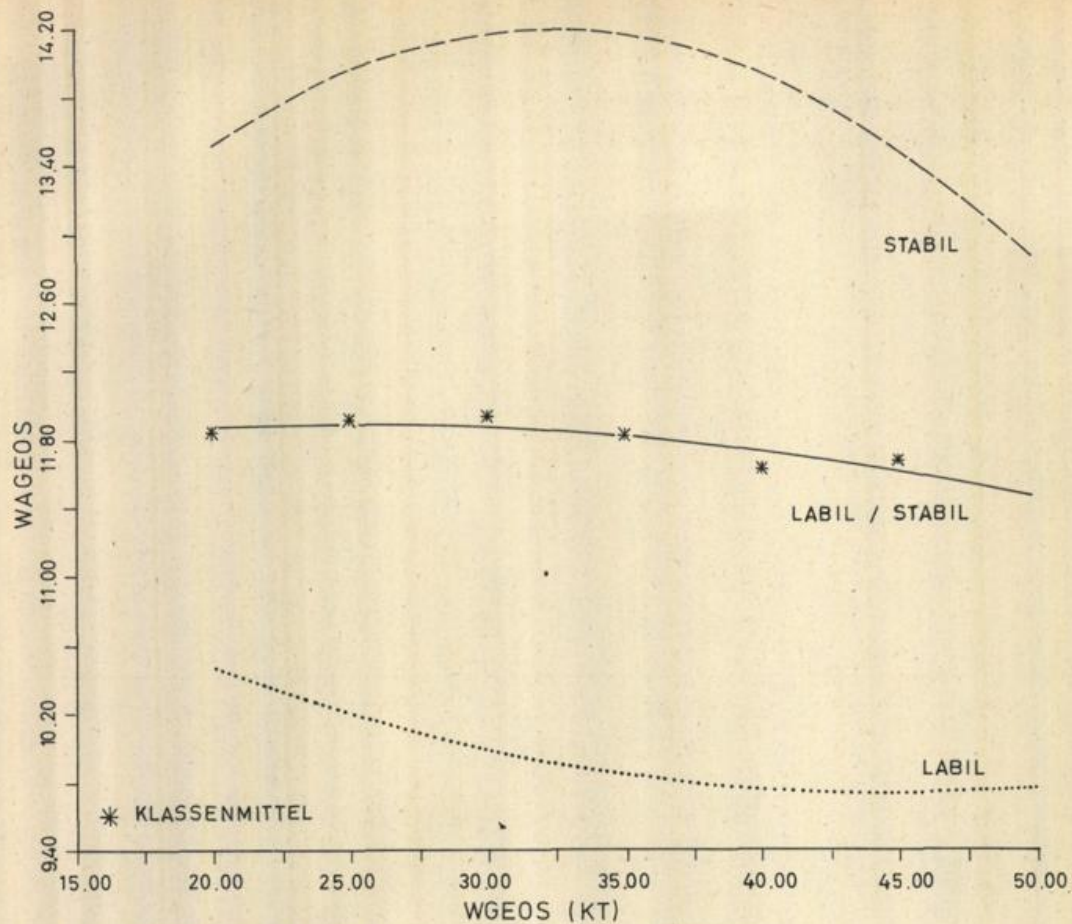
4.11-4.12 Regressionsgerade mit Konfidenzbereich für das Verhältnis aktueller/geostrophischer Wind bei stabiler und labiler Schichtung



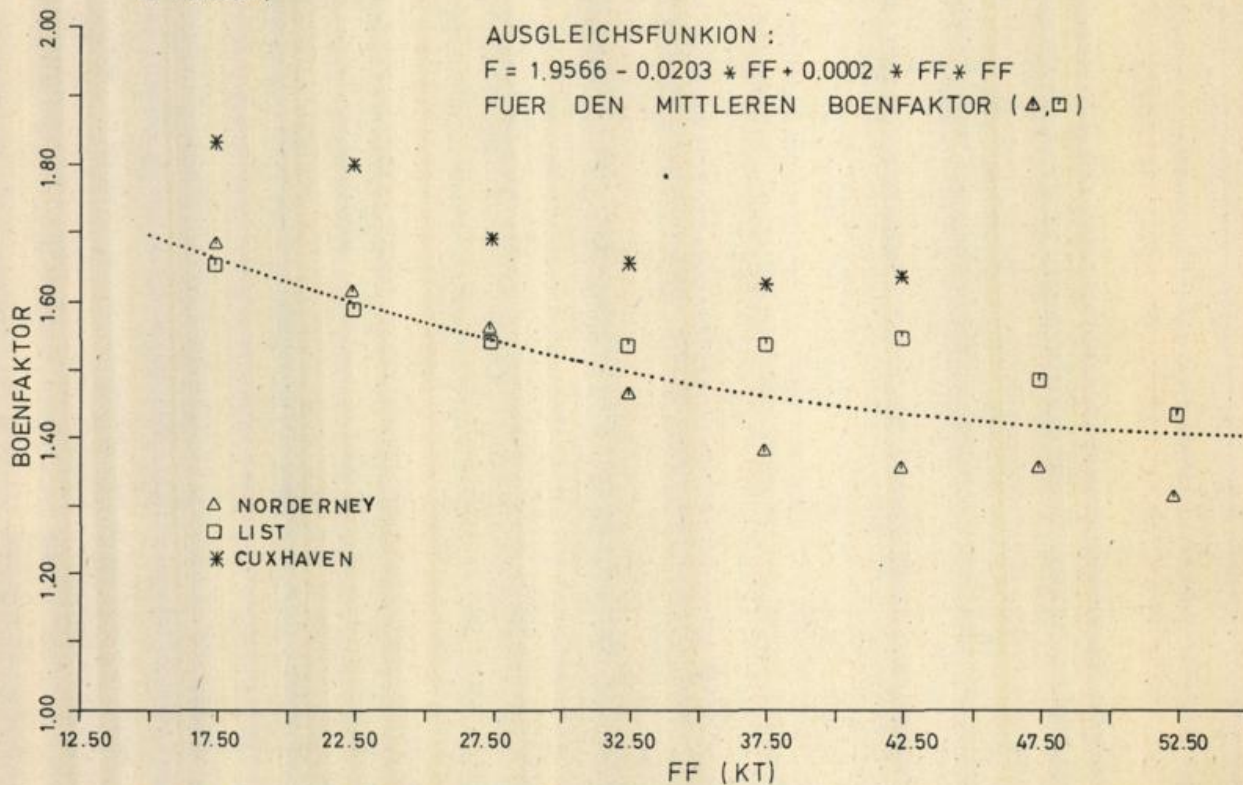
4.13 Regressionsgerade mit Konfidenzbereich für das Verhältnis aktueller/geostrophischer Wind



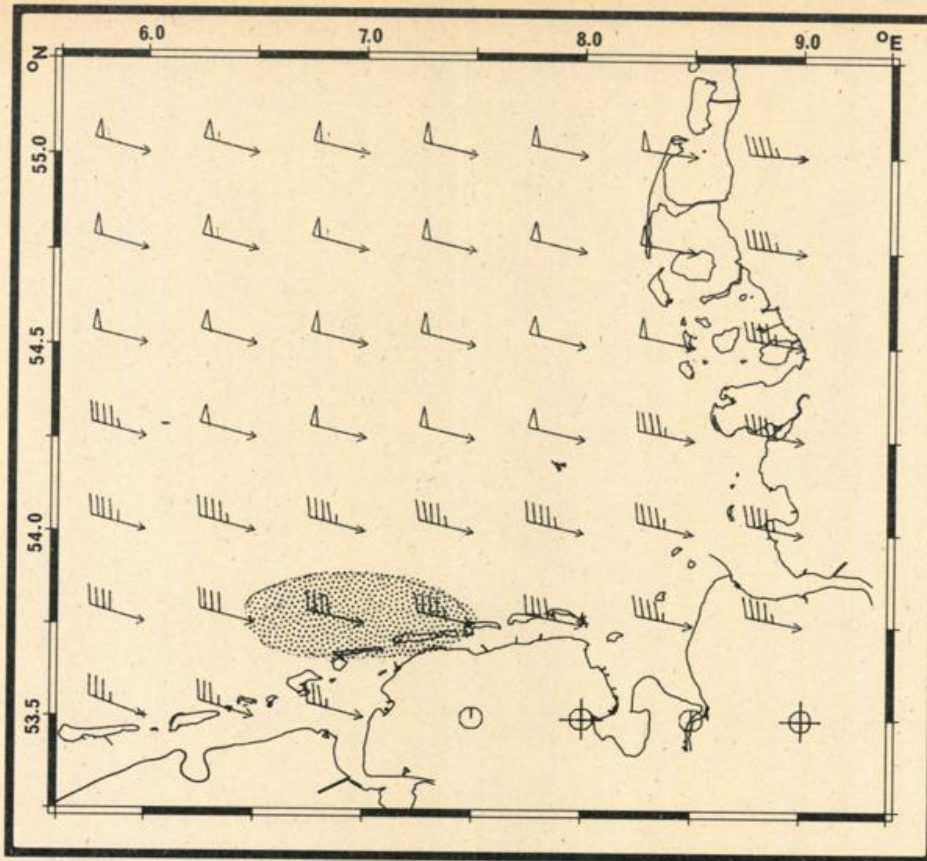
4.14 Gegenüberstellung der Regressionsgeraden aus dem Verhältnis aktueller/geostrophischer Wind bei labiler und stabiler maritimer Schichtung



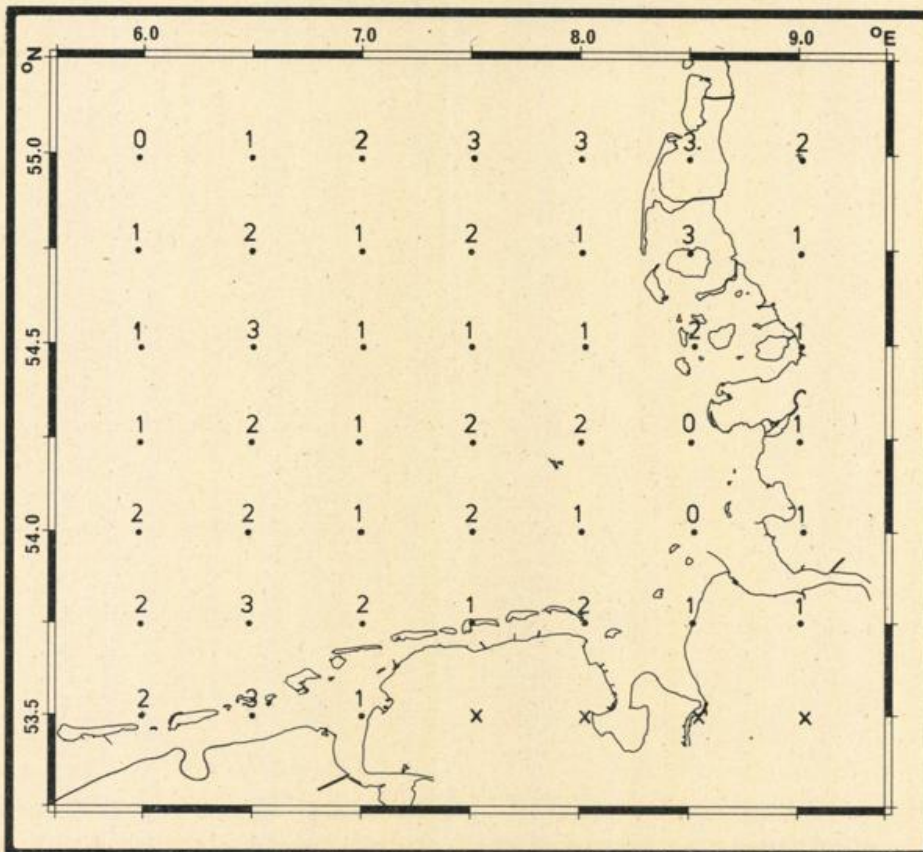
4.15 Abhängigkeit des Ablenkungswinkels α (WAGEOS) von der geostrophischen Windgeschwindigkeit (WGEOS, in Knoten)



4.16 Abhängigkeit des Böenfaktors - Windmaximum / 10-Minuten-Mittel - von der mittleren Windgeschwindigkeit (in Knoten)

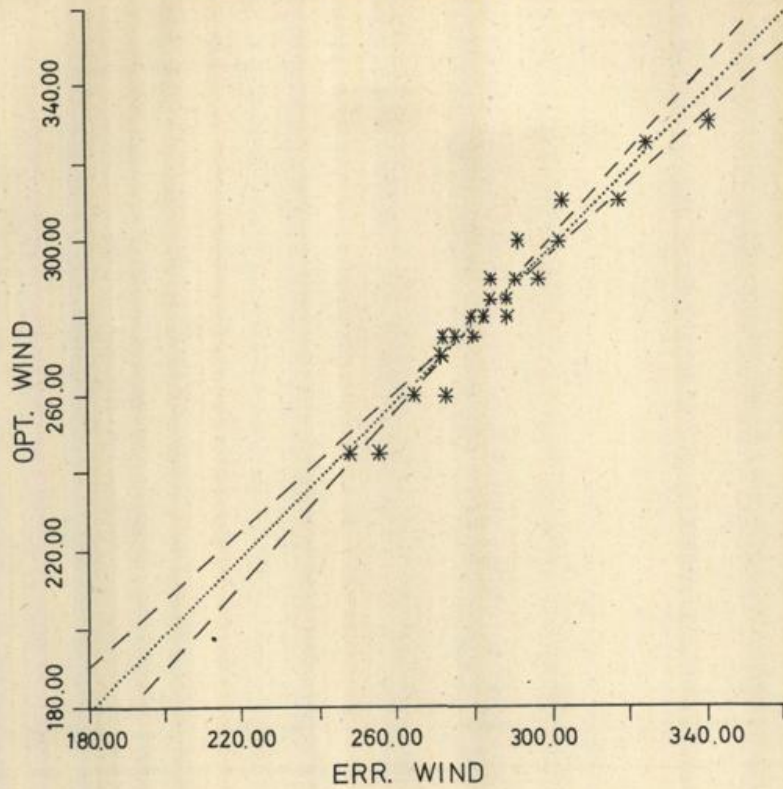


4.17 Windfeld (in kn) in der Deutschen Bucht am 21.01.76 - 00.00GMT;
Seegebiet mit für die Windstaubbestimmung erforderlichen
Winden ist gepunktet dargestellt

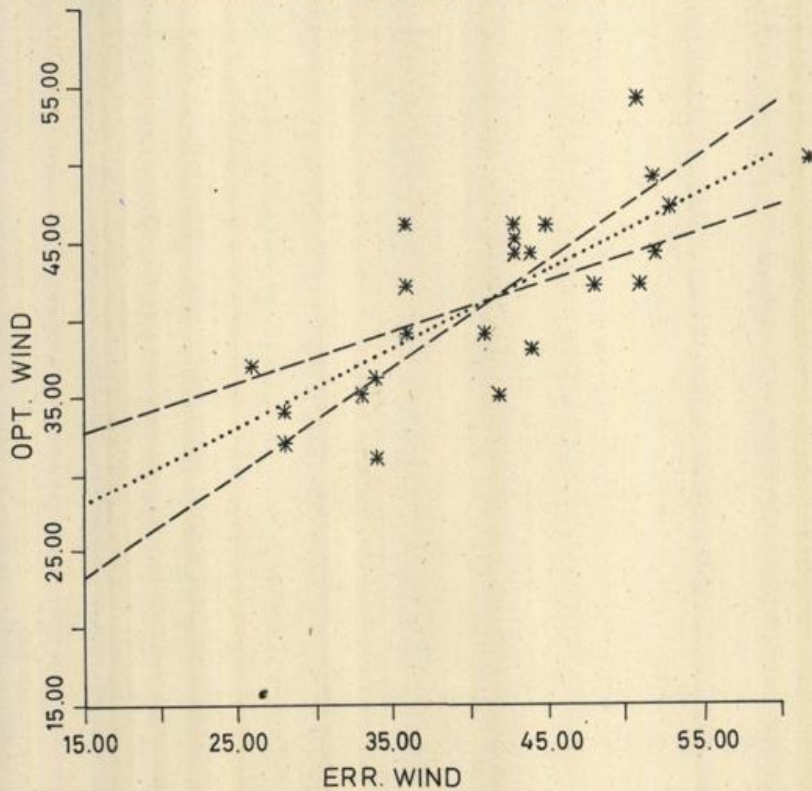


4.18 Häufigkeit der zur Windstaubbestimmung verwendbaren
Winde, die aus den 25 analysierten Sturmflutterminen
für feste Gitterpunkte berechnet wurden;
0= 0-10% , 1= 10-19% , 2= 20-29% und 3= 30-39%

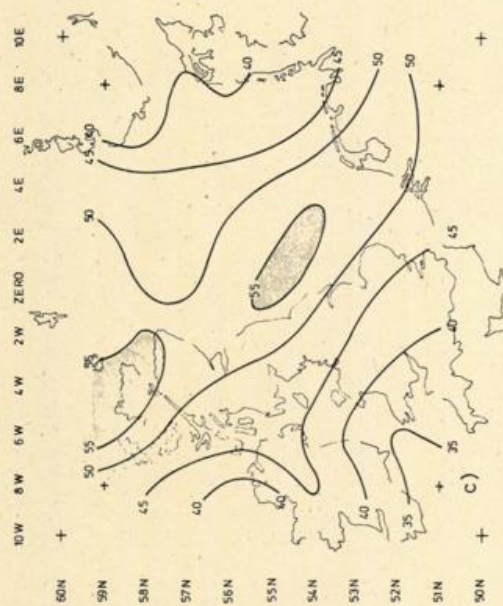
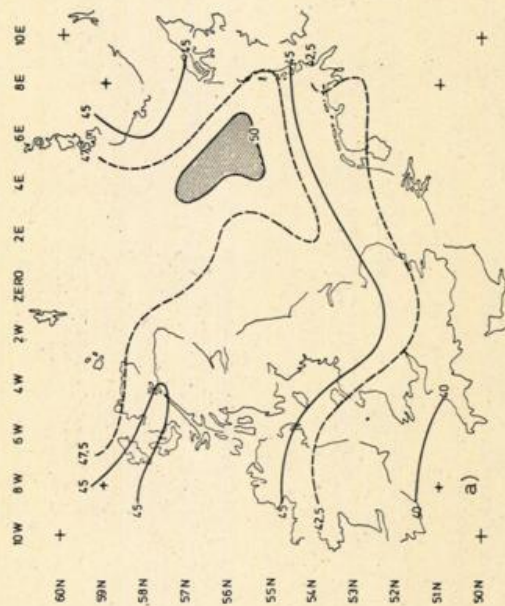
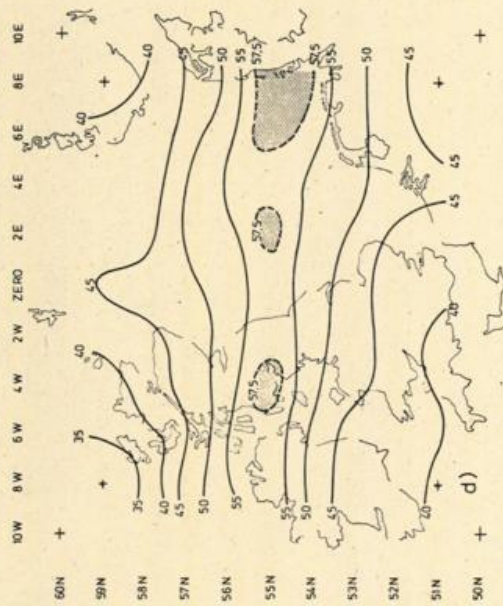
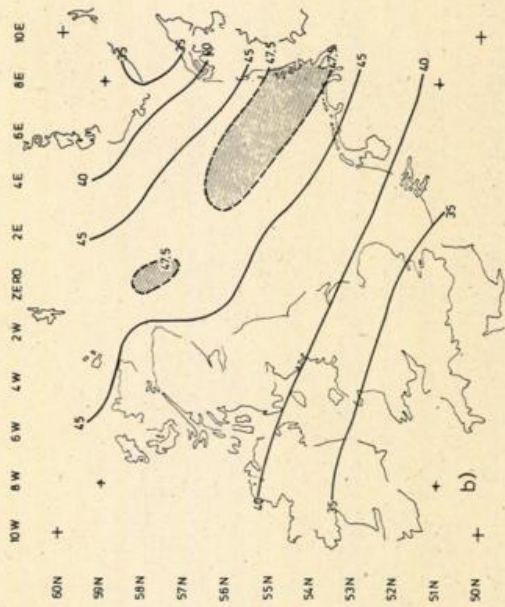
KONFIDENZINTERVALL MIT DER WAHRSCHEINLICHKEIT 95 PROZ. FUER DEN REGRESSIONSKOEFFIZIENTEN DER WINDRICHTUNG (GRAD)



KONFIDENZINTERVALL MIT DER WAHRSCHEINLICHKEIT 95 PROZ. FUER DEN REGRESSIONSKOEFFIZIENTEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT (KNOTEN)

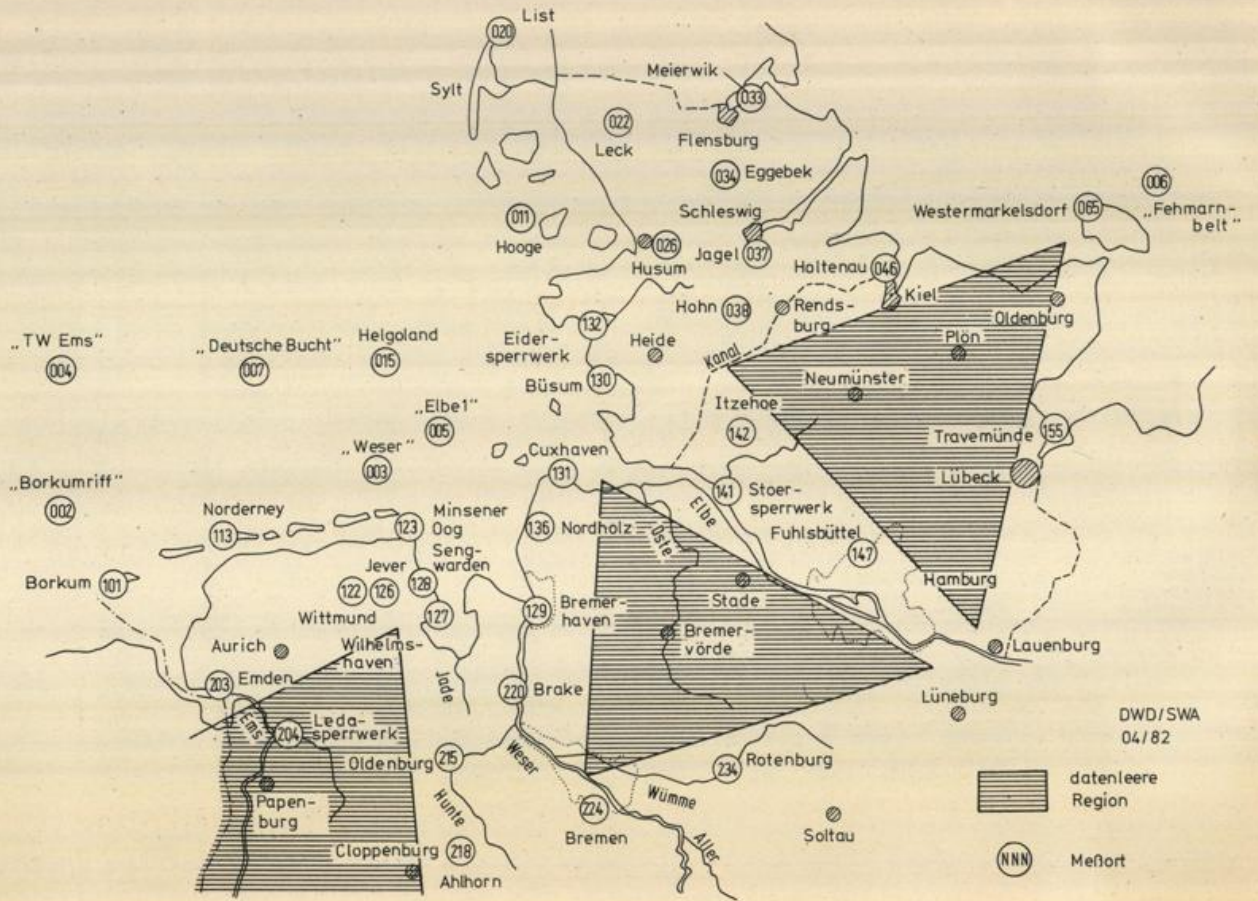


4.19 Regressionsgeraden für das Verhältnis errechneter Wind zu erforderlichem oder optimalem Wind zur Windstaubbestimmung nach Windrichtung (Grad) und Windgeschwindigkeit (kn) getrennt



5.1 Horizontale Verteilung der mittleren maximalen Windgeschwindigkeit (in kn) über der Nordsee bei verschiedenen Zugrichtungen der Tiefdruckgebiete aus Westen —
 a) Nordmeertief, b) Skagerrakzyklone, c) Nordseetief und d) Westwetterlage

6.1 Stationsübersicht



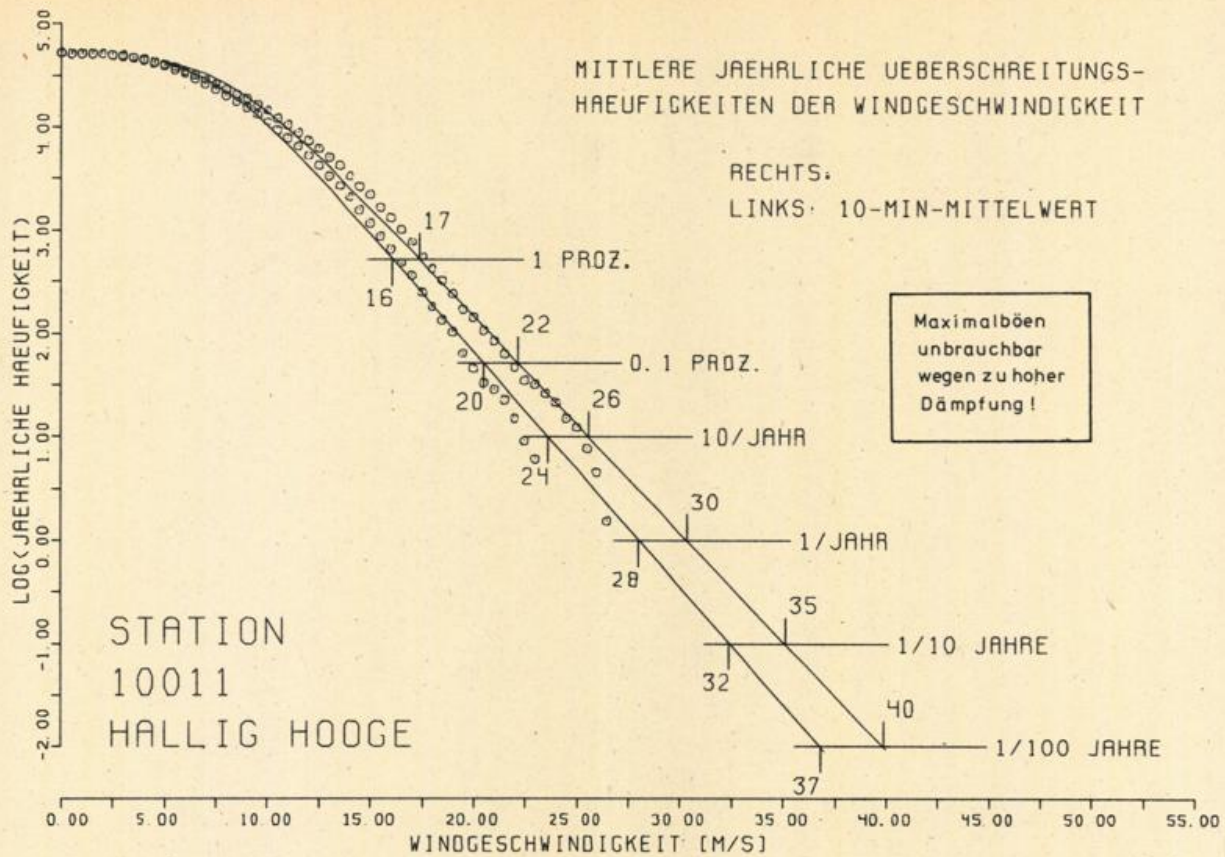


Abb. 6.2

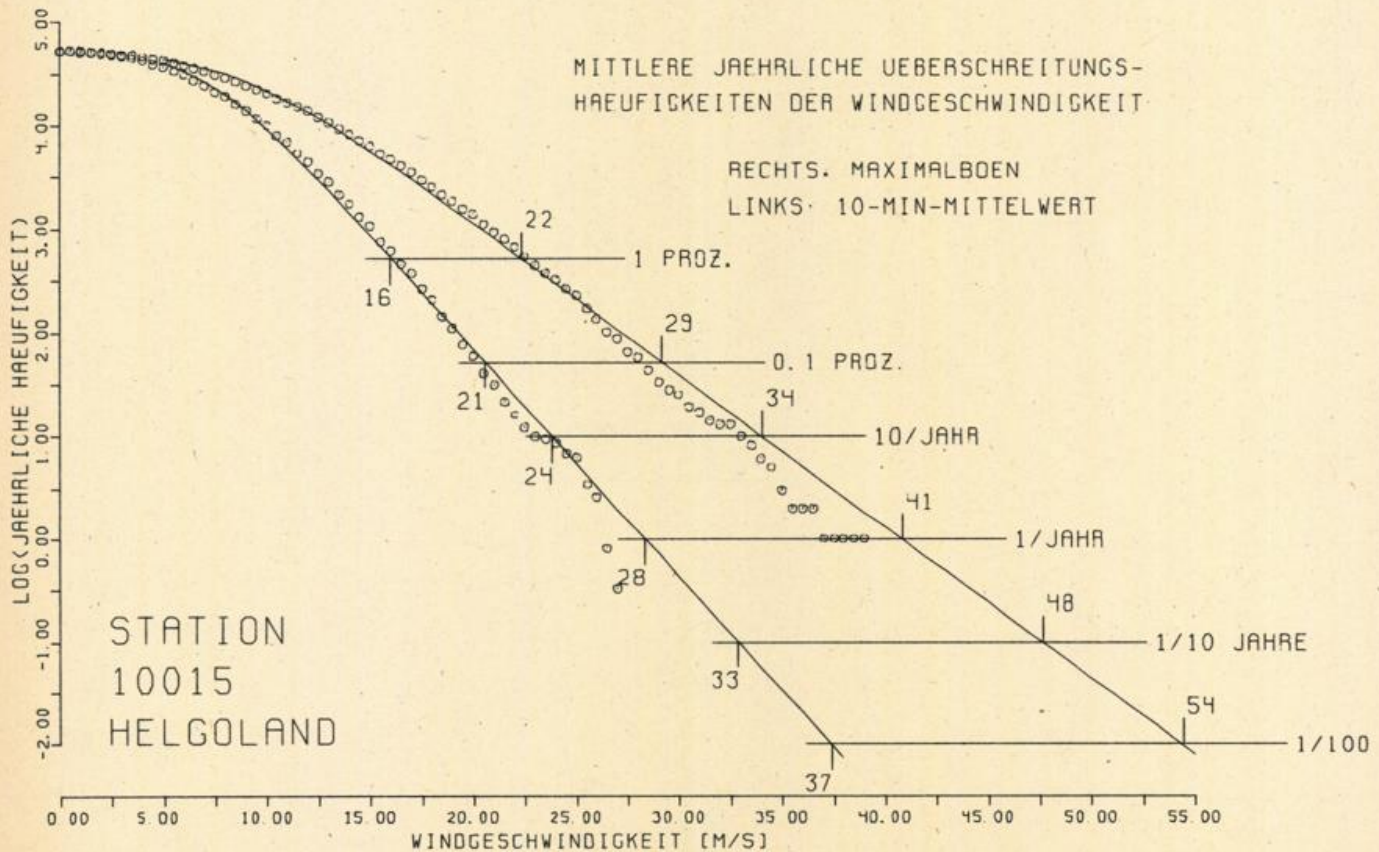


Abb. 6.3

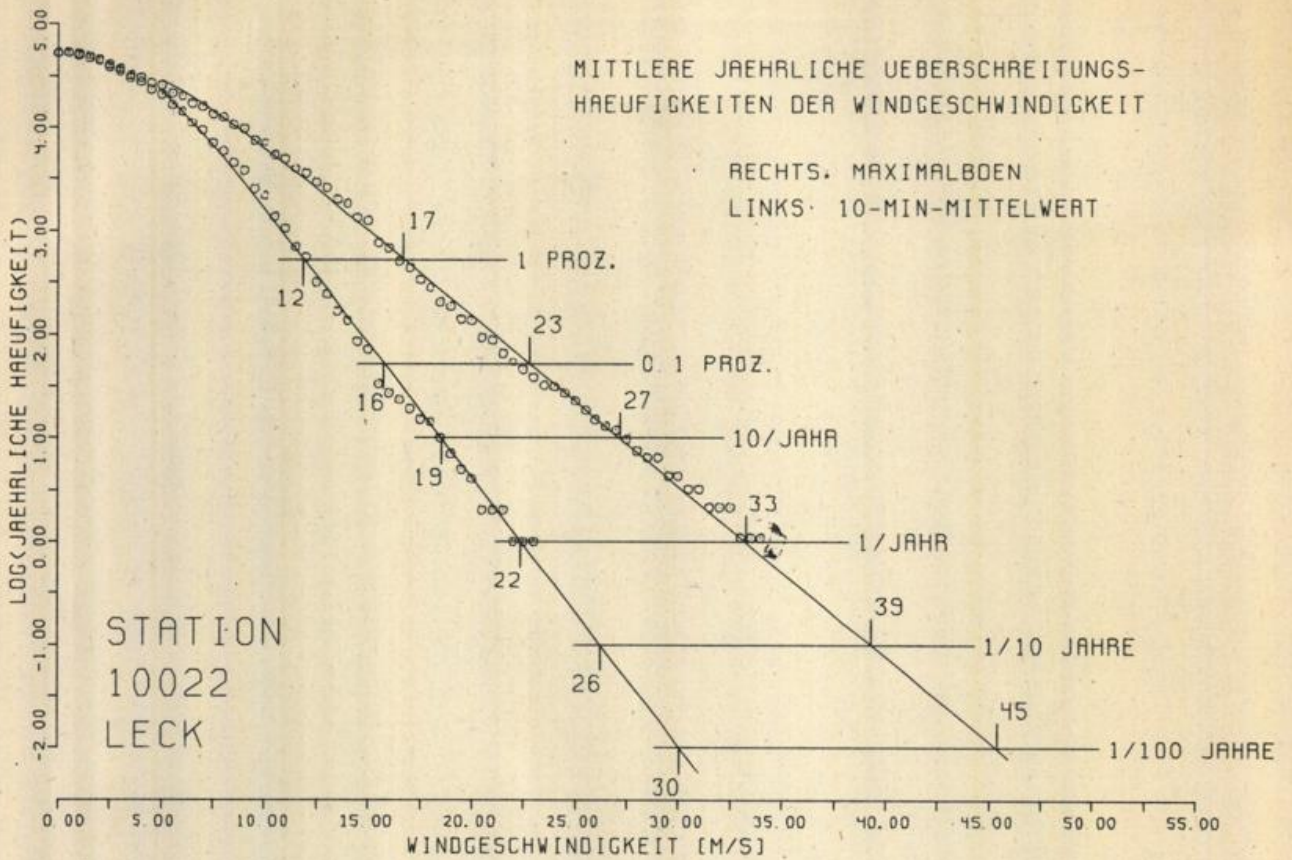


Abb. 6.4

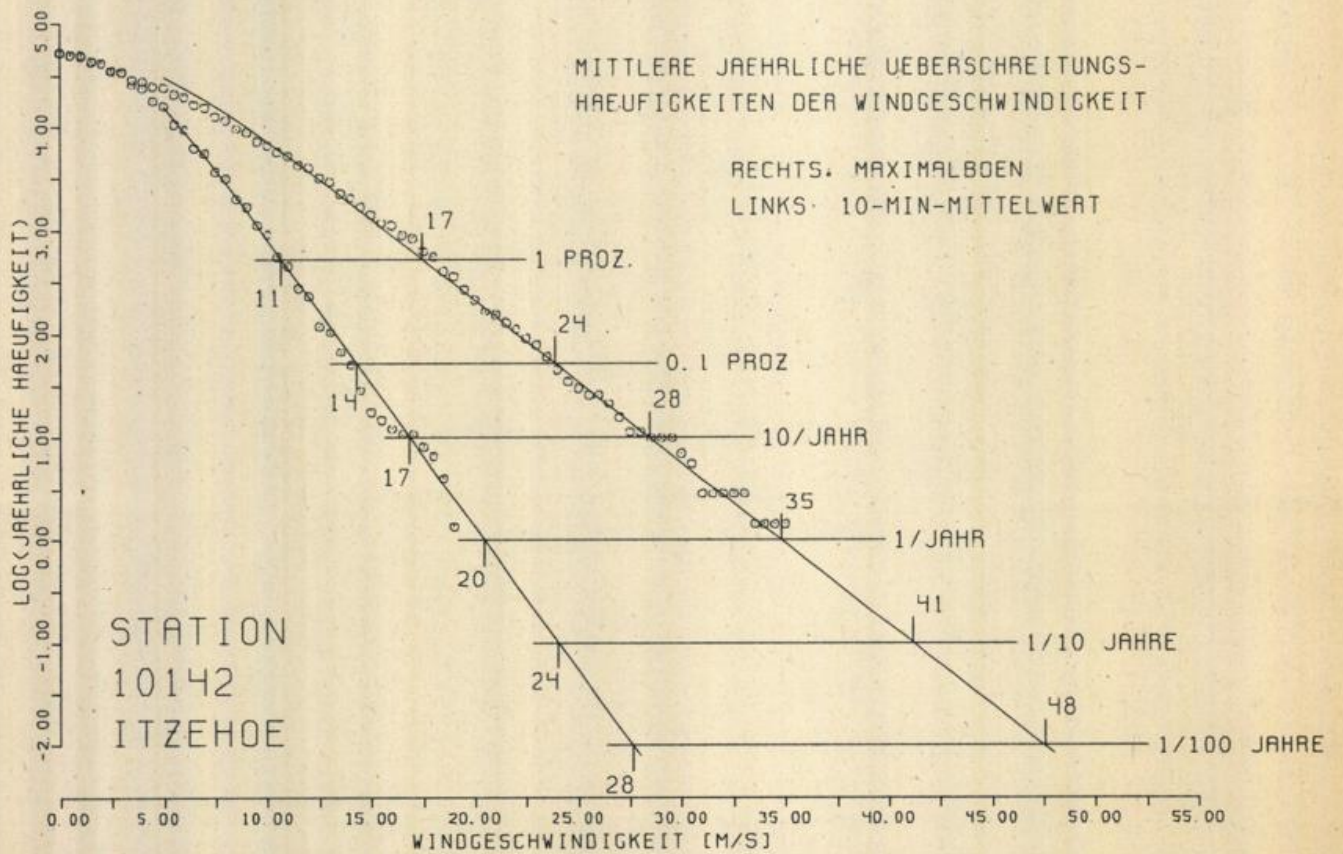
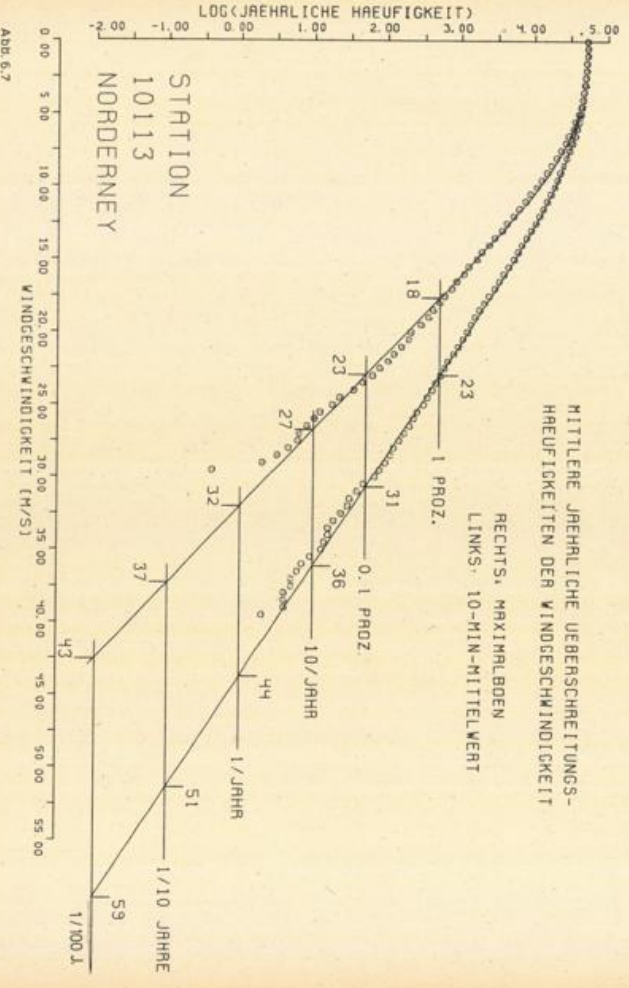
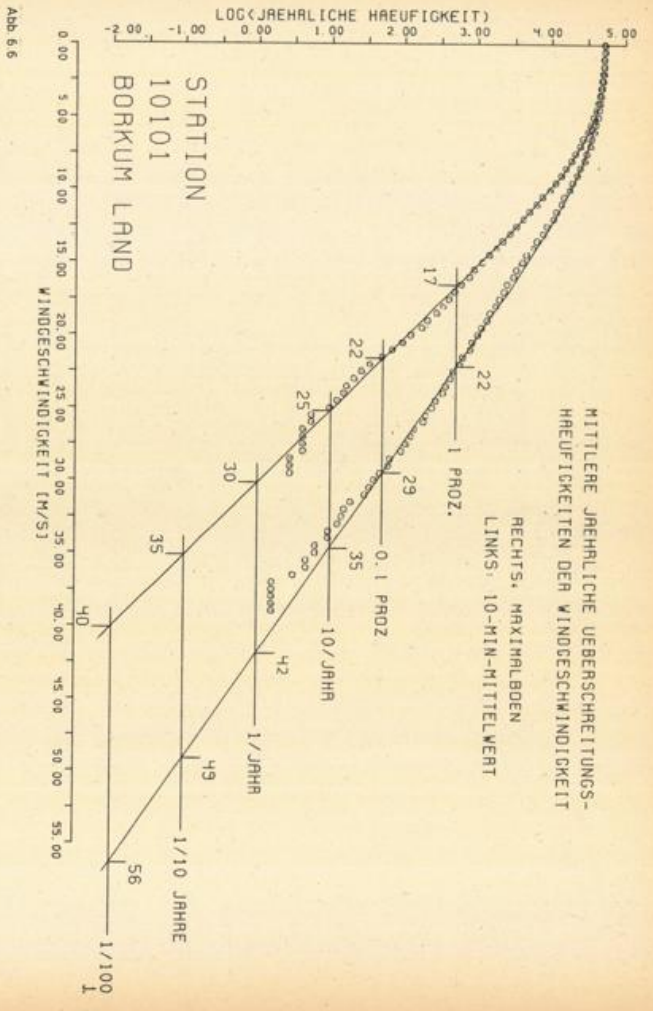


Abb. 6.5



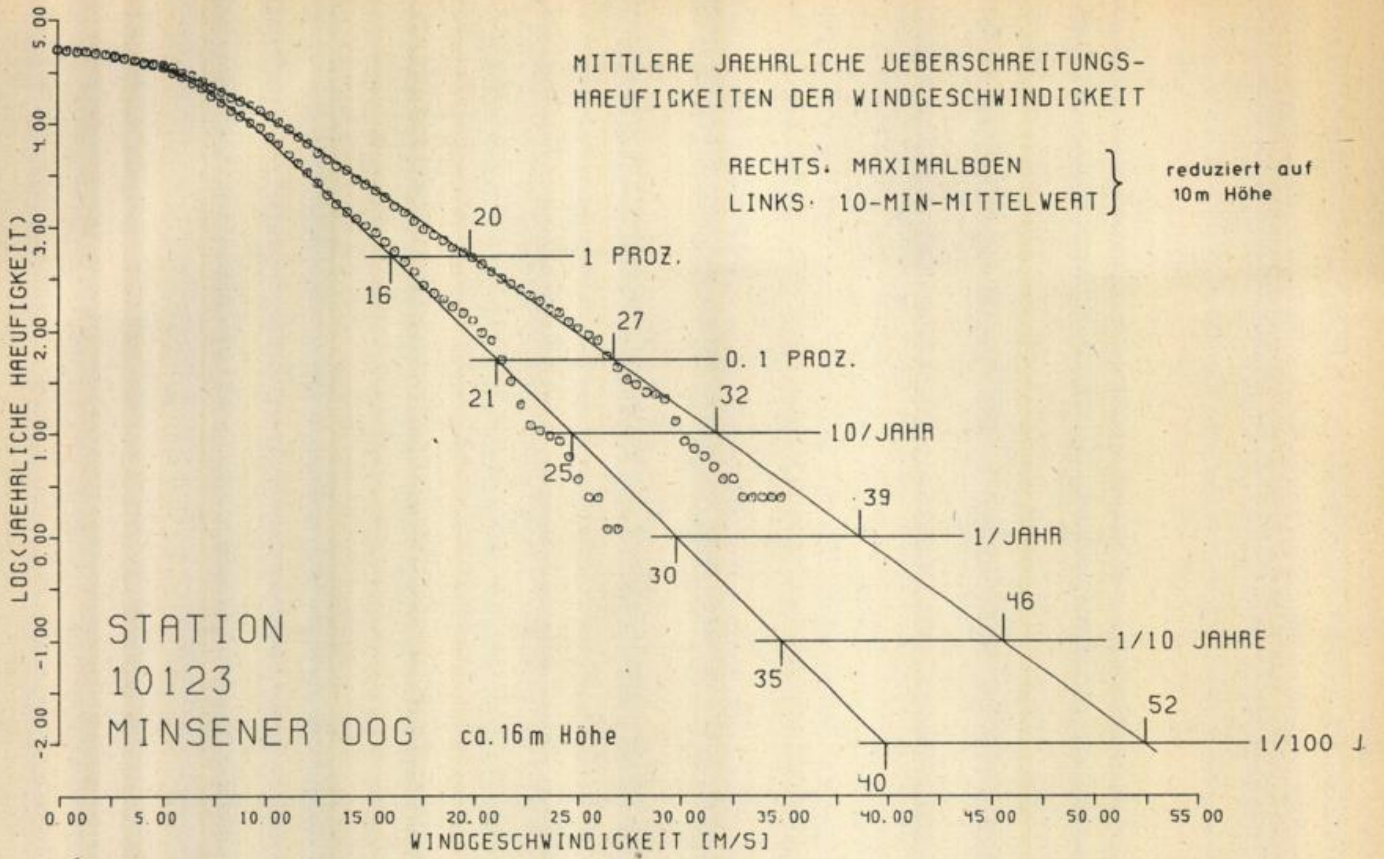


Abb. 6.8

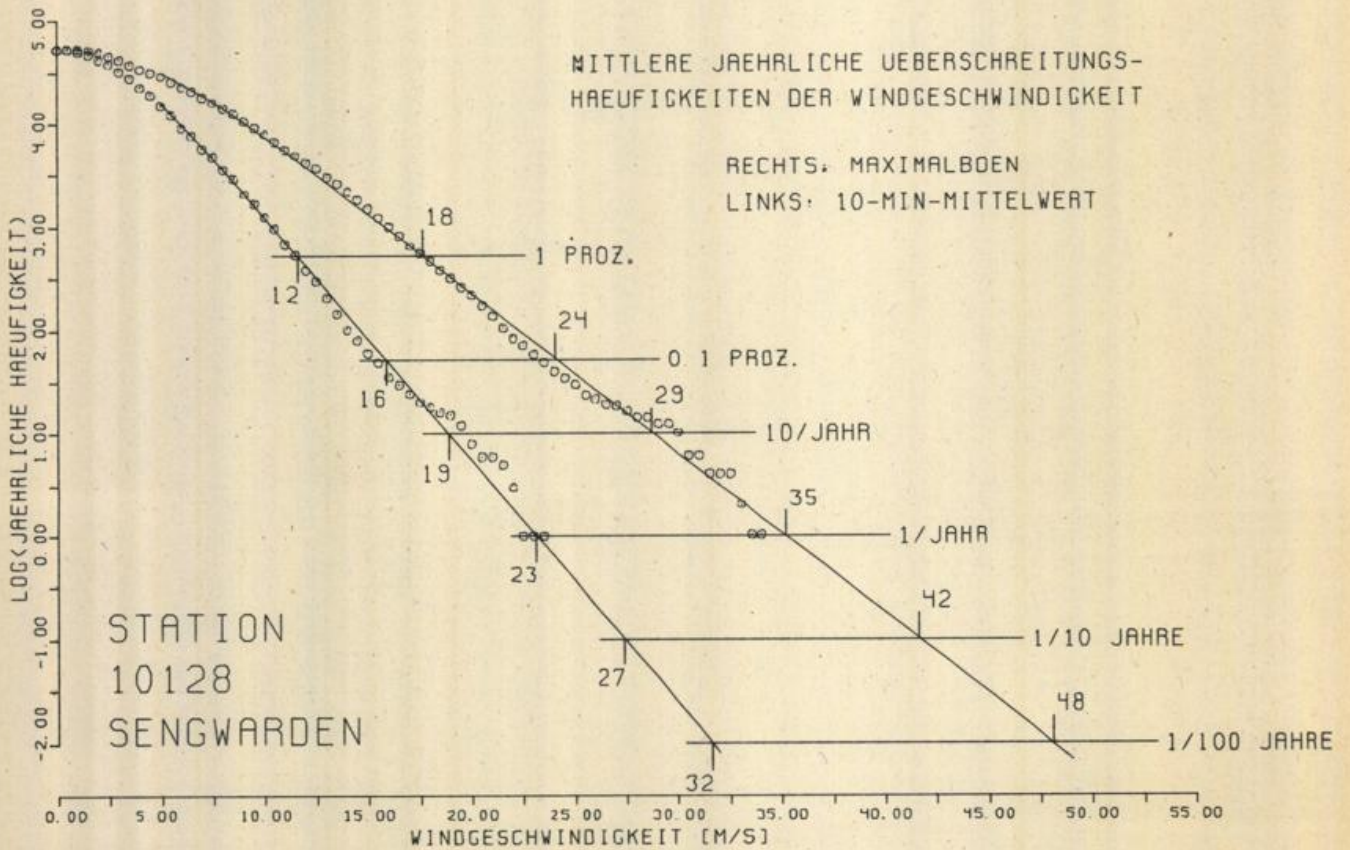
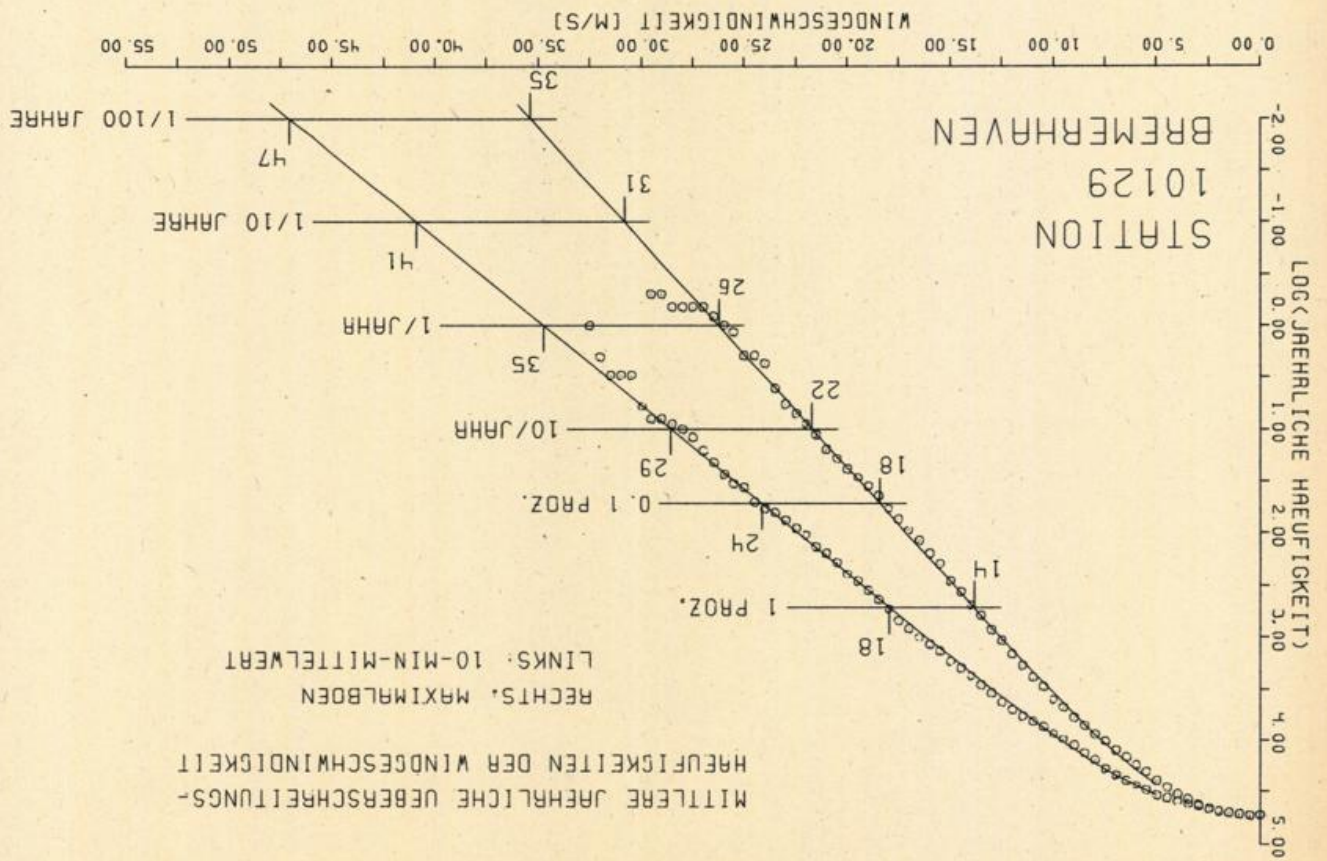
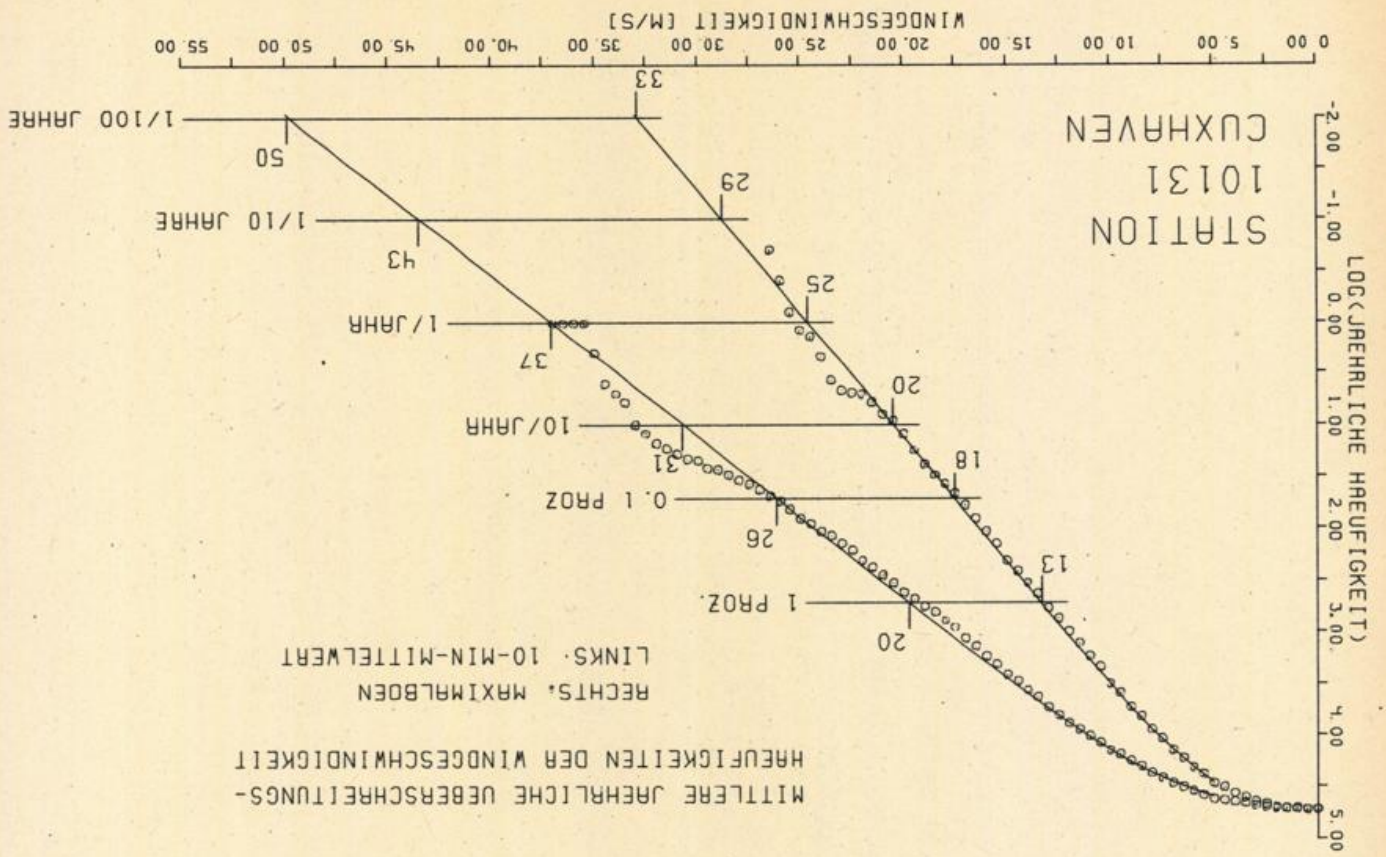


Abb. 6.9



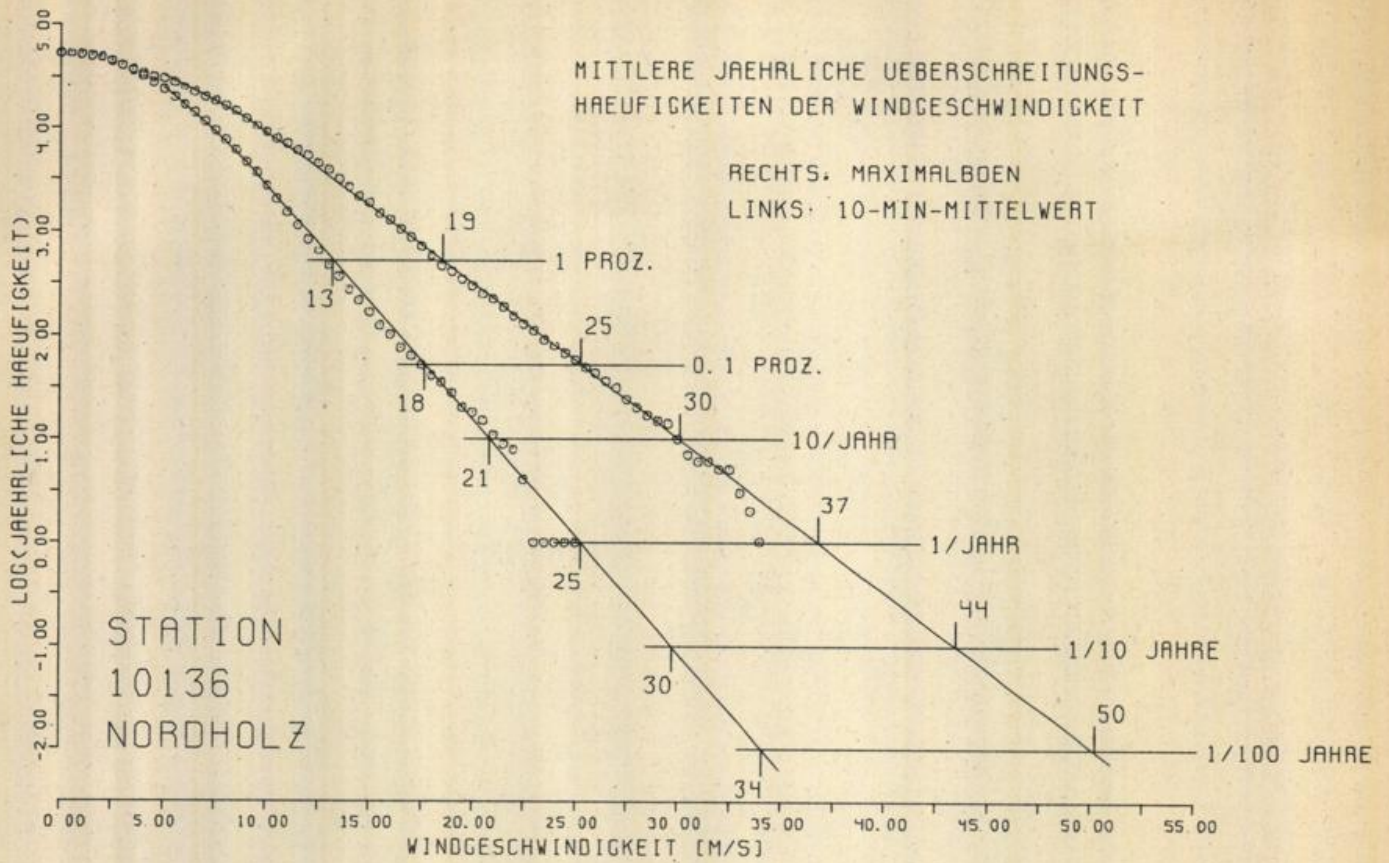


Abb. 6.12

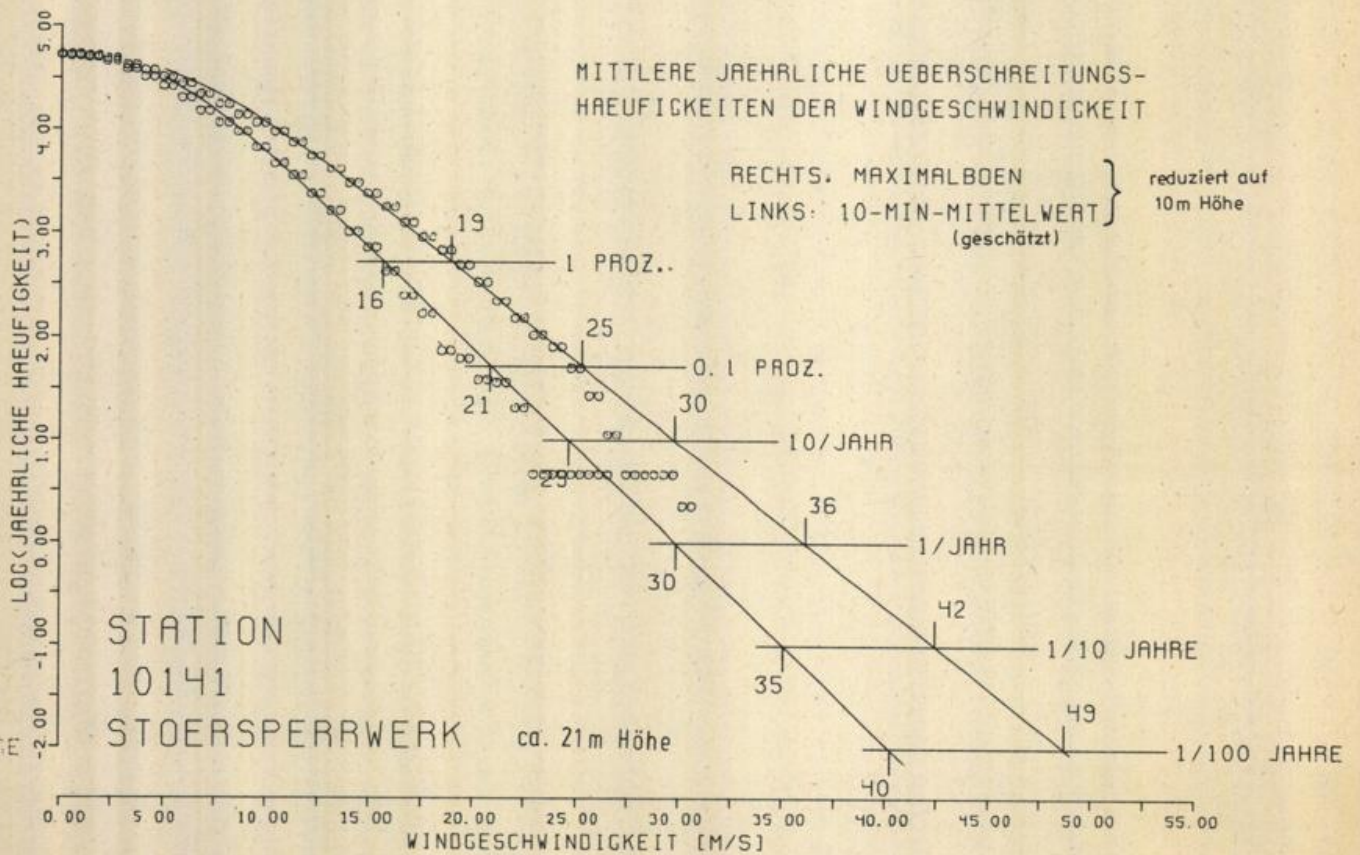


Abb. 6.13

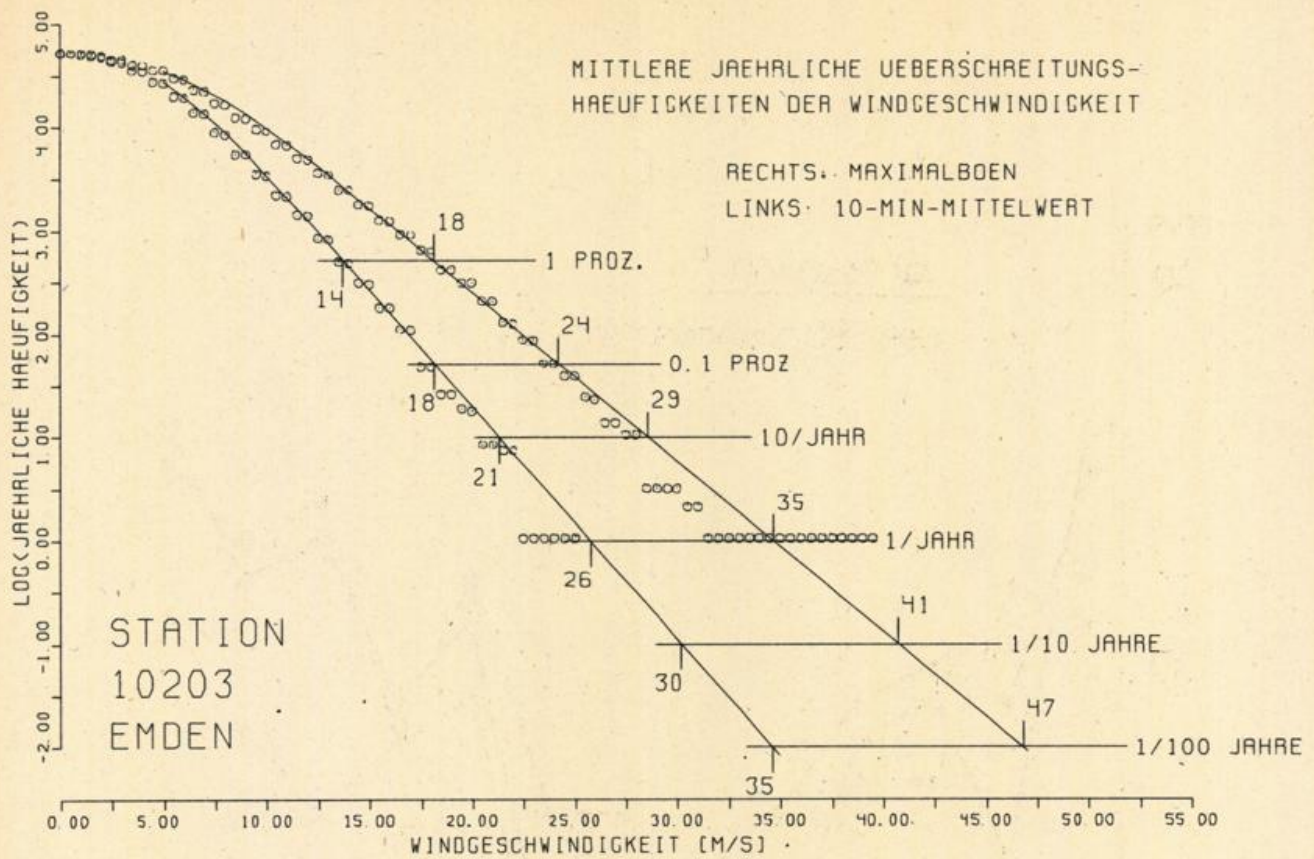


Abb. 6.14

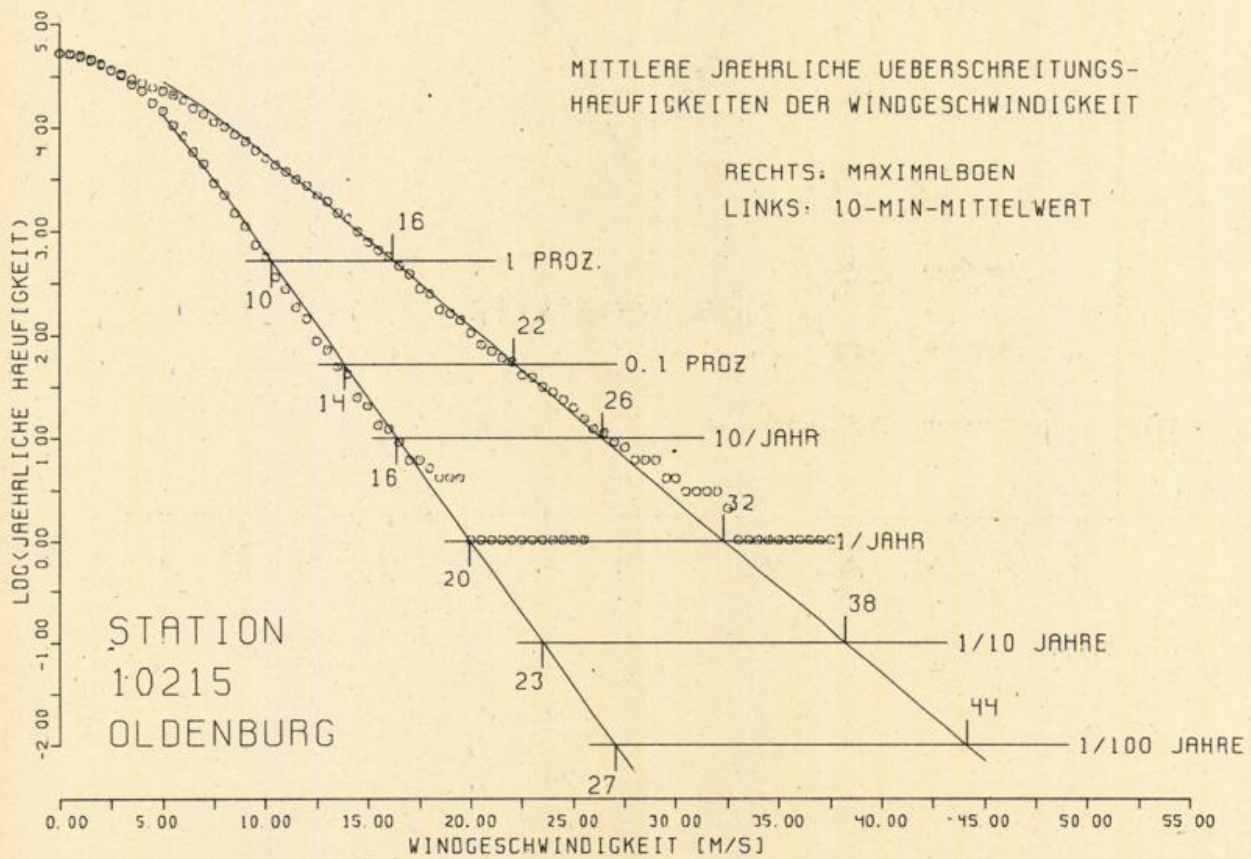
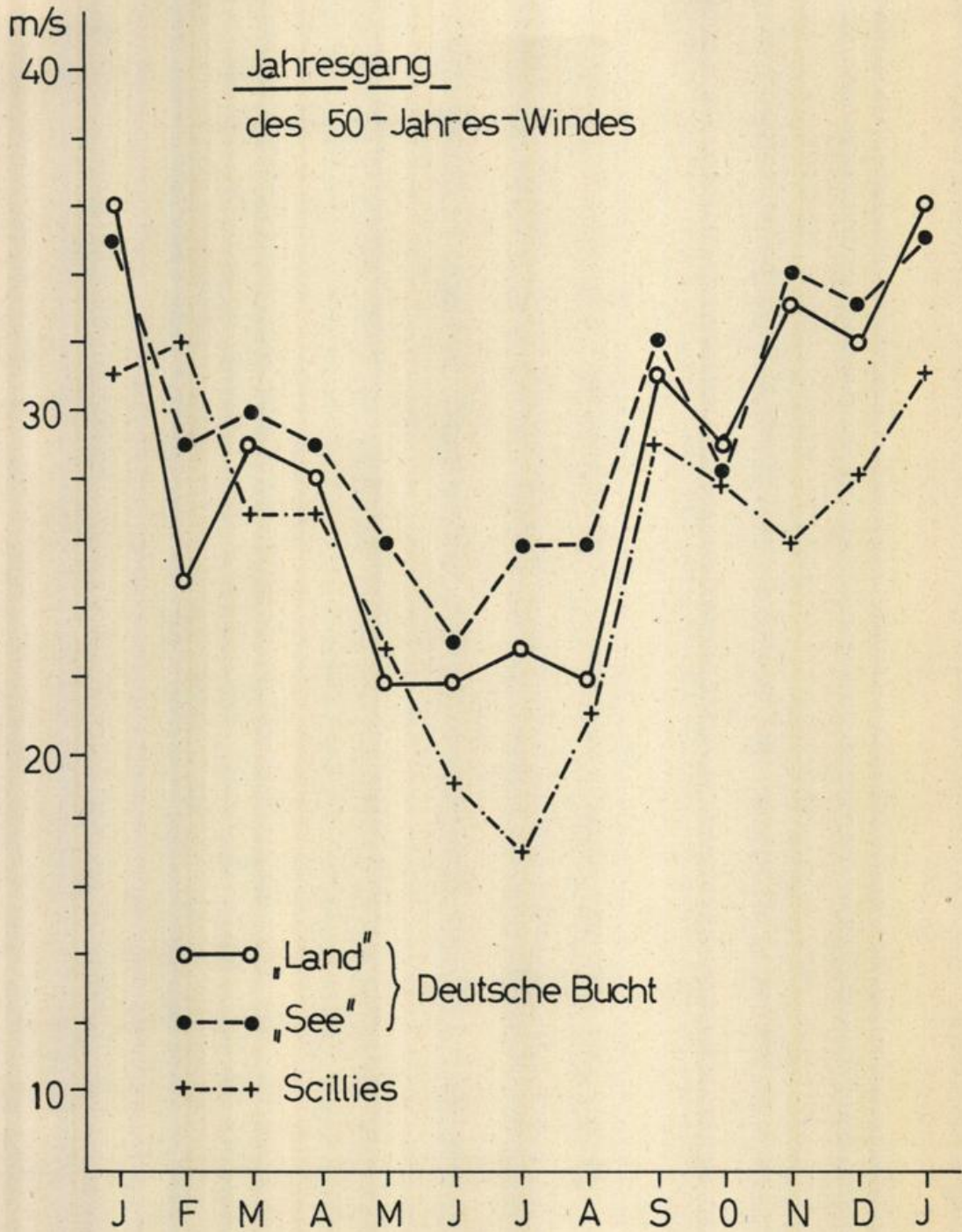


Abb 6.15



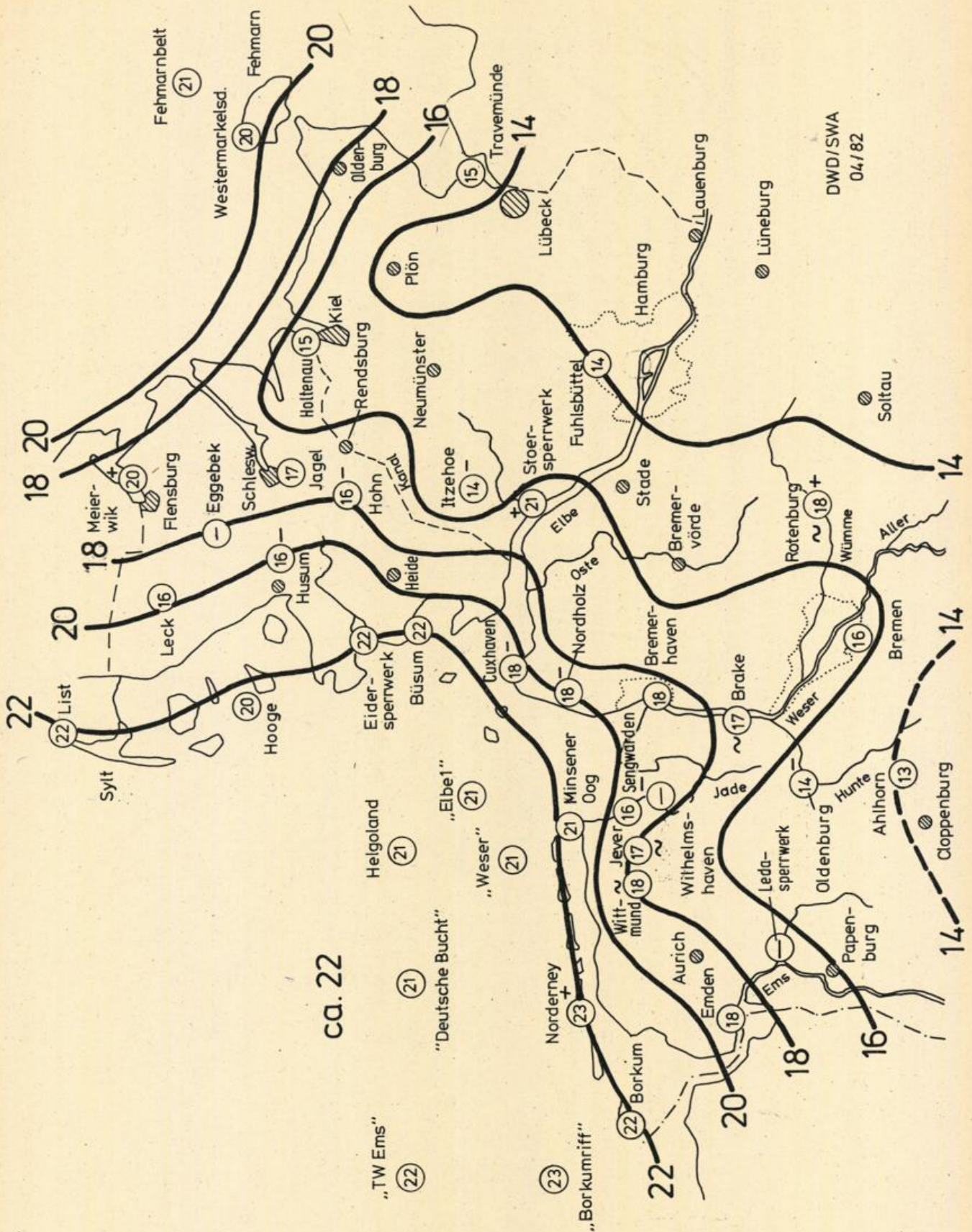


Abb. 6.17 Linien gleicher Schwellenwerte des Mittelwindes bei einer Überschreitungshäufigkeit von 0,1 Prozent

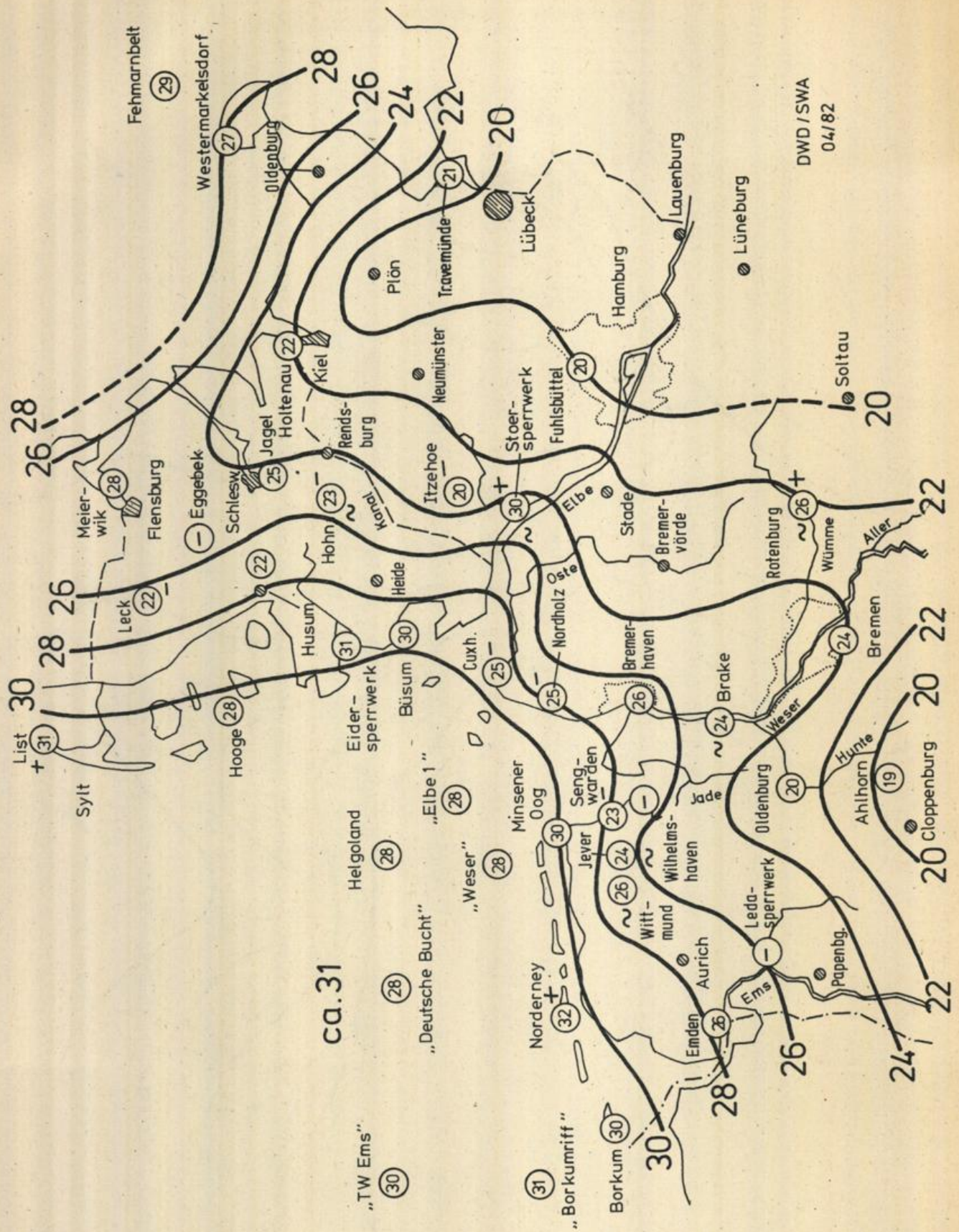


Abb. 6.18 Linien gleicher Schwellenwerte des Mittelwindes bei einer Überschreitungshäufigkeit von 1 pro Jahr

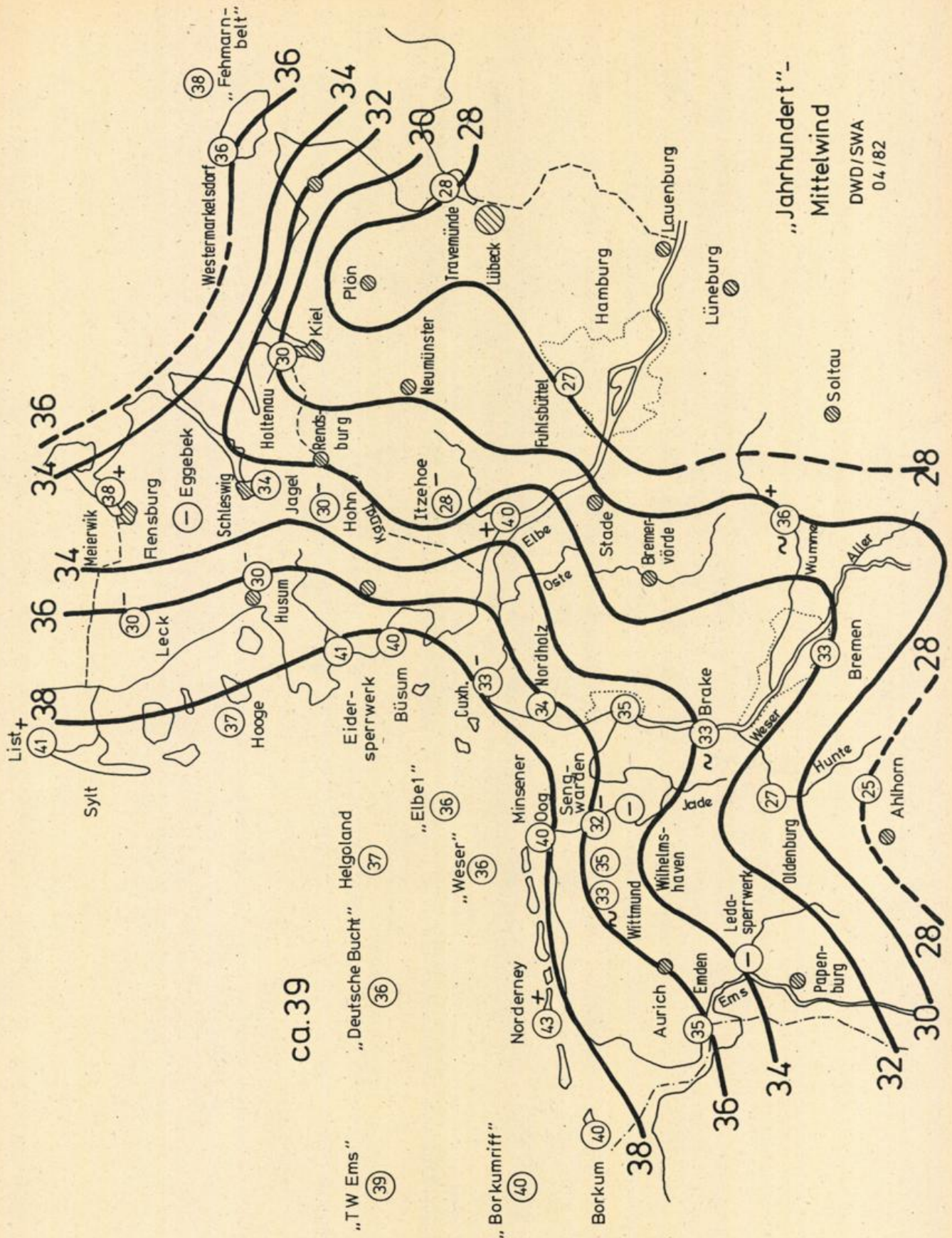


Abb.6.19 Linien gleicher Schwellenwerte des Mittelwindes bei einer Überschreitungshäufigkeit von 1 pro Jahrhundert

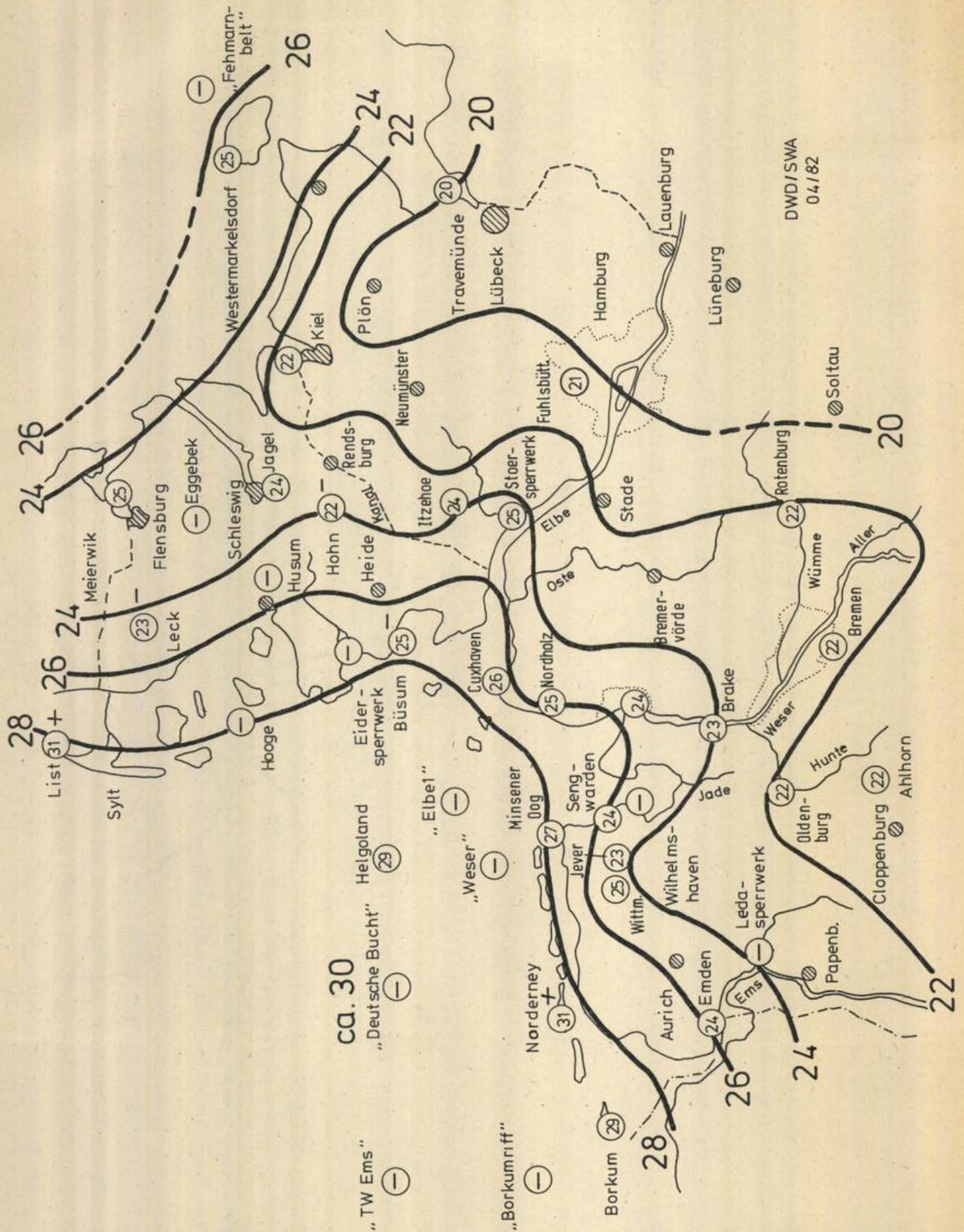
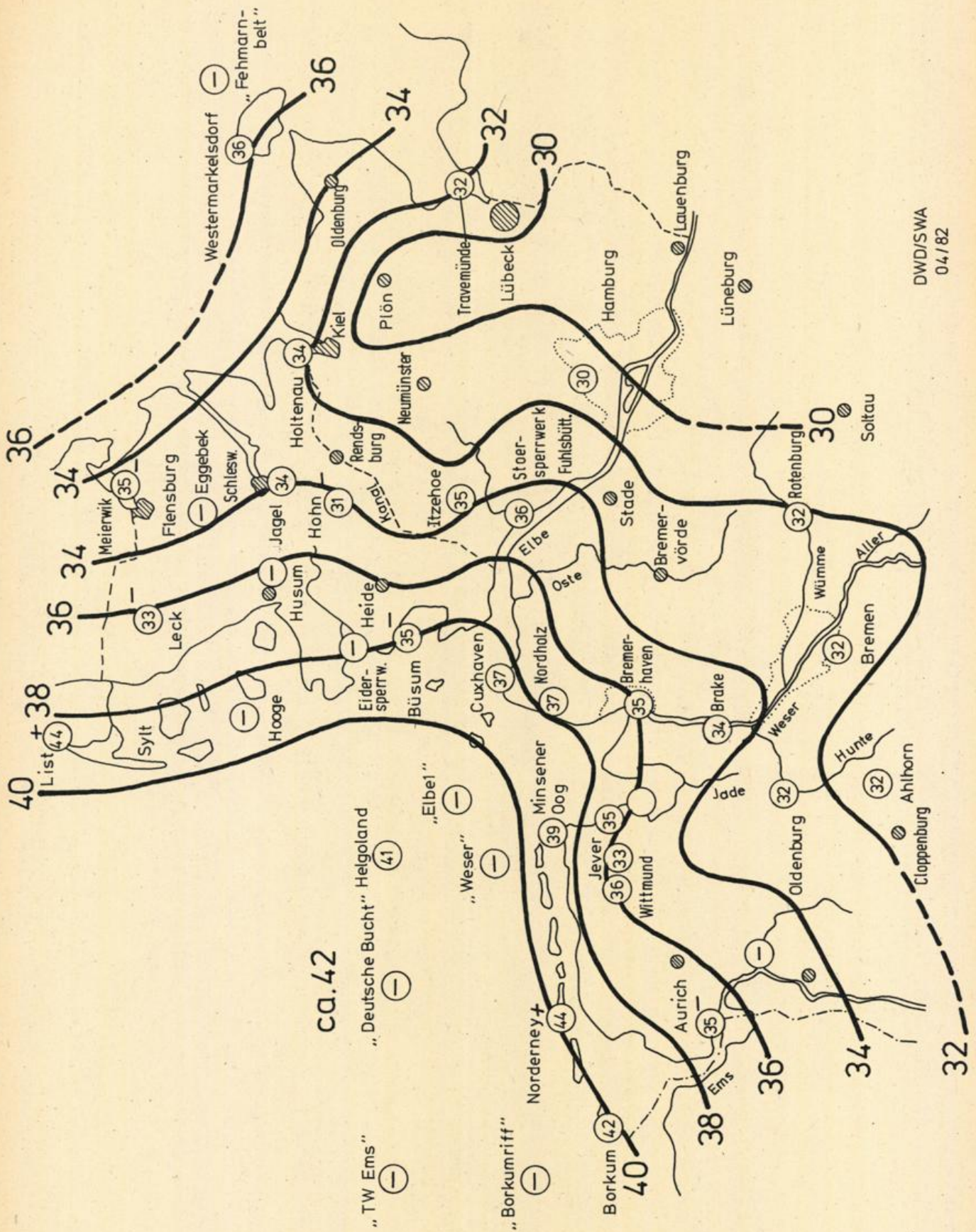
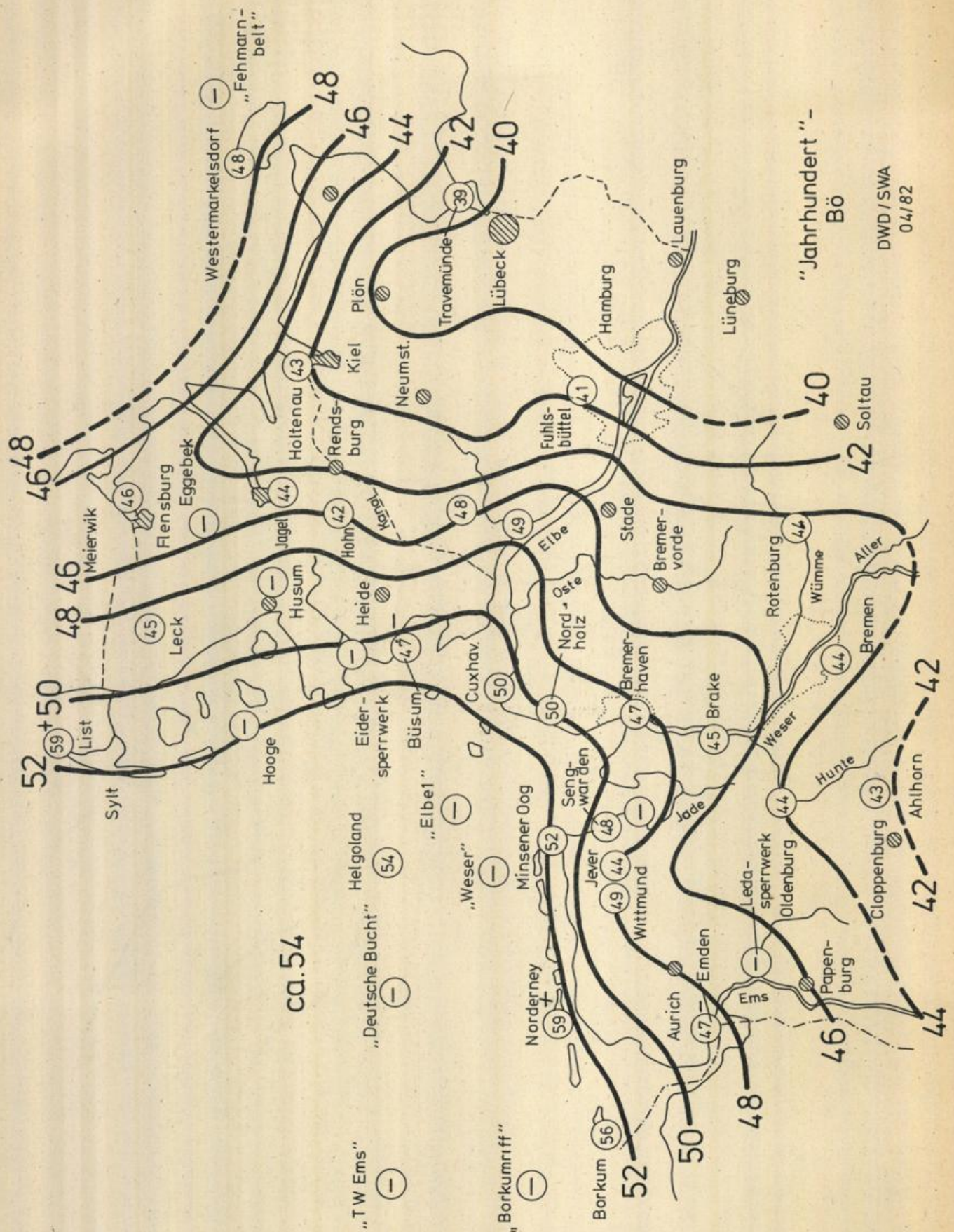


Abb. 6.20 Linien gleicher Schwellenwerte der Maximalböen bei einer Überschreitungshäufigkeit von 0,1 Prozent



DWD/SWA
04/82

Abb.6.21 Linien gleicher Schwellenwerte der Maximalböen bei einer Überschreitungshäufigkeit von 1 pro Jahr



"Jahrhundert"
Bö
DWD / SWA
04/82

Abb. 6.22 Linien gleicher Schwellenwerte der Maximalböen bei einer Überschreitungshäufigkeit von 1 pro Jahrhundert

