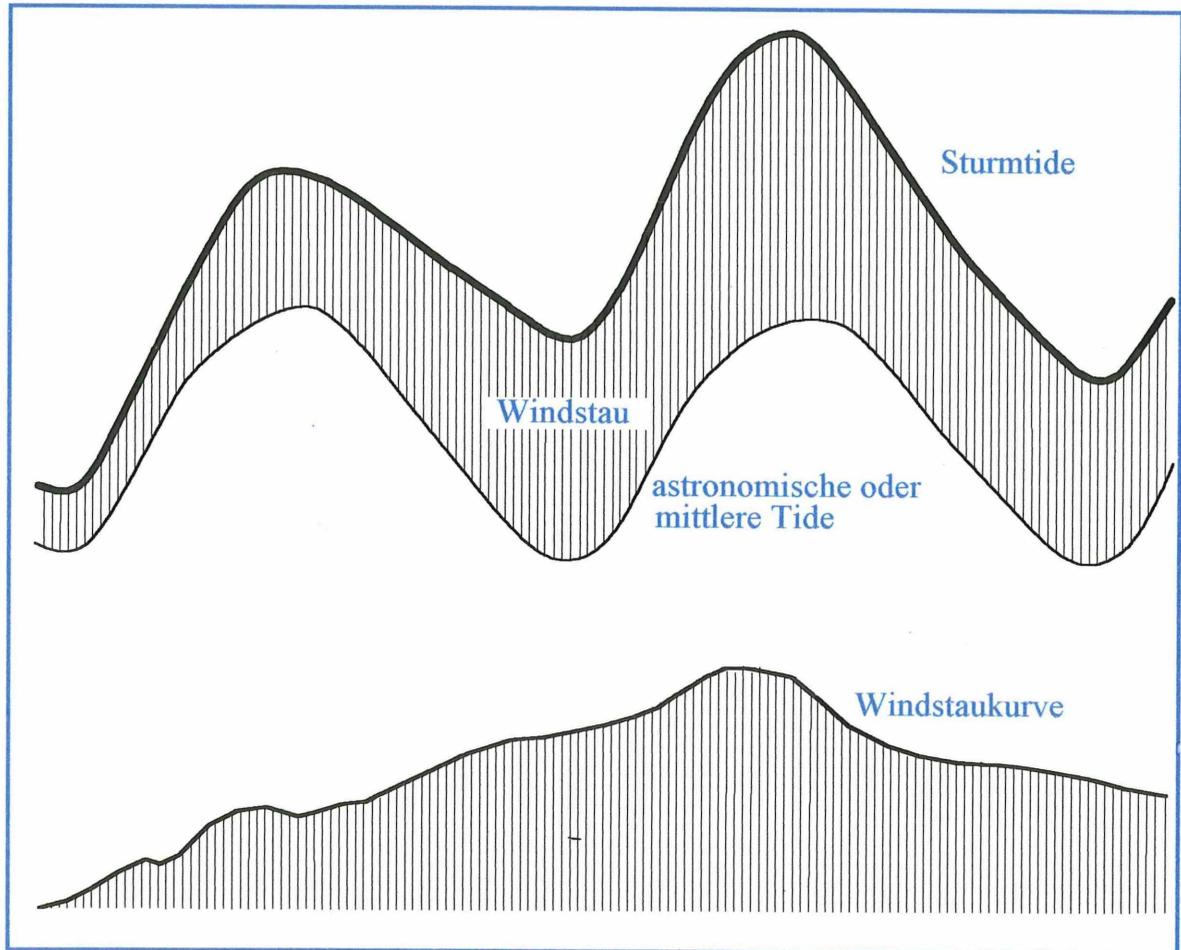


KFKI-Forschungsvorhaben
03KIS300

„Windstauanalysen in Nord- und Ostsee“



Dr. Gabriele Gönnert

Projektleitung: Prof. Dr. Winfried Siefert

in Zusammenarbeit mit
Strom- und Hafenbau Hamburg

Abschlußbericht März 1999

No 33239 dit

Projekt
KFW 1052

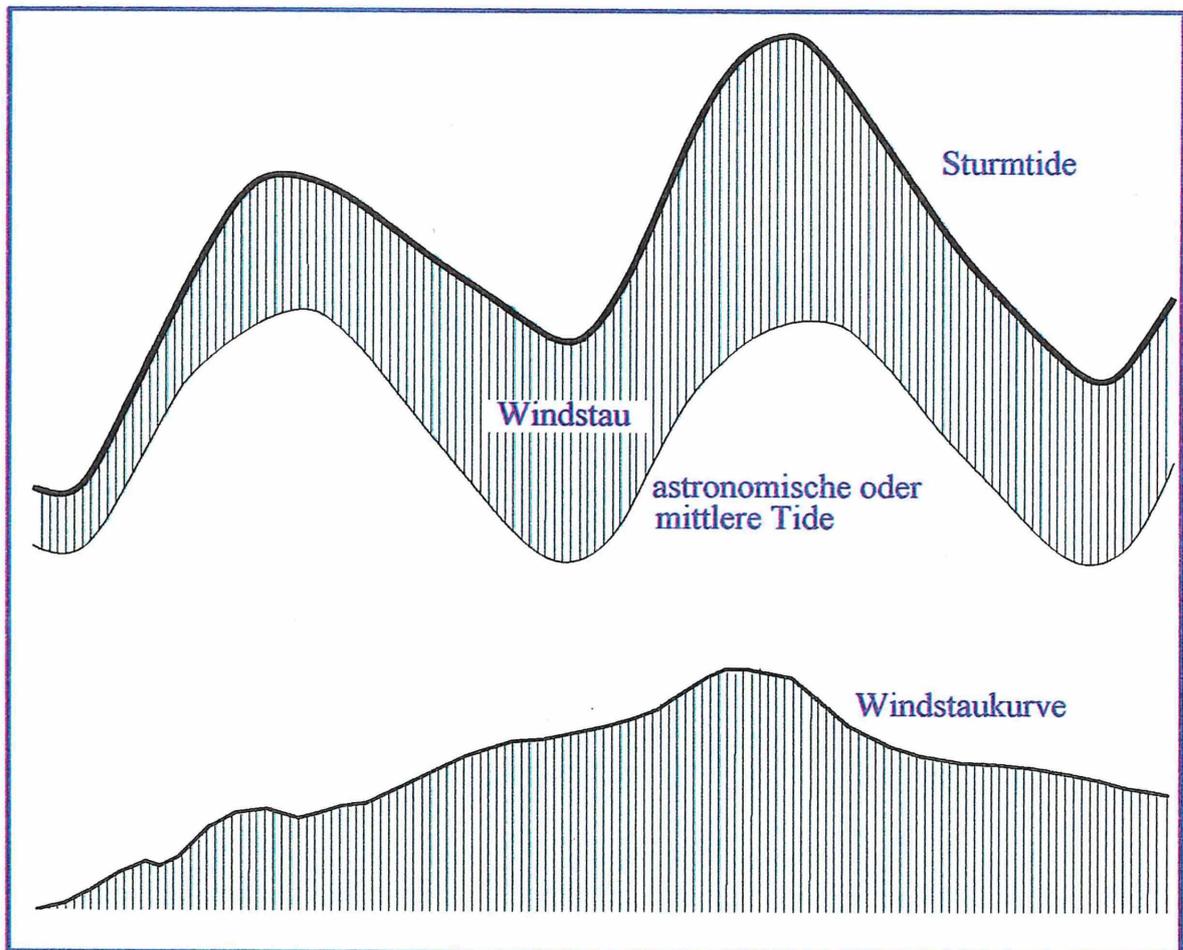
Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

^E
27. APR. 1999

^A
26. MAI 1999

KFKI-Forschungsvorhaben
03KIS300

„Windstauanalysen in Nord- und Ostsee“



Dr. Gabriele Gönert

Projektleitung: Prof. Dr. Winfried Siefert

in Zusammenarbeit mit
Strom- und Hafenbau Hamburg

No 33239

dit

Abschlußbericht März 1999

Dank

Sturmfluten haben Prof. Dr. Siefert während seiner gesamten wissenschaftlichen Laufbahn und beruflichen Tätigkeit beschäftigt. Ich durfte von dieser Erfahrung lernen, und es war mir gegeben, von ihm das Küsteningenieurwesen über Examens- und Doktorarbeit zu erlernen. Er holte mich nach Hamburg zu Strom- und Hafenaufbau, um an seinem wissenschaftlichen Herzstück, den Sturmfluten, zu arbeiten.

Einleuchtenden Erklärungen und präzise Fragen von Prof. Siefert prägten viele, so auch diese Arbeit. Als Vorgesetzten durfte ich nicht nur den Wissenschaftler, sondern auch den sich warmherzig um die Belange des Einzelnen kümmernden Chef erleben. Es entstand so eine persönliche Bindung. Prof. Dr. Siefert verstarb kurz nach Beendigung dieser Arbeit.

Es ist der Moment einen Dank auszusprechen. Doch klängen die Worte, die meinen Dank und innere Bewegung auch nur annähernd ausdrücken würden, übertrieben, jede andere Formulierung viel zu lapidar. Deshalb nur ein schlichter Dank an Dich, Winfried. Die Wege, auf denen Du mich begleitet hast, waren immer ein wenig leichter.

Das Entstehen einer solchen Arbeit erfolgt nie von einer Person allein. Bei Strom- und Hafenaufbau bin ich auf einen großen Fundus an persönlicher Erfahrung mit Sturmfluten und ihrer Vorhersage getroffen. Menschen, wie Peter Herbst und Walter Meyburg, die bei so mancher Sturmflut in Cuxhaven die Nächte der Vorhersage gewidmet haben und viel berichten konnten, sei gedankt. Peter Herbst engagierte sich darüber hinaus bei der Digitalisierung der Daten, Horst Lassen übernahm in einem separaten Teil die Aufbereitung der Sturmfluten an der Forschungsplattform Nordsee.

Ein ganz besonderer Dank geht an Sabine Komm und Hubert Kümke. Sie folgten stets dem Atem des Projektes und halfen, die Arbeit mit großem Einsatz zum erfolgreichen Ende zu führen.

Die Arbeit entstand im Rahmen eines Projektes, das durch das Kuratorium für Forschung und Technologie im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert wurde. Eine große Arbeitsgruppe mit Herrn Petersen, Prof. Dr. Kunz, Dr. Flügge, Dr. Renger, Herr Schaller, Herr Stigge, Prof. Dr. Jensen, Dr. Rudolph begleitete und unterstützte mit vielen Anregungen die Arbeit. Herrn Schmidt und Dr. Behrens vom Seewetteramt sei für die Berechnung der Winddaten gedankt.

Herr Ralf Annutsch hat von seinem ozeanographischen Standpunkt aus wertvolle Diskussionsbeiträge und Erkenntnisse geliefert. Ihm sei für die vielen Stunden, in denen wir gemeinsam Sturmfluten analysierten und Inhalte diskutierten, gedankt. Dr. Hermann Christiansen hatte bei administrativen Problemen stets ein offenes Ohr und unterstützte das Projekt mit Rat, Tat und Keksen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	6
1.1 Zielsetzung	7
2 Global Change und Greenhouse Effect	8
3 Definition von Sturmflut für die Deutschen Bucht	17
4 Der Einfluß der Astronomie	22
5 Fernwellen	24
5.1 Theoretische Voraussetzungen	24
5.1.1 Bisherige Untersuchungen.....	24
5.1.2 Hypothese zur Entstehung einer Fernwelle.....	25
5.2 Definition einer Fernwelle und Kollektivbildung	26
5.2.1 Die Datengrundlage.....	26
5.2.2 Kollektivbildung und Definition von Fernwellen.....	27
5.3 Ergebnisse	28
5.3.1 Die Fernwellenhöhe.....	28
5.3.2 Die Dauer der Fernwelle.....	33
5.3.3 Häufigkeit der Fernwellen pro Jahr und deren zeitliche Lage innerhalb des Jahres.....	33
5.3.4 Häufigkeit des Eintritts einer Fernwelle zum Zeitpunkt einer Sturmflut und ihr Einfluß auf die Sturmfluthöhe.....	34
5.3.5 Zeitdifferenz der Eintrittszeit der maximalen Höhen Aberdeen - Immingham - Cuxhaven.....	37
5.3.6 Lage und Höhe des Fernwellenpeaks zur Periode in Cuxhaven.....	38
6 Das Untersuchungsgebiet	40
6.1 Die Daten	41
6.2 Der Bezugshorizont	41
7 Arbeitsmethode	42
7.1 Die Dauer	42
7.2 Die Parametrisierung des Windstaus	42

7.2.1	Bestimmung der Windstauparameter.....	43
7.2.1.1	Bestimmung des Scheitelbereichs und der Scheiteldauer	43
7.2.1.2	Bestimmung der Anstiegs- und Abfallgradienten.....	45
8	Sturmfluthäufigkeit in der Nordsee	47
8.1	Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse in der Sturmflutforschung - ein Kollektivvergleich	47
8.2	Sturmflutscheitelhäufigkeit.....	48
8.3	Windstaukurvenhäufigkeit.....	51
9	Scheitelentwicklung von Sturmtiden in der Nordsee	55
9.1	Scheitelentwicklung der Sturmtiden	55
9.2	Entwicklung der maximalen Windstauhöhen	58
9.2.1	Lage des Windstaumaximums zur Periode	58
9.2.2	Nutzung der Windstau maxima für die Berechnung von Bemessungswasserständen.....	61
10	Charakterisierung der Sturmfluten bzw. Windstaukurven und deren Entwicklung	65
10.1	Die Charakterisierung in Cuxhaven.....	66
10.1.1	Beschreibung der Charakteristika der einzelnen Kategorien.....	66
10.1.2	Häufigkeiten der Kategorien in Cuxhaven.....	73
10.1.3	Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Sturmfluten und des Sturmflutklimas	74
10.2	Die Charakterisierung in Helgoland.....	76
10.2.1	Beschreibung der Charakteristika in Helgoland	76
10.2.2	Häufigkeiten der Kategorien in Helgoland	78
10.3	Die Charakterisierung in Norderney	88
10.3.1	Beschreibung der Charakteristika in Norderney	88
10.3.2	Häufigkeiten der Kategorien in Norderney.....	89
10.3.3	Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Sturmfluten und des Sturmflutklimas	89
10.4	Die Charakterisierung in Wittdün	99
10.4.1	Beschreibung der Charakteristika in Wittdün und Vergleich zwischen den Pegeln.....	99
10.4.2	Häufigkeiten der Kategorien in Wittdün.....	101
10.4.3	Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Sturmfluten und des Sturmflutklimas	101

10.5	Zusammenfassender Vergleich der Pegel	111
11	Die Windstauparameter in Cuxhaven	112
11.1	Korrelation der Windstauparameter	112
11.1.1	Anstiegsneigung zu Windstaumaximum	112
11.1.2	Scheiteldauer zu Windstaumaximum.....	113
11.1.3	Abfallneigung zu Windstaumaximum	114
11.1.4	Sonstige Korrelationen	115
11.2	Entwicklung der Parameter	115
11.2.1	Der Anstieg	115
11.2.2	Die Scheiteldauer	116
11.2.3	Die Windstauscheitelhöhe.....	117
11.2.4	Der Abfall	119
11.3	Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe	120
11.3.1	Auswirkung der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven.....	120
11.3.2	Auswirkung der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe in St.Pauli	120
11.4	Veränderung des Charakters der mittleren Windstaukurve in den letzten 100 Jahren in Cuxhaven	121
11.5	Die maximale Windstaukurve in Cuxhaven	122
11.6	Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Cuxhaven	123
11.7	Erkenntnisse für den Sturmflutschutz	124
12	Die Windstauparameter in Helgoland	125
12.1	Korrelation der Windstauparameter	125
12.1.1	Anstiegsneigung zu Windstaumaximum	125
12.1.2	Scheiteldauer zu Windstaumaximum.....	127
12.1.3	Abfallneigung zu Windstaumaximum.....	127
12.2	Entwicklung der Parameter	128
12.2.1	Der Anstieg	128
12.2.2	Die Scheiteldauer	129
12.2.3	Die Windstauscheitelhöhe.....	130
12.2.4	Der Abfall	132
12.3	Auswirkung der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe in Helgoland	133

12.4	Veränderung des Charakters der Windstaukurven in den letzten 60 Jahren in Helgoland	133
12.5	Die maximale Windstaukurve in Helgoland	134
12.6	Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Helgoland	136
13	Die Windstauparameter in Norderney	137
13.1	Korrelation der Windstauparameter	137
13.1.1	Anstiegsneigung zu Windstaumaximum	137
13.1.2	Scheiteldauer zu Windstaumaximum	138
13.1.3	Abfallneigung zu Windstaumaximum	139
13.2	Entwicklung der Parameter	140
13.2.1	Der Anstieg	140
13.2.2	Die Scheiteldauer	141
13.2.3	Die Windstauscheitelhöhe	141
13.2.4	Der Abfall	143
13.3	Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe	143
13.4	Veränderung des Charakters der Windstaukurven in den letzten 70 Jahren in Norderney	144
13.5	Die maximale Windstaukurve in Norderney	145
13.6	Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Norderney	146
14	Die Windstauparameter in Wittdün	147
14.1	Korrelation der Windstauparameter	147
14.1.1	Anstiegsneigung zu Windstaumaximum	148
14.1.2	Scheiteldauer zu Windstaumaximum	148
14.1.3	Abfallneigung zu Windstaumaximum	148
14.2	Entwicklung der Parameter	149
14.2.1	Der Anstieg	149
14.2.2	Die Scheiteldauer	150
14.2.3	Die Windstauscheitelhöhe	151
14.2.4	Der Abfall	153
14.3	Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe	153

14.4	Veränderung des Charakters der Windstaukurven in den letzten 90 Jahren in Wittdün	154
14.5	Die maximale Windstaukurve in Wittdün	155
14.6	Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Wittdün	156
15	Der regionale Vergleich zwischen den Pegeln	157
15.1	Die Windstaukurven um 1900 und 2000 im regionalen Vergleich	157
15.2	Die maximal mögliche Windstaukurve im Vergleich	161
16	Die Dauer des Windstaus	163
16.1	Die Dauer des Windstaus in Cuxhaven	163
16.2	Die Dauer des Windstaus in Helgoland	164
16.3	Die Dauer des Windstaus in Norderney	165
16.4	Die Dauer des Windstaus in Wittdün	166
16.5	Die Dauer des Windstaus in Cuxhaven, Helgoland, Norderney und Wittdün im Vergleich	167
17	Die Veränderung der sturmfluterzeugenden Winde und deren Dauer	169
17.1	Entscheidende Windrichtung zum Erreichen des höchsten Sturmflutscheitels und des höchsten Windstauscheitels	172
17.1.1	Stauwirksame Windrichtung zum Erreichen eines Sturmflutscheitels in Cuxhaven	172
17.1.2	Stauwirksame Windrichtung zum Erreichen eines Sturmflutscheitels in Helgoland	173
17.1.3	Stauwirksame Windrichtung zum Erreichen eines Sturmflutscheitels in Norderney	174
18	Zusammenfassung	176
19	Kurzzusammenfassung	182
20	Literatur	184
21	Verzeichnis der Abbildungen	190
22	Verzeichnis der Tabellen	194
	Anhang	1 - 62

1 Einleitung

Das ausklingende 20. Jahrhundert ist in den Industriestaaten gekennzeichnet durch die Hochtechnisierung der Industrie - und damit verbunden - den Wechsel der menschlichen Arbeit weg vom produzierenden Gewerbe hin zum Dienstleistungssektor. In dem Prozeß von der vorindustriellen Zeit des ausklingenden 19. Jahrhunderts hin zu hochentwickelten Industrien gab und gibt es einen globalen sozioökonomischen Wandel, der Spuren auf allen Ebenen hinterläßt. Soziale, wirtschaftliche und ökologische Folgen sind hier nur einfache Stichworte, hinter denen allgemeine und individuelle Veränderungen und Schicksale stehen. Es ist ein Prozeß, der zur Zeit in seinem gesellschaftlichen Wandel an einer Schwelle steht, die vergleichbar ist mit dem Wechsel von der Agrargesellschaft zur Industriegesellschaft. Zeiten des Wechsels sind Zeiten, in denen der Blick zurückgeht und Resümee gezogen wird und, daraus sich ergebend, der Blick nach vorn gerichtet wird mit den Schlußfolgerungen aus Erkenntnissen der Vergangenheit.

Einer dieser Blicke gilt dem Wandel des Klimas und damit der Frage, ob der Emissionsausstoß bereits zur Erwärmung geführt hat oder nicht. Im Zuge dieser Diskussionen sind in den letzten Jahren im verstärkten Maße auch die Sturmfluten im Nordseeküstengebiet in den Mittelpunkt des wissenschaftlichen wie des öffentlichen Interesses gerückt. Verstärkt wird das Interesse am Thema Sturmfluten durch den subjektiv geprägten Eindruck des einzelnen Beobachters, daß die Sturmfluten häufiger auftreten und höher werden. Hieraus ergibt sich die von einigen Teilen der Öffentlichkeit vorgebrachte Sorge um die Gewährleistung des Hochwasserschutzes.

Die vorliegende Untersuchung stellt einen kleinen Ausschnittes des großen Blickes zurück dar, indem die Frage der Veränderung der Sturmfluten hinsichtlich Höhe, Häufigkeit und Dauer beantwortet werden soll. In dem Blick nach vorn soll aus den gewonnenen Erkenntnissen dem wissenschaftlichen und öffentlichen Interesse ein Hinweis gegeben werden, wie sich die Sturmfluten verändern können und einem Grenzwert in der Höhe zustreben.

1.1 Zielsetzung

Der Komplex „Sturmflutklima“ ist als Grundlagenforschung dem Bereich „Klimawirkungsforschung“ zuzuordnen. Die Analyse von Änderungen des Sturmflutklimas und deren Ursachen dient als Grundlage für weiterführende Forschungen, wie Berechnung von sicheren Deichhöhen und Risikoabschätzung der Küstensicherheit. Untersucht wird exemplarisch für die südliche Nordsee die Deutsche Bucht am Beispiel der Pegel Helgoland, Norderney, Cuxhaven und Wittdün.

Folgende Ziele des Forschungsvorhabens sind zu formulieren:

- Die Erfassung signifikanter Änderungen im Sturmflutklima (Höhe, Häufigkeit, Dauer) im Laufe dieses Jahrhunderts.
- Die Analyse der Auswirkungen einzelner Klimakomponenten auf den Sturmflutverlauf - insbesondere auf die Höhe - und damit die Analyse der Folge der Veränderung einzelner Sturmflutwetterkomponenten aufgrund etwaiger Klimaänderungen.
- Die Analyse des Einflusses von Fernwellen auf die Sturmfluthöhe.

Grundsätzlich wird in diesem Forschungsvorhaben nicht vorrangig die Scheitelentwicklung der Sturmtide analysiert, sondern vielmehr der gesamte Sturmflutverlauf. Dieser spiegelt sich im Windstau wider, mit dem die Veränderung der auf das Wasser einwirkenden Kräfte erfaßt wird.

Der Windstau in der Deutschen Bucht ist zu definieren als Differenz zwischen der mittleren Tide und der Sturmtide. Er wird somit in erster Linie durch den Windeinfluß repräsentiert, enthält aber daneben auch die Faktoren statischer Luftdruck, zeitliche Änderung des Luftdrucks, Wassertemperatur und Temperaturdifferenz Luft-Wasser. Weiterhin sind im Windstau durch die Definition über die mittlere Tide auch astronomische Anteile enthalten. Demzufolge müssen der Luftdruck - vor allem dessen Auswirkungen auf die sogenannten Fernwellen - und der astronomische Anteil im Windstau analysiert werden. Die Fernwellen werden hinsichtlich der Faktoren Dauer, Periode und Häufigkeit untersucht. Der astronomische Einfluß auf die Sturmtiden wird über die Differenz der astronomischen Tide zur mittleren Tide jeder Sturmtide berücksichtigt.

Neben der Erfassung des Sturmflutklimas über die Analyse des Windstaus und seiner einzelnen Komponenten wird der Einflußfaktor Wind unmittelbar analysiert. Hierzu wird für den Bereich der Nordsee der Bodenwind des geostrophischen Windes berechnet.

2 Global Change und Greenhouse Effect

Die Thematik Sturmflutveränderung steht im engen Zusammenhang mit der Diskussion um die Klimaerwärmung. Infolgedessen soll in einem übergeordneten Kapitel die Thematik Global Change und Greenhouse Effect erläutert werden.

Die Begriffe Global Change und Greenhouse Effect werden häufig eng im Sinne der anthropogen verursachten Erwärmung der Erde und Klimaänderung genutzt. Tatsächlich ist die prognostizierte Erwärmung der Erde zurückzuführen auf den Greenhouse Effect. Dieser ist jedoch nicht ausschließlich ein Phänomen der heutigen, im speziellen der nachindustriellen Zeit, sondern vielmehr ein natürliches, das Leben auf der Erde erhaltenes Phänomen der Erde.

Bereits bei der Entstehung des Planeten Erde bildeten Wasserdampf und Kohlendioxid sowie Methan eine Hülle um die Erde, die entstanden ist aus der inneren Hitze des Planeten und der Vulkantätigkeit. Dadurch stieg „(...) in den unteren Atmosphärenschichten (...) die Temperatur wesentlich über jene, die allein aufgrund des Abstandes zur Sonne zu erwarten gewesen wäre: Wasserdampf und Kohlendioxid, die wichtigsten Treibhausgase, hielten wie die Scheiben eines Glashauses, die Wärmestrahlung der Erdoberfläche gefangen und ließen nur einen Teil in das All entweichen“ (GRAßL und KLINGHOLZ, 1990:27).

Die natürlichen Treibhausgase bewirken, daß das Klima weitestgehend konstant bleibt und auf der Erde eine Durchschnittstemperatur von plus 15 ° C statt minus 15 ° C herrscht, indem sie das wärmende Sonnenlicht zur Erde durchdringen lassen, andererseits aber verhindern, daß die Wärmestrahlung vollständig in das Weltall entweichen kann. Die auf der Erde ausgeglichene Strahlungsbilanz, setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen (nach GRAßL und KLINGHOLZ, 1990:31). Auf die Erde trifft pro Quadratmeter Erdoberfläche eine Leistung von 343 Watt. Davon reflektieren 30 % die Wolken, die helle Erdoberfläche und die Luftmoleküle. Dagegen absorbieren 49 % der Sonnenstrahlung die Erdoberfläche und 30% die Atmosphäre. Diese Energie erwärmt zum einen die Erde, zum anderen läßt sie Wasser aus den Ozeanen verdampfen. Die Erde strahlt die aufgenommene Wärmeenergie wieder vollständig ab, allerdings verzögert, da ein Teil über die Wolken und die Treibhausgase zurückgehalten werden. Insgesamt befindet sich die Erde also in einem Strahlungsgleichgewicht. Ändern kann es sich nur über große Zeiträume, indem entweder mehr Sonnenstrahlung absorbiert wird, so daß die Erde wärmer wird oder aber sie reflektiert mehr Wärme und wird damit kälter. Es muß sich aber auch dann wieder ein neues Gleichgewicht einstellen.

Demzufolge ist, war und wird das Klimasystem wie alle komplexeren Systeme auch ohne anthropogene Eingriffe Variabilität zeigen, „die je nach dominanter Zeitskala der wechselwirkenden Teile Klimaschwankungen verursacht. Es ist dann nur eine Frage des zur Mittelung gewählten Zeitintervalls, ob die Variabilität Klimaschwankung genannt wird“ (GRAßL, 1993:31).

Der Greenhouse Effect

Ebenso wie jeder andere Körper mit einer Temperatur über minus 237 ° C, gibt auch die Erde permanent Wärmestrahlung ab. Während die sichtbare Sonnenenergie auf die Erde als kurzwellige Strahlung trifft und damit durch die Atmosphäre auf die Erde dringt, bleibt die auf der Erde in langwellige Wärmestrahlung umgewandelte Strahlung meist an den Treibhausgas-Molekülen hängen.

Am Beispiel des Treibhausgas-Moleküls Kohlendioxid sei die „Arbeitsweise“ des Treibhausgases erläutert. Trifft die Wärmestrahlung auf ein Kohlendioxid, beginnen die Sauerstoffatome an den Seiten des Kohlenstoffes zu rotieren und bringen das Kohlenstoffatom zum Schwingen. Auf diese Weise absorbiert das Kohlenstoffatom die Wärmestrahlung und heizt die Atmosphäre auf. Ein Teil der Energie, die von den Kohlendioxidmolekülen in alle Richtungen abgegeben wird, wird zurück zur Erde geschickt.

Die anderen Treibhausgase vor allem Wasserdampf, Ozon, Lachgas, Methan und das anthropogen verursachte Fluorchlorkohlenwasserstoff haben eine ähnliche Wirkungsweise, so daß nur 16% der Wärmestrahlung direkt ins All abgegeben werden, der Rest erfolgt über die Atmosphäre. Auf diese Weise entsteht eine Bilanz, die besagt, daß von den 237 W/m Sonnenenergie, die auf die Erde treffen 390 W/m als Wärmestrahlung in die Atmosphäre zurückgeschickt werden. Ins Weltall entweichen aber nur die „gleichgewichtigen“ 237 W/m. Die restlichen 153 W/m werden immer wieder von der Erde abgegeben, verbleiben aber aufgrund der Treibhausgase als Restbilanz letztendlich auf der Erde. Auf diese Weise wirken die Treibhausgase wie eine Scheibe eines Treibhauses. Ändert sich die Konzentration dieser Gase, so entweicht mehr oder weniger Wärme von der Erde oder aus dem Treibhaus, und es wird wärmer oder kälter auf der Erde.

Die Treibhausgase

Treibhausgase sind Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Ozon, Distickstoffoxid. Sie nehmen an der Zusammensetzung der Luft einen sehr geringen Anteil ein. Die trockene Luft - trocken wegen des sehr variablen Anteils an Wasserdampf in der Luft - besteht zu 78,08 % aus Stickstoff, zu 20,95 % aus Sauerstoff und zu 0,93 % aus dem Edelgas Argon (GRABL und KLINGHOLZ, 1990:38), die alle keinen nennenswerten Anteil am Wärmehaushalt der Erde haben. Die dafür notwendige Funktion, Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung zu absorbieren, fehlt diesen Bestandteilen.

Zum Wärmehaushalt trägt dagegen - wie bereits erwähnt - als wichtigstes Treibhausgas Wasserdampf bei, das je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit in seinem Volumenanteil in der Luft stark von einigen Millionstel in der Stratosphäre (Atmosphärenschicht etwa 50 km über der Erde), über ein Tausendstel über der Polarregion bis zu drei Hundertstel in den Tropen nahe der Erdoberfläche variiert (GRABL und KLINGHOLZ, 1990:37f.).

Das Kohlendioxid als eines der wichtigsten Gase in der Luft hat nur noch einen Anteil von 0,035 % in der Luft, ist aber neben Wasserstoff eines der wichtigsten Treibhausgase. Alle Treibhausgase zusammen nehmen insgesamt nur einen Volumenanteil von 3 % in der Luft ein.

Viele der Treibhausgase haben eine lange Halbwertszeit. Eine zusätzliche anthropogene Anhäufung der Treibhausgase in der Atmosphäre wird demzufolge nur über sehr lange Zeiträume abgebaut.

In Tab. 2-1 ist der Anstieg der Treibhausgase aufgrund von anthropogenen Aktivitäten dargestellt. Ihre Interpretation erfolgt in Anlehnung an IPCC (1995:15). Recht deutlich ist ein Anstieg der CO₂ - Konzentration zu verzeichnen von 280 ppmv in der vorindustriellen Phase auf 358 ppmv 1994. Dieser Anstieg ist in Verbindung mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe, aber auch mit der Umwandlung von Fläche zur Landnutzung zu sehen.

Auch Methan wächst aufgrund anthropogener Aktivitäten wie Reisanbau, Großviehhaltung, Biomassenverbrennung, Erdgasleckung sowie den Verbrauch fossiler Brennstoffe. Seit der

Industrialisierung stieg die globale durchschnittliche Methankonzentration bis 1994 um 145 %, um 6 % über ein Jahrzehnt seit 1984 an.

	CO ₂ Kohlendioxid	CH ₄ Methan	N ₂ O Stickstoff	CFC-1	HCFC-22 (CFC- vertreter)	CFC ₄ (perfluoro- carbon)
Vorindustrielle Konzentration	280 ppmv	~ 700 ppbv	~ 275 ppbv	0	0	0
Konzentration 1994	358 ppmv	1720 ppbv	312* ppbv	268* pptv [§]	110 pptv	72* pptv
Rate der Kon- zentrations- änderung	1,5 ppmv/yr 0.4%/yr	10 ppbv/yr 0.6%/yr	0.8 ppbv/yr 0.25%/yr	0 pptv/yr 0%	5 pptv/yr 5%/yr	1.2 pptv/yr 2%/yr
Verweilzeit	50-200 ^{§§}	12 ^{§§§}	120	50	12	50.000

Die Wachstumsraten von CO₂, CH₄ und N₂O sind der Durchschnitt über die Dekade beginnend mit den Jahren ab 1984; die Wachstumsrate von Halocarbon basiert auf den 90iger Jahren.

* = geschätzt auf Grundlage der Daten von 1992-93

§ = 1 pptv = 1 part per trillion (million million) per volume

§§ = Eine einzelne Verweilzeit läßt sich nicht für CO₂ bestimmen aufgrund der unterschiedlichen Aufnahme- und Sinkprozessen.

§§§ = Diese wird definiert als eine Anpassungszeit, die die indirekten Effekte von Methan auf seine eigene Verweilzeit berücksichtigt.

CFC = Chlor

Tab. 2-1: Zusammenstellung von Treibhausgasen verstärkt durch menschliche Aktivitäten (aus: IPCC, 1995:15)

N₂O (Distickstoffoxid, Lachgas) hat eine relativ geringe Anstiegsrate. Allerdings ist die Verweilzeit in der Atmosphäre sehr hoch. Verursacher von Lachgas sind vor allem Stickstoffüberdüngung in der Landwirtschaft und eine Reihe industrieller Prozesse. Seit der Industrialisierung steigt der Anteil an N₂O in der Atmosphäre von 275 ppv auf 312 ppv an, wobei die Wachstumsrate in den letzten Jahren deutlich abgenommen hat (in den 80iger und frühen 90iger Jahren bei 0.8 ppbv/Jahr auf 0.5 ppbv/Jahr 1993).

In den frühen 90iger Jahren war die Wachstumsrate von CO₂, CH₄ und N₂O gering. Die Gründe dieser Variation sind noch nicht eindeutig geklärt, aber die Daten der letzten Jahre zeigen, daß diese Entwicklung vergleichbar ist mit der durchschnittlichen Wachstumsrate der 80iger Jahre.

Halokarbone umfassen Chlor und Brom und verursachen Ozonverbrauch. Im Protokoll von Montreal ist der Ausstoß begrenzt worden, wodurch die Wachstumsrate vieler dieser Verbindungen gesunken ist. So ist das Wachstum von CFC_s auf Null zurückgegangen. Die Konzentration von CFC_s und HCFC_s und ihr Ozonverbrauch soll laut dem Protokoll von Montreal absinken.

Treibhausgase mit langer Verweilzeit wie vor allem HCFC_s, PFC_s und SF₆ beeinflussen zur Zeit die Strahlungsintensität vergleichbar gering. Ihr projektiertes Wachstum kann die Strahlungsintensität im 21. Jahrhundert jedoch beträchtlich verstärken.

Ozon (O₃) ist ein bedeutendes Treibhausgas, das sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre vertreten ist. Änderungen im Ozon bewirken eine Verstärkung der Sonneneinstrahlung und der Abstrahlung der Erde. Die Strahlenintensität der Sonne ist streng abhängig von der vertikalen Verteilung von Ozon und reagiert besonders sensibel auf Änderungen im Höhenniveau der Tropopause. Das Muster der troposphärischen und stratosphärischen Ozonänderungen ist räumlich variabel.

Das Troposphärische Ozon steigt seit 1900 deutlich an. Dieser Trend verstärkt sich mit Beginn der 60iger Jahre bis Ende der achtziger Jahre verstärkt. Allerdings ist seit den neunziger Jahren eine deutliche Absenkung des Anstiegs zu verzeichnen bis hin zum gänzlichen Stop der Zunahme, auf der Südhalbkugel läßt sich seit den 80iger Jahren gar eine Abnahme erkennen.

Für das stratosphärische Ozon wird seit den 70iger Jahren eine Abnahme beobachtet, wobei das wichtigste Phänomen das Ozonloch über der Antarktis im September und Oktober ist. Es ist aber auch eine statistisch signifikante Abnahme im gesamten Ozon in den mittleren Breiten beider Hemisphären erkennbar. In den Tropen liegt nur ein geringer und nicht ansteigender Trend zur Verringerung des Ozons vor.

Veränderung der radioaktiven Strahlung

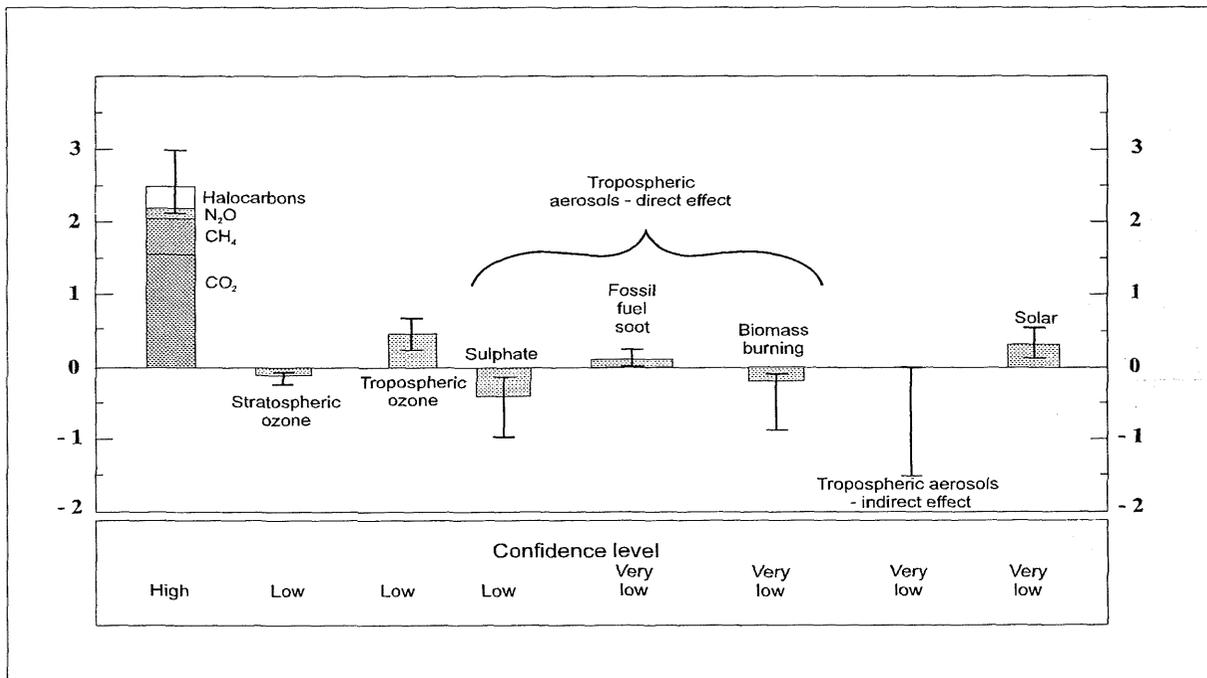


Abb. 2-1: Mittlere jährliche Änderung der radioaktiven Strahlung aufgrund anthropogener Einflüsse seit der vorindustriellen Zeit bis 1992 und von natürlichen Änderungen in der Sonnenenergie von 1850 bis heute (aus: IPCC, 1995:17)

Die Berechnung der globalen durchschnittlichen radioaktiven Strahlung bildet eine gute Möglichkeit, um einen ersten überschlägigen Eindruck von der potentiellen Klimabedeutung der einzelnen Komponenten zu erhalten. Eine solche globale Betrachtungsweise stößt auf seine Grenzen in

- dem räumlichen Muster der gut durchmischten Treibhausgase,
- dem regional variierenden troposphärischen Ozon und
- den regional variierenden troposphärischen Aerosolen.

Infolgedessen gibt eine globale Darstellung der radioaktiven Strahlung kein umfassendes Muster der möglichen Klimaauswirkungen wider. Negative Werte dürfen nicht als rechnerischer Ausgleich betrachtet werden.

Abb. 2-1 zeigt die mittlere jährliche Änderung der radioaktive Strahlung in Wm^{-2} von 1850 bis heute aufgrund von natürlichen solaren Schwankungen und anthropogenen Einflüssen seit Beginn der Industrialisierung. Während die Blockdiagramme den mittleren Bereich der radioaktiven Strahlung angeben, weisen die Linien eine Einschätzung des unzuverlässigen Bereichs auf, die auf einer Spannbreite veröffentlichter Werte basiert. Der Vertrauensbereich gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß die aktuelle radioaktive Strahlung innerhalb dieses Bereiches liegt.

Während die direkte Wirkung des Greenhouse Effects in der ersten Säule mit den wichtigsten Treibhausgasen dargestellt ist, ist die indirekte Strahlung in der zweiten und dritten Säule mit dem Abnehmen des stratosphärischen Ozon und der Zunahme des troposphärischen Ozons dargestellt. Auch die Wirkung der Aerosole wird in direkte und indirekte Effekte differenziert. Hierbei ist der indirekte Effekt nicht als Säule, sondern nur als Linie abgebildet, da es sich um die Änderung der Wolkeneigenheiten handelt, deren quantifizierte Erfassung der daraus resultierenden Prozesse noch stark begrenzt ist. Die letzte Säule gibt die Möglichkeit des Wechsels der radioaktiven Strahlung aufgrund der Variation der Sonneneinstrahlung an.

In differenzierten Werten ergibt sich die in Tab. 2-2 dargestellte mittlere radioaktive Strahlung in WM^{-2} . Auch hierbei ist zu beachten, daß es nicht erlaubt ist, negative Werte gegen positive aufzurechnen, um zu einer Minderung der Beeinflussung zu gelangen.

Faktoren	Leistung in Wm^{-2}
Treibhausgase (CO_2 , CH_4 , N_2O und Halokarbone)	+ 2.45 Wm^{-2} (von + 2.1 bis + 2.8 Wm^{-2})
Troposphärisches Ozon	+ 0.4 Wm^{-2} (von + 0.2 bis 0.6 Wm^{-2})
Stratosphärisches Ozon	- 0.1 Wm^{-2} (von - 0.05 bis 0.2 Wm^{-2})
Anthropogene Aerosole (Sulfate, Ruß von fossilen Energieträgern, vor allem Kohle, und organische Aerosole durch Biomassenverbrennung)	- 0.5 Wm^{-2} (von - 0.25 bis 1.0 Wm^{-2})
Sulfataerosole (fossile Brennstoffemission)	- 0.4 Wm^{-2} (von - 0.2 bis 0.8 Wm^{-2})
Ruß in Aerosolen von fossilen Brennstoffquellen	+ 0.2 Wm^{-2} (von 0.03 bis 0.3 Wm^{-2})
Direkte radioaktive Strahlung von Partikeln, die im Zusammenhang mit Biomassenverbrennung liegt.	- 0.2 Wm^{-2} (von - 0.07 bis -0.6 Wm^{-2})
Troposphärische Rußpartikel, beeinflusst durch menschliche Aktivität	nicht quantifizierbar
Wolkenveränderung aufgrund von Aerosolen durch menschliche Aktivität (indirekter Effekt)	0 bis - 1.5 Wm^{-2} (Kann nicht genau quantifiziert werden, weshalb für Szenarien i.d.R. -0.8 Wm^{-2} genutzt wird.)
Änderung der radioaktiven Strahlung aufgrund von Änderung im solaren radioaktiven Output*	seit 1850 - 0.3 Wm^{-2} (Von 0.1 bis 0.5 Wm^{-2})
Aerosole verursacht durch Vulkantätigkeit*	k.A.; groß für kurze Zeiträume z.B. Mt. Pinatubo -3 bis -4 Wm^{-2}

*Die vorübergehenden Variationen können klimatische Änderungen von Zeiträumen über Jahrzehnte erklären

Tab. 2-2 : Mittlere radioaktive Strahlung

Global Change

Aus den Erläuterungen wurde deutlich, daß die Änderung des globalen Klimas eng mit der Zusammensetzung und dem Anteil an Treibhausgasen zusammenhängt. Nehmen die Treibhausgase in der Atmosphäre zu, steigt die durchschnittliche Temperatur auf der Erde, wodurch der Wasserkreislauf auf der Erde stimuliert wird: „(...) pro Grad Temperaturänderung steigt die Wasserdampfmenge in Luft bei typischen oberflächennahen Temperaturen um etwa 10 %“. (GRABL, 1993:29). Es ist dabei zu bedenken, daß die Treibhausgase stets global wirksam sind und nicht regional kompensiert werden können wie die anthropogenen Veränderungen der Oberfläche (GRABL, 1993:32).

Eine weitere Rückkoppelung, die durch Veränderung der Temperaturen im Wasserhaushalt entsteht, liegt darin begründet, daß die hellste und die dunkelste natürliche Oberfläche auf der Erde aus Wasser besteht. Diese sind der Ozean als die dunkelste Fläche und der Pulverschnee als die hellste. Bei Erwärmung nimmt die hellste Fläche ab, und es wird mehr Sonnenenergie absorbiert. Infolgedessen entsteht durch das Abschmelzen der Gletscher eine weitere Erwärmung.

Die Wolken als weiterer Faktor haben zweierlei Wirkung: Während die niedrigen Wolken bevorzugt eine kühlende Wirkung im Treibhaus haben, weisen die hohen Wolken eine Erwärmung auf. Diese dünnen hohen Wolken werden jedoch auch anthropogen durch die Flugzeugabgase gebildet. Wie jedoch letztendlich die Auswirkungen der Wolken bei globaler Erwärmung sind, ist bisher noch nicht ausreichend geklärt.

Der Anstieg der globalen Mitteltemperatur der unteren Atmosphäre in den letzten 100 Jahren wird von den Klimaforschern mit 0,3 bis 0,6 ° C angegeben, in den letzten 40 Jahren mit 0,2 - 0,3 ° C (IPCC, 1995:26). Diese Erwärmung fand hauptsächlich während zwei Perioden statt: zwischen 1910 und 1940 und seit Mitte der 70iger Jahre. Sie erfolgte auf dem gesamten Globus nicht gleichmäßig. Die größte Erwärmung fand auf den Kontinenten zwischen 40°N und 70°N statt. Einige Gegenden wie nördlich des 30. Breitengrades im Nordatlantik und einige umliegende Festlandsbereiche kühlten in den letzten Dekaden ab. Es läßt sich aber festhalten, daß seit 1400 AD die globale Mitteltemperatur im 20. Jahrhundert höher ist als in allen Jahrhunderten (IPCC, 1995:37).

Allerdings kann bisher nicht eindeutig differenziert werden zwischen natürlicher Variabilität des Klimas und der anthropogen verursachten Erwärmung aufgrund der Änderung der Spurengaskonzentration seit Beginn der Industrialisierung. Die Unsicherheiten in den Schlüsselfaktoren sind für eine eindeutige Zuordnung noch zu groß. Weiterhin bewirkt die thermische Trägheitswirkung der Ozeane eine zeitliche Verzögerung der Auswirkung vergangener Beeinflussung im Umfang von einigen Jahrzehnten.

Neueste Erkenntnisse des IPCC 1996 weisen darauf hin, daß „(...) eine Änderung des Klimas durch den Menschen heute bereits feststellbar erscheint“ (HEGERL/ HASSELMANN & LATIF, 1998:155). Die Autoren versuchten durch Analyse der Stärke, den räumlichen Ausprägung und dem Zeitverlauf der natürlichen Klimaschwankungen das Treibhaussignal herauszudifferenzieren. Dabei stellten sie fest, daß aus den Modellsimulationen sich ergibt, daß „die Beobachtungen (...) einer Klimaänderung durch erhöhte Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen konsistent [sind], nicht jedoch mit anderen Klimaänderungshypothesen“ (HEGERL/ HASSELMANN & LATIF, 1998:160). Da bei diesen Modellrechnungen Komponenten wie die des Aerosols auf die Wolken und vulkanische Aerosole, erhöhte Rußkonzentration oder der Abbau des stratosphärischen Ozons nicht berücksichtigt werden konnten, bleibt

weiterhin eine eindeutige Zurodnung der beobachteten Klimaänderung zu einem externen Faktor ein schwieriges Unterfangen. Trotzdem bezeichnen HEGERL/ HASSELMANN & LATIF (1998) die Modellrechnungen als einen gute Untermauerung der Angabe des IPCC, daß eine Klimaänderung durch den Menschen bereits erkennbar sei.

Die Angabe von zukünftigen Klimaveränderungen ist mindestens ebenso schwierig, wenn nicht gar wesentlich schwieriger, wobei das Hauptproblem in der Abschätzung der künftigen anthropogenen Spurengasemission liegt. Infolgedessen werden Emissionsszenarien erstellt, die verschiedene Anstiege der anthropogenen Spurengasemissionen berücksichtigen. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird wiederum auf den Bericht des IPCC zurückgegriffen. Zu berücksichtigen ist dabei aber, daß andere Institutionen z.T. differierende Ergebnisse berechnen.

Das IPCC unterscheidet zwischen vier Szenarien, die über gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle berechnet werden. Diese schließen sowohl die Emissionen von Treibhausgasen als auch Aerosolverläufe ein:

- Die wirtschaftliche Entwicklung bleibt im momentanen Ausmaß bestehen, so daß der Weltenergieverbrauch bis zum Jahre 2100 sich vervierfacht. Gleichzeitig schreitet das Abholzen der tropischen Regenwälder unvermindert (Szenario „Business As Usual“) fort (A).
- Es erfolgen mäßige Eingriffe in den globalen Spurengasaustausch (B).
- Es erfolgen starke Eingriffe in den globalen Spurengasaustausch (C).
- Es erfolgt ein sofortiger und starker Rückgang des Ausstoßes aller klimawirksamer Spurenstoffe. Trotzdem steigt auch in diesem Szenario zunächst die Gesamtmenge aller Treibhausgase bis zum Jahre 2030 an (D).

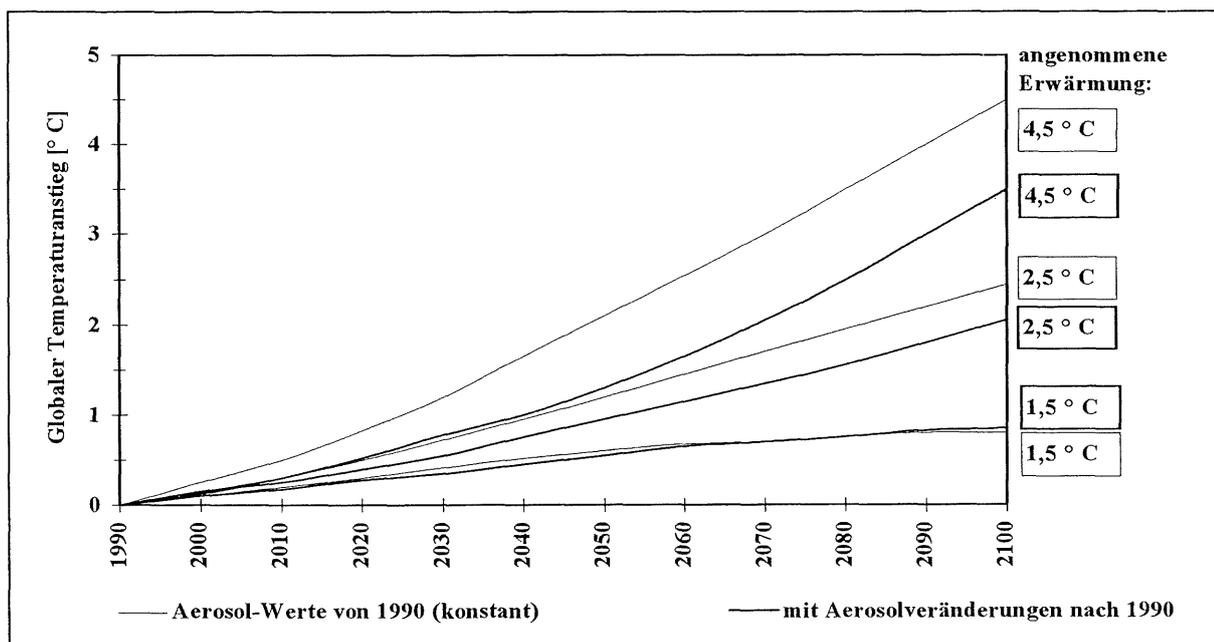


Abb. 2-2: Prognostizierte globale Oberflächentemperaturerwärmung von 1990 - 2100 (IPCC, 1995:40)

Selbst im Falle einer - wie es GRABL und KLINGHOLZ (1990:158) so trefflich formulieren - "sofortigen Vollbremsung" gäbe es in den nächsten 100 Jahren eine deutliche Erhöhung der globalen Mitteltemperatur. Die deutlichsten Folgen ergeben sich natürlich aus dem Szenario A „Business As Usual“, bei dem die Temperatur bei der für den Menschen günstigsten Schätzung um 2,0 °C bis 2100 ansteigt, die danach kaum gebremst weiterginge. „Eine so hohe mittlere

Temperatur hat es seit mindestens 200000 Jahren nicht mehr gegeben." (GRAßL, 1998:269). Wesentlich geringer fällt der Anstieg für die Szenarien B und C aus. Als oberste Grenze für eine volle Anpassung am verdoppelten CO₂ - Gehalt wird 4,5 ° C und als unterste 1,5 ° C angegeben (IPCC, 1995:42).

Obwohl CO₂ das wichtigste Treibhausgas ist, haben die anderen Treibhausgase einen signifikanten Anteil von 30 % an der projizierten globalen Erwärmung.

Auswirkungen

Die Folgen einer solchen Erwärmung sind vielfältiger Art. Allgemein formuliert, bewirkt die Zunahme von nur wenigen Zehntel Temperatur eine Verschiebung der Wüstengrenze um 50-100 km; ein Anstieg um 0,5 ° C reicht, um die nördliche Waldgrenze um die gleiche Distanz zu verlagern und um die Gletscher der mittleren Breiten um mindestens 200 Meter nach oben zu verschieben. „Eine um 2 Grad höhere Durchschnittstemperatur hat die Erde seit Bestehen des modernen Menschen, des Homo sapiens, nicht erlebt. Um eine um vier Grad wärmere Erde hat es nicht gegeben, seit der Mensch vor vier Millionen Jahren entstand“ (GRAßL und KLINGHOLZ, 1990:47).

Aus den Modellrechnungen lassen sich inzwischen folgende Auswirkungen für Temperatur und Niederschlag ermitteln (IPCC, 1995:42ff):

- eine generell größere Oberflächenerwärmung über Land als über den Ozeanen im Winter;
- eine minimale Erwärmung im Bereich der Antarktis und im nördlichen Nordatlantik, die im Zusammenhang mit der tiefen Ozeandurchmischung in diesen Gegenden steht;
- maximale Erwärmung in den hohen nördlichen Breiten im späten Herbst und Winter verbunden mit reduziertem Meereis und geringerer Schneedecke;
- leichte Erwärmung über der Arktis im Sommer;
- geringe saisonale Variationen der Erwärmung in den niedrigen Breiten oder über den südlichen circumpolaren Ozeanen;
- Verringerung der täglichen Temperaturamplitude über Land in den meisten Jahreszeiten und in den meisten Regionen;
- eine vergrößerte globale mittlere hydrologische Zirkulation;
- zunehmende Niederschläge in den hohen Breiten im Winter.

Werden die Effekte der Aerosole berücksichtigt, so reduziert sich die Oberflächenerwärmung hauptsächlich in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre, wo die maximale Erwärmung im Winter geringer wird. Grundsätzlich muß bedacht werden, daß der Abkühlungseffekt der Aerosole nicht einfach zum Erwärmungseffekt der Treibhausgase addiert werden darf. Er führt aber zu regionalen Veränderungen des Musters der Klimaänderung. So führt der doppelte Effekt von Treibhausgasen und Aerosolen zu einer Abschwächung der Monsoon-Zirkulation, während er bei ausschließlicher Berücksichtigung der Treibhausgase zunehmen würde. Bei dem Beispiel der Niederschläge in Südeuropa liegen Verstärkung und Abschwächung bedingt durch die Zunahme der Aerosole umgekehrt vor. Hier führt der zusätzliche Aerosoleffekt zu einer Zunahme der Niederschläge, während sie bei ausschließlicher Berücksichtigung der Treibhausgase abnehmen.

Für die Bodenfeuchtigkeit berechnen alle Klimamodelle eine Zunahme der Feuchtigkeit in den hohen nördlichen Breiten. Über den nördlichen Kontinenten ist im Sommer die Änderung der Bodenfeuchte abhängig von der Einbeziehung des Aerosoleffektes.

Die Ozeanzirkulation zeigt bei den meisten Modellen eine Abnahme in der Intensität der Erwärmung entlang des Nordatlantiks. Die Zunahme der Niederschläge in den hohen Breiten vermindert die Oberflächensalinität und hemmt damit das Absinken des Wasser in den hohen Breiten, was die Zirkulation antreibt. Infolgedessen hat eine Zunahme der Niederschläge in den hohen Breiten oder aber eine Zunahme des Abbruchs von Gletschern z.B. von der Küste Labradors eine Blockade der Zirkulation zur Folge. Jene entsteht dadurch, daß das Oberflächenwasser geringeren Salzgehaltes absinkt und als kalte Meeresströmungen in 2-3 km Tiefe wieder zurückfließt, nachdem es mit dem warmen Oberflächenwasser aus dem Süden in Richtung Grönland transportiert wurde. „Global betrachtet ist der Massen- und Energieaustausch in den Ozeanen Teil eines weltumspannenden ‘Förderbandes’ (oceanic conveyor belt)“ (STEINRÜCKE, 1998:25).

Die Änderungen auf regionaler Ebene sind in der Regel größer als auf globaler Ebene, da der Anteil an Aerosolen, die Landnutzung und das ökologische Zusammenwirken der einzelnen Faktoren regional die Veränderungen verstärken oder vermindern können.

Die Variabilität der Klimaänderung hat einen größeren Effekt als die gleiche Änderung in der mittleren Klimaänderung. Sie kann zu Änderungen in der Häufigkeit der Extreme führen (IPCC, 1995: 43ff):

- **Temperaturen:** Sie tendieren zu einer Zunahme der extrem hohen Temperaturen und einer Abnahme der extremen niedrigen Temperaturen (Gefriertage).
- **Hydrologie:** Variabilität in Verbindung mit einer vergrößerten hydrologischen Zirkulation verändert die Hydrologie hin zu mehr strenger Dürre und/oder Fluten an einigen Plätzen und weniger strenger Dürre und/oder Fluten an anderen Plätzen.
- **Sturmfluten:** Schlußfolgerungen aus den bisherigen Modellen hinsichtlich extremer Sturmereignisse sind weiterhin sehr unsicher.
- **Hurricanes/ Tropische Zyklonen:** Prognosen über zukünftige Entwicklungen können bisher noch nicht gegeben werden.
- **El Nino-Souther Oscillation:** Wird von einer mittleren Erwärmung der Meeresoberfläche in den Tropen als Folge von steigenden Treibhausgasen ausgegangen, so könnte sich die Variabilität der Niederschläge vergrößern, die im Zusammenhang mit ENSO-Ereignissen stehen.

Somit zeigt sich schlußfolgernd bereits hier, daß zum Thema Sturmfluten noch Forschungsbedarf besteht, aber vom Grundsatz nicht mehr mit dramatischen Darstellungen operiert wird.

3 Definition von Sturmflut für die Deutsche Bucht

Eine unverzichtbare Vorbedingung zur Bildung eines Kollektivs der Sturmfluten ist die Definition des Begriffs Sturmflut. PETERSEN und ROHDE (1991) definieren eine Sturmflut zunächst über den etymologischen Sinngehalt der Wortzusammensetzung: „Geht man auf die ursprüngliche Bedeutung des Wortes Flut zurück und berücksichtigt, daß zu der großen Wassermenge auch ein hoher Wasserstand gehört, so ist eine Sturmflut einfach zu definieren als Zeitspanne mit hohen Wasserständen an den Küsten oder in Flußmündungen, die vorwiegend durch starken Wind hervorgerufen sind" (PETERSEN und ROHDE, 1991:9).

An dieser Definition wird deutlich, daß es einer Eingrenzung des Begriffs „hoch" bedarf, um erhöhte Tiden von Sturmfluten abzugrenzen. Hierfür werden häufig deterministische Verfahren angewendet, bei denen Höhenbereiche festgelegt werden, die an den Tidewasserständen orientiert sind. Bei diesem Vorgehen, Sturmfluten zu definieren bzw. erhöhte Tiden von normalen Tiden abzugrenzen, werden jedoch die örtlichen Gegebenheiten und deren Einflüsse auf die Tide nicht immer ausreichend berücksichtigt.

Das Springtide-Verfahren nach LÜDERS (1956) ist das gebräuchlichste deterministische Verfahren. Hierbei werden für die einzelnen zu untersuchenden Pegel aus den Mittelwerten von langfristigen Scheitelwerten Grenzwerte für drei Klassen eindeutig festgelegt. Mit dieser Form der Anwendung eines deterministischen Verfahrens werden die örtlichen Besonderheiten ausreichend berücksichtigt: „Das wird daran gezeigt, daß nach diesem Vorschlag an allen Pegeln die Sturmflutgrenze etwa gleich häufig auftritt (...)" (SIEFERT, 1968:23).

Die Grenzwerte von LÜDERS (1956) stimmen für Wind- und Orkanfluten mit der BEAUFORT-Skala überein und sind in Tab. 3-1 dargestellt.

Flutklassen	Untere Grenze
Windflut	M _{SpThw} + 1/4 M _{SpThb}
Sturmflut	M _{SpThw} + 1/2 M _{SpThb}
Orkanflut	M _{SpThw} + 3/4 M _{SpThb}

Tab. 3-1: Untere Grenzwerte zur Definition von Sturmflutklassen nach LÜDERS (1956)

Neben den deterministischen liegen statistische Verfahren vor, mit denen eine Sturmflut nach der Häufigkeit des Auftretens bzw. der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Scheitelwasserstandes beurteilt wird. Die Grundlage bei einem solchen Verfahren bildet eine festgelegte Frequenz, zu der der Schwellenwert ermittelt wird, wie dies bei DIN 4049 Teil 3 vom Oktober 1994 der Fall ist, mit der Sturmfluten nach der statistischen Eintrittswahrscheinlichkeit in leichte, schwere und sehr schwere Sturmfluten eingeteilt werden. Grundsätzlich sind Sturmfluten hier durch "Windeinfluß erzeugte hohe Wasserstände an der Küste und in Flußmündungen, deren Höchstwerte den unteren Grenzwaterstand der leichten Sturmflut überschreiten".

Eine leichte Sturmflut wird nach DIN 4049 definiert „mit Tidehochwasserständen der mittleren jährlichen Häufigkeit von 10 bis 0.5 an der Nordseeküste (...)", eine schwere Sturmflut „mit Tidehochwasserständen der mittleren jährlichen Häufigkeit von 0.5 bis 0.05 an der Nordseeküste (...)" und eine sehr schwere Sturmflut „mit Tidehochwasserständen unter der mittleren

jährlichen Häufigkeit 0.05 an der Nord- oder Ostseeküste". DIN 4049 definiert allerdings nicht, ob ein fester oder ein mit der Zeit veränderlicher Bezugshorizont für die Ermittlung der Eintrittshäufigkeit zugrunde gelegt werden sollte.

Unter Anwendung dieses Verfahrens legt das NIEDERSÄCHSISCHE HAFENAMT CUXHAVEN (1988) für den Pegel Cuxhaven Scheitelwerte zur Definition und Abgrenzung einer Sturmflut von einem erhöhten Wasserstand fest. Dagegen geben PETERSEN und ROHDE (1991) etwas andere Grenzwerte für den Zeitraum 1981-1990 für den Pegel Cuxhaven an (Tab. 3-2).

An dieser Stelle sollen weniger die Ursachen für die Differenzen in den Grenzwerten und den Einteilungen der Klassen geklärt werden, wobei dies aufgrund fehlender Angaben beispielsweise über die Zeiträume der Berechnung der Eintrittshäufigkeiten auch nicht möglich ist, als vielmehr das grundsätzliche Problem der Grenzziehung bei Scheitelwasserständen dargestellt werden. LÜDERS hat sich 1975 mit dieser Problematik intensiv auseinandergesetzt und die verschiedenen Höhen seit BRAHMS (1754) anhand ausgewählter Beispiele dargestellt. Neuere Untersuchungen sind z.B. die von PETERSEN und ROHDE (1991), die zusätzlich für die Deutsche Bucht angeben, „daß leichte Sturmfluten zwischen 1.20 m und 2.30 m über MThw liegen, schwere zwischen 2.30 m und 3.00 m und sehr schwere Sturmfluten 3.00 m und höher“.

Flutklassen	HAFENAMT CUXHAVEN (1988)	PETERSEN und ROHDE (1991)
Leichte Sturmflut	7.45 m bis 7.95 m NN -5.0 m	772 cm bis 868 cm NN -5.0 m
Sturmflut	7.96 m bis 8.45 m NN -5.0 m	-
Schwere Sturmflut	8.46 m bis 9.45 m NN -5.0 m	869 cm bis 942 cm NN -5.0 m
Sehr schwere Sturmflut	≥ 9.46 m NN -5.0 m	≥ 942 cm NN -5.0 m

Tab. 3-2: Vergleich der Scheitelwerte zur Definition einer Sturmflut zwischen dem NIEDERSÄCHSISCHEN HAFENAMT CUXHAVEN (1988) und PETERSEN und ROHDE (1991:18)

Bei differierenden Angaben zu Grenzwerten ist es sinnvoll, die offizielle Definition der Bundesrepublik Deutschland vertreten durch das BSH heranzuziehen. Inhaltlich ist dies sinnvoll, weil die Datenlage des Pegels Cuxhaven im BSH so gut ist, daß von einer nach DIN 4049 fundiert ermittelten Definition auszugehen ist. Als unteren Grenzwert wird hier 1.50 m über MThw angegeben (Tab. 3-3). Dieser Grenzwert weist den Vorteil auf, daß er nicht an eine starre Höhe gekoppelt ist und somit der säkulare Anstieg des MThw miteinfließt.

Flutklassen	Grenzwerte
Sturmflut	1.5 bis 2.5 m über MThw
Schwere Sturmflut	2.5 bis 3.5 m über MThw
Sehr schwere Sturmflut	ab 3.5 m über MThw

Tab. 3-3: Grenzwerte des BSH zur Definition einer Sturmflut

Zur Kollektivbildung müssen die vorstehenden Definitionen auf ihre Anwendbarkeit für die vorliegende Fragestellung überprüft werden, wozu der Vergleich der Grenzwertbestimmung nach DIN 4049 und des Springtide-Verfahrens nach LÜDERS (1956) von NIEMEYER (1987) dienlich ist. Er stellt fest, daß bei der Anwendung der Sturmtideklassifikation nach DIN 4049, die auf einer Wiederkehrperiode von 20 Jahren beruht, Häufigkeitsuntersuchungen widersinnig sind (NIEMEYER, 1987:107). Er relativiert jedoch zugleich diese Aussage, unter der Bedingung, daß die Berechnung der Überschreitungsdauer bezogen wird auf Zeitreihen mit einer doppelten oder mehrfachen Wiederkehrperiode, ohne jedoch einen Anhaltswert über die Häufigkeit der Wiederkehrperiode im Verhältnis zum Untersuchungszeitraum anzugeben (NIEMEYER, 1987:118). In einem Aufsatz der Forschungsstelle Küste wird dann von NIEMEYER/KAISER & GLÄSER (1995) das Klassifikationsverfahren nach DIN 4049 bereits als einziges differenziertes und vergleichbares Verfahren bezeichnet. Weiterhin bewertet NIEMEYER (1987) das Springtide-Verfahren nach LÜDERS als ein Klassifikationsverfahren, mit dem es unabhängig von der Länge der Zeitreihen möglich ist, Veränderungen der Sturmfluthäufigkeiten quantitativ zu bestimmen.

Nicht außer acht gelassen werden sollte die statistische Möglichkeit, eine Sturmflut nicht einzeln zu definieren, sondern aus der Gesamtheit aller Tiden eines definierten Untersuchungszeitraumes ein MThw zu berechnen und die Gesamtheit der Scheitelwasserstände um diesen mittleren Hochwasserwert auszuwerten, wie es z.B. PFIZENMAYER (1997) durchführte. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist, daß die statistisch korrekte Gesamtheit der Ereignisse betrachtet wird, der Nachteil, daß das besondere Ereignis Sturmflut nicht als solches bearbeitet wird. Werden die Quantile auf den kleinen Ausschnitt der besonderen Ereignisse wie „besonders hoch“ beschränkt, werden die Ungenauigkeiten groß.

Bei allen Verfahren zur Definition und Bearbeitung des Themas Sturmflut ist allerdings zu beachten, daß die Betrachtung aller Ereignisse oder aber die Abgrenzung zu höheren Ereignissen allein über die Hochwasserstände erfolgt, der Begriff Sturmflut sich aber auf das gesamte Ereignis bezieht, wodurch ein gewisses Mißverhältnis deutlich wird. Bei Betrachtung der Fachtermini einer Tide wird dies veranschaulicht. Der Begriff „Flut“ bezeichnet den Zeitraum des ansteigenden Wasserstandes zwischen Niedrig- und Hochwasserstand und nicht den Hochwasserscheitel. So definieren DIETRICH et al. (1975:392) Flut und Ebbe: „Das Steigen und Fallen des Wassers von einem N.W. bis zum folgenden wird eine Tide genannt. Das Steigen heißt Flut, das Fallen Ebbe.“ Somit muß eine Definition über den Scheitelwasserstand zur Analyse des Sturmflutklimas, das sich im gesamten Sturmflutverlauf manifestiert, als unzureichend bezeichnet werden. Sinnvoll ist es dagegen, eine allgemeingültige Grenze zu definieren, die einerseits den gesamten Sturmflutverlauf berücksichtigt und damit „dem physikalischen Wert der Sturmflut“ (SIEFERT, 1968:24) entspricht, und andererseits den aus den statistischen Anforderungen resultierenden deterministischen Höhenangaben der Scheitelwasserstände berücksichtigt. Der physikalische Wert einer Sturmflut spiegelt sich in der Windstaukurve wider, weil er den zeitlichen Verlauf und die Höhe der Energie, die auf das Wasser einwirkt, darstellt. Die Windstaukurve reproduziert dementsprechend die gesamte und die maximale Energieeinwirkung während jeder Tidephase also z. B. auch bei Tideniedrigwasser.

Die Windstaukurve wird gebildet als Differenzkurve zwischen der eingetretenen und der für dieselbe Zeit vorausberechneten astronomischen bzw. mittleren Tide (Abb. 3-1). Wird die Windstaukurve mit der astronomischen Tide berechnet, ist zwar der Wind die einflußreichste Größe, in „(...) der Reihenfolge ihrer Bedeutung folgen [jedoch] statischer Luftdruck, zeitliche

Änderung des Luftdrucks, Wassertemperatur und Temperaturdifferenz Luft-Wasser (...)" (ANNUTSCH, 1977:189).

Wird die Windstaukurve über die mittlere Tide berechnet, enthält diese neben den genannten noch die astronomischen Anteile. Weiterhin besteht in beiden Fällen die Möglichkeit, daß Fernwellenanteile enthalten sind.

In der vorliegenden Untersuchung wird der Windstau über die mittlere Tide berechnet. Da die astronomischen Anteile einbezogen werden müssen, werden die vorausberechneten astronomischen Hoch- und Niedrigwasserscheitel zu jeder Sturmflut des Kollektivs berücksichtigt. Deshalb kann die mittlere Tide, nach dem Verfahren von SIEFERT und LASSEN (1985:17ff.), das neben den 5-Jahres-Mitteln der Hoch- und Niedrigwasserstände auch den Flut- und Ebbeast berechnet, verwendet werden.

Da insgesamt der Wind den größten Anteil der Windstaukurve einnimmt und dieser für die Entstehung einer Sturmflut entscheidend ist, bietet es sich an, für eine Analyse der Änderung des Sturmflutklimas, sich auf eine Definition der Sturmflut über den Windstau zu konzentrieren.

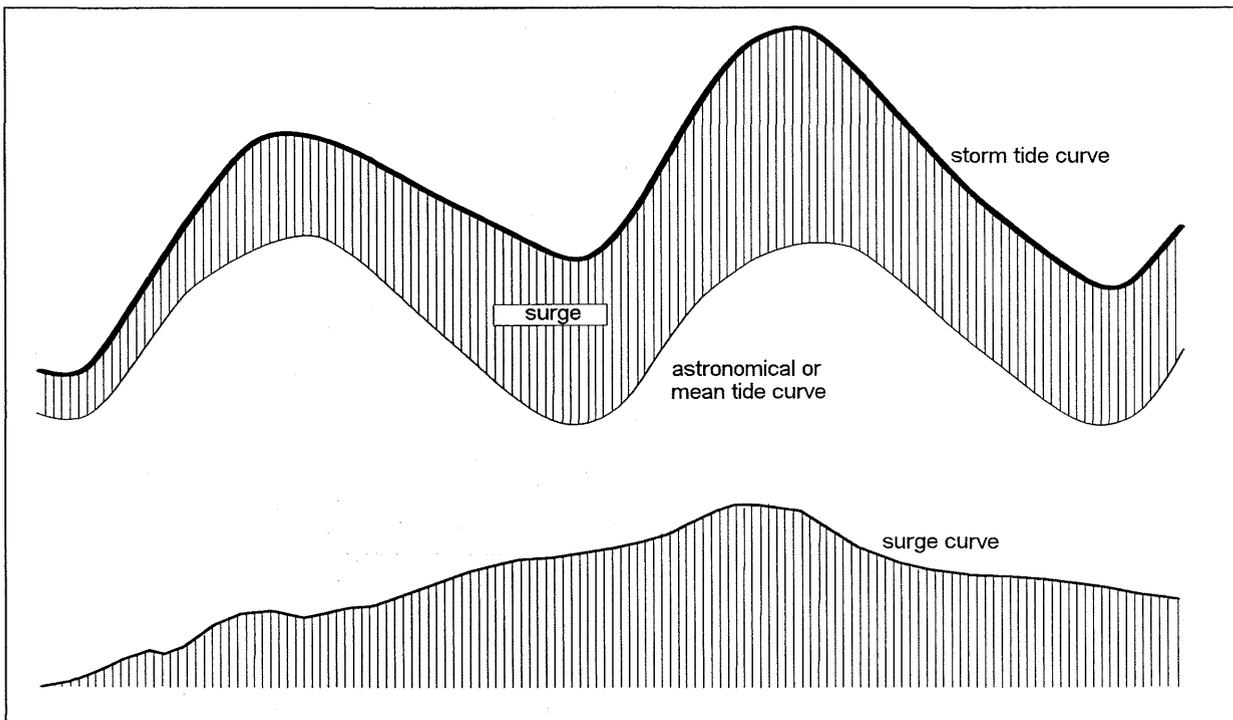


Abb. 3-1: Windstaukurve (nach SIEFERT, 1978:60)

SIEFERT (1985) definiert eine Sturmflut für die Deutsche Bucht unter der Bedingung, daß der Windstau in Cuxhaven „(...) zu irgendeiner Tidephase die Höhe von 2 m erreichte oder überschritt“. Hierzu gilt ergänzend die Definition von FERK (1993), die besagt, daß eine Sturmflut vorliegt, wenn der „Windstau in Cuxhaven mindestens 200 cm zwischen Tnw und maximal 4 Stunden nach Thw in Cuxhaven erreicht“ (FERK, 1993).

Diese Definition reicht jedoch als alleinige Voraussetzung für die Auswahl des Sturmflutkollektivs nicht aus, da der Windstau bei gleichbleibendem Wind bei Tnw höher ansteigt als bei Thw. Somit ist umgekehrt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Windstau von 2 m bei Tnw erreicht wird, größer als bei Thw, so daß sich eine Reihe als Sturmfluten definierter Ereignisse ergibt,

die in keiner Weise statistischen Anforderungen genügt, wenn die Fluten einen extrem niedrigen Scheitelwert erreichen. Von physikalischer Bedeutung ist eine weitere Ergänzung deshalb, weil nur die Wasserstände ausgewählt werden sollen, auf die eine bestimmte minimale Energieeinwirkung Einfluß genommen hat. Demzufolge wird die Definition einer Sturmflut nach SIEFERT (1985), ergänzt durch FERK (1993), erweitert nach dem Kriterium des BSH, nach dem als Sturmflut nur der Tidehochwasserstand zu definieren ist, der ≥ 1.50 m über dem MThw liegt.

Sturmflut wird definiert mit Ereignissen:

- **Windstau ≥ 2 m,**
- **HThw \geq MThw +1.50 m ,**
- **Auswahlpegel: Cuxhaven,**
- **Geltungsbereich: Deutsche Bucht.**

Den Scheitelwert am MThw festzulegen, hat den Vorteil, daß säkulare Veränderungen des Thw in die Berechnung einfließen und somit kein künstlicher Anstieg der Sturmfluthäufigkeit berechnet wird, wie es geschehen würde, wenn ein konstanter HThw-Grenzwert wie z. B. 800 cm NN -5 m über den gesamten Zeitraum herangezogen werden würde. Eine Kollektivauswahl über einen starren Scheitelwert ist deshalb grundsätzlich abzulehnen, da sie Sturmflutzunahmen aufzeigt, die aufgrund des Anstiegs des MThws nicht korrekt sind.

Da als erstes Kriterium für die Definition einer Sturmflut entsprechend der vorgestellten Diskussion der Windstau ≥ 2.0 m gelten soll, um auch den physikalischen Wert einer Sturmflut zu erfassen, gelten für das Grundlagenkollektiv die 255 definierten Sturmfluten des „Hamburger Sturmflutkollektivs“ seit 1901. In diesem Kollektiv gilt allerdings nicht nur das Kriterium Windstau ≥ 2.0 m, sondern auch, daß alle Sturmfluten mit einem HThw von 850 cm NN -5.0 m in Cuxhaven miteinbezogen werden. Bei dieser Vorgehensweise kann davon ausgegangen werden, daß sämtliche Sturmfluten mit einem Windstau ≥ 2.0 m erfaßt werden, auch wenn keine Windstaukurve bisher erstellt worden ist. Dies ist deshalb sinnvoll, weil 850 cm NN -5.0 m „2.07 m über dem MThw 1961/70 in Cuxhaven (liegen)“ (SIEFERT, 1978:84). Bei Erstellung des Kollektivs wurden weiterhin sämtliche Sturmfluten mit einer Scheitelhöhe von 800 cm NN -5.0 m berücksichtigt, die in das Kollektiv einbezogen worden sind, sobald sich ein Windstau ≥ 2.0 m ermitteln ließ. Zur zusätzlichen Berücksichtigung der säkularen Veränderungen und statistischen Anforderungen werden sämtliche Tiden, die eine HThw mit MThw +1.50 m erreicht haben, einbezogen und über Berechnung des Windstaus hinsichtlich des Kriteriums Windstau ≥ 2.0 m überprüft. Unter Ausschluß sämtlicher Sturmfluten aus dem Kollektiv, die bei Thw einen Windstau $\leq 1,50$ m aufweisen, entsteht ein Kollektiv von 192 Sturmflutscheiteln und 153 Windstaukurven also 153 Sturmfluten.

4 Der Einfluß der Astronomie

Die Tide in der Nordsee entsteht fast ausschließlich durch die wechselnden Entfernungen und damit sich ändernden Anziehungskräfte zwischen Sonne und Mond, die im Atlantischen Ozean wirken. Vom Atlantischen Ozean läuft sie von Norden und durch die Straße von Dover in die Nordsee ein. Beckenform und Tiefenverhältnisse der Nordsee sowie die Corioliskraft formen die einlaufenden Tiden in der Nordsee um. Die astronomische Tide setzt sich aus mehreren Partialtiden zusammen. Die wichtigsten sind in Tab. 4-1 dargestellt.

Den größten Einfluß auf die Höhen hat die halbmonatliche Ungleichheit (Spring- und Nipptidezeit) mit einer Periode von 14,77 Tagen, die eine Höhendifferenz von +/- 50 cm verursachen kann, weshalb diese im folgenden näher analysiert wird.

Die Bedeutung der Astronomie auf die Sturmfluten ist von zweierlei Interesse. Zum einen ist es wichtig zu wissen, wie häufig Sturmfluten bei Springtide auftreten, da die berechnete Befürchtung besteht, daß eine sehr hohen Sturmflut bei Springtide auftritt und den Scheitel zusätzlich um 50 cm hebt. Zum anderen ist es von Bedeutung, weil zur Definition einer Sturmflut eine bestimmte Windstauhöhe erreicht werden muß. Dabei sollte jedoch möglichst nur der Windstau berücksichtigt werden, der durch den Wind verursacht worden ist und nicht der, der einen hohen astronomischen Anteil aufweist. Wird zur Veranschaulichung ein Rechenbeispiel zugrunde gelegt, so wird das Problem deutlich. Eine Windstaukurve, die im Maximum 2.20 m erreicht und einen astronomisch vorausgerechneten Springanteil von 50 cm enthält, unterliegt nicht mehr der Definition einer Sturmflut, da vom Wind nur 170 cm gehoben worden sind. Deshalb werden alle Sturmfluten bei der Kollektivauswahl auch hinsichtlich des astronomischen Anteils untersucht.

Bezeichnung	Herkunft	Entstehung	Periode
S ₂	S	halbtägige Hauptsonnentide	12,00 h
M ₂	M	halbtägige Hauptmondtide	12,42 h
P ₁	S	eintägige Hauptsonnentide	24,07 h
O ₁	M	eintägige Hauptmondtide	25,82 h
Mf	M	Deklinationstide zu M ₀	13,66 Tage
MSf	M	Variationstide zu M ₀	14,77 Tage
Mm	M	Elliptische Tide 1. Ordnung zu M ₀	27,55 Tage
Msm	M	Evektionstide zu M ₀	31,81 Tage
Ssa	S	Deklinationstide zu S ₀	182,62 Tage
Sa	S	Elliptische Tide erster Ordnung S ₀	365,26 Tage
M ₀	M	konstante Mondtide	∞
S ₀	S	konstante Sonnentide	∞

Tab. 4-1: Stammtiden (LANDOLDT-BÖRNSTEIN, 1952)

Das Sturmflutkollektiv des Projektes umfaßt 192 Sturmflutscheitel bzw. 153 Windstaukurven. Davon liegen 95 Sturmfluten im Springtidezeitraum. Werden diese differenziert in einen engen (00:00-02:00 Uhr und 12:00-14:00 Uhr Hochwassereintrittszeit in Cuxhaven) und einen erwei-

terten Springtidezeitraum (02:00-04:00 Uhr und 14:00-16:00 Uhr Hochwassereintrittszeit in Cuxhaven), so zeigen sich folgende Ergebnisse: Von 192 Sturmfluten fanden

- 32 Sturmfluten bei Springtide und
- 63 Sturmfluten in den Tagen unmittelbar nach Springtide

statt. Das bedeutet, daß 95 Sturmfluten eine astronomisch bedingte Erhöhung im Hochwasser von bis zu + 50 cm enthalten und eine Erniedrigung im Niedrigwasser um den gleichen Betrag. Von den verbleibenden 97 Sturmfluten fanden dagegen nur 31 Sturmfluten bei Nipptide statt, wobei

- 16 Sturmfluten bei Nipptide (d.h. $t_{Hwcux} = 06:00-08:00$ Uhr und $18:00-20:00$ Uhr) und
- 15 Sturmfluten in den Tagen unmittelbar nach Nipptide (d.h. $t_{Hwcux} = 08:00-10:00$ Uhr und $20:00-22:00$ Uhr)

zu verzeichnen waren. Die Höhendifferenz der vorausberechneten astronomischen Tide zur mittleren Tide zeigt eine Schwankungsbreite von ± 50 cm (Abb. 4-1).

Werden die einzelnen Sturmfluten untersucht, so zeigt sich, daß keine der definierten Sturmfluten aufgrund der Astronomie herausfallen, da die meisten Windstaumaxima bei Tnw vorzufinden sind.

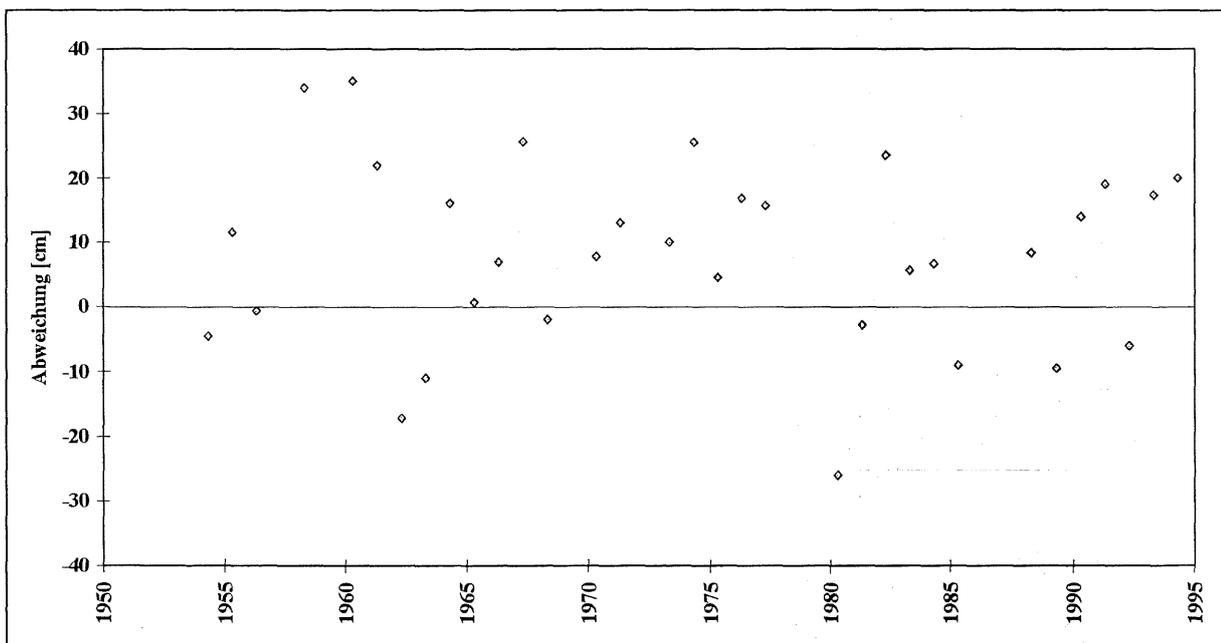


Abb. 4-1: Differenz der mittleren Tide zur astronomisch vorausberechneten Tide für die Sturmfluten mit Windstau ≥ 2.0 m und $H_{Thw} \geq M_{Thw} + 1.50$ m

5 Fernwellen

Fernwellen (*external surges*) sind im Zuge der Berechnung von Bemessungswasserständen und den damit verbundenen Diskussionen um Klimaänderung und erhöhte Sturmfluten für Forschung und Praxis zu einem wichtigen Thema geworden. Viele eher emotional geprägte Auseinandersetzungen zu diesem Thema sind mit dem Hintergrund geführt worden, was geschehen könnte, wenn in den nächsten Jahrzehnten eine erhöhte Sturmflut von einer Fernwelle von mehreren Dezimetern oder gar Metern überlagert würde.

Obwohl in aller Munde, zeigt sich die wissenschaftliche Beantwortung der Frage, was eine Fernwelle sei, insofern als kompliziertes Unterfangen, als daß es hierzu bisher keine allgemeingültige Erklärung gibt, sondern nur eine Reihe von Hypothesen, denen nachgegangen worden ist, da

1. die Zahl an Wissenschaftlern aus allen Fachbereichen, die sich mit diesem Thema beschäftigen, sehr gering ist; so z. B. KOOPMANN (1962), SCHMITZ (1965) und SCHMITZ/ HABICHT & VOLKERT (1988). Für die Auswirkungen in der Deutschen Bucht und einer zumindest für einen Zeitraum von 4 Jahren (1956-1960) umfassenden statistischen Analyse kann noch immer nur die Arbeit von KOOPMANN (1962) herangezogen werden.
2. nur mangelhafte Daten vorhanden sind.

Weiterhin haben sich einige britische Wissenschaftler mit diesem Problem beschäftigt, da Fernwellen hier eine wesentliche größere Rolle spielen als in der Deutschen Bucht. Für die Vorhersage bezogen einige Wissenschaftler *external surges* in numerische Modelle ein wie z. B. DAVIES und FLATHER (1977) und DAVIES (1980). Da dies jedoch nicht die Thematik der vorgesehenen Untersuchung betrifft, wird auch diese Literatur im folgenden nicht thematisiert.

5.1 Theoretische Voraussetzungen

5.1.1 Bisherige Untersuchungen

Fernwellen werden nach SCHMITZ (1965) durch *deep water surges* im offenen Ozean erzeugt. „Unter *deep water surge* versteht man diejenigen Wasserstandsänderungen auf den Ozeanen außerhalb der Schelfgebiete, welche durch meteorologische Effekte (Herv. durch die Verf.) hervorgerufen werden.“ Unter meteorologischen Effekten werden die Änderungen des statischen Druckes an der Meeresoberfläche und der Oberflächentangentialschub des Windes (Windschub) verstanden. Die instationären *deep water surges* breiten sich in die Gebiete der Schelfe und der Randmeere aus. Dort bilden sie die sog. *external surges* aus, die unabhängig von einer Windschubwirkung sich dem Tideverlauf in den Randmeeren anpassend weiter ausdehnen. Somit ist nach SCHMITZ (1965:51) die *external surge* zwar eine meteorologisch bedingte Erscheinung, „aber für das Randmeer im Grunde von gleicher Wirkung wie eine einlaufende, auf dem offenen Ozean erzeugte Gezeitenwelle“. Dies ist für die Forschung insofern von Bedeutung, als daß somit die Kenntnisse zur Hydrodynamik der Tide in der Nordsee in vielen Bereichen auf *external surges* übertragen werden können. Allerdings treten *external surges* nicht periodisch auf. Der Transport einer *external surge* vom Atlantik in die Nordsee kann nur erfolgen, wenn die Zugbahn einer Zyklone ostwärts aus dem Seengebiet

zwischen Irland und Island nach Mittelnorwegen führt (SCHMITZ/ HABICHT & VOLKERT, 1988:422). Die Autoren gehen davon aus, daß eine *deep water surge* sich nur vergrößert und in die Nordsee eintritt, wenn die beschriebene meteorologische Situation während des Eintritts einer *external surge* in die Nordsee und danach vorhanden ist.

KOOPMANN (1962) untersuchte für den Zeitraum 1956-1960 sämtliche Erscheinungen, die zu einem nicht durch Windeinfluß zu erklärenden Reststau in Cuxhaven führten. Der Reststau wurde von ihm über die Differenz zwischen dem durch den tatsächlichen Windeinfluß bedingten Windstau und eingetretenem Stau berechnet. Dieser muß in Cuxhaven eine Höhe von ≥ 30 cm erreichen. In seine Betrachtungen bezieht er allerdings nicht nur die *external surges* ein, sondern auch sämtliche andere Faktoren, die zur Bildung des Staus führen können wie Böigkeit des Windes, Wasserstandserhöhung infolge des Luftdrucks und die Folgen eines schnell ziehenden Tiefs sowie die Eigenschwingung in Querrichtung.

Die Erscheinung *external surge* selber behandelt KOOPMANN nur hinsichtlich der Frage, ob und wann derartige Schwallerhöhungen in der Deutschen Bucht wirksam werden. Ursache und Mechanismus untersucht er nicht. Auch KOOPMANN (1962) zog für seine Analysen die Schwallerscheinungen an der britischen Küste zu Rate.

5.1.2 Hypothese zur Entstehung einer Fernwelle

Die Hypothese über die Genese einer Fernwelle der vorliegenden Arbeit beruht auf einer Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse in Ergänzung mit ozeanographischen Erkenntnissen. Fernwellen sind erzwungene Auslenkungen der Wasseroberfläche des Nordatlantiks, die sich derart bis in die Nordsee fortpflanzen, daß sie dort zu einer zeitweiligen Erhöhung des Wasserstandes führen, die nicht durch Windfelder in der Nordsee bedingt ist. Sie werden durch meteorologische Effekte im offenen Ozean - für die Nordsee also im Atlantik - wie

- zeitliche Änderungen des Luftdrucks am Ort (in situ) aufgrund schnell ziehender, scharfgradientiger Druckgebilde und
- Windfelder über dem Nordatlantik erzeugt.

Hinter einem Tiefdruckgebiet, das normalerweise von West nach Ost über den Nordatlantik zieht, steigt der Luftdruck wieder mehr und mehr an. Die zeitliche Änderung des Luftdrucks am Ort beruht einerseits auf der Zuggeschwindigkeit des Drucksystems und andererseits auf der Größe des ihm zugeordneten, zeitlich auch veränderlichen Druckgradienten. Diese zeitliche Luftdruckänderung ist als Störimpuls zu betrachten, der an jedem Ort entlang der Zugbahn wirksam ist und zunächst die Meeresoberfläche entsprechend seiner Größe auslenkt. Es entsteht eine Schwere- oder auch Trägheitswelle, die eine entsprechende interne Welle in der im Ozean immer vorhandenen Dichtesprungschicht (in etwa in 200 - 300 m Tiefe) impliziert. Aufgrund der relativ geringen Dichteunterschiede an der Grenzfläche ist die Amplitude der internen Welle allerdings wesentlich größer als die der Oberflächenwelle. Im Hinblick auf das Entstehen einer "external surge" größeren Ausmaßes scheint der internen Welle besondere Bedeutung zuzukommen. Wenn die Zuggeschwindigkeit des die Störung einnehmenden Drucksystems im Bereich der breitenabhängigen Fortpflanzungsgeschwindigkeit freier interner Wellen liegt, tritt Resonanz auf (DEFANT, 1941; DIETRICH et al., 1975:389). Die interne ozeanische Trägheitswelle wird zu einer freien fortschreitenden Welle. Trifft sie in ihrem weiteren Verlauf auf den Kontinentalabhang, dem relativ steilen Übergang zum flachen Schelfgebiet, wird sie „branden“ oder reflektiert werden. Da sie immer an interne

Gezeitenwellen gekoppelt ist, führt das zu recht komplexen Vorgängen. Auf welche Weise die interne Welle bei ihrem Übergang in das Schelfgebiet zu einer fortschreitenden Oberflächenwelle transformiert wird, ist derzeit ungeklärt. *External surges* von 1,0 m bis 1,20 m, die wiederholt am Schelfrand beobachtet wurden, lassen sich aus wind- und/oder luftdruckbedingten Störungen an der Wasseroberfläche allein nicht erklären (TIMMERMANN, 1979).

Da die Schwingung den Gesetzmäßigkeiten der Tide in der Nordsee folgt, muß eine *external surge* von Immingham über Aberdeen entlang der niederländischen Küste bis Cuxhaven meßbar sein. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß der örtliche Wind dazu führen kann, daß die Erhöhung des Wasserstandes sich nicht gleichmäßig fortsetzt, sondern Überlagerungen bzw. Absenkungen eintreten können. Da sie in der Straße von Dover an Höhe verliert, muß sie sich nicht bis Cuxhaven fortsetzen. *External surges* mit geringen Höhen in Aberdeen können daher in Cuxhaven kaum noch als *external surge* zu definierende Reststauhöhen aufweisen.

5.2 Definition einer Fernwelle und Kollektivbildung

5.2.1 Die Datengrundlage

External surges zeigen in ihrem grundsätzlichen Verlauf nach Eintritt in die Nordsee ein ähnliches Verhalten wie die Tide. So ist davon auszugehen, daß sie sich nach Eintritt in die Nordsee entlang der britischen Küste von Aberdeen bis Immingham leicht aufsteilen, um dann in der Straße von Dover an Höhe zu verlieren. Bei einer Berechnung der Wasserstandserhöhung infolge Ausbreitung der *external surge*, konstatierte SCHMITZ (1965:51), daß auf „(...) dem Wege (...) sich ihre Amplitude [vermindert], am stärksten jedoch beim Fortschreiten längs der west- und ostfriesischen Küste, wo die Reibungswirkung wegen der geringen Wassertiefen die *surge* in zahlreichen Fällen praktisch vernichtet“. Dementsprechend ist es nicht sonderlich verwunderlich, daß die Fernwellenhöhe, die in Cuxhaven noch vorhanden ist, sehr gering ist. Es muß jedoch davon ausgegangen werden, daß immer eine meßbare, nicht durch Wind verursachte Erhöhung des Wasserstandes verbleibt und auch Fernwellen von bis zu 108 cm (im Zeitraum 1971-95) in Cuxhaven auftreten.

Ausgangsbasis für die Untersuchung von *external surges* sind die Daten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, das für den Zeitraum von 1971 bis 1995 die Wasserstände von Aberdeen und Immingham lückenlos aufzeichnete. Ältere Daten weisen dagegen erhebliche Lücken auf. Zur Berechnung und graphischen Darstellung einer Fernwelle werden diese Daten nicht in ihrer ursprünglichen Form dargestellt, sondern einer Zwischenrechnung unterzogen, die die täglichen Wasserstandsschwankungen und astronomischen Einflüsse eliminieren und auf „andere Einflüsse“ reduzieren soll. Hierzu wird eine Staukurve ermittelt, indem die Differenz zwischen den Vorausberechnungen und den Beobachtungen berechnet wird. Diese Kurve wird über eine Mittelwertbildung geglättet mit:

$$M = \frac{(S_{HW} + S_{NW})}{2}$$

wobei M = Mittelwert
 S_{HW} = Stau Hw
 S_{NW} = Stau Nw ist.

Der so ermittelte Wert wird alle 6 h aufgetragen. Um eine zeitliche Vergleichbarkeit zwischen den Daten Aberdeen, Immingham und dem Reststau in Cuxhaven zu erreichen, erfolgt eine zeitliche Verschiebung. Das bedeutet, daß die Daten von Aberdeen und Immingham 15 h später aufgetragen werden als sie eingetreten sind. Diese Zeitspanne ist für Aberdeen ein wenig länger als die normale Eintrittszeitdifferenz, die bei 13 - 14 h liegt. Für Immingham ist der Wert von 15 h sehr groß, da nach KOOPMANN (1962) die Verlagerung des Peaks von Immingham bis Cuxhaven bei etwa 6,5 Stunden liegt.

Aufgetragen und verglichen wird dieser Wert mit dem Reststau in Cuxhaven, d. h. mit jenem Stau, der nicht durch die Wirkung des Windes und des Luftdrucks im Küstenvorfeldes erklärt werden kann. Dieser Stau wird berechnet, indem die Differenz zwischen dem eingetretenen und dem vorausberechneten Wasserstand ermittelt wird. Hiervon wird der Tabellenstau und der Luftdruck zum Zeitpunkt von Hoch- und Niedrigwasser minus 1015 hPa abgezogen.

Dabei ist der Tabellenstau (T_{st}) jener Stau, den das BSH für Windrichtung und Windstärke (kn.) 3,5 h vor Eintritt des Hoch- und Niedrigwassers berechnet, also der „reine Windstau“. Für den lokalen Stau, der sich aus Tabellenstau und dem Luftdruckeinfluß auf den Wasserstand zusammensetzt, wird ein Listenstau erstellt, der für diese Parameter die statistischen Höhen angibt, so daß die Berechnung des Reststaus eine Routinearbeit im BSH ist.

5.2.2 Kollektivbildung und Definition von Fernwellen

Bei Glättung der Stauberechnungen in Aberdeen, Immingham und der Reststaukurve von Cuxhaven sind Schwingungen in Aberdeen und Immingham in Höhe von ± 40 cm zu vernachlässigen, da sie alltäglich von örtlichen, meteorologischen Faktoren verursacht werden und daher nicht als Fernwellen zu bezeichnen sind. Um das alltägliche Rauschen durch Seegang, örtlichem Wind etc. zu eliminieren, wird eine Fernwelle wie folgt definiert:

- Sie muß in Aberdeen und in Immingham auftreten.
- Stau in Aberdeen ≥ 40 cm.
- Geringfügig erhöhte Wasserstände ≥ 20 cm werden berücksichtigt, wenn diese eine Wasserstandserhöhung unmittelbar nach bzw. vor einer Fernwelle darstellen, und somit ein deutlicher Zusammenhang mit der Fernwelle nachzuweisen ist.
- Alle *surges*, die in Immingham niedrigere Werte als in Aberdeen erreichen, werden nicht verwendet. Ausnahme bilden jene Fälle, bei denen die Höhendifferenzen zwischen $h_{\max Ab}$ und $h_{\max Im}$ von ± 10 cm nicht überschritten werden und sie somit hinsichtlich ihres Charakters eindeutig als Fernwelle einzuordnen sind.
- Die Zeitdifferenz ΔT zwischen $T_{\max Im} : T_{\max Ab}$ darf nicht größer als 5 h sein.

Grundsätzlich müßte zur Analyse der definierten Fernwellen die jeweilige Wettersituation betrachtet werden, um genau festlegen zu können, ob es sich um eine Fernwelle handelt, wie es KOOPMANN (1962) für den Zeitraum 1956 bis 1960 tat. Dies ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu bewerkstelligen. Allerdings sind Definition und vorhergehende Untersuchungen so detailliert angefertigt worden, daß eine Fernwellenanalyse ohne Rekonstruktion der meteorologischen Situation aus der Bearbeitung des Staus möglich ist.

5.3 Ergebnisse

Die zu untersuchenden Fragestellungen sind:

- Welche Fernwellenhöhen treten auf?
- Welche Fernwellenhöhe tritt bei welcher Periode auf (Fernwellenhöhe bei T_{nw} und bei Th_w)?
- Wie lange dauert eine Fernwelle in der Regel an?
- Wieviel Fernwellen treten pro Jahr auf?
- Gibt es eine jahreszeitlich bedingte Häufung von Fernwellen?
- Wie groß ist der Anteil von Fernwellen im Verhältnis zum Anteil von Fernwellen bei Sturmfluten?
- Wie groß ist die Höhendifferenz Aberdeen/Cuxhaven und Immingham/Cuxhaven?
- Wie groß ist die Zeitdifferenz Aberdeen/Cuxhaven und Immingham/Cuxhaven?
- Zu welcher Periode tritt ein Fernwellenpeak in Cuxhaven auf?

Im Zeitraum von 1971 bis 1995 traten 75 Fernwellen in Aberdeen auf, die auch in Immingham und - wenngleich auch manchmal mit sehr geringer Höhe - in Cuxhaven als erhöhter, durch einen *external surge* bewirkter Wasserstand registriert werden konnten.

5.3.1 Die Fernwellenhöhe

Der Reststau, der in Cuxhaven meßbar ist und als Fernwellenhöhe außerhalb des Windeinflusses interpretiert wird, reicht von 10 cm bis 109 cm bei einer Ausgangshöhe in Aberdeen von 30 cm bis 108 cm. KOOPMANN (1962) gibt eine maximale Reststauhöhe für Cuxhaven von 170 cm an, die er durch eine fortschreitende Luftdruckänderung in Höhe der Geschwindigkeit von „freien Wellen“ im darunterliegenden Wassers erklärt (also durch fortschreitende Luftdruckschwankung). Hierbei ist jedoch nicht eindeutig, ob diese per Definition tatsächlich als *external surge* bezeichnet werden kann, die als *deep water surge* im Atlantik entstanden ist oder nur auf meteorologische Einflüsse in der Nordsee zurückzuführen ist. Sind sie durch meteorologische Einflüsse in der Nordsee entstanden, d.h. durch Überlagerung der fortschreitenden Luftdruckänderung mit der freien Welle, können sie nicht als *external surge* bezeichnet werden. Für *external surges* selbst gibt er eine Abhängigkeit der Höhe von der Wassertiefe an. So treten laut KOOPMANN (1962) bei Hochwasser *external surges* in Cuxhaven von maximal 95 cm, bei Niedrigwasser von 120 cm auf. Die vorliegende Untersuchung ermittelte eine maximale Reststauhöhe in Cuxhaven von 90 cm bei Hochwasser und 109 cm bei Niedrigwasser. Demzufolge könnte die Aussage von KOOPMANN(1962) bestätigt werden. Es bleibt aber zu bedenken, daß diese Werte recht dicht beieinander liegen und eine Differenzierung in Eintritt bei Hoch- und bei Niedrigwasser eher als künstlich anzusehen ist (s.u.).

Im Zeitraum von 1971 - 1995 bewirkten die 75 *external surges* in Cuxhaven eine Reststauhöhe zwischen 10 cm und 108 cm.

Neben der rein statistischen Auflistung der Höhen der *external surges* in Aberdeen, Immingham und Cuxhaven, stellt sich die Frage: Wie hoch muß eine Fernwelle in Aberdeen und Immingham sein, damit sie noch Auswirkungen im Reststau in Cuxhaven hat? KOOPMANN (1962:192) stellt hierzu allgemein fest, „daß nur dann im Reststau bei Cuxhaven

eine merkliche Erhöhung zu verzeichnen war, wenn die Energie der an der englischen Küste beobachteten Schwallerhöhen groß war”.

Bestätigt werden kann mit der vorliegenden Untersuchung, daß von den 75 Fernwellen in gut 70% der Fälle in Cuxhaven eine deutliche Verringerung des Reststaus zu verzeichnen ist, wobei zum größten Teil die Höhendifferenz bei -1 bis -20 cm liegt. Deutlich weniger Fernwellen werden von Aberdeen bis Cuxhaven um 20 bis 40 cm niedriger (Tab. 5-1). Nur einige Fernwellen erreichen in Cuxhaven einen Reststau, der höher ist als in Aberdeen. Dabei ist bemerkenswert, daß dies grundsätzlich alle bisher aufgetretenen Höhendifferenzbereiche betrifft.

Höhendifferenz Aberdeen : Cuxhaven	Anzahl
-41 bis -50	2
-31 bis -40	1
-21 bis -30	1
-11 bis -20	2
0 bis -10	11
0	5
1 bis 10 cm	24
11 bis 20 cm	17
21 bis 30 cm	6
31 bis 40 cm	6
> 40 cm	0

Tab. 5-1: Höhendifferenz Aberdeen : Cuxhaven

So läßt sich insgesamt kein Zusammenhang zwischen der Fernwellenhöhe in Aberdeen und der Höhendifferenz Aberdeen : Cuxhaven erkennen. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß in der Regel die Fernwelle auf dem Weg von Aberdeen bis Cuxhaven um rund 20 cm abnimmt. Erhöhungen des Reststaus in Cuxhaven im Verhältnis zu Aberdeen müssen mit lokalen, nicht durch Fernwellen bedingten Ursachen zusammenhängen.

In der Regel nimmt die Fernwellenhöhe von Aberdeen bis Cuxhaven deutlich ab. In Einzelfällen kann die Fernwelle bis Cuxhaven an Höhe gewinnen.

Die Entwicklung der Fernwellenhöhe von Aberdeen bis Cuxhaven läßt sich besser analysieren, wenn Immingham hinzugezogen wird. Die Höhendifferenz zwischen Aberdeen und Immingham und Immingham und Cuxhaven gibt ein anschauliches Bild über die Höhenentwicklung einer Fernwelle.

In Abb. 5-1 ist deutlich erkennbar, daß nahezu grundsätzlich die Fernwellen von Aberdeen bis Immingham an Höhe gewinnen. Die Höhenunterschiede können beträchtlich sein und erreichen Werte von bis über 80 cm. Nur in ganz seltenen Fällen verlieren sie an Höhe.

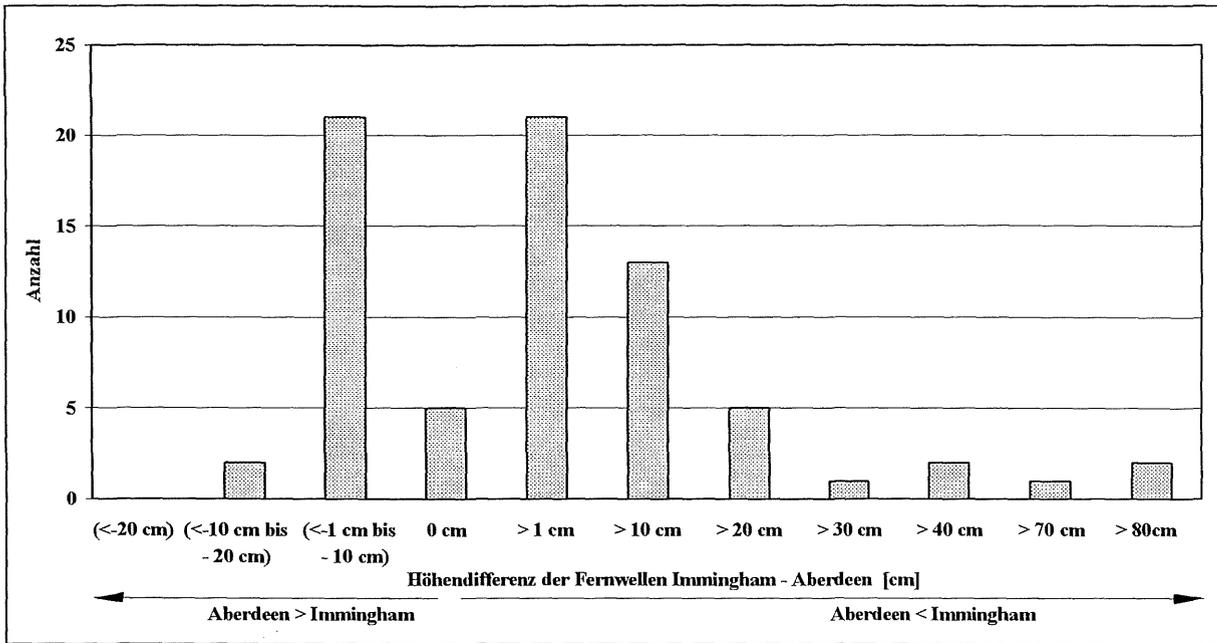


Abb. 5-1: Höhendifferenz Immingham : Aberdeen

Eine Abhängigkeit der Höhendifferenz zwischen Immingham und Aberdeen von der absoluten Höhe in Aberdeen läßt sich nicht zwangsläufig ableiten (Abb. 5-2). Die Höhendifferenzen schwanken von + 20 cm bis - 20 cm. Differenzen ≤ -20 cm können bei allen Ausgangshöhen auftreten, mit einer leichten Zunahme der Häufigkeit von "großen" Höhendifferenzen bei hohen Ausgangs-Fernwellen in Aberdeen. Infolgedessen kann nicht von einer generellen Korrelation gesprochen werden, sondern vielmehr von einer Erhöhung der Möglichkeit, daß die Höhendifferenz (Aberdeen - Immingham) zunimmt bei größerer Ausgangshöhe in Aberdeen.

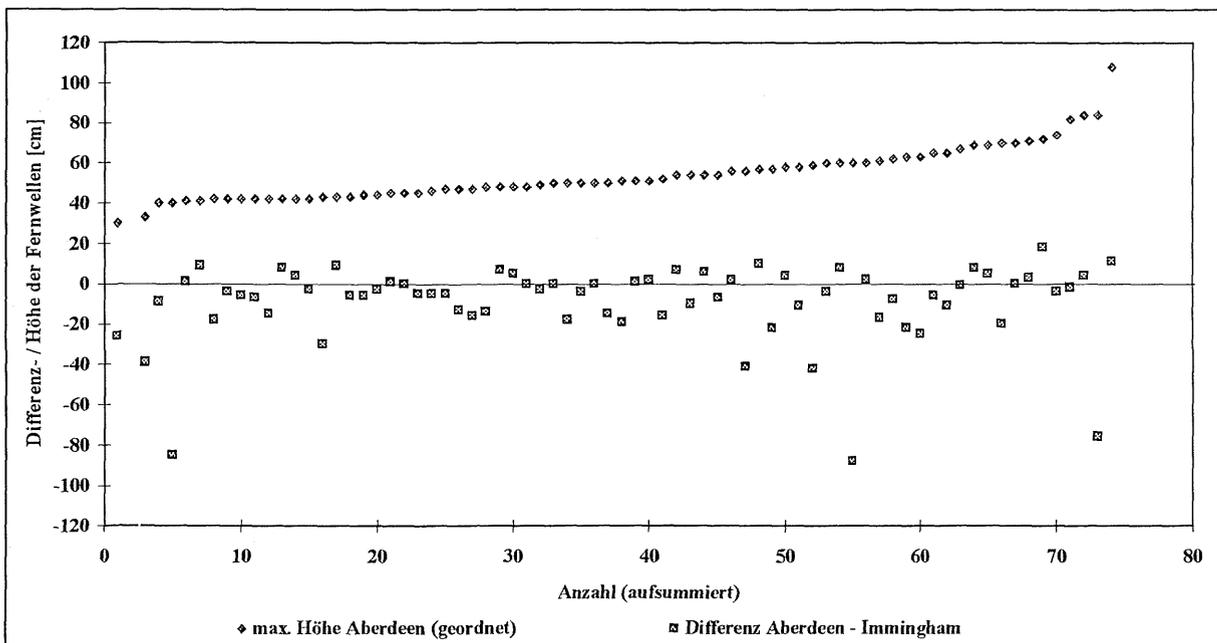


Abb. 5-2: Abhängigkeit der Höhendifferenz Aberdeen : Immingham von der absoluten Höhe in Aberdeen

Wird der weitere Verlauf der Fernwelle von Immingham bis Cuxhaven betrachtet, so zeigt sich, daß die Fernwelle von Immingham bis Cuxhaven wieder an Höhe verliert. In der Regel nimmt sie zwischen wenigen Zentimetern bis 30 cm wieder ab. Es treten aber auch Höhenabnahmen von bis zu 60 cm auf. In ganz seltenen Fällen erhöht sich die Fernwelle von Immingham bis Cuxhaven wieder. Dann muß aber von lokalen, die Fernwelle nicht betreffenden Einflüssen, ausgegangen werden, die den Reststau erhöht haben.

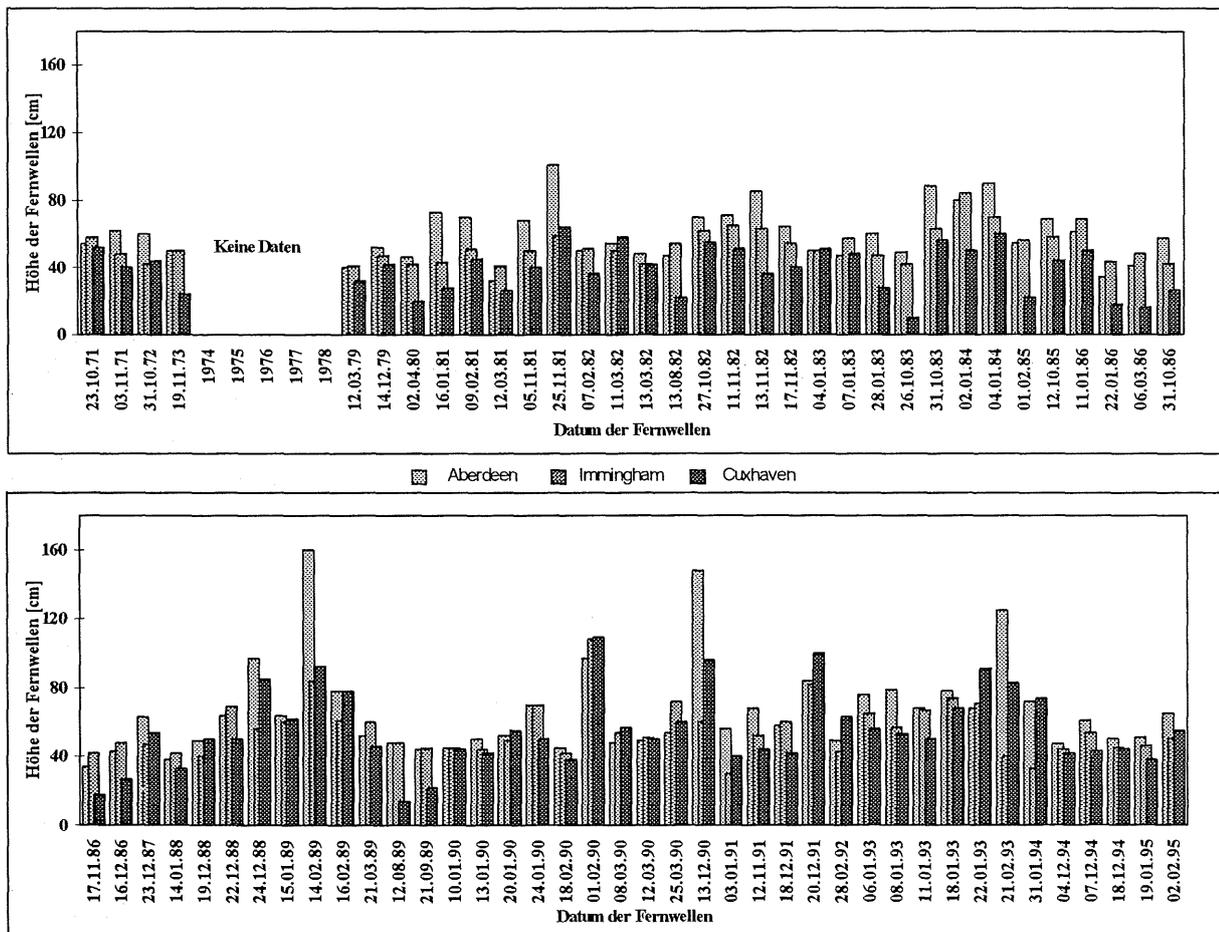


Abb. 5-3 : Maximale Fernwellenhöhen in Aberdeen, Immingham und Cuxhaven

Infolgedessen kann hier ausgesagt und bestätigt werden, daß eine Fernwelle, die in Aberdeen als solche erkannt und definiert wurde, dem Tideverlauf folgt. Auf diesem Weg entlang der schottischen und britischen Küste gewinnt die Fernwelle an Höhe, die sie dann in der Straße von Dover wieder verliert, so daß sie in Cuxhaven in verminderter Höhe ankommt (Abb. 5-3).

Abb. 5-4 zeigt die Korrelation zwischen der absoluten Höhe in Immingham und der Höhendifferenz Immingham zu Cuxhaven. Es ist deutlich zu erkennen, daß eine Korrelation besteht. Mit zunehmender Höhe in Immingham nimmt die Möglichkeit einer größeren Höhendifferenz zu, das heißt die absolute Höhe des Reststaus nimmt in Cuxhaven ab. Höhendifferenzen größer als 40 cm treten erst bei absoluten Höhen von 70 cm in Immingham auf. Das heißt bei großen Fernwellenhöhen in Immingham verliert die Fernwelle in der Straße von Dover am meisten an Höhe. Allerdings ist diese Korrelation nicht zwangsläufig. Bei allen Fernwellenhöhen in Immingham können in Cuxhaven Höhenabnahmen von 40 cm bis zu Höhenzunahmen von rund 30 cm auftreten.

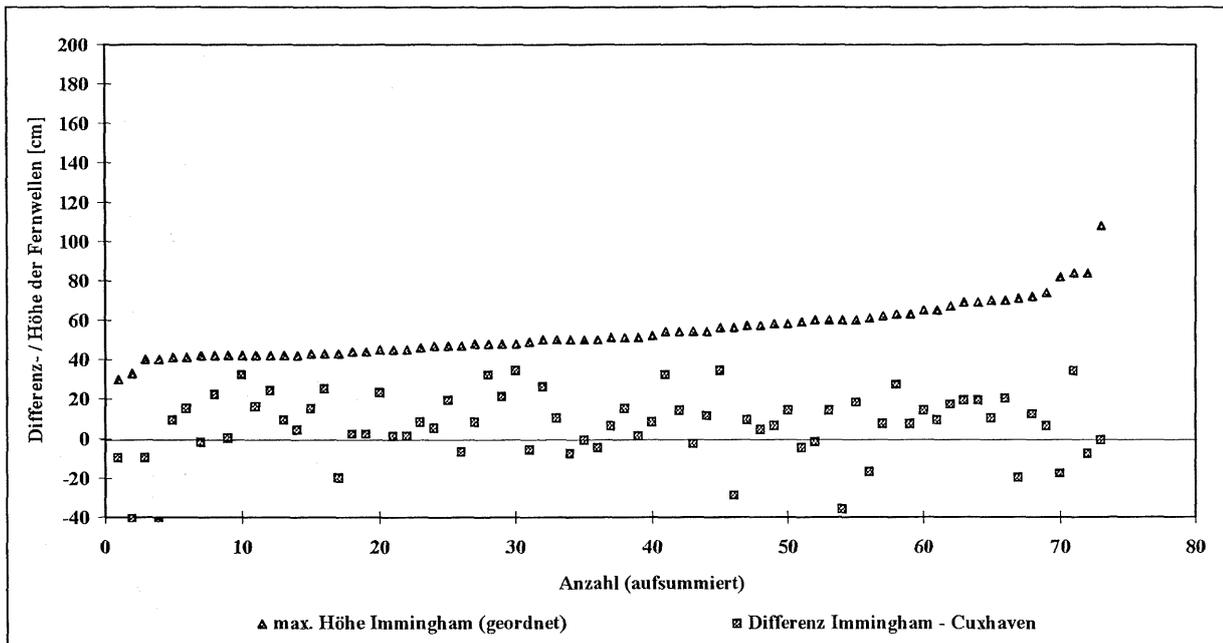


Abb. 5-4: Abhängigkeit der Höhendifferenz Immingham : Cuxhaven von der absoluten Höhe in Immingham

Für eine Vorhersage ist es notwendig, einen Parameter zu finden, der zumindest einen Anhalt über die Höhe der Fernwelle in Cuxhaven gibt. Einen ungefähren Wert bietet bereits die Korrelation der Höhe Immingham mit der Höhendifferenz Immingham : Cuxhaven. Sehr viel genauer wird aber die Betrachtung der Entwicklung der Höhendifferenz von Aberdeen über Immingham nach Cuxhaven.

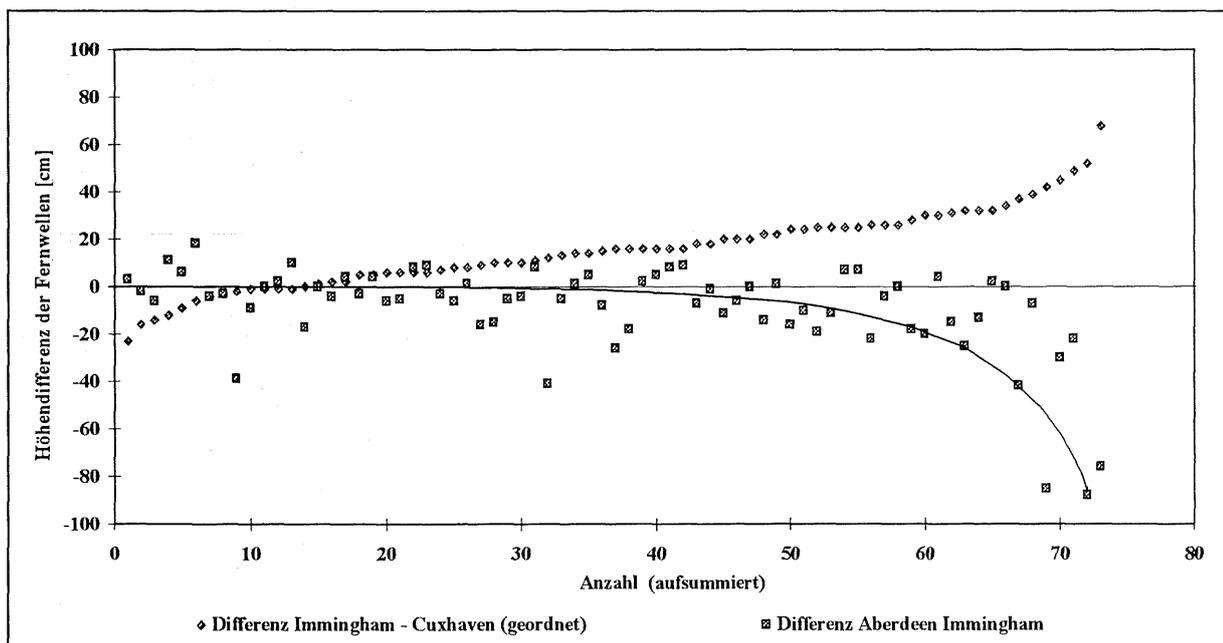


Abb. 5-5: Korrelation der Höhendifferenz Immingham-Aberdeen zu Immingham-Cuxhaven

Deutlich ist zu erkennen, daß bei zunehmender Höhendifferenz von Aberdeen bis Immingham (negative Werte nehmen an Größe zu) die Höhendifferenz von Immingham bis Cuxhaven ebenso zunimmt, das heißt der Reststau in Cuxhaven kleiner wird (Abb. 5-5).

Für eine Vorhersage insbesondere im Sturmflutfall ist es sinnvoll, die Höhendifferenz von Aberdeen zu Immingham zu betrachten und diese etwa umgekehrt proportional zur Höhe von Immingham zu addieren.

5.3.2 Die Dauer der Fernwelle

Die Dauer der Fernwelle wird in Aberdeen ermittelt, indem der Zeitraum in Aberdeen ≥ 20 cm als Fernwellen-Dauer gilt. Nach diesem Kriterium reicht die Dauer in Aberdeen von 8 h bis 36 h.

Vereinzelte Ausnahmen (5) erreichen eine Dauer von 40 - 91 h, wobei der Maximalwert von 91 h bisher einmal zu verzeichnen war. Dies ist mit langen, andauernden *surges* oberhalb von 20 cm in Aberdeen zu erklären, die mit der Fernwelle nicht immer direkt gleichzusetzen sind. Dabei ist zu bedenken, daß die Dauer bis Cuxhaven sich wesentlich verkürzt.

5.3.3 Häufigkeit der Fernwellen pro Jahr und deren zeitliche Lage innerhalb des Jahres

Fernwellen treten im Beobachtungszeitraum jährlich ein bis sechs mal auf. Nur 1982 und 1990 gab es eine Häufigkeit von acht (1982) und gar zehn (1990) Fernwellen (Abb. 5-6). Während 1982 hinsichtlich der Anzahl der Sturmfluten in Cuxhaven keine besonders hohe Häufigkeit zu verzeichnen ist, gehört das Sturmflutjahr 1990 zu jenen, in denen eine sehr hohe Anzahl an Sturmfluten auftrat, auch wenn diese in anderen Jahren ebenfalls erreicht wurde. Über den kurzen Beobachtungszeitraum läßt sich kein Trend in Richtung eines häufigeren Eintretens von Fernwellen ermitteln.

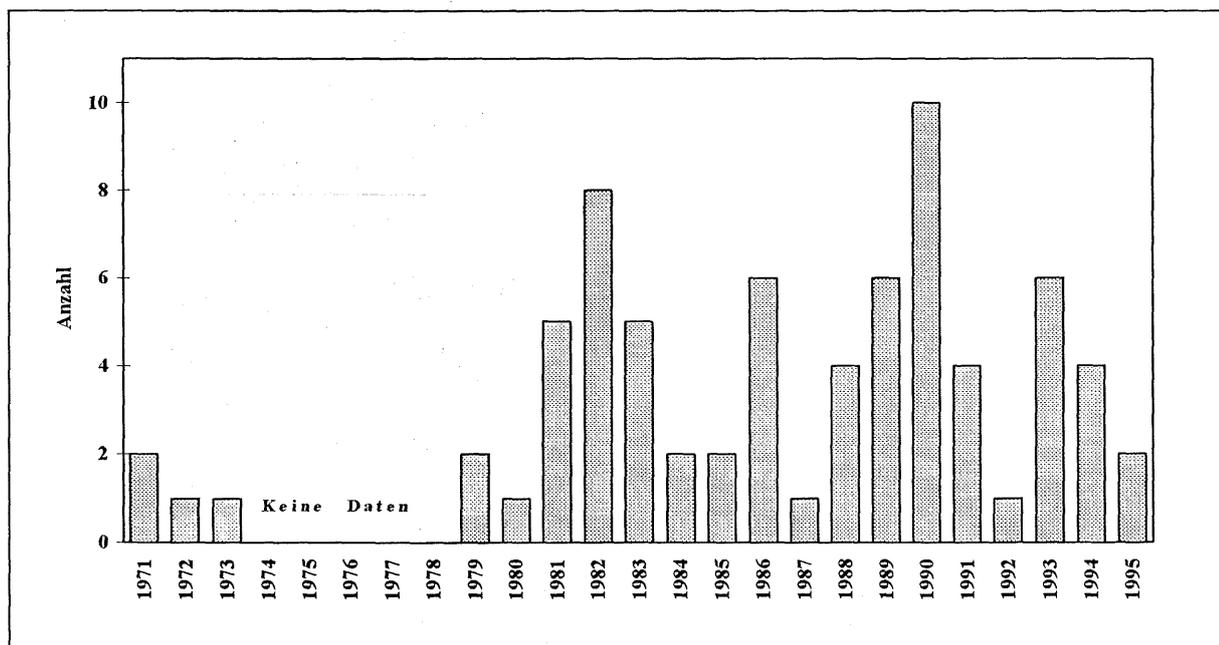


Abb. 5-6: Häufigkeit der Fernwellen pro Jahr

Die Fernwellen treten in erster Linie in den Wintermonaten von Oktober bis März auf, mit einem absoluten Peak im Januar vor (Abb. 5-7). Sehr viel seltener sind sie im Laufe des

Untersuchungszeitraumes im April, August und September zu verzeichnen. Dies entspricht der Häufigkeitsverteilung von Sturmfluten über das Jahr.

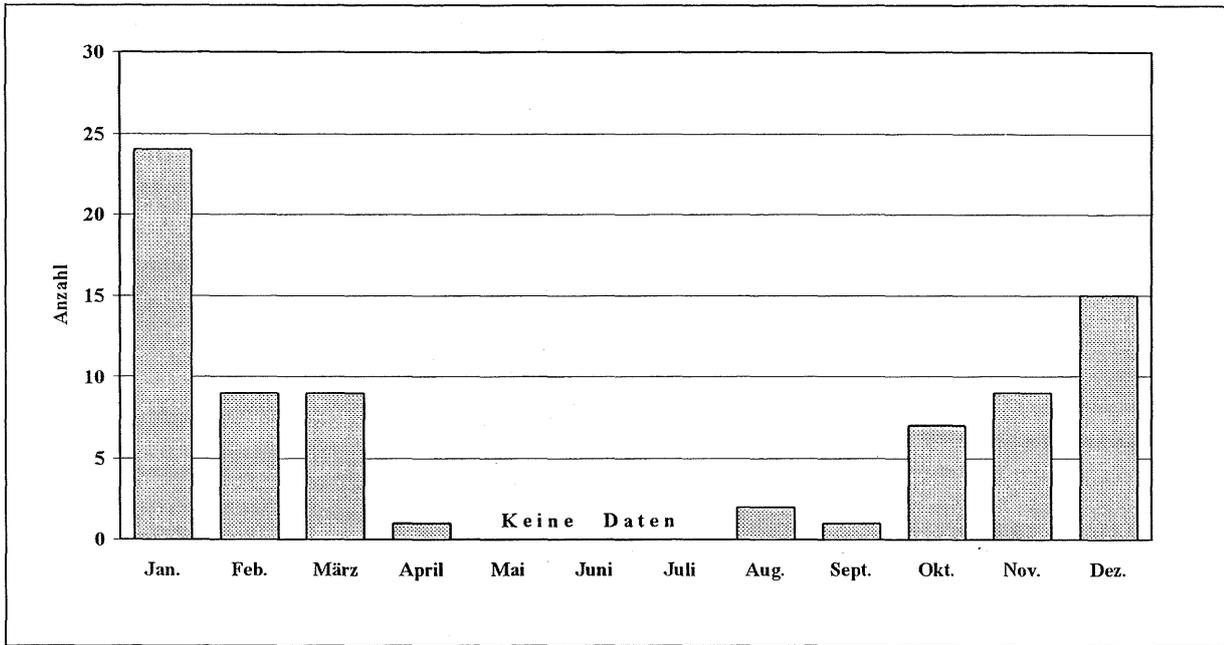


Abb. 5-7: Häufigkeit der Fernwellen pro Monat für den Zeitraum 1971 bis 1995

5.3.4 Häufigkeit des Eintritts einer Fernwelle zum Zeitpunkt einer Sturmflut und ihr Einfluß auf die Sturmfluthöhe

Bei der Thematik "external surges" besteht grundsätzlich die Frage, ob, wann, wie häufig und in welcher Höhe Fernwellen zeitgleich mit dem Eintreten einer Sturmflut festzustellen sind. Die Erkenntnis, daß Fernwellen in erster Linie in der Sturmflutsaison auftreten, verstärkt die Notwendigkeit der Beantwortung dieser Fragen. Hierfür werden die Fernwellen mit ihrer maximalen Höhe den Sturmfluten gegenübergestellt.

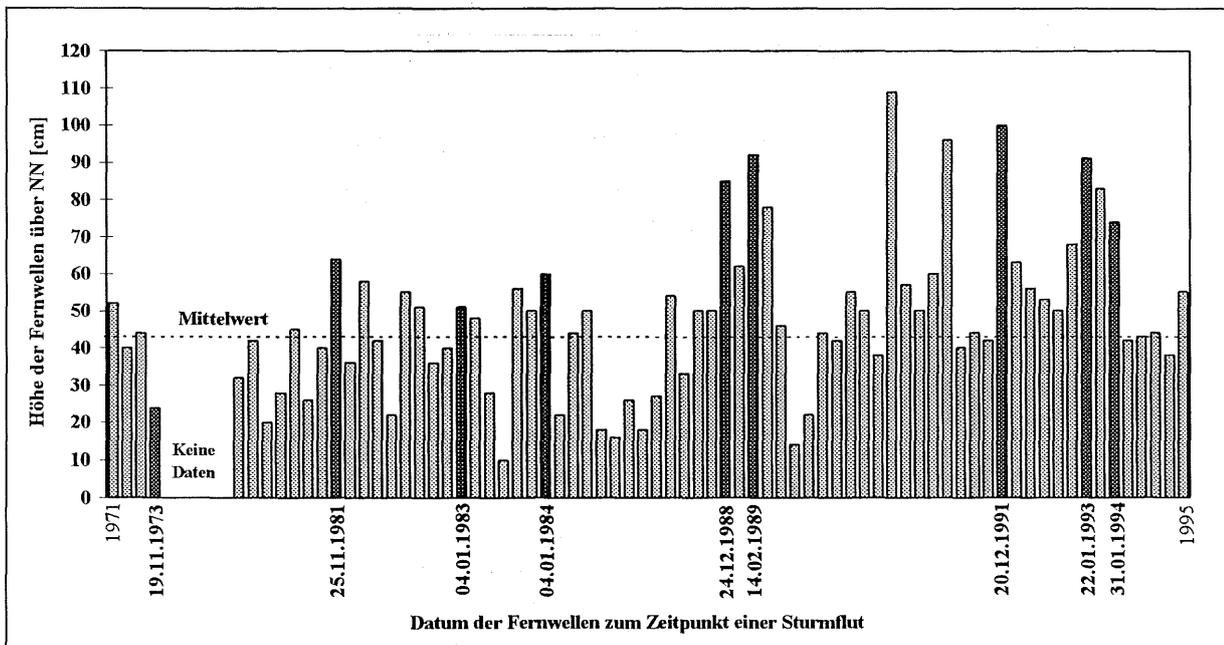


Abb. 5-8: Häufigkeit von Fernwellen zum Zeitpunkt einer Sturmflut für den Zeitraum 1971 bis 1995

Abb. 5-8 zeigt, daß von den 75 Fernwellen im Zeitraum 1971 bis 1995 neun zeitgleich mit einer Sturmflut auftraten. Umgekehrt formuliert traten im Zeitraum 1971 bis 1995 abzüglich der Jahre 1973 bis 1978 in Cuxhaven 39 Sturmflutereignisse (Windstaukurven) auf, die 54 Sturmflutscheitel verursachten, bei denen die Scheitelhöhe in neun Fällen maßgeblich durch eine Fernwelle beeinflusst wurde. Das bedeutet, daß in jedem vierten bis fünften Sturmflutfall eine Fernwelle einen deutlichen Einfluß ausübte, der somit von nicht zu vernachlässigender Bedeutung ist.

Die Höhe der Fernwellen in Cuxhaven, die zum Zeitpunkt einer Sturmflut auftraten, schwankt zwischen 25 cm und 100 cm, wobei drei Fernwellen eine Höhe zwischen 45 und 65 cm erreichen und fünf weitere 75 cm bis 100 cm. Somit ist auch die Höhe einer Fernwelle für die Betrachtung einer Sturmflut nicht unerheblich.

Die Höhen der von Fernwellen beeinflussten Sturmfluten in Cuxhaven liegen mit 797 cm bis 951 cm zwischen niedrigen bis schweren Sturmfluten. Zwar erreicht eine Sturmflut 286 cm über MThw, von einer sehr schweren Sturmflut kann bisher aber nicht gesprochen werden.

STURMFLUT (Nr.)	19.11.73 (115)	24.11.81 (147)	04.01.83 (153)	04.01.84 (160)	24.12.88 (180)	14.02.89 (182)	20.12.91 (202)	23.01.93 (207)	31.01.94 (219)
SCHEITEL [cm]	907	951	866	853	838	797	864	934	876
Zeitpunkt (Tag)	19:30	23:41 (24.11.)	17:02	01:32	13:52	18:10	11:19	01:13	02:31
WINDSTAU [cm]	290	350	215	230	210	330	220	285	235
Zeitpunkt (Tag)	18:00	7:10 (24.11.)	17:10	05:20	09:45	13:00	07:00	01:10	02:15
FERNWELLEN [cm]	24	64	51	60	85	92	100	91	74
Zeitpunkt (Tag)	23:00	04:00 (25.11.)	15:00	05:00	17:00	18:00	15:00	22:30 (22.01.)	24:00

Tab. 5-2: Von Fernwellen beeinflusste Sturmfluten

Kommentar:

Nr. 115: Die Fernwelle erreicht Cuxhaven deutlich nach dem Windstaumaximum und dem Hochwasserzeitpunkt.

Nr. 147: Der Reststau in Cuxhaven weist zum Zeitpunkt des Windstaumaximums einen ersten Peak von 75 cm auf, das nicht eindeutig mit der Fernwelle in Aberdeen - die dort erst ansteigt - in Zusammenhang zu bringen ist. Das zweite niedrige Fernwellenpeak von 64 cm liegt außerhalb der Windstau- und Scheitelpeaks und führt bei keinem zu einer Erhöhung. Auch der sehr langsame Abfall dieser Kettentide wird nicht in seinem Verlauf verändert. Der erste Reststauppeak von 75 cm dagegen, der nicht als Fernwelle zu definieren ist, hat dagegen einen deutlichen Einfluß auf das Windstaumaximum. Um so mehr ist hieran zu erkennen, daß eine Fernwelle im Windstau und damit in der Vorhersage über den Windstau nicht separat berücksichtigt werden muß, da sie in diesem erhalten ist.

Nr. 153: Die Fernwelle liegt unmittelbar im ansteigenden Ast der Sturmtide und hat keinerlei Einfluß auf das Windstaumaximum und das Sturmhochwasser.

Nr. 160: Die Fernwelle liegt mit ihrem Maximum unmittelbar vor dem Windstaumaximum und im abfallenden Ast der Sturmtide. Sie hat keinerlei Wirkung auf den Hochwasserscheitel.

Nr. 180: Das Fernwellenmaximum liegt im abfallenden Ast der Sturmflut und hinter dem Windstaumaximum. Es trägt dazu bei, daß der Abfall der Sturmflut bzw. der Windstaukurve langsamer erfolgt als durch den Windabfall zu prognostizieren wäre.

Nr. 182: Das Fernwellenmaximum liegt unmittelbar zum Zeitpunkt des Hochwassers und beeinflusst damit maßgeblich die Sturmfluthöhe. Bei dieser Sturmflut handelt es sich jedoch mit 797 cm um eine sehr niedrige. Hier entspricht die Situation der Sturmflut Nr 180: Die Windgeschwindigkeit fällt deutlich ab, was einen relativ raschen Abfall des Staus zur Folge hätte haben müssen. Der vermutlich durch eine Fernwelle bedingte Reststau bremst diesen Abfall jedoch deutlich und führt mit seinem Fernwellenmaximum zur Sturmflut Nr. 182.

Nr. 202: Diese mittelschwere Sturmflut wird wiederum in ihrem abfallenden Ast von dem Fernwellenpeak beeinflusst. Auch das Windstaumaximum ist längst überschritten. Die Fernwelle trifft allerdings mit einer Windgeschwindigkeit zusammen, die nur langsam, in ihrer Intensität schwankend, abfällt, so daß der Windstau in seinem langsamen Abfall genau diesem Muster entspricht und die Fernwelle den Abfall wohl verzögert, nicht aber die folgende Tide erhöht.

Nr. 207: Die Fernwelle bzw. der Reststau in Cuxhaven folgt dem Verlauf der Windstaukurve und hat sein Maximum kurz vor Windstaumaximum und Hochwasserscheitel. Mit dem Abfall der Windstaukurve fällt auch diese hohe Fernwelle ab.

Nr. 219: Das Fernwellenmaximum liegt vor dem Windstaumaximum und dem Hochwasserscheitel. In ihrem Abfall beeinflusst die Fernwelle das Windstaumaximum und den Scheitelwasserstand in ihrer Höhe.

Die Höhen- und Zeitdifferenz des Eintritts der Peaks zwischen Aberdeen und Cuxhaven ist auch bei Sturmfluten nicht gleichmäßig, so daß hieraus allein keine Aussage getroffen werden kann.

Wie aus der Tab. 5-2 und dem Kommentar ersichtlich, können die Fernwellenpeaks zu allen Tidephasen bei Sturmfluten auftreten und dementsprechend die Windstaukurve unterschiedlich beeinflussen. Deutlich wird, daß vor allem für die Vorhersage jene Fälle interessant sind, wenn die Windgeschwindigkeit abfällt, der Stau aber nicht entsprechend, so daß die nachfolgende Tide erhöht sein und die Routinevorhersage über Wind und Stau problematisch werden kann. Fernwellen, die bisher bei Hochwasser aufgetreten sind, folgten dem Verlauf des Windes und konnten deshalb bisher trotz erheblicher Höhe bei der Kombination Windstau, Windgeschwindigkeit und -richtung der korrekten Vorhersage nicht im Wege stehen.

Bei der Berechnung von Deichhöhen ist es sicherlich sinnvoll, über die etwaige Eintrittshöhe einer Fernwelle informiert zu sein. Für die Berechnung eines zukünftigen Scheitelwasserstandes ist die Berücksichtigung der bisher eingetretenen Wasserstände ausreichend, da diese den bisherigen Fernwelleneinfluß und dessen Entwicklung mit einbezieht.

Die Problematik der Fernwellenhöhe bezogen auf „climate change“ und „greenhouse-effect“ liegt eher darin, daß nicht gesichert ist, ob sich die Geschwindigkeit, mit der die Zyklonen ziehen, bei einer globalen Erwärmung ändern könnte oder nicht. Eine Erhöhung der Zugeschwindigkeit würde auch eine Erhöhung der Fernwellen zur Folge haben. Diese Möglichkeit wird von Modellen bisher nicht berechnet und wurde auch in der Natur nicht festgestellt, so daß zur Zeit nicht davon ausgegangen werden muß, daß sich die Fernwellen signifikant erhöhen werden.

5.3.5 Zeitdifferenz der Eintrittszeit der maximalen Höhen Aberdeen - Immingham - Cuxhaven

Bei der Untersuchung der zeitlichen Differenz des Eintritts der Peaks in Aberdeen, Immingham und Cuxhaven muß auf bereits geänderte Daten zurückgegriffen werden, da vom BSH die Eintrittszeiten von Aberdeen und Immingham mit 15 h addiert wurden.

In der vorliegenden Untersuchung zeigt sich, daß die zeitliche Differenz zwischen Aberdeen und Immingham in der Regel zwischen zwei und fünf Stunden liegt, im Mittel bei ca. 4 h. Vereinzelt reicht sie bis zu 13 h. Diese Erkenntnis läßt zwei Vermutungen zu:

1. Das Fernwellenpeak benötigt von Aberdeen bis Immingham im Mittel rund 4 h.
2. Die großen Abweichungen von der unter 1. genannten Zeit entsteht durch die langen Zeitabstände zwischen den aufgenommenen Daten in Aberdeen und Immingham. Die Abstände der Daten sind zu lang, um den exakten zeitlichen Ablauf der Fernwelle darstellen zu können.

Der Vergleich der zeitlichen Differenz Immingham zu Cuxhaven ist problematischer. Hier liegt die Bandbreite zwischen 7 h und -10 h. Eine Differenz von ca. -9 h hätte die Aussage von KOOPMAN (1962) von einer zeitlichen Differenz mit 6,5 h bestätigt. Die große Spanne allerdings läßt weniger die Annahme zu, daß KOOPMAN (1962) unrecht gehabt hätte als vielmehr, daß eine zeitliche Differenz von 15 h bei weitem zu hoch gegriffen ist, zumal die meisten Differenzen im negativen Bereich liegen. Da es sich aber um eine große Spannbreite an zeitlichen Differenzen handelt, läßt sich bei einem Fernwellenpeak keine zeitliche Abfolge von Immingham bis Cuxhaven ermitteln. Infolgedessen läßt sich schlußfolgern, daß

1. die Aufnahme der Daten alle sechs Stunden bei weitem zu kurz ist und die Abstände der Daten damit zu lang, um den zeitlichen Ablauf der Fernwelle darstellen zu können.
2. die Fernwelle in ihrem zeitlichen Ablauf nicht der Tide folgt.

Erst der Vergleich der Eintrittszeiten zwischen Aberdeen und Cuxhaven kann klären, ob neben der zu geringen Datenanzahl das grundsätzliche Prinzip der Hydrodynamik der Fernwellen in Frage gestellt werden muß.

Die zeitliche Differenz zwischen Aberdeen und Cuxhaven zeigt ein etwas systematischeres Bild. Sie liegt zwischen 0 h und 6 h; nur in wenigen Ausnahmen wird sie größer. Selten liegt die zeitliche Differenz bei 0 h bis -3 h. Wird davon ausgegangen, daß die vom BSH addierten 15 h ca. 1 - 2 h zu viel sind und außerdem berücksichtigt, daß nur alle sechs Stunden Werte aufgetragen wurden, so liegen diese Differenzen innerhalb des Rauschens, welches durch die relativ großen Datenschnitte zwangsläufig groß ist. Demzufolge kann bei der Differenz Aberdeen - Cuxhaven davon ausgegangen werden, daß ein Fernwellenpeak dem Tideverlauf folgt und dementsprechend 13 - 14 h nach Eintritt in Aberdeen in Cuxhaven aufläuft.

Die These, die beim Vergleich der Eintrittszeiten Immingham - Cuxhaven gebildet wurde, daß die Fernwelle nicht der Tide folgt, wäre demnach nicht zu bestätigen.

Für den korrekten zeitlichen Vergleich der Eintrittszeiten sind Daten alle sechs Stunden zu wenig. Weiterhin ist die Addition von 15 h, um die Eintrittszeiten der Peaks "übereinander" zu legen, vor allem für Immingham zu hoch. Die von KOOPMANN (1962) angegebenen 6,5 h für den Weg von Immingham bis Cuxhaven scheinen dagegen etwas zu niedrig, wobei die genaue Differenz aufgrund der großen Spannbreite der Differenzwerte auch hier nicht angegeben werden kann.

5.3.6 Lage und Höhe des Fernwellenpeaks zur Periode in Cuxhaven

Um herauszufinden zu welcher Periode das Fernwellenpeak bzw. das Peak des Reststaus in Cuxhaven auftritt, wird die zeitliche Differenz zwischen den astronomisch vorhergesagten Tideniedrigwasserzeiten vor dem Fernwellenpeak in Cuxhaven und der Eintrittszeit des Peaks berechnet. Auf diese Weise entsteht eine Verteilung der Fernwellenpeaks über eine Tidephase (Abb. 5-9). Durch Korrelation der maximalen Fernwellenhöhe zur Tidephase läßt sich erkennen, ob eine Höhenabhängigkeit von Niedrig- und Hochwasser existiert (Abb. 5-10).

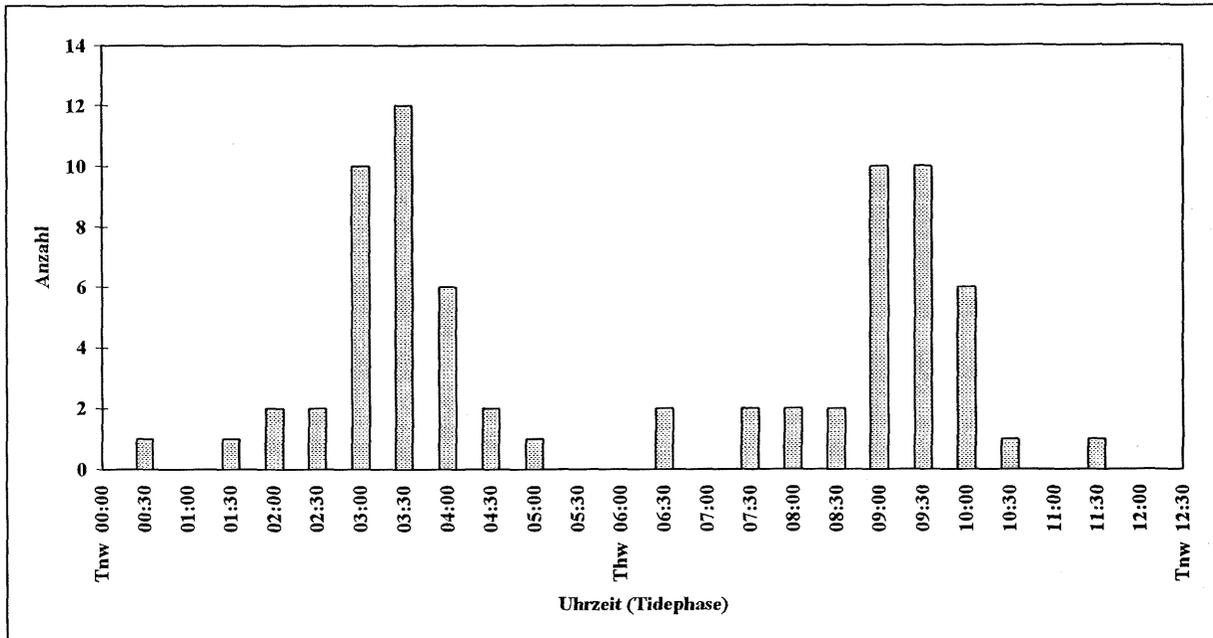


Abb. 5-9: Häufigkeit des Peaks des Reststaus (*external surge peak*) in Cuxhaven zur Tidephase

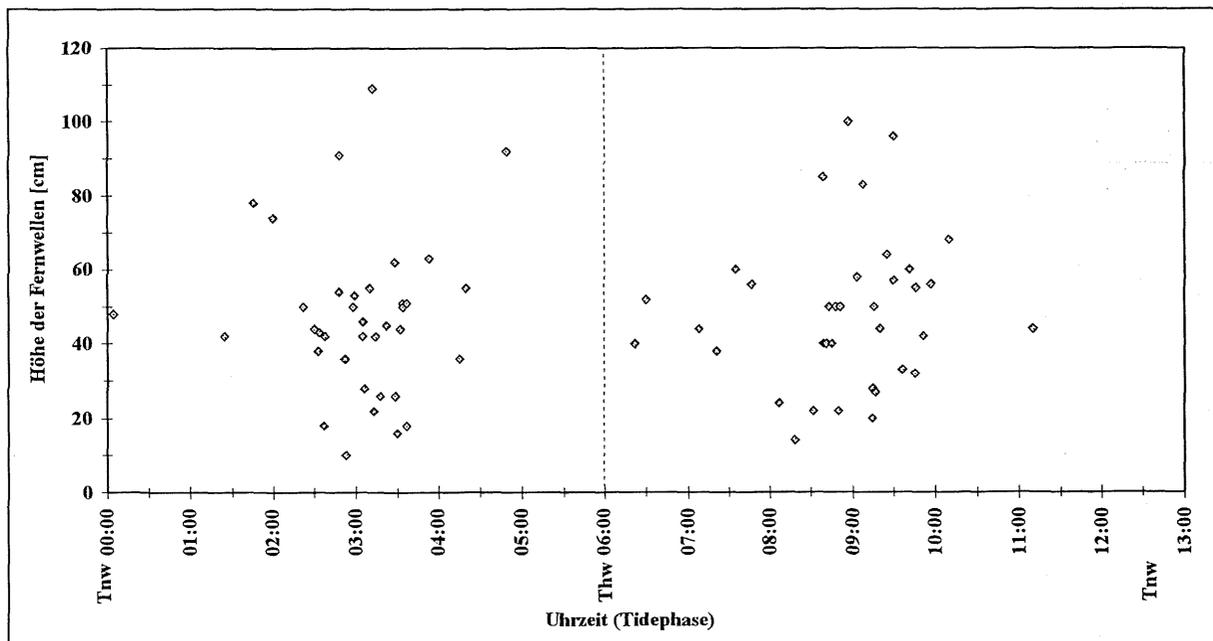


Abb. 5-10: Maximale Fernwellenhöhe in Cuxhaven zur Tidephase

Abbildung Abb. 5-9 zeigt, daß ein Peak einer *external surge* zu allen Tidephasen auftritt, außer unmittelbar zum Hochwasserzeitpunkt. Allerdings gibt es auch hier Konzentrationen größerer

Häufigkeit. So tritt der Fernwellenpeak in erster Linie und am häufigsten 2 - 3 h vor dem astronomisch berechneten Hochwasser sowie 3 - 4 h danach auf. Das bedeutet, daß die Fernwellen in erster Linie zu einer Erhöhung und Verlängerung von Anstieg und Abfall der Tide führen. Somit folgt die Häufigkeit des Peaks zur Phase tendenziell der Häufigkeit der Windstaupeaks zur Tidephase in Cuxhaven.

Die Fernwellenhöhen zwischen 10 cm und 60 cm treten zu allen Tidephasen auf (Abb. 5-10). Größere Höhen verteilen sich mit größerer Häufigkeit in dem aufsteigenden und abfallenden Ast, was in erster Linie damit zu erklären ist, daß zu diesem Zeitpunkt generell die größte Wahrscheinlichkeit existiert, daß eine Fernwelle sein Peak in Cuxhaven erreicht. Das bedeutet, daß die Fernwellenhöhe nicht den Windstaukriterien, daß bei Hochwasser niedrigere Maxima als bei Niedrigwasser auftreten, folgt. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen von KOOPMANN (1962). Allerdings war dies zu erwarten, denn eine durch die Zuggeschwindigkeit der Zyklonenbahn gebildete Höhe wird mit der Tide durch die Nordsee geführt und folgt nicht den Gesetzmäßigkeiten des Windstaus. Umso mehr ist dies ein Nachweis, daß es sich bei den ausgewählten Wasserstandsanhörungen in Aberdeen und Cuxhaven um *external surges* handelt.

6 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfaßt die Pegel Cuxhaven, Norderney, Helgoland und Wittdün auf Amrum (Abb. 6-1). Ausgewählt wurden sie nach den Kriterien Lage und Länge von vorhandenen Pegelaufzeichnungen. Die Lage der vier Auswahlpegeln deckt exemplarisch die Deutsche Bucht ab. Hinsichtlich der Pegelaufzeichnungen weisen diese vier Pegel die geringsten anthropogenen Veränderungen und durchgängigsten homogenen Aufzeichnungen auf.

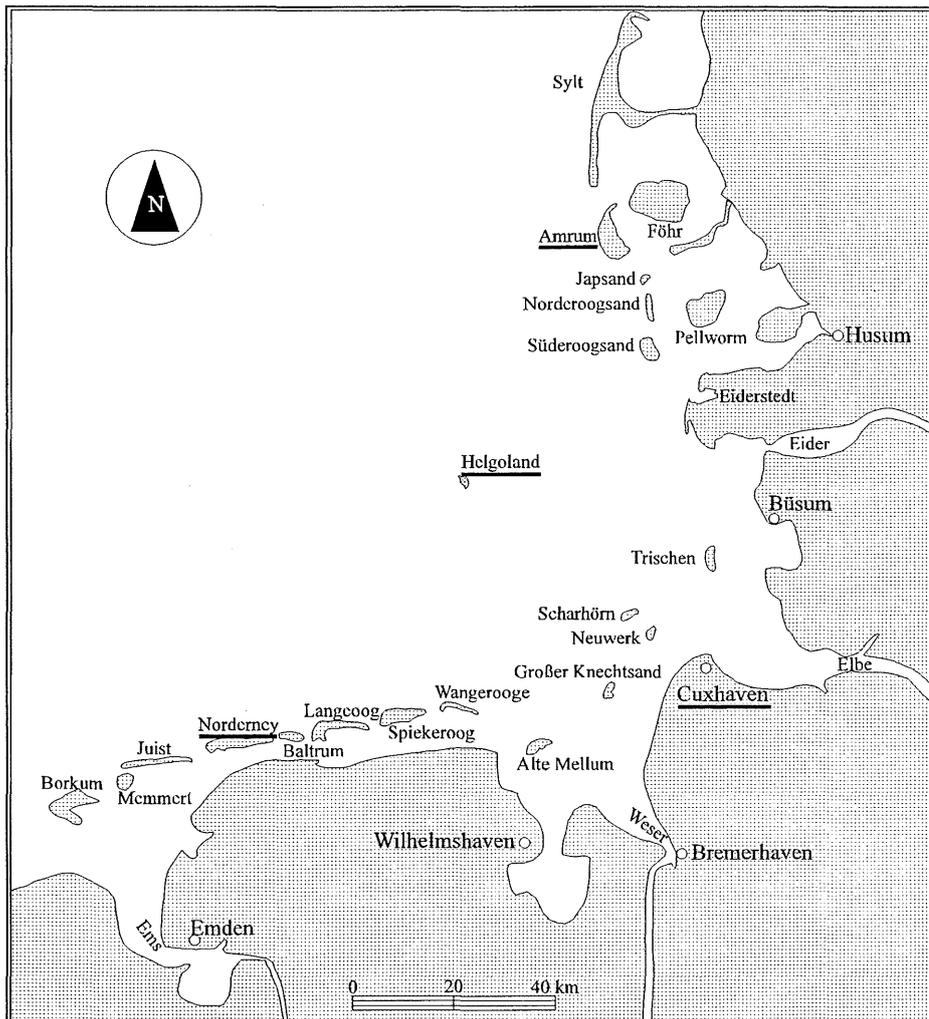


Abb. 6-1: Das Untersuchungsgebiet - Lage der ausgewählten Pegel
(Kartengrundlage: Topographische Karte 1:100.000, 1986)

Der nördliche Raum der Deutschen Bucht wird mit dem Pegel Wittdün auf der Insel Amrum bearbeitet. Andere Pegel wie Husum und Dagebüll, die längere Pegelaufzeichnungen vorzuweisen haben, sind durch Baumaßnahmen und starke morphologische Veränderungen so beeinflusst, daß sie Veränderungen im Windstau spiegeln würden, die nicht zwangsläufig mit klimatischen Veränderungen im Zusammenhang stehen (s. FISCHER, 1955). Der südwestliche Rand des Raumes wird mit dem Pegel Norderney abgedeckt, der Hochseebereich durch den Pegel Helgoland und der zentrale Bereich durch Cuxhaven. Cuxhaven ist vor allem deshalb interessant, weil hier die längste, ungestörte Zeitreihe an Pegelaufzeichnungen vorliegt, Helgoland, weil die Veränderung der Windstaukurve vom Tiefseebereich hin zur Küste beobachtet werden kann.

6.1 Die Daten

Vom WSA Emden wurden die Pegelbögen von Norderney und vom WSA Tönning die Pegeldaten von Helgoland und Wittdün zur Verfügung gestellt. Für die ausgesprochen freundliche und kooperative Zusammenarbeit sei hier noch einmal gedankt.

Für den Pegel Norderney sind die Daten und Pegelaufzeichnungen für den Zeitraum 1901-1935 sehr lückenhaft, weshalb für eine sorgfältige Windstauanalyse erst 1936 begonnen werden kann. Weiterhin muß beachtet werden, daß bis 1931 die Aufzeichnungen auf den Pegelbögen in einer sehr engen Skalierung vorliegen (4 h auf 1 cm Pegelbogenpapier), so daß die Digitalisierung des Sturmflutverlaufes weitaus ungenauer als nach 1931 und somit nicht vergleichbar ist. Bei den nach 1935 nicht vorhandenen Daten und Pegelbögen sind in der Regel die Pegel aufgrund des Sturmflutgeschehens ausgefallen. So fehlen deshalb die Sturmfluten Nr. 37/38 vom 1.12.1936; Nr. 47 vom 6.4.1943, Nr. 64-66 vom 21.12.-23.12.1954, Nr. 71 vom 27.11.1956, Nr 133 vom 24.12.1977, Nr 134 vom 31.12.1977, Nr. 138 vom 18.11.1980 und Nr. 139 vom 1.1.1981.

Für den Pegel Wittdün liegen Daten seit 1914 vor, wobei eine detaillierte Analyse erst ab dem Sturmflutjahr 1917 (mit Sturmflut vom 24.12.1918) korrekte Ergebnisse bringt, da vorher die Daten zu lückenhaft vorliegen. Bis 1926 fehlen wenige Sturmfluten, da der Pegel ausgefallen war. Diese sind so vereinzelt, daß die Analyse trotzdem als sinnvoll und statistisch signifikant zu bezeichnen ist.

Für den Pegel Helgoland ist eine sorgfältige Analyse erst seit 1950 möglich, da der Pegel vorher immer wieder über große Zeitspannen ausgefallen ist. Einzig im Zeitraum 1940-1944 liegt eine geschlossene Aufzeichnung der Pegeldaten vor, so daß diese zu dem Untersuchungszeitraum 1950-1997 hinzugezogen werden kann.

6.2 Der Bezugshorizont

Das gesamte Datenmaterial der Pegel Cuxhaven, Norderney und Wittdün wurde auf eine einheitliche Bezugshöhe NN bezogen. Änderungen des jeweiligen PN wurden für jeden Pegel separat berücksichtigt wie z.B. die vier Höhenänderungen des Pegels Wittdün. Bekannte Veränderungen des Pegels wie z.B. etwaige Sackungen, die einen Einfluß auf die Bezugshöhe hatten, wurden berücksichtigt, seien aber ebenso wie die einzelnen Veränderungen des PN hier nicht aufgeführt.

Genannt werden muß allerdings das Helgoländer Null des Pegels Helgoland. Während PN und NN für die Inseln und Küstenorte noch verhältnismäßig einfach über Festpunkte bestimmbar und auch korrigierbar im Laufe des Jahrhunderts war und ist, ist dies für den Pegel Helgoland wesentlich schwieriger, da die „Insel bisher immer noch nicht an das deutsche Höhennetz angeschlossen ist (...)“ (SIEFERT, 1990). Über Vergleiche von Mittelwasserhöhen berechnete LASSEN (1989:84 und 1995:128) die Beziehung zwischen dem „alten Helgoländer Null“ (HN) und NN mit

$$\text{HN} = \text{NN} + 25,7 \pm 1,3 \text{ cm}$$

Erwähnt werden sollten hierbei neuere GPS - Untersuchungen in Verbindung mit gravimetrischen Vermessungen und einem Quasigeoidmodell vom Institut für Erdmessung in Hannover (SEEBER/ TORGE & GOLDAN, 1995), die eine Höhe von $23,3\text{cm} \pm 2 \text{ cm}$ berechneten. In der vorliegenden Untersuchung wurden die Daten auf HN bezogen, so daß für den Vergleich mit NN zu den Ergebnissen der jeweilig neueste genaue Wert hinzugerechnet werden muß.

7.1 **Die Dauer**

Änderungen im Sturmflutklima können über die Analyse der Verweilzeit einer Sturmtide oder über die Analyse des Windstaus, der direkt die meteorologischen Einflüsse spiegelt, erfaßt werden. Eine Bearbeitung der Scheitelwasserstände kann nur einen ersten Anhalt zur Sturmflutentwicklung geben, da zum Erreichen eines bestimmten Scheitelwasserstandes völlig unterschiedliche Sturmflutabläufe - und damit verschiedene Verläufe der einwirkenden Energien - möglich sind. Deshalb reichen zur Analyse der Änderung im Sturmflutklima Verfahren, die nur die Scheitelwasserstände berücksichtigen, keineswegs aus. Um die meteorologischen Einflüsse ausreichend zu berücksichtigen, ist es notwendig, den Windstau in den Vordergrund zu stellen, wobei die Faktoren Höhe und Dauer berücksichtigt werden müssen. Während FÜHRBÖTER (1979) die Verweilzeit der Sturmtide in den Vordergrund stellt, analysiert SIEFERT bereits seit 1968 den Windstau. Zur differenzierten Bearbeitung der Sturmflutereignisse ist die Analyse des Windstaus im Vergleich zur Verweilzeit der Sturmtide deshalb sinnvoller, weil die Auswirkung des Windes auf die Tide abhängig ist von der Tidephase. Dieses Phänomen ist über die Verweilzeit der Sturmtide nicht zu erfassen, dagegen spiegelt der Windstau in Relation zur Tidephase deutlich die Auswirkung des Energieeintrages wider.

FÜHRBÖTER (1979) bestimmt auf der Basis der linearen Wellentheorie von AIRY-LAPLACE mit der Berechnung der Leistungsabgabe N die Wellenbelastung während einer Sturmflut. Aufgrund der Betrachtung der Sturmflut in Höhe und Zeit ist es möglich, Unterschiede im Ablauf einzelner Sturmflutereignisse aufzuzeigen. Weiterhin kann die Sturmflutsee- gangenergie in verschiedenen Höhen ermittelt werden. Für die Berechnung der Verweilzeiten des Windstaus in der vorliegenden Untersuchung ist es von besonderer Bedeutung, daß FÜHRBÖTER (1979) die Höhenstufen zur Berechnung der Verweilzeit detailliert analysiert und feststellt, daß bei einer Unterteilung in Höhenstufen von 0.25 m die günstigste Auflösung gegeben ist. Deshalb wird diese Differenzierung für die Berechnung der Dauer des Windstaus in der Nordsee übernommen, für die grafische Darstellung allerdings nur in 50 cm-Schritten abgebildet.

Für die Berechnung der Dauer wird in dieser Arbeit die gesamte Zeitspanne von Eintreten der Höhe bis Ende der Höhe in 0.25 m-Schritten betrachtet und nicht, wie bei den Verweilzeiten von FÜHRBÖTER (1979), die Zeit pro Höhenstufe.

7.2 **Die Parametrisierung des Windstaus**

Um die Entwicklung, die Summe der Einzeleinwirkungen, das Maximum und das Ende der sturmfluterzeugenden Windverhältnisse zu erfassen, muß der Windstau parametrisiert werden. Hierzu prüft SIEFERT (1978:78) verschiedene Möglichkeiten:

1. Die Annäherung durch eine Parabel. Aufgrund der zu großen Abstrahierung können jedoch wichtige Teile der Windstaukurve verloren gehen.
2. Die Fourieranalyse. „Die Unregelmäßigkeiten der Windstaukurve können so groß sein, daß eine Fourieranalyse eines nur kurzen Teilabschnittes keine brauchbare Extrapolation gestattet“.

3. Die Annäherung durch einen Polygonzug. Dieser erfaßt die Phasen des Windstaus sinnvoller als das Dreieck, welches bei einer fülligen Windstaukurve große Teile des Windstaus nicht berücksichtigt und ist effektiver als die unter 1. und 2. genannten Punkte. Es werden hierbei die in Tab. 7-1 dargestellten Windstauparameter analysiert.

Parameter	Einheit
Anstiegskennzahl	h/m
Scheitelhöhe	cm
Scheitelmaximum/Periode	h vor/nach astronom. Tnw
Anstiegsende	h vor/nach astronom. Tnw
Scheiteldauer	h
Abfallskennzahl	h/m

Tab. 7-1: Die Windstauparameter

Der Parameter **Anstieg** gibt eine Größenordnung an, in welcher Zeit der Wind den Stau bis zum Maximum aufgestaut hat, d. h. die Entwicklung der sturmfluterzeugenden Windverhältnisse. Das bedeutet, daß der Anstiegsparameter ein Maß ist für die Geschwindigkeit, mit der ein Windfeld über die Nordsee zieht, und „(...) für die zeitliche Änderung der Isobaren in den stauwirksamen Gebieten der Nordsee (...)“ (SIEFERT, 1968:51).

Der Parameter **Scheitelhöhe** mit seiner **Dauer und Höhe** bildet ein Maß für die Summe aller sturmfluterzeugenden Erscheinungen. Im Scheitelmaximum manifestiert sich die größte Störung der mittleren Tide durch äußere Einflüsse (SIEFERT, 1968:53).

Die **zeitliche Lage des Scheitelmaximums zur Periode** gibt an, wann die größte Störung der mittleren Tide sich am stärksten ausgewirkt hat. Sie spezifiziert die maximale Einwirkung, da ein maximaler Windstau bei Tnw einen etwas geringeren Energieeintrag benötigt als bei Thw. Grundlage ist, daß derselbe Wind bei Thw nur 2/3 bis 4/5 der Windstauhöhe aufbauen kann wie bei Tnw (TOMCZAK, 1952).

Das **Anstiegsende** drückt ebenso wie die zeitliche Lage des Scheitelmaximums zur Periode die Phasenlage des Windstaus zur Periode aus und ist entscheidend für die Höhe des Sturmflut-scheitels. Anstiegsende und Phasenlage des Windstaus können zeitlich verschoben sein.

Die **Abfallkennzahl** ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit welcher zeitlichen Änderung der stauwirksame Wind abflacht. Im Zusammenhang mit der Anstiegskennzahl bildet die Abfallkennzahl ein Maß für Wirksamkeit und Dauer der sturmfluterzeugenden Ereignisse.

7.2.1 Bestimmung der Windstauparameter

7.2.1.1 Bestimmung des Scheitelbereichs und der Scheiteldauer

Der Scheitel einer Windstaukurve wird als Ausgleichsgerade über kurzzeitige Schwankungen entwickelt. Ein Peak in der Windstaukurve muß jedoch nicht zwangsläufig gleichzusetzen sein mit dem Windstaumaximum, da es nicht nur abhängig ist von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung, sondern auch von der Lage zur Tidephase. Weiterhin muß nicht nur ein einzel-

nes Peak Ausdruck der Summe aller sturmfluterzeugenden Erscheinungen und deren Dauer sein, vielmehr wird diese durch den gesamten Scheitelbereich abgebildet. Um den richtigen Scheitelbereich definieren und analysieren zu können, ist es notwendig, die Vorgehensweise näher zu definieren.

Bei der Bearbeitung dieser Ausgleichsgeraden müssen zwei grundsätzliche Regeln berücksichtigt werden:

1. Der Wind sollte direkt mit dem Verlauf der Windstaukurve verglichen werden. Das ist wichtig, um den Scheitelbereich von Anstieg und Abfall exakt zu differenzieren; insbesondere in Fällen, in denen der Anstieg sehr flach und der Übergang in eine langandauernde hohe Windgeschwindigkeit undeutlich ist, was sich dann im Windstau spiegelt (z. B. Sturmflut vom 16.02.1962). Weiterhin können mehrere Maxima auftreten, deren Zuordnung zum Scheitelbereich ohne Berücksichtigung des Windverlaufs nicht eindeutig festzustellen ist (s.u.).
2. Die Lage zur Tidephase muß berücksichtigt werden, wenn das Scheitelmaximum bzw. der Scheitelbereich nicht eindeutig zu definieren ist. So können kleinere Peaks unberücksichtigt bleiben, die nur deshalb entstehen, weil während des Anstiegs oder Abfalls Tnw erreicht wird (niedriger Wasserstand und damit größere Wahrscheinlichkeit, daß höherer Wasserstand erreicht wird). Ein solches Beispiel stellt die Tide vom 02./03.10.1970 dar.

Weiterhin gibt es Windstaumaxima, welche vor dem durch den Wind verursachten Windstaumaximum liegen (z. B. 09.10.1970), was aber in der Regel wiederum mit der Lage des Peaks zur Phase im Zusammenhang steht.

Konzipiert wird die Scheitelhöhengerade wie folgt (vgl. Abb. 7-1):

- a) Ist ein eindeutiger Anstieg und ein kuppenförmiger Windstauscheitel vorhanden, wird nach SIEFERT (1968:101) dieser so gekappt, daß ein Flächenausgleich zwischen Anstiegs- und kurzem Scheitelbereich erreicht wird.
- b) Es sollte grundsätzlich versucht werden, nur ein Peak zu definieren, es sei denn, es sind eindeutig aufgrund des Windverlaufes zwei zu definieren. Dies kann z. B. durch Windstaukurven entstehen, die sehr lange anhalten und mehr als eine Sturmtide umfassen. Die Ursache solcher Mehrzahl an Windstaupeaks kann zum einen am Wind liegen, der mehrmals maximale Geschwindigkeiten erreicht und dazwischen abflaut (z. B. 03./04.01.1981; 03.02.1981), oder aber zum anderen an schwankender Windrichtung. Die Entscheidung, ob ein oder zwei Windstaupeaks vorliegen, wird in erster Linie nach dem Windverlauf entschieden, d.h. die Windgeschwindigkeit muß deutlich erkennbar absinken und wieder ansteigen, um dann das zweite Peak zu verursachen.
- c) Zum anderen kann der Grund die Lage zur Tidephase sein. Bei mehr oder weniger gleichbleibendem Wind, der über mehrere Tiden anhält, kann es bei Tideniedrigwasser zu Peaks kommen (z. B. 02./03.10.1970; 04.01.1983).

Scheitelbereiche, die durch einen sehr langsamen Anstieg oder Abfall den Eindruck mehrerer Peaks erwecken, können ebenso nur durch irrelevante Windgeschwindigkeitsschwankungen oder das Erreichen einer anderen Tidephase entstehen (z. B. 11.02.1983).

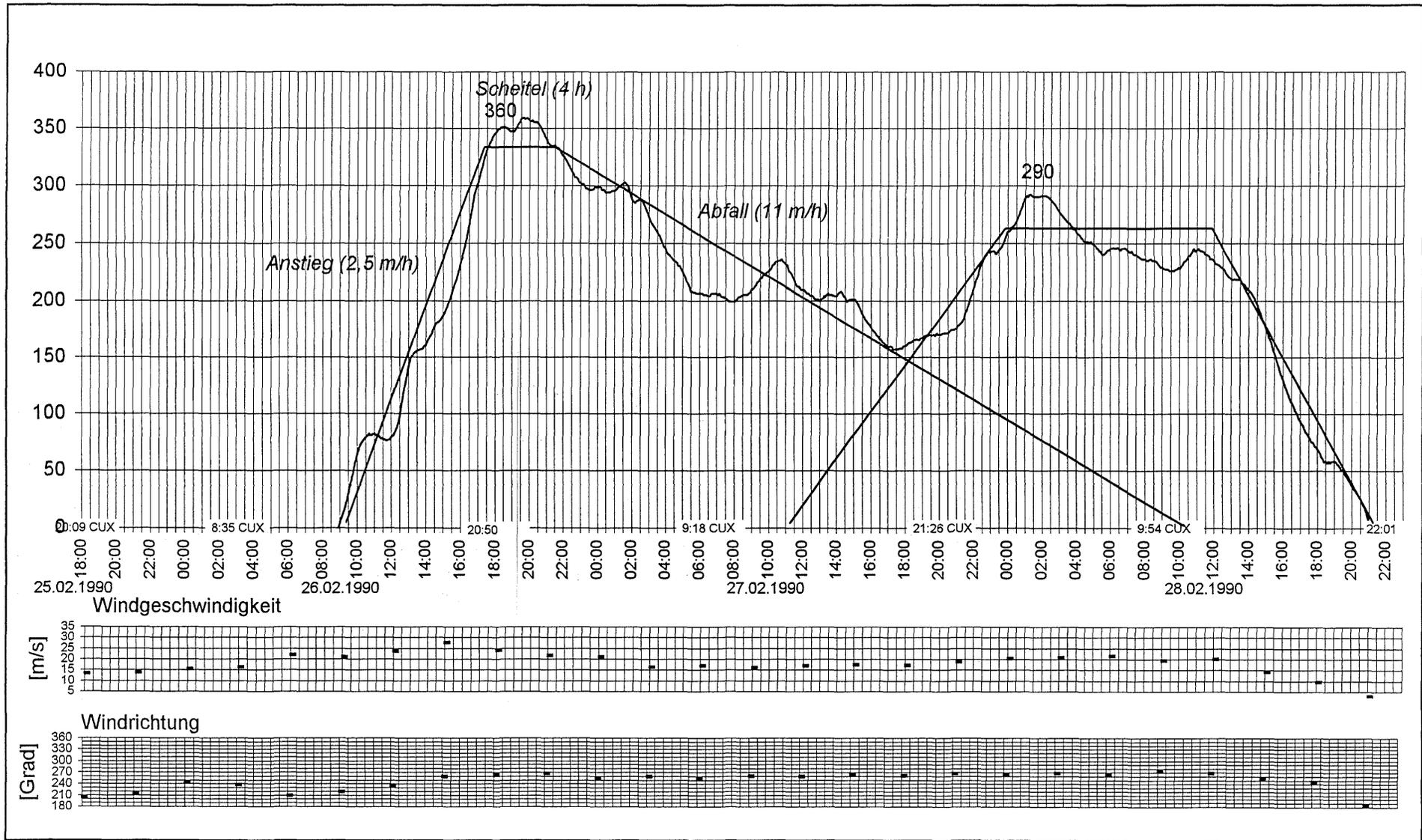


Abb. 7-1: Parameter der Windstaukurve (am Beispiel von Cuxhaven Nr. 187-191 vom 26.-28.02.1990)

7.2.1.2 Bestimmung der Anstiegs- und Abfallgradienten

Auch die Anstiegs- und Abfallgerade wird in einer ersten Näherung durch eine Ausgleichsgerade ermittelt. Hierbei gilt, daß ab einer Windstauhöhe von 50 cm in Cuxhaven und ca. 60 cm in Norderney, Helgoland und Wittdün der gesamte Anstieg berücksichtigt wird. Diese Höhe wurde gewählt, um Wasserstandsschwankungen, die aufgrund der Astronomie entstehen können, zu eliminieren. Bei einer Untersuchung, die das Sturmflutklima behandelt, kann nicht nur die stauwirksame Zeit betrachtet werden, sondern vielmehr der gesamte Windverlauf. Hierbei sind auch jene Phasen des Windes einzubeziehen, die erst langsam eine stauwirksame Windgeschwindigkeit erreichen.

Grundsätzlich wird bei der Konstruktion der Ausgleichsgeraden dem Windverlauf in Kombination mit der Windrichtung gefolgt. Bei der Konstruktion des Anstiegs müssen die Punkte 1 und 2 (s. Kap 7.2.1.1) ebenso eingehalten werden wie bei der Scheiteldefinition. Die Gründe entsprechen hier weitestgehend denen der Konstruktion der Scheitelgeraden wie z. B., daß ein leichter Abfall des Anstiegs aufgrund des Erreichens von Hochwasser ohne Änderung der Windgeschwindigkeit auftreten kann.

Insgesamt bilden die so definierten Ausgleichsgeraden die Änderung und die Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit ab (vgl. Abb. 7-1). Sie werden in Kennzahlen in h/m beschrieben, wobei ergänzend jeweils Beginn und Ende von Anstieg, Scheiteldauer (h) und Abfall ebenso aufgenommen werden wie die gängige Einheit m/s und die gesamte Dauer pro Ausgleichsgerade.

8.1 Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse in der Sturmflutforschung - ein Kollektivvergleich

Ergebnisse von Untersuchungen zu Veränderungen von Sturmfluten, die sich auf die Analyse von Sturmflutscheitelentwicklungen und Sturmfluthäufigkeiten beziehen, wie z. B. bei NIE-MEYER (1987), FÜHRBÖTER (1976), SELIGER (1983), FÜHRBÖTER et al. (1988), SIE-FERT und LASSEN (1986), SIEFERT (1988), PLATE und IHRINGER (1991), ERCHIN-GER (1992), NIEMEYER/KAISER und GLÄSER (1995), SÜNDERMANN (1996) und VON STORCH/ LANGENBERG & POHLMANN (1998) sind oftmals aufgrund uneinheitli-cher Sturmflutgrenzwerte nicht miteinander vergleichbar. Dies betrifft vor allem Untersuchun-gen, die sich bei der Grenzwertbestimmung auf einen festen Bezugshorizont beziehen, der die säkularen Veränderungen des mittleren Hochwassers nicht einbezieht. Hierdurch wird ein An-stieg der Sturmfluthäufigkeit und -höhe ermittelt, der nicht mit Änderungen des Sturmflutkli-mas im Zusammenhang steht, sondern mit dem Anstieg des mittleren Hochwassers verknüpft ist.

In der vorliegenden Untersuchung wurde bei der Grenzwertbestimmung sowohl der Anstieg des mittleren Hochwassers als auch die Niedrigwasserentwicklung berücksichtigt, da die Wind-stauberechnung mit den 5-Jahres-Mitteln von Hoch- und Niedrigwasser erfolgt. Die Auswahl der zu untersuchenden Tiden bezieht sich nicht allein auf eine Grenzwertbestimmung über den Scheitelwasserstand, sondern gleichzeitig auf eine Grenzwertbestimmung über den Windstau. Das bedeutet, daß die Ergebnisse nicht zwangsläufig vergleichbar sein müssen mit den sich allein über die Sturmflutscheitel ergebenden Kollektiven, da Sturmfluten, die einen Scheitel-wasserstand von 1.50 m über MThw erreichen nicht unbedingt durch die Energieeinwirkung gebildet werden, die einen Windstau von 2.0 m verursacht. Da in dem vorliegenden Kollektiv eine Sturmflut über den physikalischen Wert definiert wird, sind Sturmfluten, die diesen Schwellenwert nicht erreichen, auch nicht enthalten.

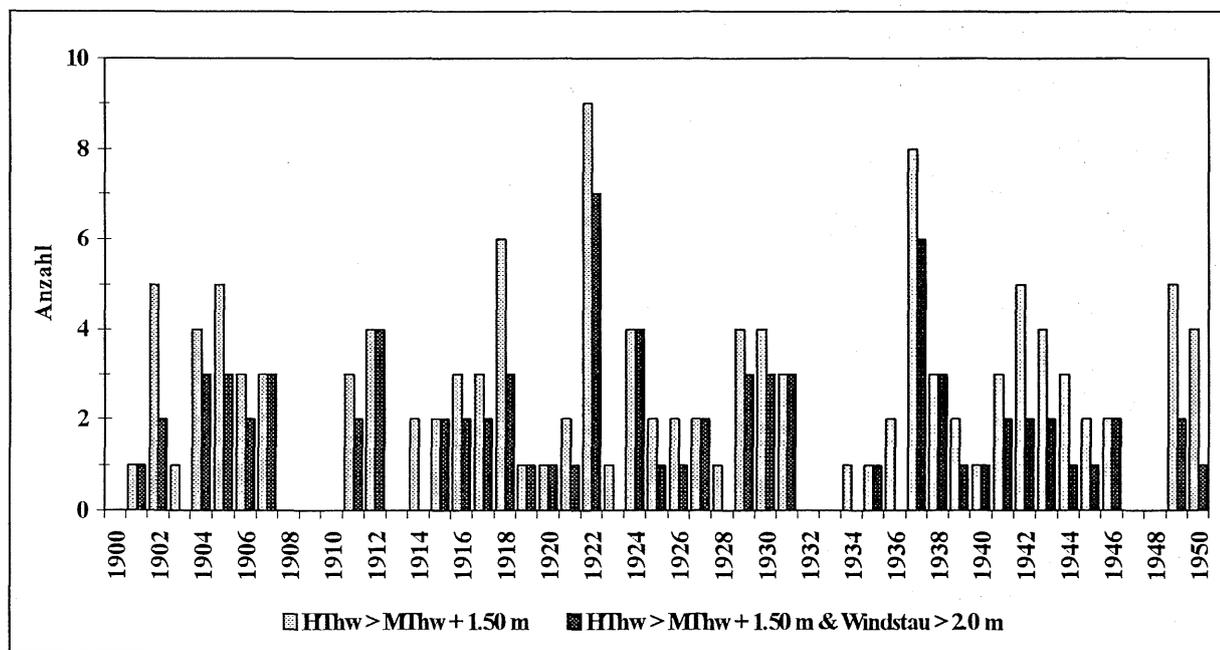


Abb. 8-1: Häufigkeit von Sturmtiden mit $H_{Thw} \geq M_{Thw} + 1.50$ m und von Sturmtiden mit $H_{Thw} \geq M_{Thw} + 1.50$ m & Windstau > 2.0 m in Cuxhaven

Die Ergebnisdifferenzen, die sich durch unterschiedliche Kriterien zur Sturmflutdefinition und damit zur Kollektivauswahl ergeben, sollen an einem Beispiel veranschaulicht werden. Gewählt wurde ein Vergleich zwischen Sturmfluten, deren Definition auf dem Kriterium nach DIN 4049 aber unter Berücksichtigung des MThw-Anstiegs beruht und dem vorliegenden, das den Windstau zugrunde legt. Werden die Sturmfluthäufigkeiten der Sturmfluten der verschiedenen Kriterien für den Zeitraum 1900-1950 verglichen, so zeigt sich, daß von den nach DIN 4049 definierten Sturmfluten im Mittel nur 70 % einen Windstau von 2.0 m erreichen (Abb. 8-1).

Die Analyse der Sturmfluthäufigkeit erfolgt nach zwei Kriterien:

1. Es werden alle Sturmflutscheitel des Kollektivs als eine Sturmflut pro Sturmflutjahr gezählt.
2. Es werden jeweils die Windstaukurven pro Sturmflutjahr gezählt. Dabei gelten als eine Sturmflut auch die Windstaukurven, die mehr als einen Sturmflutscheitel umfassen. Auf diese Weise wird eine Unabhängigkeit der Ereignisse sichergestellt.

8.2 Sturmflutscheitelhäufigkeit

Wird der Untersuchungszeitraum auf die Jahre 1950 bis 1995 begrenzt, so zeigt sich sowohl bei den dreijährig übergreifenden Summen als auch bei der Anzahl der Sturmflutscheitel pro Jahr ein deutlicher Anstieg der Sturmflutscheitelhäufigkeit (Abb. 8-2 u. Abb. 8-3). Ursachen hierfür sind zum einen die Häufung der Sturmfluten in den Sturmflutjahren 1983, 1990 und 1993 mit jeweils acht Sturmfluten und zum anderen das gehäufte Auftreten von $n \geq 5$ Sturmflutjahren seit Mitte der sechziger Jahre (Abb. 8-3). Diese Häufung ist auch der Grund für die Berechnung der leichten Zunahme seit 1850 sowohl bei Betrachtung der jährlichen Sturmflutscheitelhäufigkeiten als auch bei Betrachtung der dreijährig übergreifenden Summen (Abb. 8-4 u. Abb. 8-5). Es wird deutlich, daß über diesen wesentlich längeren Zeitraum der Trend geringer wird, da ein gehäuftes Auftreten von Sturmfluten bereits von 1850 bis 1900 vorlag.

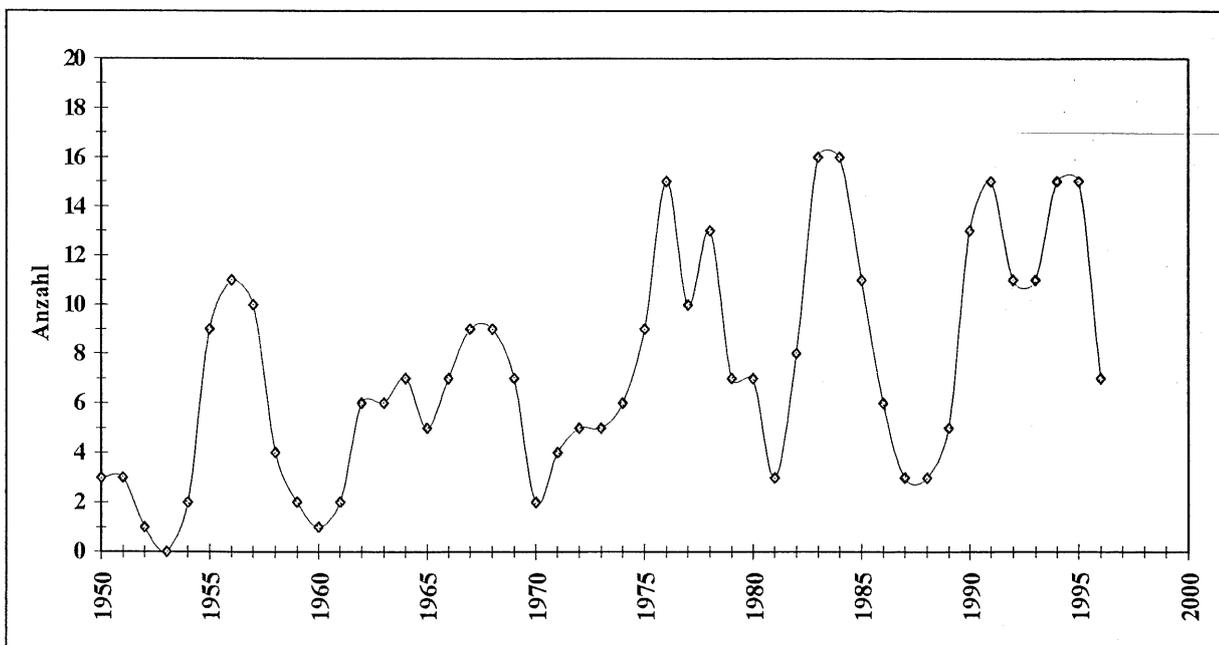


Abb. 8-2: Sturmflutscheitelhäufigkeit seit 1950 an der deutschen Nordseeküste am Beispiel dreijährig übergreifender Summen in Cuxhaven

Es zeigt sich also, daß die Wahl des Zeitraumes entscheidend sein kann, ob eine Zunahme der Häufigkeit und der Höhe berechnet wird oder nicht. So führen Untersuchungen, die 1950 in dem Tiefpunkt der fünfziger Jahre beginnen, nahezu zwangsläufig zu einem Anstieg der Häufigkeit, wie es z.B. ERCHINGER (1992) für Norderney beschreibt, wobei hier neben dem Zeitfenster auch das Kriterium der Definition des Ereignisses zu berücksichtigen ist.

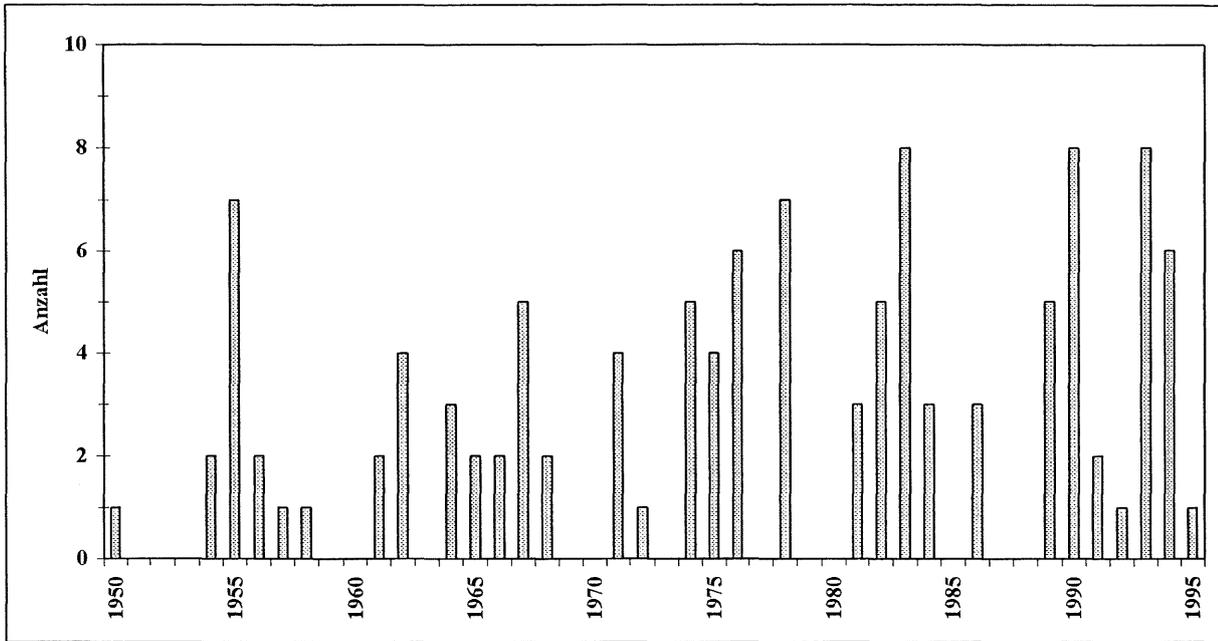


Abb. 8-3: Jährliche Sturmflutschwellhäufigkeit seit 1950 in Cuxhaven

Untersuchungen über die Sturmflutschwellhäufigkeit vom BSH mit der Grenzwertbestimmung einer Sturmflut mit MThw +1.0 m für Cuxhaven ergaben, daß auch im Zeitraum 1900-1950 höhere Sturmfluthäufigkeiten auftraten, so daß bei der Berechnung eines Trends kein signifikanter Anstieg ermittelt werden konnte. Auch diese Diskrepanz ist zu begründen mit der unterschiedlichen Grenzwertbestimmung (s.o.).

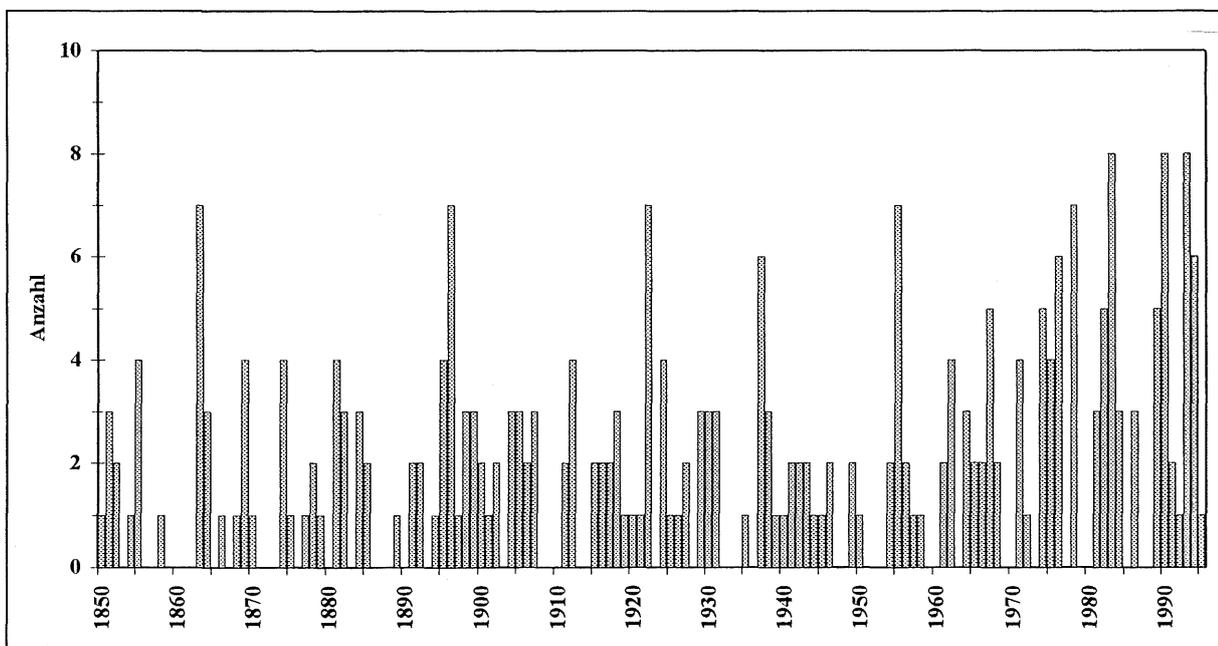


Abb. 8-4: Jährliche Sturmflutschwellhäufigkeit seit 1850 in Cuxhaven

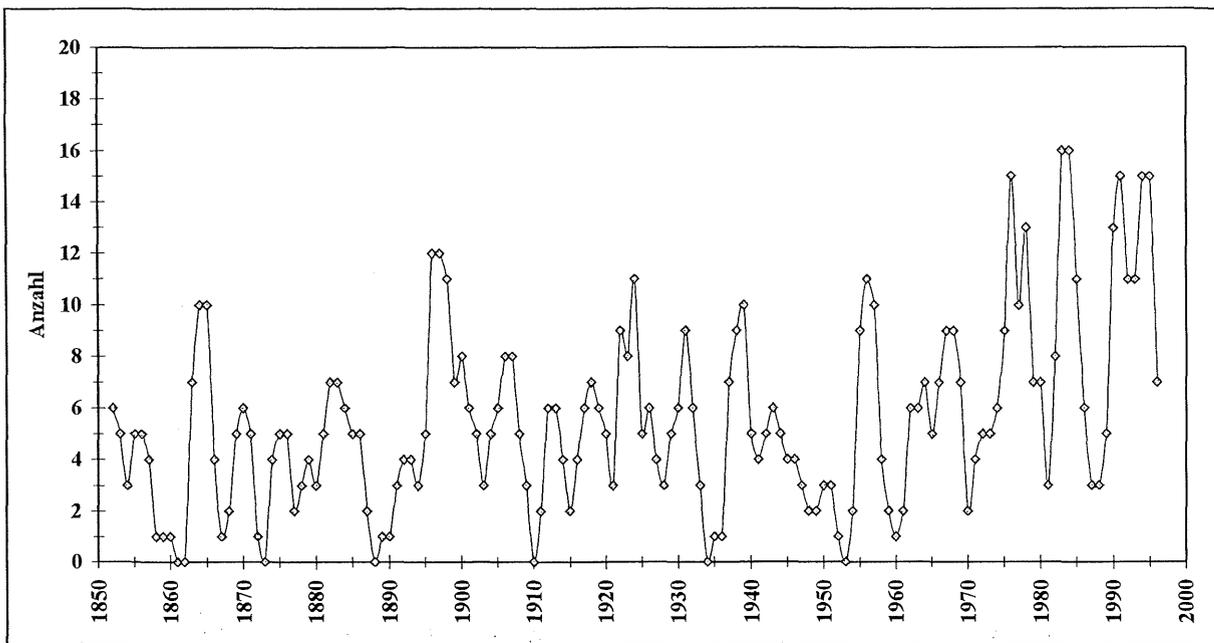


Abb. 8-5: Sturmflutschwellhäufigkeit seit 1850 an der deutschen Nordseeküste am Beispiel dreijährig übergreifender Summen in Cuxhaven

Dagegen konstatierte JENSEN (1987), der ebenso mit statistischen Methoden erhöhte Scheitelwasserstände untersuchte, für den gleichen Zeitraum einen deutlichen Anstieg der Häufigkeit. Aber auch hier muß bedacht werden, daß bereits eine geringfügige Änderung der gewählten Höhe über MThw zu deutlichen Unterschieden in der Anzahl und deren Entwicklung führen kann.

Die statistisch genaueste Methode der Bearbeitung der Entwicklung der Scheitelwasserstände - die aber auch den gesamten Verlauf berücksichtigt - ist jene, aus der Gesamtheit der Wasserstände Quantile herauszufiltern und deren Trend zu ermitteln, wie es PFIZENMAYER (1997) durchführte. Seine Ergebnisse von sieben Pegeln an der niederländischen, deutschen, dänischen und schwedischen Küste bestätigen die in der vorliegenden Untersuchung dargestellte Entwicklung. „An allen Stationen nehmen die hohen Quantile des THw's in den letzten beiden Jahrzehnten zu und erreichen teilweise ihre höchsten Werte seit Beginn regelmäßiger Wasserstandszeichnungen. Ein ähnlich hohes Niveau wurde auch am Ende des letzten Jahrhunderts sowie in den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts gemessen. Die Zunahme der Häufung der Extremwasserstände in den letzten Jahrzehnten liegt also noch im Bereich der natürlichen langperiodischen Variabilität der Wasserstände und ist noch kein Indiz für eine außergewöhnliche anthropogene Variabilität.“ (PFIZENMAYER, 1997:43)

Werden die Sturmfluten differenziert in Sturmfluten mit $H_{Thw} = M_{Thw} + 1.50 \text{ m}$ bis $+2.50 \text{ m}$ und schwere Sturmfluten mit $H_{Thw} = M_{Thw} + 2.50 \text{ m}$ bis $+3.50 \text{ m}$ sowie sehr schwere Sturmfluten mit $H_{Thw} = M_{Thw} \geq +3.50 \text{ m}$, können unterschiedliche Entwicklungen festgestellt werden. Während bei schweren Sturmfluten und sehr schweren Sturmfluten keinerlei Anstieg zu verzeichnen ist, liegt eine deutliche Zunahme der Anzahl der niedrigen Sturmfluten vor (Abb. 8-6). Dies trifft in erster Linie auf den Zeitraum 1950 bis 1995 zu, der sich auch im Gesamtzeitraum durch eine Zunahme der Sturmfluthäufigkeiten auszeichnet. Demzufolge muß davon ausgegangen werden, daß weniger die Änderung Orkanwetterlage von Bedeutung ist, als vielmehr die Zunahme der mittleren Starkwindwetterlagen. Eine weitere mögliche Ursache wäre, daß der Windstau bei gleicher Windstärke niedriger aufläuft. Dies ist jedoch relativ un-

wahrscheinlich. Wahrscheinlicher ist dagegen, daß die Häufung der maximalen Windgeschwindigkeiten bei Tideniedrigwasser zunimmt, so daß eine Verschiebung des Windstaumaximums zum Niedrigwasser erfolgt sein könnte.

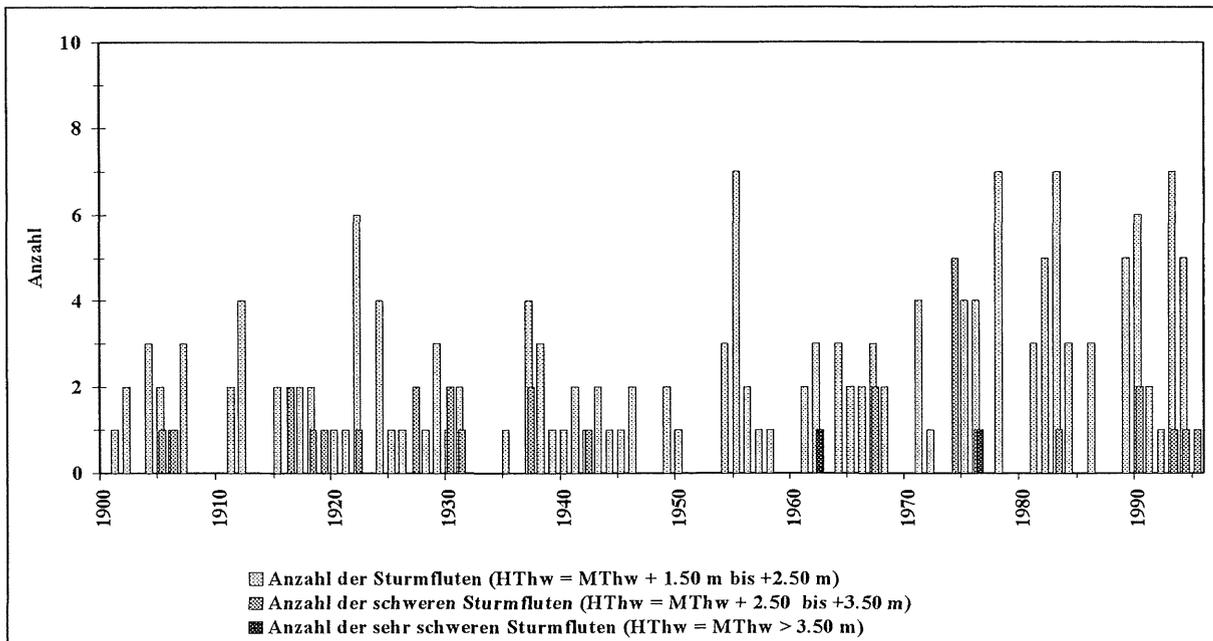


Abb. 8-6: Häufigkeiten der Sturmfluten, schweren und sehr schweren Sturmfluten in Cuxhaven für den Zeitraum 1901-1995

8.3 Windstaukurvenhäufigkeit

Eine Untersuchung der Häufigkeit von Sturmflutscheiteln bezieht in die Berechnung jeden Scheitel einer Tide ein, die einen bestimmten Grenzwert überschritten hat. Hierbei werden auch unmittelbar aufeinanderfolgende Sturmzeiten als Einzelereignisse gezählt, obwohl der sturmflutverursachende bzw. windstaubildende Faktor nämlich der Wind als ein Ereignis zu werten ist, da in einer solchen Serie eine Differenzierung der Zahl der winderzeugenden Sturmzyklonen nicht immer möglich ist. Dies betrifft vor allem frühere Ereignisse, bei denen über Druckmessungen zwar der Bodenwind berechnet werden kann, es jedoch offen bleibt, wieviel Sturmzyklonen diesen gebildet haben. Bei der Analyse der Veränderung des Sturmflutklimas muß die Sturmflut im Zusammenhang mit dem Energieeintrag betrachtet werden, der sich in den Windparametern Dauer und Geschwindigkeit und in der direkten Auswirkung im Windstau widerspiegelt. Liegt eine lange Winddauer mit hoher Geschwindigkeit vor, bewirkt sie einen Windstau, der über eine Tide hinaus andauert. Dies muß als ein Ereignis gewertet werden, denn nur auf diese Weise ist es möglich, z. B. bei der Häufigkeitsanalyse, die sturmfluterzeugenden Ereignisse voneinander unabhängig und damit korrekt zu erfassen. Wird die Häufigkeitsanalyse einzelner Scheitel im direkten Zusammenhang mit der Klimaänderung betrachtet, führt dies demzufolge zu falschen Erkenntnissen. Es ist somit zwingend erforderlich - neben der Scheitelanalyse als ersten Anhalt - eine Häufigkeitsanalyse der Windstaukurven zu erstellen.

Werden sämtliche Windstaukurven pro Jahr gezählt (Abb. 8-7), so zeigt sich ein etwas anderes Bild als bei den Sturmflutscheitelhäufigkeiten (Abb. 8-6). Während die maximal erreichte Anzahl bei den Sturmflutscheitelhäufigkeiten in Cuxhaven im Zeitraum 1950-1995 liegt, wird die maximale Anzahl an Windstaukurven 1922 mit sechs erreicht. Es zeigt sich allerdings auch

hier, daß eine Häufung von Windstaukurven mit fünf Windstaukurven pro Jahr seit Mitte der sechziger Jahren vorliegt. Insgesamt steigt seit 1901 auch die Windstaukurvenhäufigkeit pro Jahr leicht an, wenn auch mit weitaus geringerer Intensität als es sich bei der Sturmflut-scheitelhäufigkeit abzeichnete. Das bedeutet, daß jene Windstaukurven, die mehr als einen Sturmflut-scheitel umfassen, zugenommen haben müssen, dementsprechend also jene Sturm-tiden, die dicht aufeinander folgen.

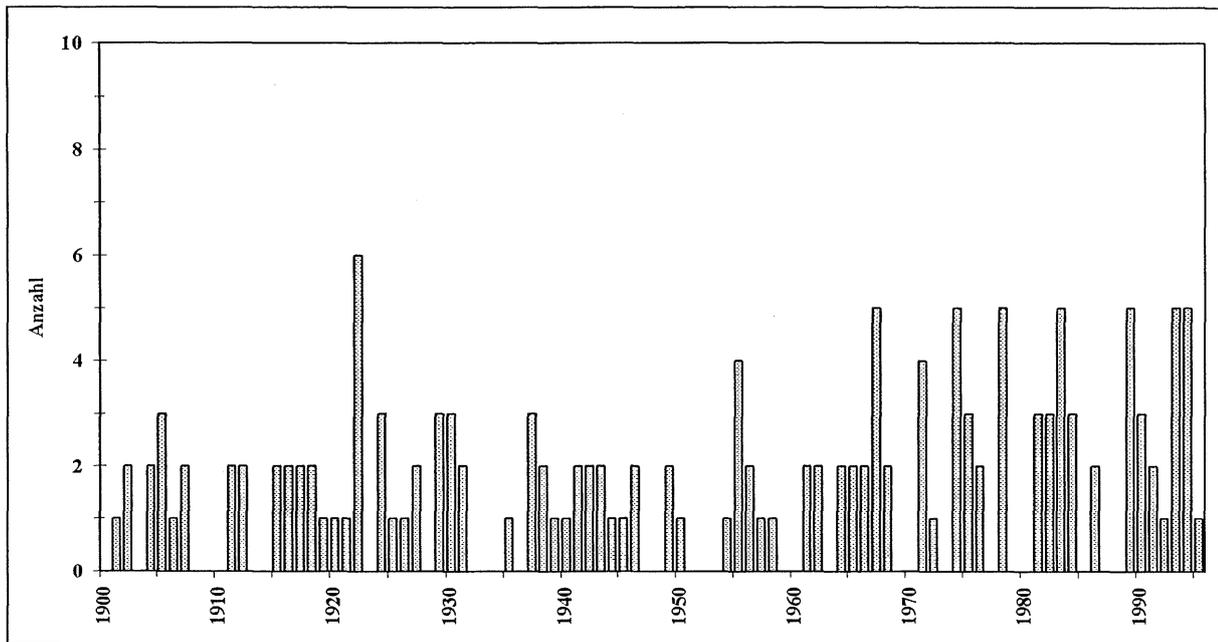


Abb. 8-7: Windstauhäufigkeiten pro Jahr in Cuxhaven seit 1901

Sturmfluten, die unmittelbar aufeinander folgen, fanden in der bisherigen Forschung relativ wenig Beachtung. So wurden zwar häufig besondere Ereignisse im einzelnen analysiert wie die Sturmflutkette von 1916 (KRÜGER, 1929) oder die Sturmflutserie 1973 (DIETZE, 1974), eine umfassende statistische Analyse ist bisher nur selten vorgenommen worden wie z. B. von KURCZACK (1974) am Pegel Bremerhaven oder LÜDERS (1974) in einer recht umfassenden Untersuchung der Pegel Wilhelmshaven, Leuchtturm Mellum-Plate, Wangerooge-West, Norderney-Hafen, Borkum-Südstrand und Emden-Seeschleuse.

Anlaß dieser Untersuchung war das Auftreten von dicht aufeinander folgenden Sturm-tiden, die zu Schäden an den Küstenschutzbauwerken und zu Dünen- und Strandabbrüchen geführt haben, um eine Art Risikoabschätzung zu erreichen. Dementsprechend unterliegen die bisherigen Definitionen von Sturm-tiden, die dicht aufeinander folgen, dem Einfluß der Schäden, die sie bewirken können. So grenzt LÜDERS (1974) sogenannte Sturm-tidenketten ein:

1. „Sturm-tiden, die dicht aufeinanderfolgend auftreten“ (LÜDERS, 1974:82).
2. Es gilt **nicht** als Sturm-tidenkette, wenn weniger als fünf Sturm-tiden dicht aufeinander folgen.
3. Kennzeichen einer Sturm-tidenkette ist, daß die größere Anzahl von kurz aufeinander folgenden Sturm-tiden anfangs entstandene Schäden durch die nachfolgenden Sturm-tiden verstärkt.

Dies führt zu der Definition, „daß eine Sturm-tidenkette mindestens fünf Sturm-tiden haben muß, die zeitlich so dicht aufeinander folgen, daß das Verhältnis aus der Zeitdauer von der ersten bis zur letzten Sturm-tide in Tagen (Z) zur Anzahl der Sturm-tiden (N) den Kennwert (K) ≤ 5.0 ergibt (...)“ (LÜDERS, 1974:83). Das bedeutet, daß die Definition von LÜDERS (1974)

auch jene Sturmflutserien als Sturmtidenketten definiert, bei denen zwischen den Sturmtiden auch „Normaltiden“ liegen.

LÜDERS (1974) kommt zu dem Ergebnis, daß im Zeitraum von 1854-1973 am Pegel Wilhelmshaven insgesamt 28 Sturmtidenketten auftraten mit einer Dauer von vier bis 36 Tagen, wobei Sturmtidenketten mit mehr als 30 Tagen durchschnittlich alle 30 Jahre aufgetreten sind. Hinsichtlich der Entwicklung der Häufigkeit der Sturmtidenketten über den gesamten Zeitraum, konnte er keine Zunahme berechnen, für die mittleren Höhen berechnet er gar eine Abnahme, die auch in den Spitzenhöhen der Sturmtidenketten erkennbar sind.

In der vorliegenden Untersuchung zu Sturmtiden gilt es natürlich auch, Schadensbegrenzungen bzw. -abschätzungen von Küstenschutzwerken zu berücksichtigen. Allerdings wird hier zur Risikoabschätzung nicht von einer Definition ausgegangen, die von den Schäden auf die Definition rückschließt. Die Ausgangsbasis bilden vielmehr die verursachenden Kräfte, d. h. der Wind und dessen Änderungen. Infolgedessen wird zwar der Begriff Kettentide von LÜDERS (1974) übernommen, definiert wird sie aber folgendermaßen:

Alle Sturmtiden, die durch eine Windstaukurve zusammengefaßt werden, gelten als eine Kettentide, auch wenn sie nur zwei Sturmflutscheitel enthalten. Zwei Ereignisse, zwischen denen die Windstaukurve auf 50 cm absinkt, werden als zwei getrennte Sturmtiden betrachtet, da davon auszugehen ist, daß der verursachende Faktor Wind vollkommen nachgelassen hat und erst ein erneutes Sturmtief die folgende Sturmtide verursacht hat.

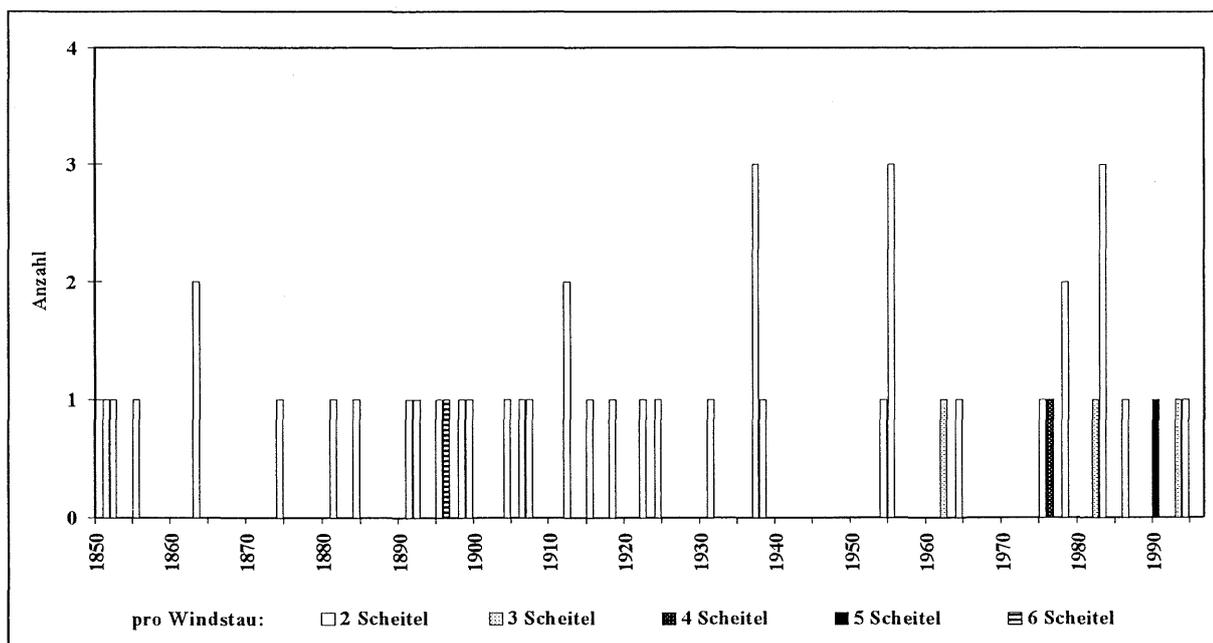


Abb. 8-8: Häufigkeit der Sturmfluten mit mehr als einem Scheitel pro Windstau in Cuxhaven seit 1850

Werden alle Windstaukurven mit mehr als einem Sturmflutscheitel von 1850 bis 1995 analysiert, so zeigt sich, daß bei den Sturmtiden mit zwei Scheiteln pro Windstau keine nennenswerte Entwicklung zu verzeichnen ist (Abb. 8-8). Bemerkenswert ist allerdings die deutliche Lücke von 1937 bis 1955, in der auch keine Kettentiden mit drei, vier, fünf oder gar sechs

Scheiteln auftreten. Dagegen sind Kettentiden mit mehr als zwei Sturmflutscheiteln ausschließlich seit 1955 vorzufinden. Einzige Ausnahme bildet die Kettentide vom 6.-8.12.1895, die die größte Anzahl an Sturmflutscheiteln in einer Windstaukurve aufweist. Infolgedessen treten nicht erst in den letzten 50 Jahren Sturmfluten mit mehr als einem Scheitel pro Windstaukurve auf, es wird aber dennoch deutlich, daß die Häufigkeit von Kettentiden mit mehr als zwei Scheiteln pro Windstaukurve in den letzten 50 Jahren zugenommen hat. Werden hieraus Rückschlüsse auf die Windentwicklung gezogen, so muß davon ausgegangen werden, daß die Dauer des Windes bezogen auf das Einzelereignis zugenommen hat. Werden weiterhin die Scheitel der Kettentiden betrachtet, so zeigt sich, daß dies keineswegs niedrige Sturmfluten waren (Tab. 8-1), sondern vielmehr die Sturmflutscheitelmaxima bis auf eine Ausnahme dem Bereich der schweren bis sehr schweren Sturmfluten zuzuordnen sind. Demzufolge müßte der Wind in Einzelereignissen mit hohen Windgeschwindigkeiten und langer Dauer zugenommen haben.

3 Scheitel pro Windstau	4 Scheitel pro Windstau	5 Scheitel pro Windstau	6 Scheitel pro Windstau
16.-17.02.1962 (354 cm über MThw)	21. -23.12.1954 (247 cm über MThw)	26.-28.02.1990 (293 cm über MThw)	5.-8.12.1895 (264 cm über MThw.)
23.-24.11.1982 (302 cm über MThw)	20.-22.01.1976 (369 cm über MThw)		
25.-16.01.1993 (218 cm über MThw)			

Tab. 8-1: Daten und maximale Höhen der Windstaukurven mit mehr als 2 Scheiteln pro Windstau

9.1 Scheitelentwicklung der Sturmfluten

Zur Scheitelentwicklung von Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste wurden bereits diverse Untersuchungen durchgeführt, die sich vor allem auf schwere und sehr schwere Sturmfluten beziehen, wie z. B. HENSEN (1938), LEPIK (1950), TOMCZAK (1952), KOOPMANN (1962), ROHDE (1964, 1968, 1977 und 1991), LAUCHT (1968 und 1977), LÜDERS (1974), NASNER und PARTENSCKY (1977), LIESE und LUCK (1978), SIEFERT (1982, 1988 u.v.a.), FÜHRBÖTER et al. (1988) oder aber VAN MALDE (1996). Es ist hier nicht beabsichtigt, eine umfassende Darstellung der Literatur zur Höhenentwicklung von Sturmfluten zu geben, sondern vielmehr an vereinzelten Beispielen aufzuzeigen, daß dies im Laufe des 20. Jahrhunderts immer wieder ein Forschungsbereich ist, der aufgrund der Sicherheit der Küsten eine hohe Relevanz hat.

Bei der vorliegenden Untersuchung zur Änderung des Sturmflutklimas werden nicht allein die sehr schweren Sturmfluten berücksichtigt, sondern vielmehr auch Änderungen im Bereich der ordinären und der schweren Sturmfluten, da sich hier Änderungen im Sturmflutklima ebenso manifestieren wie in den Extremfluten.

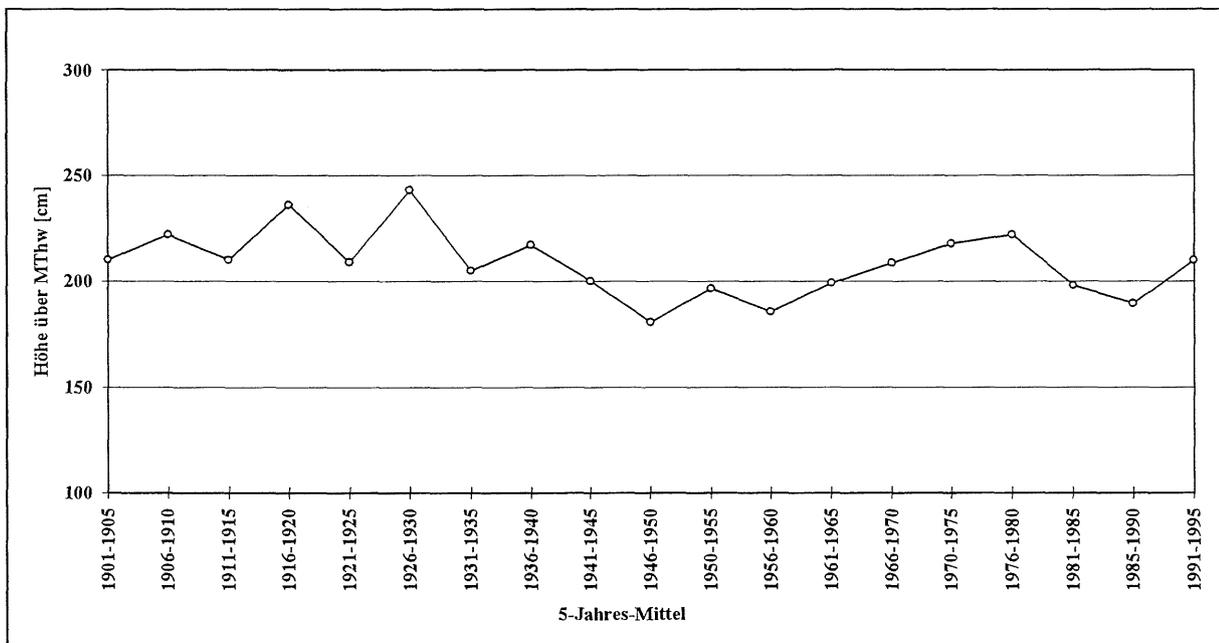


Abb. 9-1: Entwicklung der Sturmflutscheitel in Cuxhaven (5-Jahres-Mittel) 1901-1995 für Sturmfluten mit Windstau ≥ 2.0 m und HThw \geq MThw +1.50 m

Zur Erlangung eines Überblicks ist es notwendig, das 5-Jahres-Mittel der Hochwasserscheitel über MThw zu untersuchen. Deutlich ist in Abb. 9-1 erkennbar, daß im Mittel die Sturmfluten in Cuxhaven keinen Anstieg der Scheitel aufweisen. Werden die Sturmflutscheitel des Pegels Norderney in diese Betrachtung miteinbezogen, so wird dieses Phänomen bestätigt (Abb. 9-2).

Der leicht positive Trend von $r^2 = 0,028$ für die mittlere Scheitelentwicklung des Pegels Helgoland kann aufgrund des lückenhaften Datenmaterials für 1900-1940 nicht als signifikant

bezeichnet werden. Eine Ausnahme bildet die Scheitelentwicklung des Pegels Wittdün, der einen etwas deutlicheren positiven Trend mit $r^2 = 0,113$ aufweist.

Eine Berechnung von Mittelwerten läßt keine Aussage zur Scheitelentwicklung schwerer und sehr schwerer Sturmfluten zu, da die Vielzahl niedriger Sturmfluten einfließt. Werden sämtliche Sturmfluten des Kollektivs von 1901 bis 1995 betrachtet, entsteht zunächst der Eindruck, daß die Scheitel der schweren Sturmfluten mit den Sturmfluten vom 16.02.1962 mit 995 cm PN bzw. 354 cm über MThw in Cuxhaven und vom 03.01.1976 mit 1010 cm PN bzw. 369 cm über MThw in Cuxhaven mit bis dahin in der absoluten Höhe noch nicht erreichten Werten ansteigen (Abb. 9-3 u. Abb. 9-4). Wird der Untersuchungszeitraum jedoch auf den Zeitraum 1788 bis 1995 verlängert, so zeigt sich, daß mit der Sturmflut vom 04.02.1825 mit 963 cm PN in Cuxhaven zwar nicht die absoluten Höhen von 1962 und 1976 erreicht werden, jedoch mit 354 cm über MThw die Wasserstandserhöhung über dem mittleren Hochwasser von 1962 erreicht wurde. Demzufolge kann bei ausschließlicher Betrachtung der Scheitel über MThw +3.50 m von einem Anstieg der maximalen Scheitel nicht ausgegangen werden.

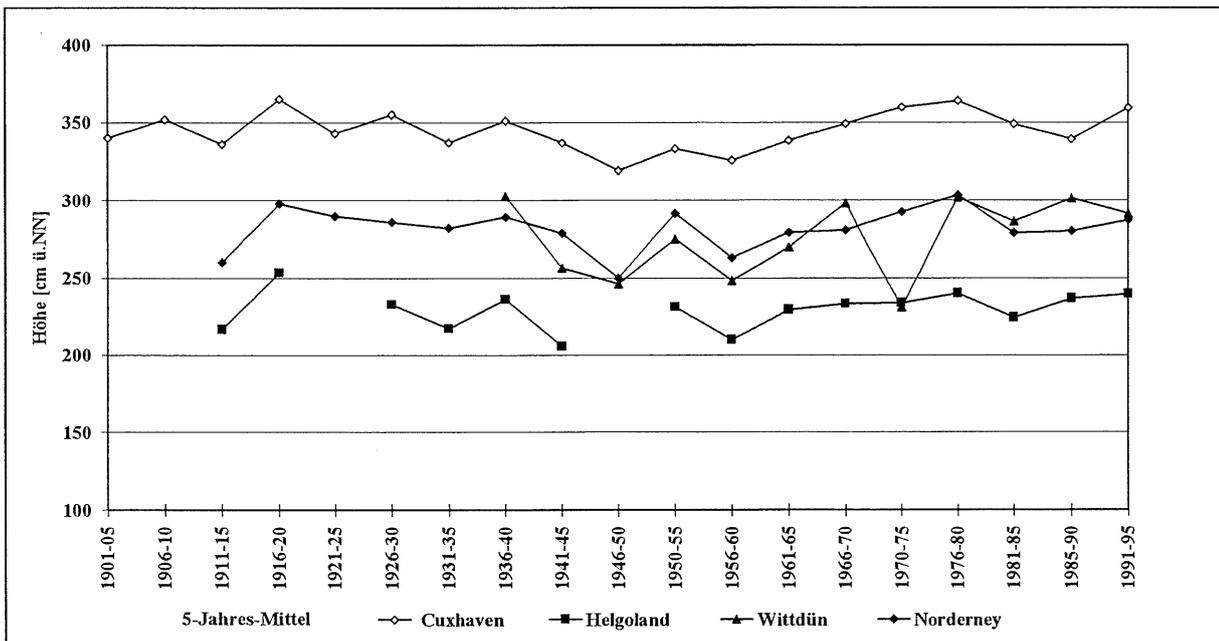


Abb. 9-2: Entwicklung der Sturmflutscheitel in Cuxhaven, Helgoland, Wittdün und Norderney (5-Jahres-Mittel) für Sturmfluten mit Windstau Cux ≥ 2.0 m und HThwCux $\geq +1.50$ m

Der generalisierte Anstieg des mittleren Hochwassers ist in Abb. 9-3 (gestrichelte Linie) dargestellt, so daß die Analyse der Scheitelwerte bezogen auf den mittleren Hochwasseranstieg erfolgen kann. Der mittlere Hochwasserstand wurde entsprechend der Vorgehensweise des BSH zur Differenzierung der Sturmfluten in ordinäre Sturmfluten, schwere Sturmfluten und sehr schwere Sturmfluten übertragen auf die Höhen MThw +2.50 m und MThw +3.50 m. Es zeigt sich, daß die Scheitel der schweren Sturmfluten zwischen MThw +2.50 m und MThw +3.50 m in Cuxhaven für den Zeitraum 1901 bis 1995 bei Berechnung eines über das arithmetische Mittel berechneten Trends nur einen geringfügig höheren Anstieg aufweisen als der Anstieg des mittleren Hochwassers. Dies veranschaulicht und bestätigt die Abb. 9-4, die die Sturmflutscheitel über MThw darstellt. Wird die Scheitelentwicklung der schweren Sturmfluten für den Zeitraum 1788 bis 1995 analysiert, so zeigt sich auch hier kein Anstieg der Hochwasserscheitel, der nennenswert größer ist als der mittlere Hochwassertrend der letzten 200 Jahre.

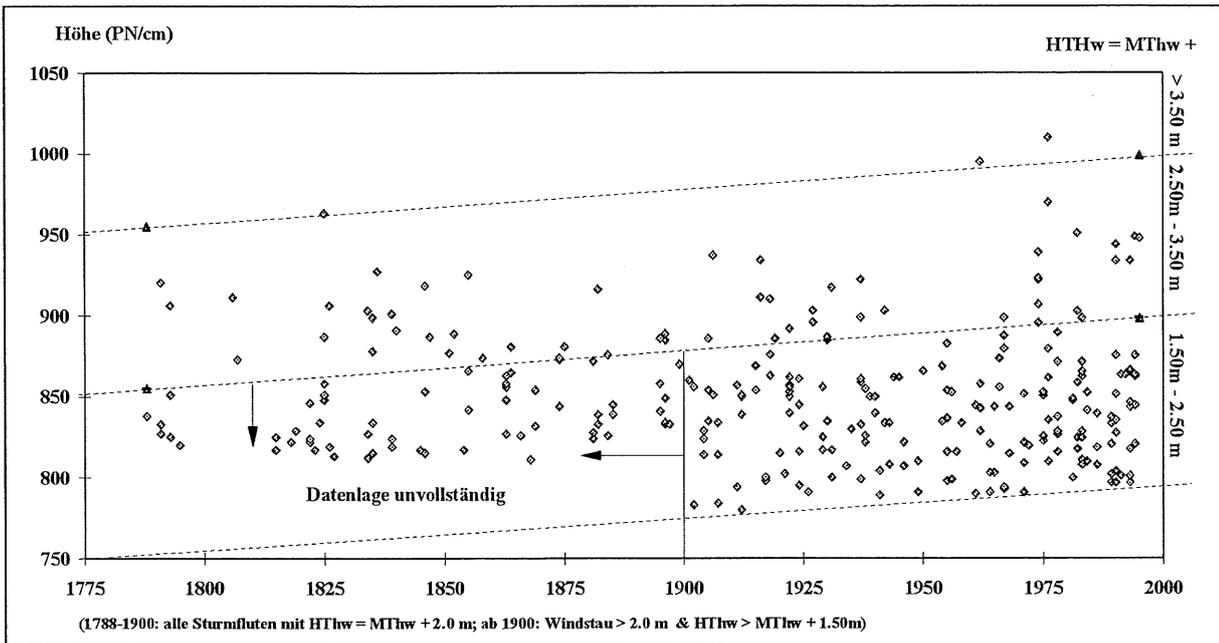


Abb. 9-3: Sturmflutscheitel in Cuxhaven 1788 - 1995

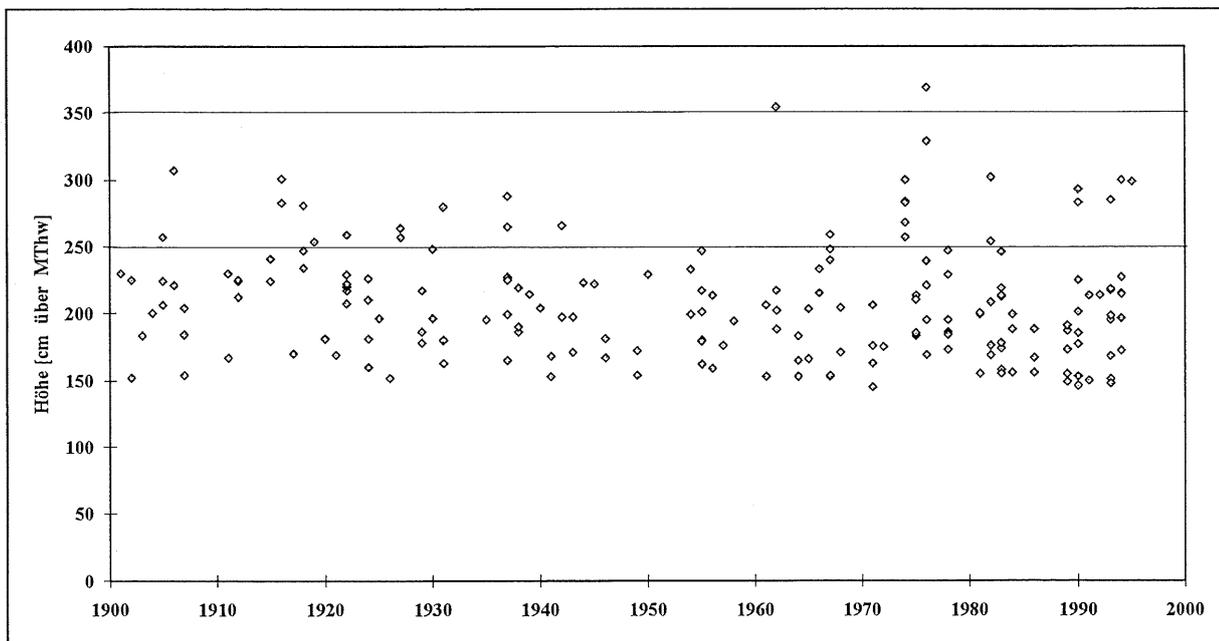


Abb. 9-4: Sturmflutscheitel über MThw (Windstau ≥ 2.0 m und HThw ≥ 1.50 m)

Die Entwicklung der ordinären Sturmfluten für den Zeitraum 1901-1995 zeigt bei Berechnung einer Trendlinie durch alle Scheitelhöhen über MThw ebenfalls keinen Anstieg. Es ist eher ein leicht negativer Trend über MThw zu verzeichnen.

Es ist nicht möglich, die ordinären Sturmfluten für den Zeitraum 1775-1900 zu analysieren, da nicht sichergestellt ist, daß insbesondere im Zeitraum von 1775-1850 alle niedrigen Sturmfluten erfaßt wurden.

9.2 Entwicklung der maximalen Windstauhöhen

9.2.1 Lage des Windstaumaximums zur Periode

Zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen, muß die Lage der Windstaumaxima zur Periode berücksichtigt werden. Bereits TOMZCAK (1952) untersuchte das Phänomen der Lage des Windstaus zur Periode und stellte fest, daß die Windstauhöhen bei Tnw um ca. 2/3 bis 4/5 höher sein müßten als bei Thw, da die Windstauhöhe bei gleichem Wind mit zunehmender Wassertiefe abnimmt.

SIEFERT und MURTY (1991) konnten ebenfalls feststellen, daß Häufigkeit und Höhe der Windstaupеaks in der Deutschen Bucht bei Tnw größer sind als bei Thw. Sie erklärten dieses Phänomen aber ausschließlich mit der „zufälligen“ Lage des Windes zur Periode und damit mit der Tatsache, daß der Wind bei Tnw seine größte Windgeschwindigkeit hatte. Als Beweis zogen sie die Lage der Windstaumaxima zur Periode an der britischen Küste heran. Dort ist die größte Häufigkeit der Windstaupеaks bei Thw vorzufinden.

Auch in der vorliegende Untersuchung läßt sich feststellen, daß in Cuxhaven in den letzten 100 Jahren die Windstaupеaks sich deutlich bei Tnw I konzentrieren (Abb. 9-5). Ein weiteres Maximum liegt bei 3 h vor Thw I bis Thw I mit einem Peak bei 4.5 h nach Tnw I bzw. 1.5 h vor dem astronomischen Hochwasser. Danach nimmt die Konzentration deutlich ab mit einem kleineren Peak bei Tnw II.

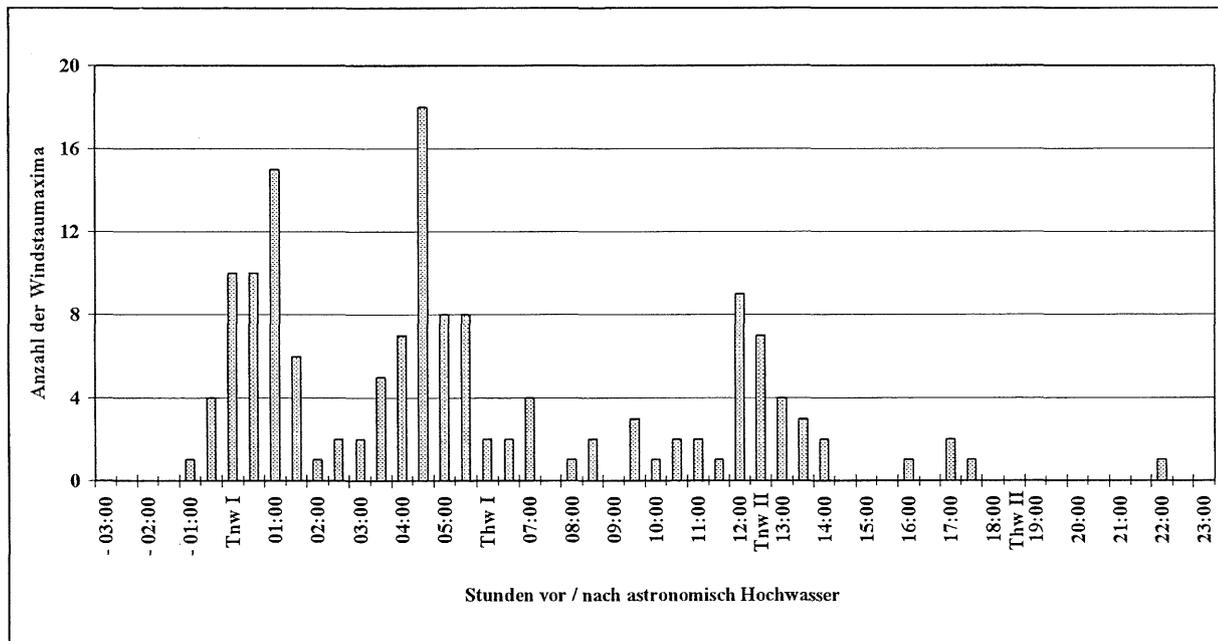


Abb. 9-5: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Cuxhaven für die Jahre 1901 - 1997

In Norderney liegt auf den ersten Blick auch eine deutliche Konzentration der Windstaupеaks bei Tnw vor. Von den 92 Windstaumaxima seit 1938 traten 56 Peaks von 3 h vor Tnw I und II bis 3.5 h nach Tnw I und II auf und nur 36 Peaks um Thw (Abb. 9-6). Bemerkenswert ist jedoch, daß die Peaks bei Thw alle von 3 h vor Thw bis Thw auftreten, aber nicht nach Thw. Auffällig ist weiterhin, daß eine weitere Konzentration an Windstaupеaks von 2 h nach Thw I bis 1 h nach Tnw II vorliegt, die für den Pegel Cuxhaven nicht festzustellen ist.

Helgoland ist dem Einflußbereich der Küstentopographie zwar nicht entzogen, aber dennoch wesentlich weniger ausgesetzt als die anderen beschriebenen Pegel. Es sollte nach der Theorie von TOMCZAK (1952) eine gleichmäßige Verteilung der Windstaumaxima zur Tidephase vorliegen.

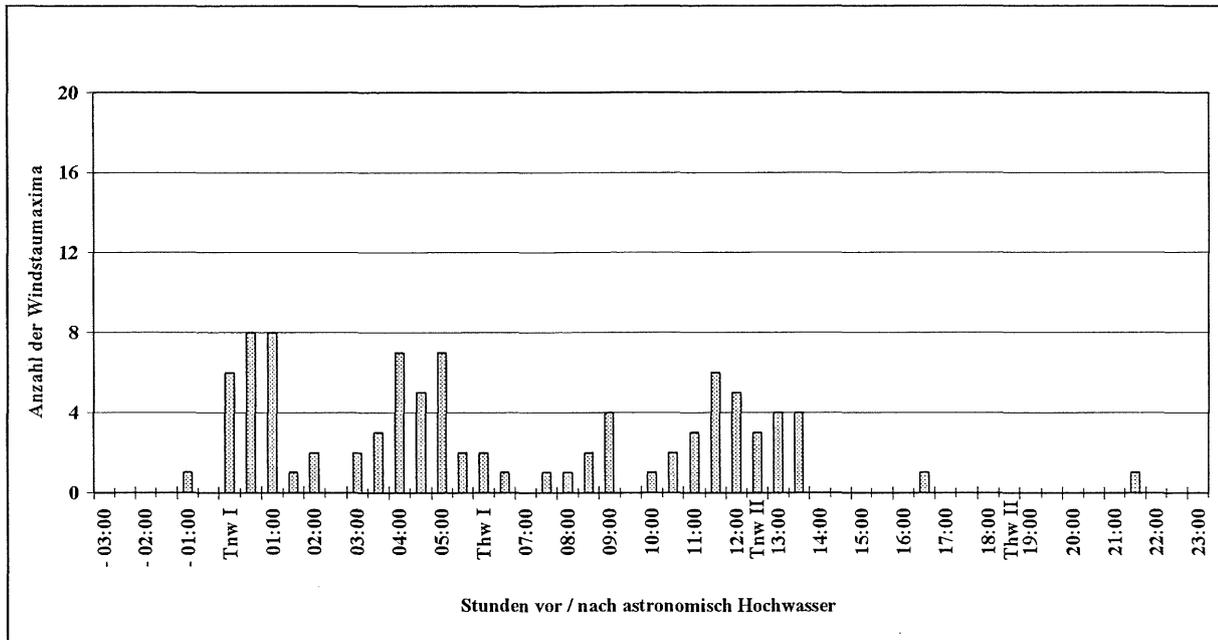


Abb. 9-6 Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Norderney für die Jahre 1938 - 1997

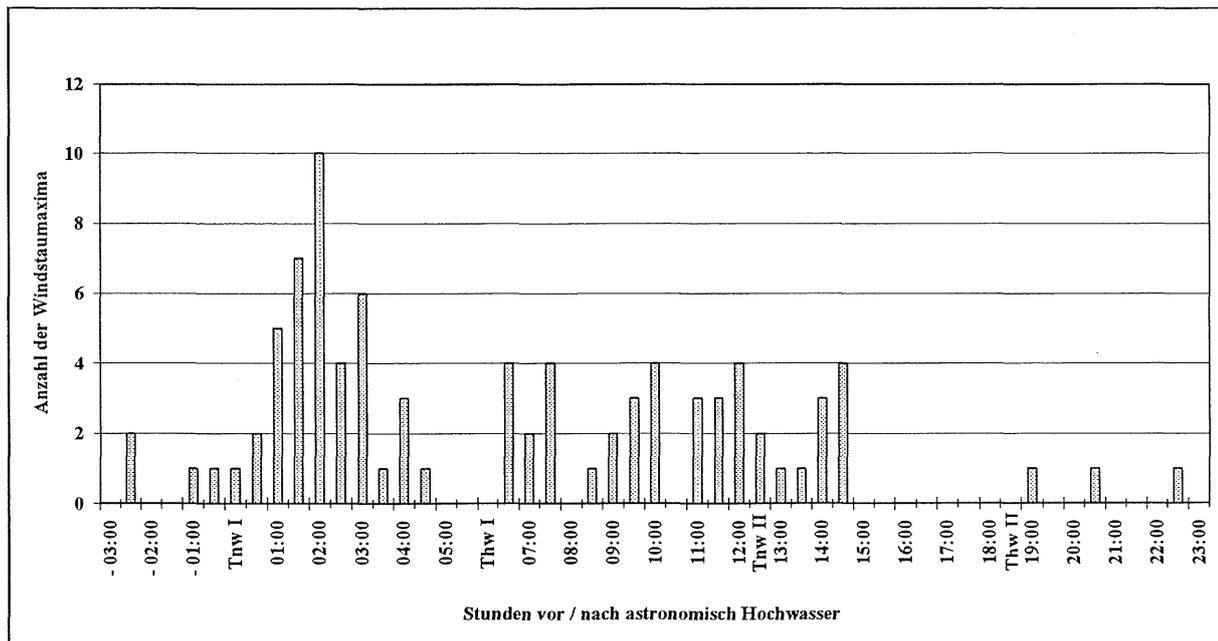


Abb. 9-7: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Helgoland für die Jahre 1940 - 1997 (unter Auslassung der Jahre 1945 - 1950)

Die Abb. 9-7 zeigt, daß die Verteilung der Windstaumaxima auf die Tidephasen wesentlich gleichmäßiger ist als bei den Pegeln Cuxhaven, Norderney und Wittdün. Allerdings sind auch hier Konzentrationen der Windstaumaxima zu verzeichnen. Diese liegen in erster Linie am Flutast nach astronomisch Tideniedrigwasser mit einem Maximum 2 h nach Tnw I und in

wesentlich geringerer Intensität während der Ebbephase bis 3 h nach Tideniedrigwasser. Dagegen sind bisher keine Windstaumaxima kurz vor Hochwasser I und am Flutast von 4 h vor Thw II bis Thw II aufgetreten. Es liegt also keine völlig gleichmäßige Verteilung der Windstaumaxima vor.

In Wittdün auf Amrum ist die Verteilung der Windstaumaxima zur Periode sehr eindeutig (Abb. 9-8). Es gibt einen Schwerpunkt bei Tnw I bis 1 h nach Tideniedrigwasser, der sich in etwas geringer Intensität bei Tnw II wiederholt. Die restlichen Windstaumaxima treten um Hochwasser (1 h vor bis 3 h nach Hochwasser) auf.

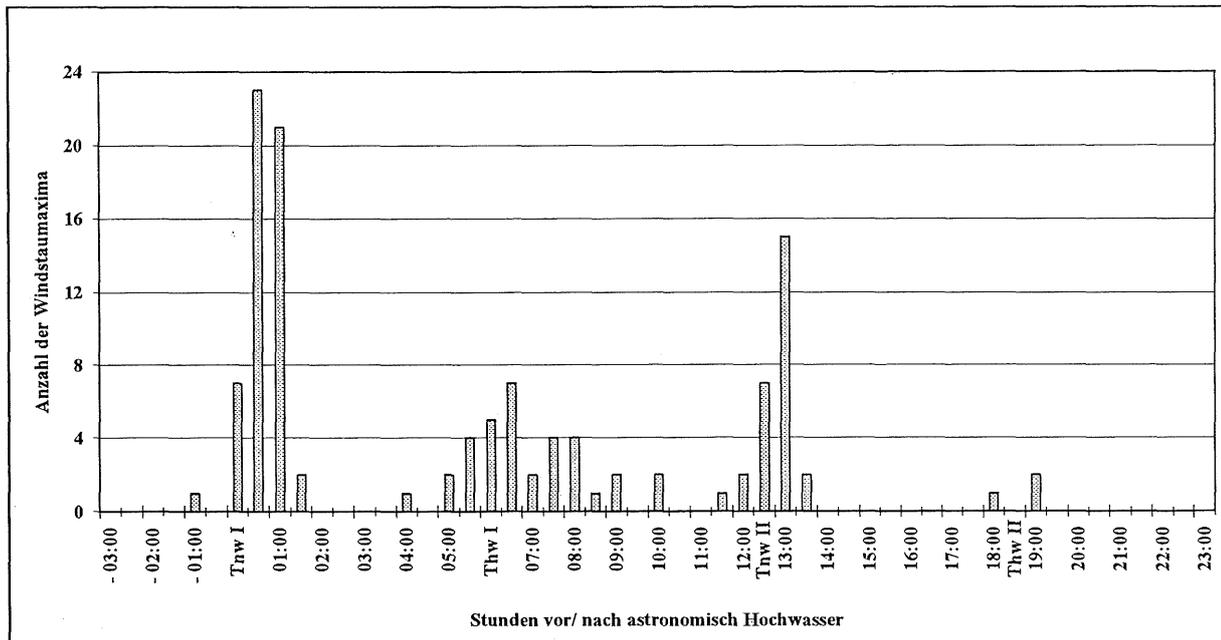


Abb. 9-8: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Wittdün für die Jahre 1914 - 1997 (1914 - 1938 lückenhaft)

Der Vergleich der vier Pegel erfolgt in der Reihenfolge Norderney, Cuxhaven, Helgoland und Wittdün, um die Lage im Raum zu berücksichtigen. Erwartungsgemäß liegen die Windstaumaxima der Pegel Norderney, Cuxhaven und Wittdün gehäuft um Tideniedrigwasser, mit Schwerpunkt auf 1 h nach Tideniedrigwasser. Am ausgeprägtesten ist dieses Phänomen in Wittdün, wo von den 114 Windstaukurven 53 (47 %) ihr Windstaumaximum im Zeitraum von Tideniedrigwasser bis 1 h danach aufweisen. Nicht ganz so hoch aber dennoch mit einem Anteil von 29 % (27 Windstaumaxima von 92 Windstaukurven) liegt in Norderney die größte Häufigkeit deutlich bei Tideniedrigwasser. Mit 23 % erreicht die Häufigkeit der Windstaumaxima von Cuxhaven (35 von 152 Windstaukurven) bei Tnw I eine ähnliche Höhe wie in Norderney. Im Gegensatz zu Norderney und Wittdün, wo die Anzahl an Windstaumaxima 1.5 h nach Tideniedrigwasser deutlich abnimmt, haben in Cuxhaven sieben Windstaukurven ihr Maximum 1.5 h nach Tnw I, so daß der Anteil der Windstaukurven um Tnw auf 28 % ansteigen würde, wenn diese dazugezählt werden. Da die Konzentration der Windstaumaxima bei allen drei Pegeln deutlich bei Tnw liegt und kein Verrücken der Maxima mit der Lage im Raum zu verzeichnen ist, kann dies sowohl mit dem Phänomen, daß die Windstauhöhe abhängig ist von der Wassertiefe, erklärt werden als auch mit der Erklärung von SIEFERT und MURTY (1991), daß die maximale Windgeschwindigkeit mehr oder weniger zufällig meistens bei Tnw liegt und deshalb dort das Windstaumaximum vorzufinden ist. Konkret muß dazu aber

letztendlich der Verlauf der einzelnen Tiden entlang der Küste untersucht werden, was durch den einfachen Vergleich der Lage der Windstaumaxima zur Periode noch nicht zu erkennen ist. Dies muß über einen Vergleich der Lage der Windstaumaxima zur Periode der einzelnen Sturmzeiten erfolgen. Zu erwarten wäre eine Verschiebung der Windstaumaxima zur Periode von Norderney bis Wittdün.

Helgoland weist die größte Häufigkeit der Windstaumaxima 1.5 h bis 3 h nach Tnw I mit knapp 30 % (29 von 98 Windstaukurven) auf. Das ist der Zeitraum in dem für Norderney, Cuxhaven und Wittdün eine sehr geringe Häufigkeit zu verzeichnen ist. Diese liegt für Helgoland um Tnw I vor, einem Zeitraum, in dem die größte Häufigkeit bei den anderen Pegeln festgestellt werden kann.

Bei den weiteren Konzentrationen der Windstaumaxima zur Periode zeigen sich die Differenzen nicht nur bei Helgoland, sondern auch bei Wittdün. Während Cuxhaven noch eine deutliche Konzentration der Windstaumaxima mit 32 % bei 3.5 h nach Tnw I bis Thw I aufweist, verteilt sich diese in Norderney mit jeweils 22 % auf 3.5 h nach Tnw I bis Thw I und 2 h vor Tnw II bis 1 h nach Tnw II. Für letzteren Zeitraum (2 h vor Tnw II bis 1 h nach Tnw II) konzentrieren sich in Cuxhaven nur 15 % der Windstaumaxima. Dies bedeutet, daß die Windstaumaxima in Norderney eine größere Verteilung zur Periode aufweisen als in Cuxhaven mit bereits deutlicher Konzentration auf Tnw I und dem Flutast bis Thw I. Diese Konzentration nimmt bis Wittdün zu, wo die Verteilung 47 % bei Tnw I, und je 25 % um Thw I und Tnw II kaum dazwischenliegende Windstaupeaks möglich macht. Erkennbar ist auch eine Verschiebung zum Thw II von Norderney über Cuxhaven bis Wittdün von maximaler Konzentration vor Thw II (Norderney) über bis Thw II (Cuxhaven) bis direkt vor, bei und nach Thw II (Wittdün). Dieser Ablauf ist, aufgrund der räumlichen Lage der Insel, für Helgoland nicht nachzuweisen.

9.2.2 Nutzung der Windstaumaxima für die Berechnung von Bemessungswasserständen

Zur Berechnung der Entwicklung der Scheitelhöhen ist weniger von Relevanz, wie sich die Sturmflutscheitel entwickeln, als vielmehr, wie sich die Windstaupeaks entwickeln. Der Grund liegt auf der Hand. Wird nur die Stauentwicklung des Scheitels betrachtet, wird nicht die maximal mögliche Stauwirkung des Wassers durch die Windeinwirkung betrachtet, die, wie in Kap. 9.2.1. erläutert, in der Regel bei anderen Tidephasen stattfindet, meist bei Tnw. Zur Berechnung von zukünftig sicheren Deichhöhen muß deshalb auch die Stauentwicklung bei Tnw betrachtet werden; zum einen ist das „Kollektiv mit hohem Stau um MThw nur sehr klein, zum anderen sind die Maximalwerte um MTnw aufgetreten und sollten nicht einfach vernachlässigt werden“ (LÄNDER-ARBEITSGRUPPE, 1988:36). Hierzu wird das maximale Verhältnis der Windstauhöhe bei Thw zur Windstauhöhe bei Tnw betrachtet. Dieses wird ermittelt, indem alle Sturmfluten in Cuxhaven betrachtet werden, „deren Windstaumaximum W um MTnw auftrat und bei denen der Wind sich über die Tide nicht wesentlich veränderte“ (LÄNDER-ARBEITSGRUPPE, 1988:36). Das maximale Verhältnis $W(MThw) : W(MTnw)$ liegt laut der LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988:36) bei 90 %. Auch die Ergebnisse der neuen LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1999) weisen auf ein Verhältnis von 90 % für Cuxhaven hin.

Infolgedessen wird die Überschreitungswahrscheinlichkeit zunächst für alle Windstaupeaks bei Tnw (definiert als 3.5 h vor Tnw bis 3h nach Tnw) und bei Thw (definiert als 3 h vor Thw bis

3 h nach Thw) berechnet. Hierzu wird die Überschreitungswahrscheinlichkeit in 10 cm-Schritten und in logarithmischer Teilung dargestellt. Zunächst werden die Pegel Norderney, Helgoland und Wittdün analysiert. Für die Untersuchung der Windstaumaxima von Cuxhaven sei auf die Untersuchung der LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1998) verwiesen.

Werden für Norderney die Windstaumaxima bei Thw und bei Tnw getrennt aufsummiert, so zeigt sich eine geringe Höhendifferenz zwischen den Maxima bei Thw und denen bei Tnw (Abb. 9-9). Liegt sie bei den niedrigen Windstaumaxima noch bei knapp 50 cm Differenz, was $W(MThw) : W(MTnw)$ von 75 % entspricht, verringert sie sich bei den Maxima auf 20 cm Differenz, wodurch sich $W(MThw) : W(MTnw) = 94 %$ ergibt. Zu beachten ist bei dieser Vorgehensweise, daß hier verschiedene Tiden und damit Windstaumaxima verglichen werden und nicht wie bei dem Verfahren der LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988) der maximale Wert bei Tnw und bei Thw der gleichen Tide, bei der der Wind etwa gleichbleibend weht.

Die maximal erreichten Windstauwerte sind bei Thw 313 cm mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1:60 Jahren, bei Tnw 332 cm mit ebenso 1:60 Jahren (Abb.9-9).

Wird davon ausgegangen, daß bei Thw 90 % des höchsten Wertes bei Tnw eintreten können, kann für Norderney ein Wert um Thw von rund 300 cm über MThw angesetzt werden. Sieht man weiterhin, daß diese Kurven nahezu asymptotisch verlaufen, so bildet dieser Wert eine gute erste Grundlage für eine Deichhöhe, die dann mit den entsprechenden Zuschlägen wie Meeresspiegelanstieg, Wellenauflauf etc. versehen werden muß. Der im weiteren bearbeitete maximale Windstauwert, wird diese Grundlage spezifizieren und verfeinern.

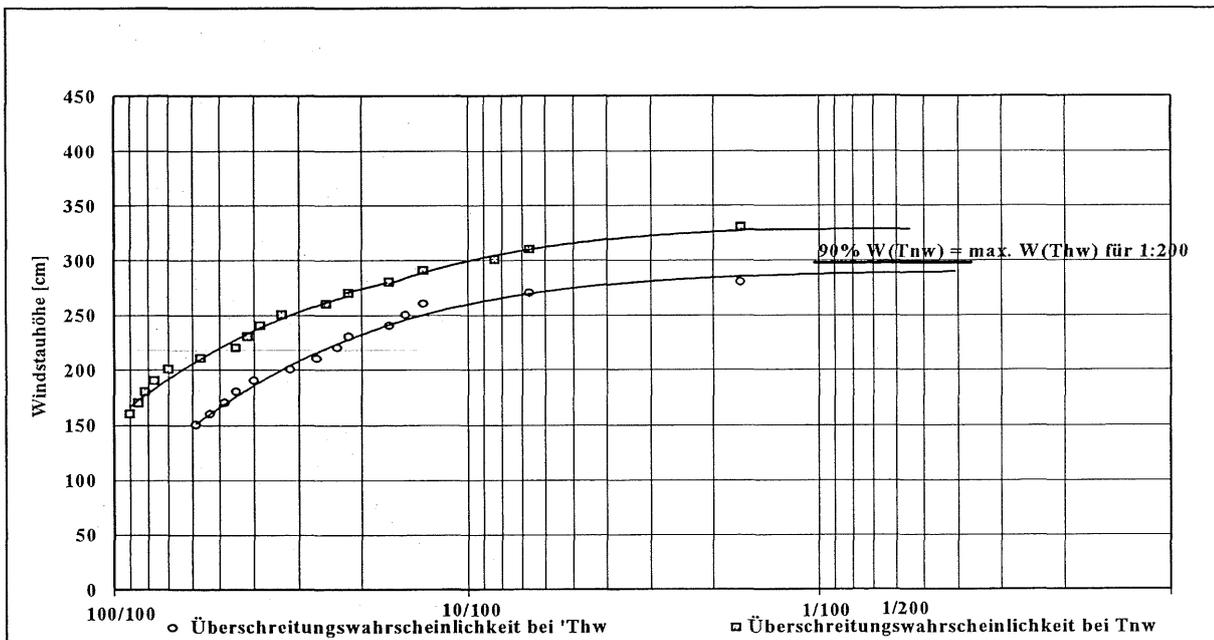


Abb. 9-9: Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen in Norderney für die Jahre 1938-1997

In Wittdün erreicht das Maximum bei Thw 309 cm mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1:65 Jahren, bei Tnw 368 cm mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1:30 Jahren (Abb. 9-10), so daß $W(MThw) : W(MTnw)$ 84 % erreicht. Bei den niedrigen Sturmfluten ist auch hier die Differenz wesentlich größer mit 110 cm bei Thw und 240 cm bei Tnw bei gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit (46 %).

Wird mit einem „Sicherheitszuschlag“ davon ausgegangen, daß auch 90 % des T_{nw} bei T_{hw} erreicht werden können, so ergibt sich für Wittdün eine Windstauhöhe über $M_{T_{hw}}$ von 330 cm. Dieser Wert muß aber mit Vorsicht betrachtet werden. Die Berechnung einer Verteilungsfunktion für diese Daten zeigt keine Tendenz in einem asymptotischen Verlauf zu münden, was ein Anzeichen für einen etwaigen momentanen Höchstwert darstellen könnte. Demzufolge bildet dieser Wert einen Anhalt und findet in der weiteren Untersuchung in der sogenannten maximalen Windstaukurve seine detaillierte Bearbeitung.

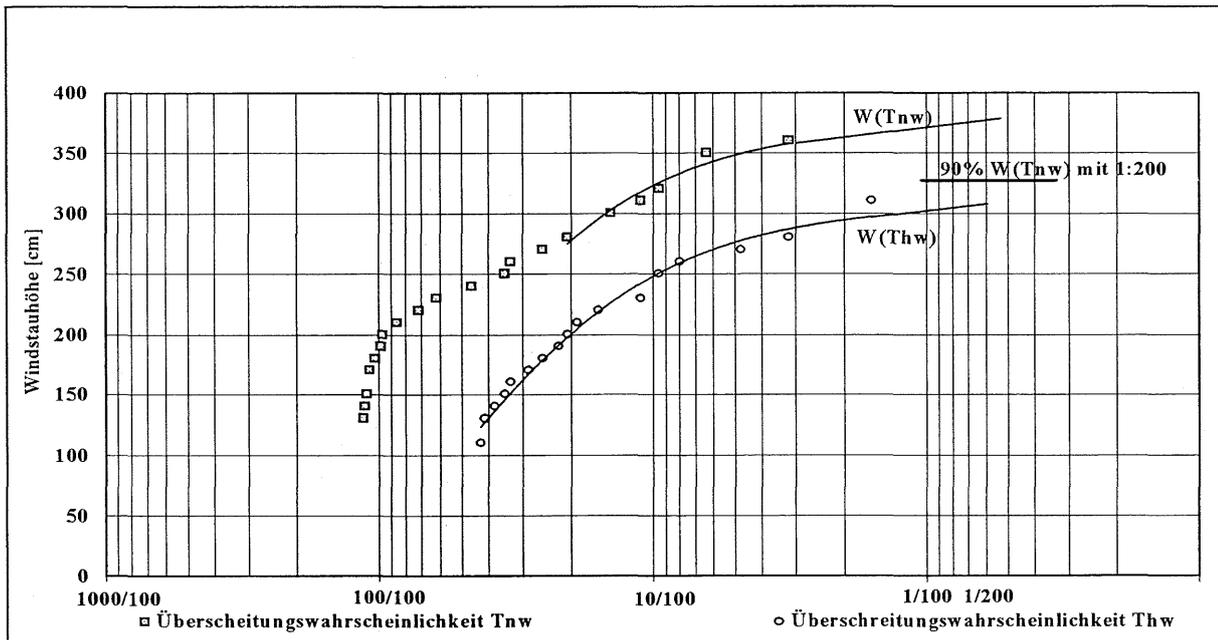


Abb. 9-10: Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen in Wittdün für die Jahre 1935-1997

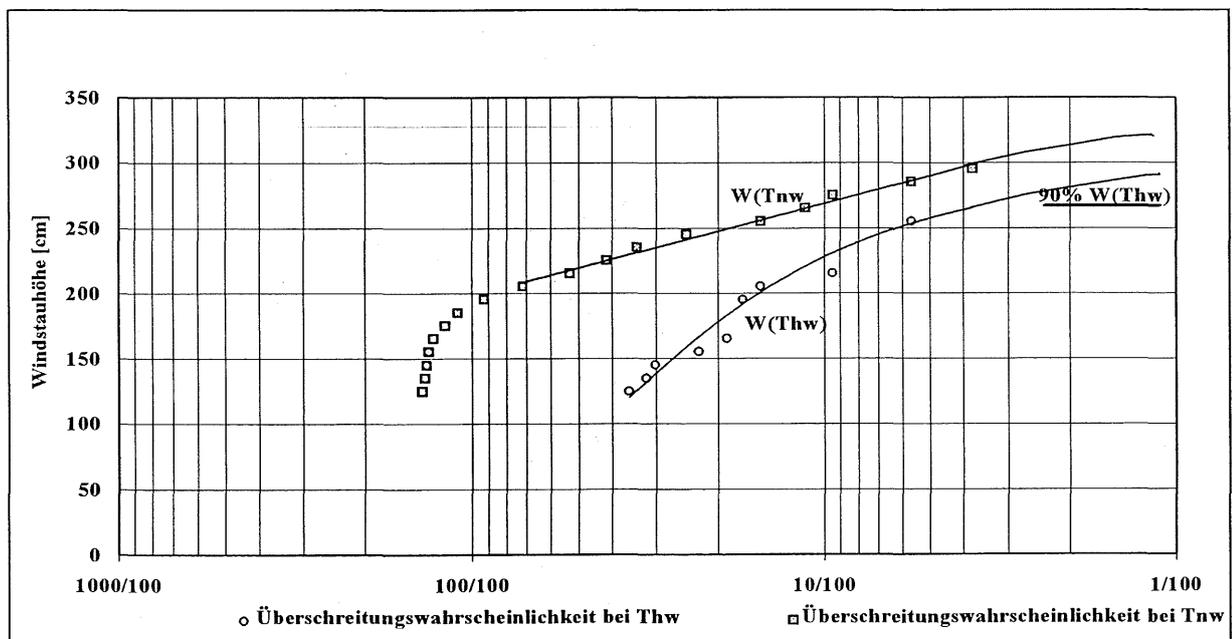


Abb. 9-11: Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen in Helgoland für die Jahre 1940-1997

Abb. 9-11 zeigt für Helgoland eine deutliche Annäherung der Windstaumaxima bei Thw und Tnw bei kleinerer Eintrittswahrscheinlichkeit mit 100 %. Der maximal erreichte Windstau bei Thw und Tnw in Helgoland liegt bei 270 cm, die jeweils zweimal in 53 Jahren aufgetreten sind. Das bedeutet, daß hier im Hochseebereich die Formel, 90 % vom Höchstwert Tnw entspricht dem zur Zeit höchst möglichen Wert um Thw, nicht zutrifft. Weiterhin laufen auch diese Werte nicht einem Grenzwert entgegen, so daß der zu berechnende Wert von 320 cm ein erster Anhalt für die weitere Bearbeitung der vorliegenden Untersuchung bedeutet.

10 Charakterisierung der Sturmfluten bzw. Windstaukurven und deren Entwicklung

Der Versuch, Sturmtiden zu charakterisieren, erfolgt in der Regel über die Fülligkeit der Sturmtide. Um jedoch den von der "Normaltide" bzw. mittleren oder astronomischen Tide abweichenden Charakter zu bestimmen, muß ein Weg gewählt werden, der den hauptsächlichsten Verursacher einer Abweichung ebenso erfaßt wie die Lage der Änderung zur Phase. Dies ist zwangsläufig die Windstaukurve.

Einen Vorschlag, die "Fülligkeit" einer Tide zu definieren, macht SIEFERT (1997, mündl. Auskunft), indem er über die Grenzwerte der Anstiegsparameter, Scheiteldauer und Abfallkennzahl der Windstaukurve auf die "Fülligkeit" der Tide rückschließt.

Entsprechend der Fragestellung des Forschungsvorhabens erfolgt die Charakterisierung der Sturmtiden über die Kategorisierung der unterschiedlichen Windsituationen, die die differierenden Charaktere der Sturmfluten verursachen. So wird eine Windstaukurve, die einen langen Anstieg aufweist, natürlich von einem Wind verursacht, der einen langsamen Anstieg der Windgeschwindigkeit bis zu der maximalen Windgeschwindigkeit aufweist (d.h. die Dauer der Windgeschwindigkeitsänderung ist groß), eine lange Scheiteldauer wird von einer lang andauernden hohen Windgeschwindigkeit bewirkt und eine kleine Abfallkennzahl weist einen plötzlichen Zusammenbruch der hohen Windgeschwindigkeiten nach.

Die Definition der Begriffe *kurz* und *lang* erfolgt über die Anstiegs- und Abfallkennzahl h/m und über die Dauer des Scheitelbereiches. Beginn und Ende der Parameterlinien und damit der Berechnung der Kennzahlen erfolgt über die gesamte Windstaukurve ≥ 50 cm und ist nicht zeitlich begrenzt. Demzufolge ergeben sich größere Kennzahlen für die Begrenzung von *kurz* und *lang* als bei zeitlicher Einschränkung wie etwa 3 h vor dem Windstaumaximum (z.B. bei SIEFERT [1968] für die Sturmflutvorhersage).

Da der gesamte Anstieg und Abfall zur Parametrisierung gewählt wird, wird *kurz* so definiert, daß bei einem Anstieg der Windgeschwindigkeit über den Flutast von Tideniedrigwasser bis Hochwasser ein Wasserstand von mindestens 1.50 m über MThw erreicht sein muß. Dies ist bei einer Anstiegskennzahl von 6 h/m der Fall (1 m in 6 h + 50 cm Ausgangshöhe). Ebenso ist davon auszugehen, daß ein schnelles Abflauen der Windgeschwindigkeit dann der Fall ist, wenn der Wind innerhalb einer Ebbephase vollständig abgeklungen ist und der Windstau nur noch 50 cm erreicht.

Demzufolge werden *kurz* und *lang* wie in Tab. 10-1 definiert.

	<i>kurz</i>	<i>lang</i>
Anstiegskennzahl	≤ 6 h/m	> 6 h/m
Scheiteldauer	≤ 6 h	> 6 h
Abfallkennzahl	≤ 6 h/m	> 6 h/m

Tab. 10-1: Definition von *kurz* und *lang*

Auf diese Art erhält man verschiedene Sturmflutcharaktere, die sich zunächst ganz einfach durch die mögliche Kombinationen von drei Parametern ergeben, nämlich 3^3 Kombinationen. Inhaltlich entstehen jedoch aufgrund der Wechselwirkung Wind zu Tide nur 9 Kombinationen:

- | | | | |
|-------------------|-----------------|---------------|-------------------------|
| 1. langer Anstieg | langer Scheitel | langer Abfall | (lang-lang-lang; [lll]) |
| 2. langer Anstieg | langer Scheitel | kurzer Abfall | (lang-lang-kurz; [llk]) |
| 3. langer Anstieg | kurzer Scheitel | langer Abfall | (lang-kurz-lang; [lkl]) |
| 4. langer Anstieg | kurzer Scheitel | kurzer Abfall | (lang-kurz-kurz; [lkk]) |
| 5. kurzer Abfall | kurzer Scheitel | kurzer Abfall | (kurz-kurz-kurz; [kkk]) |
| 6. kurzer Abfall | kurzer Scheitel | langer Abfall | (kurz-kurz-lang; [kkL]) |
| 7. kurzer Abfall | langer Scheitel | kurzer Abfall | (kurz-lang-kurz; [klk]) |
| 8. kurzer Abfall | langer Scheitel | langer Abfall | (kurz-lang-lang; [klL]) |
9. Windstaukurve mit deutlich zwei definierten Windstaupeaks

Anhand des Pegels Cuxhaven werden im folgenden die einzelnen Kategorien vorgestellt. Zu Beginn werden die Charaktere der einzelnen Kategorien beschrieben, die für alle Pegel grundsätzlich übereinstimmen. Im weiteren werden jeweils für alle Pegel die Häufigkeiten, die Entwicklung in den letzten 100 Jahren der Häufigkeit und die jeweiligen Besonderheiten wie z.B. die generelle Windstauhöhe, die diese Kombination bewirkt, angeführt. Tabellarisch wird im Anhang die Windsituation, die für die Ausbildung eines bestimmten Charakters eines Parameters verantwortlich ist, beschrieben und den jeweiligen Sturmfluten zugeordnet.

10.1 Die Charakterisierung in Cuxhaven

10.1.1 Beschreibung der Charakteristika der einzelnen Kategorien

Langer Anstieg - langer Scheitel - langer Abfall

Die Kategorie *lang-lang-lang* umfaßt jene Sturmfluten, die durch langsame Windgeschwindigkeitsanstiege (18b; 113; 208) oder aber langsames Eindrehen der Windrichtung in die stauwirksame Windrichtung bei bereits hohen Windgeschwindigkeiten, einer lange Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit und wiederum langsamen Abfall entstanden sind. Die Kombination *lang-lang-lang* führt zwangsläufig zu Windstaukurven mit langen Dauern, die mehr als einen Tidescheitel umfassen, häufiger umfassen sie gar mehrere Sturmflutscheitel. Ein Beispiel für diese Kategorie sind Nr. 78a/78/79 und 180.

Windstauhöhe: Diese Kombination von einem langandauernden Windanstieg mit einem langen Scheitel führt nicht zwangsläufig zu einem hohen Windstaumaximum und einem hohen Sturmflutscheitel in Cuxhaven, obwohl durch die lange Stauwirkung dies hätte erwartet werden können. Wie jedoch die Korrelationen zwischen Anstiegsneigung und Windstaumaximum zeigen, können lange Anstiege zwar hohe Windstaumaxima stauen (Maximum 375 cm, das jedoch mit 6,5 h/m einen Grenzwert zu kurz bildet), sehr hohe Windstaumaxima werden aber von kurzen Anstiegen gebildet. So erreichen 75 % der Windstaukurven der Kategorie *lang-lang-lang* eine Höhe von 200-250 cm und nur knapp 25 % 250-300 cm.

Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Die Windstaumaxima dieser Kategorie liegen über die gesamte Tidephase verteilt ohne Konzentration um Niedrig- oder Hochwasser.

Sturmflutscheitel in Cuxhaven: Die Sturmflutscheitelhöhen, die in dieser Kategorie in Cuxhaven erreicht werden, liegen zwischen 780 cm PN und 995 cm PN (16.02.1962). Der größte Teil der Sturmfluten liegt jedoch zwischen 800 und 900 cm. Die zweithöchste Sturmflut des 20. Jahrhunderts vom 16.02.1962 weist eine Anstiegskennzahl von 6,5 h/m auf und bildet damit den Grenzwert zu kurzer Anstiegskennzahl. Deutlich wird jedoch, daß diese Gruppe Extrema ausbilden kann. Eine Zunahme der Anzahl in dieser Gruppe muß mit Sorgfalt betrachtet werden.

Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli (entspricht Auswirkungen auf flußaufwärts gelegene Orte):

Es ist anzunehmen, daß dieser Typus flußaufwärts größere Konsequenzen tragen kann, vor allem, wenn wie hier auch noch ein langsamer und langandauernder abflachender Wind vorliegt, da die längere Winddauer in der trichterförmigen Mündung und dem begrenzten Flußbett den Stau besser hält. Grundsätzlich kann dies nicht bestätigt werden, da natürlich erst ein hoher Windstau an der Küste gebildet werden muß, der wiederum von kurzen Anstiegen gebildet wird. So wird die Sturmflut vom 03.01.1976, die höchste Sturmflut seit verlässlicher Pegelaufzeichnungen in St. Pauli, ebenso von einem kurzen Anstieg gebildet wie die vom 10.01.1995. Viele der schweren Sturmfluten mit hohen bis sehr hohen Sturmflutscheiteln in St. Pauli werden allerdings in dieser Gruppe gebildet wie jene vom 16.02.1962 mit 1070 cm PN und vom 28.01.1994 mit 1102 cm PN.

Interessant ist, daß die Differenz der Scheitelhöhen Cuxhaven:St.Pauli seit Beginn der sechziger Jahre drastisch zugenommen hat von 5-55 cm im Zeitraum 1901-1960 hin zu 45-155 cm 1960-1995. Es ist hier ein deutlicher signifikanter Trend zu berechnen. Es muß aber beachtet werden, daß die Daten von St. Pauli bis 1950 lückenhaft sind.

Die erreichte sehr hohe Differenz der Scheitelhöhen St. Pauli zu Cuxhaven von 155 cm zeigt, daß ein langsamer Abfall größere Konsequenzen flußaufwärts haben muß als ein kurzer. Es ist die größte Differenz aller Kategorien und wird mit 150 cm nur von der Kategorie *kurz-kurz-lang* erreicht.

Weiterhin ist davon auszugehen, daß diese Kategorie verstärkt Windstaukurven enthält, die mehr als einen definierten Sturmflutscheitel umfassen. Dies ist in der Tat der Fall: 8 von den 24 Windstaukurven umfassen mehr als einen definierten Sturmflutscheitel, eine der Windstaukurven umfaßt gar drei Sturmflutscheitel.

Langer Anstieg – langer Scheitel – kurzer Abfall

Grundsätzlich charakterisiert diese Kategorie eine Windsituation, in der der Wind eine lang andauernde oder langsame Windgeschwindigkeitsänderung im Anstieg vorweist, in der maximalen Geschwindigkeit lange anhält und dann plötzlich zusammenbricht (z.B. Sturmflut Nr. 90, 33).

Ein kurzer Abfall entsteht durch raschen Abfall der Windgeschwindigkeit. Er kann nur verstärkt werden durch gleichzeitiges Abdrehen der Windrichtung in den nichtstauwirksamen Bereich. Bemerkenswert ist jedoch, daß bei fast allen Sturmtiden dieser Kategorie die Windgeschwindigkeit zwar rasch zusammenbricht, aber dann entweder erneut ansteigt - jedoch nicht so sehr um einen erneuten Stau von 2 m zu verursachen - oder aber auf relativ hohem Niveau noch anhält (15m/s). Entscheidend für einen raschen Zusammenbruch der Windstaukurve ist demnach die rasche Windgeschwindigkeitsänderung, die ein längeres Anhalten oder Wiederaufbauen des Staus nicht erlaubt.

faßt), so daß davon auszugehen ist, daß in der Regel bei einem langen Anstieg und einem langen Scheitel kein rascher Zusammenbruch des Windes vorliegt.

Windstauhöhe und Phasenlage des Maximums: Die Windstauhöhe dieser Kategorie ist recht niedrig. Sie liegt zwischen 200 cm und 270 cm. Allerdings liegen die Maxima entweder bei auflaufend Wasser kurz vor Hochwasser oder aber kurz nach Hochwasser.

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven: Da die Windstaumaxima um Hochwasser liegen, stimmt das Windstaumaximum fast mit der Scheitelhöhe über MThw in Cuxhaven überein, d.h. hier werden leichte bis schwere Sturmfluten produziert.

Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli: Die Scheitelhöhen dieser Gruppe in St. Pauli liegen zwischen 900 und 1000 cm PN. Die Differenz der Scheitelhöhen zwischen Hamburg und St. Pauli beträgt 60 bis 116 cm, wobei kein Trend in den letzten 100 Jahren zu berechnen ist. In diese Kategorie fallen keine sehr hohen Sturmfluten.

Langer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

Mit 39 Windstaukurven umfaßt die Kategorie *lang-kurz-lang* die meisten Sturmfluten und bedarf schon deshalb einer genauen Betrachtung. Auch hier entstehen die langen Anstiege in erster Linie durch das langsame Ansteigen der Windgeschwindigkeit und/oder allmähliches Eindrehen der Windrichtung in die stauwirksame Windrichtung. Liegt ein leichtes Abfallen der Windgeschwindigkeit vor, nachdem bereits ein Windstauanstieg vorliegt, wird der langsame Anstieg des Windstaus verstärkt, selbst wenn höhere Windgeschwindigkeiten auftreten. Ein exemplarisches Beispiel für den klassischen Fall in Verbindung mit einem zwischenzeitlichen Abfall der Windgeschwindigkeit ist Sturmflut Nr. 170, bei der auch der kurze Scheitel sehr deutlich wird. Dieser wird sehr häufig in dieser Kategorie dadurch gebildet, daß der Anstieg nach Erreichen des Peaks unmittelbar wieder abfällt.

Windstauhöhe: Die Windstauhöhe schwankt zwischen 200 cm und 366 cm, d.h. die maximalen Höhen, die hier erreicht werden, sind recht hoch. Auch hier ist es jedoch so, daß das Windstaumaximum von 366 cm durch einen Anstieg gebildet wird, der mit 6,5 h/m an der Grenze zu *kurz* liegt. Außerdem entsteht *lang* bei Sturmflut Nr. 168/169 zwar durch sehr langen und langsamen Anstieg der Windgeschwindigkeit, so daß sich bereits frühzeitig ein Stau aufzubauen beginnt; in die das Peak stauende Windrichtung dreht der Wind sich jedoch erst sehr spät ein.

Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Die Windstaumaxima sind ausgesprochen gleichmäßig über die gesamte Tidephase verteilt. Ein gewisser Schwerpunkt in der Anzahl liegt im Flutast von Tideniedrigwasser bis Tidehochwasser. Es gibt - offensichtlich aufgrund des kurzen Scheitels - kein Windstaumaximum, das später als um Tnw III liegt. Demzufolge ist der Anteil an Windstaukurven, die mehr als einen Sturmflutscheitel umfassen, mit 6 von 36 sehr gering. Diese sechs Windstaukurven umfassen alle nur zwei definierte Sturmflutscheitel. Das bedeutet, daß lange Anstiege und lange Abfälle zwar lange Windstaukurven bilden können, der kurze Scheitel aber Kettentiden mit vielen hohen Sturmflutscheiteln verhindert. Außerdem zeigt sich wiederum, daß lange Abfälle keinen erneuten definierten Sturmflutscheitel an der Küste bewirken, sondern dies ausschließlich durch einen erneuten Anstieg der Windgeschwindigkeit erfolgt (s. 2 Scheitel).

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und in St. Pauli: Die Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven reicht von 784 cm bis 939 cm und in St. Pauli von 825 cm bis 1033 cm. Damit zeigt sich, daß sowohl in der Windstauhöhe als auch in der Scheitelhöhe eine große Spannbreite zu verzeich-

nen ist. In dieser Kategorie sind sehr viele der leichten Sturmfluten, deren maximale Scheitelhöhe gerade 1.50 m über MThw ist. Es können aber auch schwere Sturmfluten auftreten wie jene vom 06.12.1973, Nr. 117, mit 939 cm PN, die achthöchste in Cuxhaven und in Hamburg die 14. höchste Sturmflut mit 1033 cm PN. Diese Sturmflut wird allerdings von einem Anstieg von 6,5 h/m gebildet, der den Grenzbereich zu "kurz" bildet. Bei diesem Wert werden Windstaumaxima bis zu 360 cm ausgebildet, so daß grundsätzlich bleibt, daß in dieser Kategorie mit langem Anstieg eher niedrige Sturmfluten ausgebildet werden.

Die Höhendifferenz zwischen St.Pauli und Cuxhaven lag von 1920 bis 1970 in einer Spannbreite von 10-60 cm, ab 1970 in einer Spannbreite von 40-114 cm. Es zeigt sich also auch in dieser Gruppe ein eindeutiger Trend zu größeren Differenzen.

Langer Anstieg– kurzer Scheitel– kurzer Abfall

Mit diesem Charakter steigt die Windgeschwindigkeit langsam an, um nach Erreichen der maximalen Windgeschwindigkeit und günstigsten Windrichtung rasch wieder abzuflauen. Langsame Anstiege in dieser Kombination verursachen keine besonders hohen Scheitel. Sturmfluten in dieser Kombination kommen mit 12 Windstaukurven relativ selten vor (Nr. 220, 207, 193, 13, 3). Sturmflutwetterlagen, bei denen der Wind nach Erreichen der maximalen Windgeschwindigkeit unmittelbar wieder rasch abflaut, bilden selten Windstaukurven, die mehr als einen definierten Sturmflutscheitel umfassen. In dieser Kategorie kommt dies nicht ein einziges mal vor, was wiederum zeigt, daß lange Scheitel und lange Abfälle Kettentiden verursachen aber nicht lange Anstiege.

Windstauhöhe: Die Windstaumaxima liegen in dieser Kategorie zwischen 250 cm und 300 cm mit einer Ausnahme von 210 cm.

Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Die Windstaumaxima liegen verstärkt um Tnw II bis 1 h vor Thw. Nur ein Windstaumaximum liegt nach Thw, allerdings 20 h nach Tnw II.

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und in St. Pauli: In Cuxhaven liegt die Scheitelhöhe zwischen 794 cm und 934 cm mit der Sturmflut Nr. 207 vom 23.01.1993, die in Cuxhaven die zehnthöchste, in St. Pauli mit 1075 cm die fünfhöchste Sturmflut ist. In St. Pauli liegen die niedrigsten Werte bei 840 cm, so daß sie demnach von leichten Sturmfluten bis schweren Sturmfluten reichen.

Differenz Cuxhaven - St.Pauli: Die Differenz der Scheitelhöhen zwischen Cuxhaven und St. Pauli liegen zwischen rund 10 cm und knapp 110 cm, wobei bis 1994 ein kontinuierlicher Anstieg zu verzeichnen ist.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – kurzer Abfall

Diese Kategorie zeigt Beispiele, in denen nach kurzem Anstieg der Windgeschwindigkeit und/oder Eindrehen des Windes in die richtige Windrichtung schnell das Windstaumaximum erreicht wurde, das rasche Abflauen des Windes jedoch einen kurzen Scheitel und raschen Abfall verursacht hat (Nr. 141, 192, 214, 153; 70b, 57). Wie nicht anders zu erwarten, wird nur ausgesprochen selten in dieser Kategorie eine Sturmflut mit mehr als einem definierten Sturmflutscheitel vorkommen. Erstaunlicher Weise existiert eine Sturmflut (Nr. 65/66 vom 23.12.1954), deren Windstaukurve aber zwei Sturmflutscheitel umfaßt. Der Grund ist der, daß das Windstaumaximum nach Tidehochwasser liegt und bei Tideniedrigwasser der folgenden Tide bereits im Abfall ist, der bei 10 m/s bleibt und das folgende Hochwasser noch einmal staut.

Windstauhöhe: Kurze Anstiege können hohe Windstaumaxima verursachen. Windstaumaxima, die schwere bis sehr schwere Sturmflutscheitel bewirken, benötigen aber eine lange Dauer. Hierbei kann es sich um den Abfall handeln oder aber um den Scheitelbereich, da die meist bei Tideniedrigwasser liegenden hohen Windstaumaxima mit Hilfe der langen Scheiteldauer oder des langsamen Abfalls über Tidehochwasser hinweggezogen werden. Demzufolge bewirken die Windstaumaxima, die in dieser Kategorie in einer Spannbreite von 204 cm bis 395 cm auftreten, keine sehr schweren Sturmfluten. Im Gegenteil, das höchste Windstaumaximum dieser Kategorie bildet eine leichte Sturmflut in Cuxhaven aus (Nr. 57 vom 10.02.1949).

Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Natürlich liegen auch in dieser Kategorie die meisten Windstaumaxima (6 von 12) um Tideniedrigwasser (Tnw II), allerdings liegen drei auf dem aufsteigenden Ast um Thw und weitere drei um Tnw III. Das bedeutet, daß die kurzen Anstiege zwei Tiden erhöhen. In diesem Fall liegen alle drei Windstaumaxima über 300 cm, was bei einer Lage des Windstaupeaks um Thw nicht zu leichten, sondern zu schweren bis sehr schweren Sturmfluten hätte führen können, wenn die Scheiteldauer oder der Abfall lange Kennzahlen aufweisen würde, wie dies am 03.-04.1.1976 mit kurz-kurz-lang der Fall war.

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli: Die Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und St. Pauli liegt mit 791 cm bis 896 cm in Cuxhaven und 838 cm bis 977 cm in St. Pauli im Bereich der leichten bis schweren Sturmfluten. Da in dieser Kategorie hohe Windstaumaxima ausgebildet werden können, entscheidet allein die Lage des Windstaumaximums zur Tidephase die Sturmflutscheitelhöhe. Die Differenz Cuxhaven : St. Pauli schwankt zwischen 35 cm und 128 cm. Es läßt sich in dieser Gruppe kein eindeutiger Trend zu größeren Differenzen erkennen.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

Diese Kategorie ist gekennzeichnet durch einen raschen Anstieg der Windgeschwindigkeit, kurze Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit und langsamen Abfall der Windgeschwindigkeit (Nr. 206).

Ein kurzer Anstieg kann zu einem hohen Windstauscheitel und zu hohen Sturmflutscheiteln führen kann (Nr. 94; Nr. 88) und ein langer Abfall dies forcieren (Nr. 156 oder auch Nr. 125 vom 03.-04.01.1976). Letzterer kann außerdem Kettentiden verursachen (Nr. 146/147/148). Windstaukurven, die mehr als einen definierten Sturmflutscheitel umfassen, treten in vier von 29 Fällen auf, einmal umfaßt sie sogar drei Scheitel. Insgesamt tritt die Sturmflutwetterlage *kurz-kurz-lang* sehr häufig auf.

Windstauhöhe: In dieser Kategorie liegen die größten Windstaumaxima mit einer Spannbreite von 200 cm bis 430 cm.

Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Auch hier liegen die meisten Windstaumaxima um Tnw II, jedoch ist wie in *kurz-kurz-kurz* der Anteil mit 6 Windstaumaxima um Thw und mit 5 um Tnw III groß.

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli: In dieser Kategorie liegen die Sturmflutscheitelhöhen im Bereich der schweren bis sehr schweren Sturmfluten. Dies zeigt, daß ein langsamer Windgeschwindigkeitsabfall Einfluß auf die Sturmflutscheitelhöhe nehmen kann, da ein hohes Windstaumaximum um Tnw II noch im langsamen Abfall um Tidehochwasser hohe Werte erzielt. So hat die höchste Sturmflut vom 03.01.1976 in Cuxhaven und in St. Pauli den Charakter *kurz-kurz-lang*. In St. Pauli führt der langsame Abfall zu der dritthöchsten Sturmflut vom 10.1.1995 mit 1102 cm und zur vierthöchsten vom 24.11.1981

mit 1081 cm. Es ist bemerkenswert, daß von den 10 höchsten Sturmfluten in St. Pauli nur eine Sturmflut einen kurzen Abfall in Cuxhaven aufweist (Sturmfluten mit zwei Scheiteln ausgeschlossen). Die Differenz der Scheitel zwischen St. Pauli und Cuxhaven lag in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zwischen 5 cm und 60 cm, in der zweiten Hälfte zwischen 60 cm und 155 cm. Es ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Diese zweithöchste Differenz aller Kategorien ist einleuchtend. Grundsätzlich führen schwere Sturmfluten zu einer größeren Differenz St. Pauli zu Cuxhaven. Da kurze Anstiege hohe Windstaumaxima in Cuxhaven verursachen, kann der lange Abfall dies flußaufwärts verstärken.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel - kurzer Abfall

Diese Charakterisierung zeigt an, daß nach relativ rasch ansteigender Windgeschwindigkeit die maximale Windgeschwindigkeit relativ lange anhält, um dann wieder rasch abzufallen.

Dies führt in Cuxhaven zu eher niedrigen, selten zu hohen Windstaumaxima und auch nur zu niedrigen Sturmflutscheiteln, obwohl der Scheitel auch häufig über Hochwasser anhält. Auch hier zeigt sich, daß lange Scheitel keine hohen Windstau- und Sturmflutscheitel verursachen (Nr. 67).

Windstauhöhe und Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Die Windstaumaxima liegen zwischen 208 cm bis 325 cm. Die Verteilung der Windstaumaxima ist gleichmäßig verteilt, das heißt, sie liegen zu gleichen Teilen bei Tnw II, Thw und Tnw III.

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli: Die Sturmflutscheitelhöhe schwankt zwischen 816 cm und 886 cm in Cuxhaven sowie 853 cm und 947 cm in Hamburg St. Pauli und liegt damit im Bereich der leichten bis niedrigen schweren Sturmfluten.

Kurzer Anstieg– langer Scheitel – langer Abfall

Im Idealfall ist diese Gruppe gekennzeichnet durch einen raschen Anstieg der Windgeschwindigkeit, die in ihrem Maximum lange andauert und dann langsam wieder abfällt. Natürlich kann auch hier der kurze Anstieg durch spätes Eindrehen der Windgeschwindigkeit in die stauwirksame Richtung verursacht worden sein bei gleichzeitigem weiterem Anstieg der Windgeschwindigkeit. Auch ist es möglich, daß der langsame Abfall bewirkt wird durch Schwankungen der Windgeschwindigkeit im Abfall, der keinen erneuten Scheitel verursacht. In diese Kategorie fallen 10 Windstaukurven, wobei drei Windstaukurven zwei Sturmflutscheitel umfassen.

Windstauhöhe: Die Windstauhöhe dieser Kategorie schwankt zwischen 210 cm und 325 cm. Es werden also wiederum durch den kurzen Anstieg hohe Windstaumaxima erreicht.

Lage des Windstaumaximums zur Tidephase: Auch hier sind 6 Windstaumaxima um Tnw II, hiervon drei im abfallenden Ast, zu verzeichnen. Weitere zwei Sturmfluten treten bei Tnw III auf, so daß wiederum die Windstaumaxima überwiegend um Tideniedrigwasser auftreten.

Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und Sturmflutscheitelhöhe in St. Pauli: Die Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven liegt bei 856 cm bis 922 cm, in Hamburg St. Pauli bei 867 cm bis 997 cm, so daß hier schwere Sturmfluten ausgebildet werden. Die Differenz zwischen Hamburg St. Pauli und Cuxhaven lag von 1900 bis 1950 zwischen 10 und 60 cm, von 1950 bis 1995 bei 60 cm bis 130 cm. Allerdings ist der stetige Anstieg seit Beginn der neunziger Jahre unterbrochen und es treten wieder Differenzen um 60 cm auf.

Nr. 129/130 wird mit *kurz-kurz-lang* und *kurz-lang-lang* charakterisiert.

Auch hier zeigt die Windgeschwindigkeit eindeutige den Windstaupeaks zuzuordnende Schwankungen. Der kurze Anstieg wird verursacht durch das verspätete Eindrehen der Windrichtung auf 240°, der langsame Abfall durch Halten der Geschwindigkeit bei ca. 15-16 m/s.

Nr. 127b/127/127a/128 wird mit *lang-kurz-lang* und *lang-kurz-kurz* charakterisiert.

Der lange Anstieg des ersten Peaks wird verursacht durch schwankende Windgeschwindigkeitsänderungen, das kurze Peak durch das Abdrehen der Windrichtung (auf 280°). Der langsame Abfall der Windgeschwindigkeit bewirkt einen langsamen Abfall des Windstaus. Der folgende Anstieg wird durch einen langsamen Anstieg der Windgeschwindigkeit verursacht, der kurze Abfall durch sofortiges Abflauen der Windgeschwindigkeit nach Erreichen des Peaks. Das rasche Abflauen der Windgeschwindigkeit hat letztendlich einen *kurzen* Abfall zur Folge.

Nr. 5/6 wird mit *kurz-kurz-kurz* und *kurz-kurz-lang* charakterisiert.

Auch hier erklären Windgeschwindigkeitspeaks die Windstau maxima. Die Anstiege und Abfälle erklären sich durch die Windgeschwindigkeitsänderungen.

10.1.2 Häufigkeiten der Kategorien in Cuxhaven

Anhand der Häufigkeiten der Kombinationen der Charaktere läßt sich erkennen, welche sturmflutrelevante Gesamtwindssituation am häufigsten auftritt, anhand der Entwicklung in den letzten 100 Jahren jene Windsituation, die häufiger auftritt. Durch die Analyse der Auswirkungen der Kombinationen läßt sich interpretieren, welche Folgen eine größere Häufung bestimmter Kategorien haben kann (Kap. 10.1.3).

	lll	llk	lkl	lkk	kkk	kkk	klk	kll	2
1901-95	24	7	40	12	12	28	9	10	5
1901-47	8	4	17	5	4	12	4	6	2
1948-95	16	3	23	7	8	16	5	4	3
Kettentiden	9x2 1x3	1x2	6x2	-	1x2	4x2 1x3	3	3x2	
absoluter und prozentualer Anstieg	+ 8 +100%	-1 -25%	+6 +35,3%	+2 +40%	+4 +100%	+4 +33%	+1 +25%	-2 -33,3%	+1 +50%

Tab. 10-2: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert

Tab. 10-2 gibt die Häufigkeiten der Kategorien an. Da die starke Differenzierung zu recht kleinen Sturmfluthäufigkeiten pro Kategorie führt, kann kein Trend über den gesamten Zeitraum ermittelt werden, der signifikant wäre. Infolgedessen wird der gesamte Zeitraum geteilt in die Phasen 1901-1947 und 1948-1995. Anschließend wird und der prozentuale Anstieg ermittelt. Bei der Bewertung muß jedoch der prozentuale und der absolute Anstieg berücksichtigt wer-

den. Es wird nicht aus der Gesamtsumme der prozentuale Anstieg berechnet, da davon auszugehen ist, daß Einzelereignisse geringerer Anzahl auch insgesamt seltener vorkommen und damit die Zuwachsrate in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in Relation zur ersten Hälfte zu betrachten ist.

Die drei am häufigsten vorkommenden Sturmflutcharaktere entstanden aufgrund einer Windsituation, die anhand der Windstaukurve mit *lang-kurz-lang* (40), *kurz-kurz-lang* (28) und *lang-lang-lang* (24) zu charakterisieren sind. Mit wesentlich weniger Windstauereignissen folgen dann *lang-kurz-kurz* (12), *kurz-kurz-kurz* (12), *kurz-lang-lang* (10), *kurz-lang-kurz* (9) und *lang-lang-kurz* (7). Auf den ersten Blick läßt sich hieraus nicht vielmehr als die Rangfolge an sich ableiten. Bei genauerem Hinsehen zeigt sich jedoch, daß lange Anstiege wesentlich häufiger auftreten als kurze. Da lange Anstiege keine großen Windstauscheitel bewirken, korreliert dies mit der Tatsache, daß die größte Anzahl bei den niedrigen Sturmfluten liegt.

Mit einer Zunahme von 8 Sturmfluten und damit 100 % in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zeigt *lang-lang-lang* die größte Zuwachsrate gefolgt von *kurz-kurz-kurz* mit absolut 4 Sturmfluten und relativ auch 100 %. Einen 50 %igen Anstieg weisen die Windstaukurven mit zwei Scheiteln auf.

Daraus läßt sich ableiten, daß die Extreme zugenommen haben, wobei jedoch gerade bei 2 Scheiteln, die 50 % von einer so kleinen Anzahl ausmachen, deutlich wird, daß dies mit äußerster Vorsicht betrachtet werden muß.

Eindeutig ist aber, daß Sturmfluten mit langen Abfallsneigungen in der absoluten Anzahl die größte Zunahme aufweisen (*lll* mit 8 und 100 %; *lkl* mit 6 und 35 %; *kkk* mit 4 und 33 %). Das bedeutet, daß Sturmfluten, die lange andauern und Kettentiden verursachen, quantitativ zugenommen haben, ebenso wie jene, die flußaufwärts hohe Sturmflutscheitel verursachen können. Die Folgen flußaufwärts sind vor allem in der Kategorie *kkk* relevant.

Bemerkenswert ist weiterhin, daß die Kategorie *kkk* eine deutliche Abnahme zu verzeichnen hat. In dieser Kategorie entstehen Windstaumaxima bis zu 320 cm, d.h. jene die bei Erreichen des Wertes bei Thw zu sehr schweren Sturmfluten führen. Demzufolge gibt es im Gegenzug zu dem Anstieg der Extrema auch eine Entspannung der Gruppe, die zu recht hohen Windstaumaxima führen kann.

Kurze Anstiege können hohe Windstaumaxima ausbilden. Somit ist die Tatsache, daß kurze Anstiege deutlich zugenommen haben, so zu betrachten, daß mit häufigeren hohen Windstauscheiteln gerechnet werden kann.

10.1.3 Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Sturmfluten und des Sturmflutklimas

1. Die größte Zunahme weisen in Cuxhaven alle jene Kombinationen auf, die die Extreme zusammenfassen, d.h. *kurz-kurz-kurz*, *lang-lang-lang* und solche, die so lange Anstiege oder Scheiteldauern aufweisen, daß zwei Windstaumaxima gebildet werden. Das bedeutet, daß Windsituationen, die extreme Tendenzen aufweisen, zugenommen haben. Diese Aussage muß aber mit Vorsicht betrachtet werden, da die Anzahl pro Kategorie insgesamt zu gering ist, daß sie einer Signifikanzprüfung standhalten würde.
2. Da die Kategorie *lang-lang-lang* die meisten Sturmfluten aufweist und damit auch die größte Zunahme, wird bestätigt, daß die Anzahl an leichten Sturmfluten, die häufig von langen Anstiegen gebildet werden, zugenommen hat. Dies wird ergänzt durch die Tatsache,

daß lange Anstiege insgesamt am häufigsten vorkommen. Die Zunahme der Kategorie *lang-lang-lang* muß mit Vorsicht betrachtet werden, da in den Grenzbereichen zwischen *kurz* und *lang* durchaus auch sehr schwere Sturmfluten entstehen können.

3. Die deutliche Zunahme der Extremkategorie *lang-lang-lang* und die Zunahme der Windstaukurven mit zwei Scheiteln korreliert mit der Zunahme von langen Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel. Die Windstaukurven mit zwei Windstaumaxima zeigen einen Anstieg in der Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und in St. Pauli.
4. Kurze Anstiege können hohe Windstaumaxima ausbilden. Demzufolge ist die Erkenntnis, daß kurze Anstiege deutlich zugenommen haben, so zu betrachten, daß mit häufigeren hohen Windstauscheiteln gerechnet werden kann.
5. Es treten keine Sturmflutwetterlagen auf, bei denen langsame Windgeschwindigkeitsanstiege und eine lange Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit zu einem schnellen Abflauen der Windgeschwindigkeit führt. Es muß somit bei langen Anstiegen und langen Dauern immer damit gerechnet werden, daß nachfolgende Tiden durch den langsamen Abfall noch erhöht sind. Dies betrifft vor allem die flußaufwärts liegenden Orte.
6. Lange Anstiege und Scheiteldauern verursachen hohe Scheiteldifferenzen zwischen Küsten (Cuxhaven) und flußaufwärts liegenden Orten (Hamburg). Besonders deutlich wird dies bei zwei Scheiteln und der Kategorie *lang-lang-lang* sowie bei allen Kategorien mit einem langen Scheitel oder/und langem Abfall. Demzufolge hat die Tendenz zu langen Winddauern größere Folgen für die flußaufwärts liegenden Orte als für die Küstenorte. Da aber für die flußaufwärts liegenden Orte auch ein hohes Windstaumaximum an der Küste notwendig ist zum Erreichen von sehr schweren Sturmfluten, eliminiert der wesentlich geringere aber dennoch deutlich vorhandene Anstieg der kurzen Anstiegsneigung ein wenig die Gefahr für sehr schwere Sturmfluten flußaufwärts. Grundsätzlich bedeutet aber die hier herausgearbeitete Tendenz zu mehr langen Abfällen eine wesentlich größere Gefahr für flußaufwärts gelegene Orte.
7. Die Differenz der Scheitelhöhen zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli steigt nahezu in allen Kategorien an. Nur für Cuxhaven in der Kategorie *kkk* läßt sich kein Trend erkennen.

10.2 Die Charakterisierung in Helgoland

Die Charakterisierung erfolgt mit den gleichen Kriterien wie in Cuxhaven. Da die generelle Beschreibung der Windsituation in den einzelnen Kategorien für alle Pegel übereinstimmt, wird hierfür auf die Beschreibung in Cuxhaven verwiesen. Entscheidend sind die Unterschiede der Pegel untereinander, die anhand differierender Ausprägung der Parameter verdeutlicht wird. Anhand der Analyse der zugehörigen Windsituation läßt sich so ermitteln, warum die gleiche Windsituation an verschiedenen Pegel zu differierenden Sturmflutverläufen führt.

10.2.1 Beschreibung der Charakteristika in Helgoland

Langer Anstieg - langer Scheitel - langer Abfall

Windstauhöhe: Drei lange Komponenten führen in Helgoland im Gegensatz zu Cuxhaven relativ häufig zu hohen Windstaumaxima. Dies ist mit der Topographie Helgolands zu erklären, bei der im tiefen Wasser vor der Küste die gleiche Windsituation langsamere Anstiege im Stau bewirkt. Die Wirklänge des Windes muß länger sein als in Cuxhaven, um einen entsprechend hohen Stau zu produzieren. Auf dem Weg zur Küste steilt der Windstau sich auf und erreicht bei kürzerem Anstieg höhere Maxima.

Scheitelhöhe: Die Kombination aus drei langen Komponenten führt in Helgoland zu einer großen Spannbreite von niedrigen (häufig vorkommenden) bis schweren Sturmfluten. Die Sturmflut vom 21.1.1976 erreicht in Helgoland mit drei langen Komponenten den zweithöchsten Scheitelwert. Auch hier muß, wie in Cuxhaven, die Entwicklung dieser Kategorie betrachtet werden, da sie Extrema ausbildet.

Kettentiden: Wie zu erwarten, werden bei langer Dauer des Windes auch häufiger Sturmfluten, die mehr als einen Sturmflutscheitel umfassen, auftreten. In dieser Kategorie treten die häufigsten Kettentiden auf.

Aufgrund der Tatsache, daß in dieser Kategorie schwere Sturmfluten und sehr häufig Kettentiden auftreten können, muß die Entwicklung der Häufigkeit der Sturmfluten genau betrachtet werden. Leider ist eine signifikante Untersuchung dieser Entwicklung aufgrund des mangelnden Datenmaterials seit 1900 nicht möglich, seit 1950 ist die Zeitspanne zu kurz.

Langer Anstieg – langer Scheitel – kurzer Abfall

In dieser Kategorie sind, ebenso wie in Cuxhaven, nur sehr wenige Sturmfluten, da bei langer Anstiegs- und Scheiteldauer der Wind sehr selten rasch zusammenbricht. Windstaukurven, die mehr als einen Sturmflutscheitel umfassen, kommen nicht vor. Sowohl die Windstauhöhen als auch die Hochwasserhöhen sind niedrig.

Langer Anstieg– kurzer Scheitel – langer Abfall

In dieser Kategorie werden sowohl die höchsten Windstaumaxima als auch die höchsten Sturmflutscheitel in Helgoland erreicht. Weiterhin umfaßt ebenso wie in Cuxhaven auch diese Kategorie die meisten Sturmfluten. Die langen Komponenten bewirken, daß häufig Sturmfluten mit mehr als einem Sturmflutscheitel auftreten.

Im Vergleich zu Cuxhaven macht sich erneut die Topographie bemerkbar. Zwar treten auch in Cuxhaven in dieser Kategorie sehr viele Sturmfluten auf, die durch eine große Windstauhöhe

und hohe Scheitelhöhe gekennzeichnet sind. Es werden in Cuxhaven aber keine Maximalwerte erreicht wie in Helgoland. Die topographischen Bedingungen führen zu einem langsameren Ansteigen und Abfallen des Staus, der dann auf diesem Wege höhere Werte erreicht, während im flachen Küstenbereich eine Sturmflut schneller höher aufläuft und langsame Abläufe nur zu hohen aber nicht sehr hohen Ereignissen im Windstau und dem Scheitelbereich führen.

Langer Anstieg – kurzer Scheitel – kurzer Abfall

Während in Cuxhaven in dieser Kategorie noch schwere Sturmfluten erreicht werden, ist dies in Helgoland nicht der Fall. Deutlich wird, daß auch für Helgoland gilt, daß längere Anstiege nicht höhere Windstau- und Hochwasserpeaks zur Folge haben. Vielmehr werden diese ab einer bestimmten Länge tendentiell wieder niedriger.

Die Tatsache, daß trotz langem Anstieg keine Kettentiden auftreten, zeigt erneut, daß für ihre Entstehung lange Scheiteldauern und lange Abfälle nötig sind.

Kurzer Anstieg – kurzer Anstieg – kurzer Abfall

In dieser Kategorie wird der Vergleich mit Cuxhaven besonders deutlich. Während in Helgoland wenige Sturmfluten verzeichnet sind, weil die Wirkdauer des Windes zu kurz ist und dadurch die Windstauhöhen niedrig bis hoch sind und die Hochwasserscheitel nur niedrige Werte erreichen, werden in Cuxhaven hohe (aber nicht sehr hohe) Werte im Windstau und im Hochwasserscheitel erreicht.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

In dieser Kategorie werden in Cuxhaven die höchsten Windstaumaxima erreicht. In Helgoland erreichen die Windstaumaxima sehr hohe Werte, aber nicht die maximalen. Das bedeutet, daß auch sehr kurze Anstiege zu hohen Maxima führen, aber nicht zu maximalen in Helgoland. Die bisher daraus resultierende Hochwasserhöhe ist eher niedrig, was mit der Lage der Windstaumaxima um NW zusammenhängt. In Cuxhaven werden dagegen maximale Scheitelhöhen erreicht. Um auch in Helgoland maximale Scheitelhöhen zu erreichen, bedarf es einer anderen Lage des Windstaumaximums zur Phase oder/und einen etwas längeren Anstieg, um die gleiche Höhe auch um HW zu heben.

Es treten drei Kettentiden auf, was wiederum zeigt, daß die lange Komponente Abfall ausreicht, um Kettentiden zu bewirken.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel - kurzer Abfall

In Helgoland tritt nur eine Sturmflut auf, die sowohl im Windstau als auch zum Hochwasserzeitpunkt niedrige Werte erreicht.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel – langer Abfall

Es werden leichte bis hohe Windstaumaxima erreicht bei schweren Hochwasserscheiteln (03.01.1976; dritthöchste in Helgoland seit 1950). Die Verteilung der Maxima zur Tidephase ist dementsprechend recht gleichmäßig, wobei das Windstaupeak des Hochwassermaximums um NW liegt. In Cuxhaven liegt diese Flut nicht in dieser Kategorie. Es werden hier maximal schwere Fluten erreicht.

Auch in Helgoland werden hier relativ viele Kettentiden gebildet.

Zwei Scheitel

Die Sturmfluten Nr. 187 und 129 erreichen auch in Helgoland zwei Scheitel, da die Windsituation in der Windgeschwindigkeit mit zwischenzeitlichem Abfall eindeutig so verläuft, daß zwei Peaks ausgebildet werden müssen.

In Helgoland kommt das Phänomen der Ausbildung von zwei Scheiteln wesentlich seltener vor als in Cuxhaven. Auch das muß mit der Topographie erklärt werden. Im tiefen Wasser reagiert das Wasser träger als an der Küste auf Änderungen des Windverlaufes, so daß Schwankungen in der Windgeschwindigkeit sich nicht so leicht ausprägen.

10.2.2 Häufigkeiten der Kategorien in Helgoland

Für Helgoland läßt sich aufgrund des kurzen Untersuchungszeitraumes für eine solch differenzierte Betrachtung kein Trend ermitteln (Tab. 10-3).

	III	IIIk	IIIk	IIIkk	IIIkkk	IIIkkk	IIIkkk	IIIkkk	2
1940-1995	25	4	29	5	2	15	1	5	2
Kettentiden	7	0	4	0	0	3	0	3	2 (1*5)

Tab. 10-3: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert

Zu bemerken bleibt, daß die Kategorien *III* und *IIIk* die größte Anzahl an Sturmfluten aufweisen. Dies sind auch jene Kategorien, die die höchsten Sturmflutscheitel und Windstaumaxima erreichen. Die Kategorie *IIIkk* erreicht mit 15 Windstaukurven ebenso eine große Anzahl an Ereignissen. Alle weiteren Kategorie kommen in Helgoland recht selten vor.

	III	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	115 cm - 235 cm 100 cm - 150 cm = 9 150 cm - 200 cm = 13 < 200 cm = 22; > 200 cm = 3; >300 cm = 0	Es werden hohe Windstaumaxima erreicht. In Kombination mit einem hohen Sturmflutscheitel liegen sie im Grenzbereich zu kurz (20.01.1976).
Anstiegsneigung	6, 5 h/m am 20.01.1976	
Scheitelhöhe	von 687 cm bis 834 cm 700 cm - 750 cm = 25 750 cm - 800 cm = 7 800 cm - 850 cm = 2 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	Es können sehr schwere Sturmflutscheitel aufgestaut werden.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	16 NW 9 HW	Es liegt eine deutliche Konzentration um NW vor.
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	7 1 mit 4 (20.01.1976) 1 mit 3 (25.01.1993)	
Beispiel	Sturmflut Nr. 203/204 vom 18.11.1992	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland

	IIIk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	165 cm - 200 cm 200 cm - 250 cm = 0 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 4; > 200 cm = 0; > 300 cm = 0	sehr niedrig
Anstiegsneigung	10 h/m am 21.09.1990	
Scheitelhöhe	von 724 cm bis 783 cm 700 cm - 750 cm = 3 750 cm - 800 cm = 1 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	niedrig
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	3 NW 1 HW	Konzentration um NW
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	
Beispiel	Sturmflut Nr. 117 vom 06.12.1973	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	lkl	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	100 cm - 275 cm 100 cm - 150 cm = 7 150 cm - 200 cm = 14 < 200 cm = 21; > 200 cm = 8; >300 cm = 0	Es werden die höchsten Windstauwerte gleichzeitig mit dem höchsten Scheitelwert erreicht (16.02.1962), der einen deutlichen langen Anstieg zu verzeichnen hat. Dieser verkürzt sich und steilt sich bis Cuxhaven auf.
Anstiegsneigung	9,5 h/m am 16.01.1962	
Scheitelhöhe	von 675 cm bis 860 cm (16.02.1962) 600 cm - 700 cm = 12 700 cm - 750 cm = 18 750 cm - 800 cm = 3 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 1 > 900 cm = 0	Die Spannbreite reicht von niedrig bis sehr schweren Sturmfluten.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	25 NW 4 HW	Es liegt eine ganz deutliche Konzentration der Peaks um NW vor.
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	4 1 mit 3 (16.02.1962)	Die langen Komponenten bewirken eine große Häufigkeit von Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel.
Beispiel	Sturmflut Nr. 78 - 79 vom 16.02.1962	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	lkk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	140 cm - 195 cm 100 cm - 150 cm = 1 150 cm - 200 cm = 4 < 200 cm = 5; > 200 cm = 0; >300 cm = 0	niedrig
Anstiegsneigung	14,5 h/m	
Scheitelhöhe	von 696 cm bis 792 cm 700 cm - 750 cm = 3 750 cm - 800 cm = 1 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	niedrig
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	4 NW 1 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	
Beispiel	Sturmflut Nr. 46a vom 13.02.1943	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	kkI	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	125 cm - 270 cm 100 cm - 150 cm = 3; 150 cm - 250 cm = 6 200 cm - 250 cm = 3; 250 cm - 300 cm = 3 < 200 cm = 9; > 200 cm = 6; >300 cm = 0	von niedrig bis sehr hoch
Anstiegsneigung	1,5 h/m am 23.02.1967	
Scheitelhöhe	von 685 cm bis 770 cm 700 cm - 750 cm = 10 750 cm - 800 cm = 4 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	11 NW 4 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	3	
Beispiel	Sturmflut Nr. 85 vom 13.02.1965	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	kkk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	100 cm - 250 cm 200 cm - 250 cm = 1 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 1 ; > 200 cm = 1 ; >300 cm = 0	niedrig bis hoch
Anstiegsneigung	2, 5 h/m am 14.02.1989	
Scheitelhöhe	von 688 cm bis 734 cm 700 cm - 750 cm = 1 750 cm - 800 cm = 0 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	niedrig
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	1 NW 1 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	
Beispiel	Sturmflut Nr. 182 vom 14.02.1989	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	klk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	185 cm 200 cm - 250 cm = 0 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 1; > 200 cm = 0; >300 cm = 0	hoch (nicht sehr hoch)
Anstiegsneigung	3, 5 h/m am (05.12.1988)	
Scheitelhöhe	von cm bis 743 cm PN 700 cm - 750 cm = 1 750 cm - 800 cm = 0 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	niedrig
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	1 NW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	
Beispiel	Sturmflut Nr. 179 vom 05.02.1988	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	kl	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	180 cm - 235 cm 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 2; > 200 cm = 3; >300 cm = 0	leicht bis schwer
Anstiegsneigung	2 h/m am 03.01.1976	3. höchste Flut von HEL
Scheitelhöhe	von 712 cm bis 827 cm 700 cm - 750 cm = 3 750 cm - 800 cm = 4 800 cm - 850 cm = 1 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	leicht bis schwer
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	3 NW 2 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	3	
Beispiel	Sturmflut Nr. 125/126 vom 03.01.1976	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

	2 Scheitel	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	160 cm - 260 cm 200 cm - 250 cm = 0 250 cm - 300 cm = 1 < 200 cm = 3; > 200 cm = 1; >300 cm = 0	niedrig bis hoch
Anstiegsneigung	3 h/m am 28.02.1990 (Nr. 187)	
Scheitelhöhe	von 698 cm bis 824 cm 700 cm - 750 cm = 4 750 cm - 800 cm = 0 800 cm - 850 cm = 2 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	niedrig bis (sehr) schwer
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	2 NW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	2 1 mit 5	
Beispiel	Sturmflut Nr. 129/130 vom 12.11.1977	

Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland (Fortsetzung)

10.3 Die Charakterisierung in Norderney

10.3.1 Beschreibung der Charakteristika in Norderney

Langer Anstieg - langer Scheitel - langer Abfall

In Norderney führt die Kombination aus drei langen Parametern ebenso wie in Helgoland zu schweren bis sehr schweren Sturmfluten. Sowohl für Norderney als auch für Cuxhaven enthält diese Kategorie die Sturmflut vom 16.2.1962, die in Norderney die höchste, in Cuxhaven die zweithöchste Sturmflut bildet. In Helgoland führt die gleiche Windsituation nicht zu einem langen Abfall, sondern vielmehr zu einem kurzen Scheitel. Auch in Wittdün führt diese Kombination mit drei langen Komponenten zur schwersten Sturmflut. In Cuxhaven, Norderney und Wittdün liegt der lange Anstieg mit 6,5 h/m im Grenzbereich zu kurz. Nur in Helgoland wird diese Flut von einem deutlich längeren Anstieg gebildet.

Langer Anstieg – langer Scheitel – kurzer Abfall

In Norderney werden leichte bis (niedrig) schwere Windstaumaxima und Sturmflutscheitel gebildet. Im Gegensatz zu Cuxhaven liegen alle Windstaumaxima um NW. Insgesamt ist dies keine nennenswerte Kategorie.

Langer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

In dieser recht umfangreichen Kategorie werden schwere Sturmfluten (bis zur 10. höchsten des Untersuchungszeitraumes) und sehr hohe Windstaupicks erreicht. Dies entspricht den Pegeln Cuxhaven und Wittdün. In Helgoland werden dagegen sogar sehr hohe Sturmflutscheitel erreicht.

Langer Anstieg – kurzer Scheitel – kurzer Abfall

Die Sturmfluthöhen und Windstauhöhen sind niedrig bis (niedrig) schwer.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – kurzer Abfall

Es werden leichte bis hohe Windstaumaxima ausgebildet, die niedrige bis flache schwere Sturmfluten ausbilden. Während in Cuxhaven leichte bis schwere Sturmfluten von den sehr schweren Windstaumaxima ausgebildet werden, werden in Helgoland nur leichte Sturmfluten und in Norderney nur niedrige schwere Sturmfluten ausgebildet. Das bedeutet, daß hohe Windstaukurven um NW größeren Einfluß auf den Hochwasserscheitel an der Küste haben als im Hochseebereich und auf den Inseln.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

Wie in Helgoland entstehen in dieser Windsituation sehr hohe Windstaumaxima, aber nur hohe Sturmflutscheitel. Im Gegensatz zu Cuxhaven und Wittdün ist diese Kategorie von Bedeutung aber nicht so entscheidend für den Hochwasserscheitel wie in selbigen Pegelstandorten.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel - kurzer Abfall

In Norderney tritt nur eine Sturmflut mit einem niedrigen Windstaumaximum und niedrigen Sturmflutscheitel auf.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel – langer Abfall

Es werden sehr hohe Scheitelwerte erreicht (3. höchste in Norderney bei leichten bis schweren Windstauhöhen. Dies ist vergleichbar mit Helgoland. Während in Cuxhaven und Wittdün in *kkk* diese Scheitelhöhen erreicht werden, sind für Norderney und Helgoland zwei lange Komponenten notwendig, um diese Höhe zu erreichen.

Zwei Scheitel

Auch in Norderney treten recht häufig Windstaukurven mit zwei Windstauscheiteln auf. Diese Windstaukurven können zu auch zu hohen Windstaukurven führen und auch zu schweren Sturmflutscheiteln. Die Anzahl nimmt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu.

10.3.2 Häufigkeiten der Kategorien in Norderney

In Norderney treten ebenso wie an allen anderen Pegeln in den Kategorien *III* und *IIk* die größte Anzahl an Sturmfluten auf (Tab. 10-5). Dies sind auch die Kategorien, die für das Erreichen von hohen Sturmflutscheiteln und Windstau maxima in Norderney relevant sind. Beide zeigen auch einen deutlichen Anstieg in der Anzahl an Ereignissen, relativ gesehen ist die Steigerungsrate jedoch gemäßigt. Trotzdem muß berücksichtigt werden, daß jene Windsituationen, die hohe Windstau maxima und Sturmflutscheitel bewirken, insgesamt häufiger auftreten als in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes. Allerdings treten in diesen Kategorien auch viele niedrige Sturmfluten auf, so daß die Zunahme eher im Bereich der niedrigen Sturmfluten liegt als in der Zunahme von schweren Sturmfluten. Die Kategorie *kII* bewirkt in Norderney sehr schwere Sturmfluten. Hier liegt insgesamt eine Abnahme in der Anzahl der Ereignisse vor, so daß keine erhöhte Möglichkeit des Eintritts dieser Windsituation und damit einer sehr schweren Sturmflut vorliegt.

	III	IIk	IIl	IIk	kkk	kkI	kkk	kII	2
1935-95	26	3	25	2	6	9	1	15	3
1935-65	9	1	10	0	1	2	0	8	0
1966-95	17	2	15	2	5	7	1	7	3
Kettentiden	8	1	3	0	0	1	0	6	3
absoluter und prozentualer Anstieg	+ 8 + 89%	+ 1 +100%	+ 5 + 50%	+ 2	+ 4 +400%	+ 5 + 250%	+ 1	- 1 - 12,5 %	+ 3

Tab. 10-5: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert

10.3.3 Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Sturmfluten und des Sturmflutklimas

Es zeigt sich eine Zunahme jener Windsituationen, die hohe Sturmflutscheitel und Kettentiden bewirken, aber nicht jener Windsituation, die sehr schwere Sturmfluten bewirken.

	III	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	160 cm - 313 cm 200 cm - 250 cm = 8 250 cm - 300 cm = 5 < 200 cm = 11; > 200 cm = 13; >300 cm = 1	niedrig bis hoch
Anstiegsneigung	6, 5 h/m am 17.02.1962 (schwere Flut)	Grenzbereich zu kurz
Scheitelhöhe	von 733 cm bis 910 cm 700 cm - 750 cm = 4 750 cm - 800 cm = 23 800 cm - 850 cm = 6 850 cm - 900 cm = 2 > 900 cm = 1	leicht bis sehr schwer (höchste Sturmflut 16.02.1962)
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	13 NW 13 HW	gleichmäßige Verteilung der Peaks zur Phase
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	8 2 mit 3 Scheiteln (16.02.1962 und 25.01.1993)	häufiges auftreten von Kettentiden
Beispiel	Sturmflut Nr. 108 vom 17.11.1971	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney

	llk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	218 cm - 232 cm 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 0; > 200 cm = 3; >300 cm = 0	niedrig bis (niedrig) schwer
Anstiegsneigung	11 h/m am 21.09.1990	leichte Sturmflut
Scheitelhöhe	von 764 cm bis 823 cm (01.12.1966) 700 cm - 750 cm = 0 750 cm - 800 cm = 3 800 cm - 850 cm = 1 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	entsprechend der Windstauhöhe hier niedrig bis (niedrig) schwer
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	3 NW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	1 (13.01.1955)	Obwohl der Abfall kurz ist, liegt eine Kettentide vor!
Beispiel	Sturmflut Nr. 67/67a vom 13.01.1955	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	lkl	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	168 cm - 332 cm 200 cm - 250 cm = 10 250 cm - 300 cm = 6 < 200 cm = 7; > 200 cm = 16; > 300 cm = 2	niedrige bis sehr hohe Peaks, mit einem Schwerpunkt in der Verteilung bei hohen Windstaumaxima hoch
Anstiegsneigung	6, 5 h/m am 06.11.1985 (Nr. 168) (schwere Flut)	Grenzbereich zu kurz
Scheitelhöhe	von 723 cm bis 856 cm (24.11.1981) 700 cm - 750 cm = 7 750 cm - 800 cm = 14 800 cm - 850 cm = 7 850 cm - 900 cm = 1 > 900 cm = 0	Es treten leichte bis schwere Sturmfluten auf. Jene vom 24.11.1981 gehört zu den 10 höchsten Sturmfluten.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	17 NW 8 HW	leichte Konzentration bei Niedrigwasser
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	3 1 mit 3 (23.11.1981)	Der lange Abfall führt wiederum zur Ausbildung von Kettentiden.
Beispiel	Sturmflut 81/81a vom 13.10.1961	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	lkk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	185 cm - 227 cm 200 cm - 250 cm = 1 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 1; > 200 cm = 1; > 300 cm = 0	niedrig bis leicht schwere
Anstiegsneigung	13 h/m am 22.01.1993	
Scheitelhöhe	von 780 cm bis 830 cm 700 cm - 750 cm = 0 750 cm - 800 cm = 1 800 cm - 850 cm = 1 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	leicht bis (niedrig) schwer
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	2 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	Ausschließlich eine lange Komponente im Anstieg führt nicht zu Kettentiden.
Beispiel	Sturmflut Nr. 207 vom 22.01.1993	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	kkI	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	153 cm - 313 cm 200 cm - 250 cm = 4 250 cm - 300 cm = 2 < 200 cm = 2; > 200 cm = 6; > 300 cm = 1	Es werden deutlich in größerer Häufigkeit hohe bis sehr hohe Windstaumaxima ausgebildet, was bedeutet, daß eine maximale Windstaukurve dieser Kategorie entsprechen würde.
Anstiegsneigung	1,5 h/m am 23.02.1967	
Scheitelhöhe	von 751 cm bis 836 cm 700 cm - 750 cm = 6 750 cm - 800 cm = 4 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	Leichte bis schwere Sturmfluten, aber keine sehr hohen Sturmfluten. Das zeigt, daß bei Eintritt einer „maximalen“ Windstaukurve zum Erreichen eines hohen Hochwasserscheitels eine längere Scheiteldauer benötigt wird.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	6 NW 3 HW	etwas häufigeres Vorkommen um NW
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	1	Auch hier führt der lange Abfall zur Kettentide.
Beispiel	Sturmflut 184/185 vom 26.01.1990	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	kkk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	146 cm - 290 cm 200 cm - 250 cm = 1 250 cm - 300 cm = 3 < 200 cm = 2; > 200 cm = 4; >300 cm = 0	leichte bis hohe Maxima mit Schwerpunkt bei den hohen Maxima
Anstiegsneigung	2, 5 h/m am 14.02.1989	
Scheitelhöhe	von 731 cm bis 775 cm 700 cm - 750 cm = 2 750 cm - 800 cm = 4 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	Es werden vorwiegend niedrige bis niedrige schwere-Sturmfluten ausgebildet.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	5 NW 1 HW	Schwerpunkt liegt um NW
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	
Beispiel	Sturmflut Nr. 164 vom 14.01.1984	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	klk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	205 cm 200 cm - 250 cm = 1 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 0; > 200 cm = 1; > 300 cm = 0	niedrig
Anstiegsneigung	3, 5 h/m am 05.12.1988	
Scheitelhöhe	von 775 cm bis 775 cm 700 cm - 750 cm = 0 750 cm - 800 cm = 1 800 cm - 850 cm = 0 850 cm - 900 cm = 0 > 900 cm = 0	niedrig
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	1 NW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	keine	
Beispiel	Sturmflut Nr. 179 vom 05.12.1988	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	kl	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	139 cm - 301 cm 200 cm - 250 cm = 6 250 cm - 300 cm = 4 < 200 cm = 4; > 200 cm = 10; > 300 cm = 1	leicht bis hoch, mit Schwerpunkt auf hohen Peaks
Anstiegsneigung	1, 5 h/m am 03.01.1976	
Scheitelhöhe	von 730 cm bis 886 cm 700 cm - 750 cm = 3 750 cm - 800 cm = 10 800 cm - 850 cm = 7 850 cm - 900 cm = 1 > 900 cm = 0	2. höchste von NOR
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	10 NW 5 HW	großes Gewicht auf NW
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	6 mit 2	Die Kombination von langer Scheiteldauer und langem Abfall in Verbindung mit kurzem Anstieg kann zu hohen Kettentiden führen.
Beispiel	Sturmflut Nr. 61/62 vom 16.01.1954	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

	2 Scheitel	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	185 cm - 295 cm 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 2 < 200 cm = 1; > 200 cm = 5; > 300 cm = 0	i. d. R. hohe Windstaumaxima, selten niedrig
Anstiegsneigung	3 h/m am 26.02.1990 mit 295 cm	
Scheitelhöhe	von 738 cm bis 886 cm (21.01.1976) 700 cm - 750 cm = 2 750 cm - 800 cm = 5 800 cm - 850 cm = 1 850 cm - 900 cm = 3 > 900 cm = 0	leichte bis (sehr) schwere Hochwasserscheitel (3. höchste)
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	4 NW 2 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel		
Beispiel	Sturmflut Nr. 127-128 vom 20.01.1976	

Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney (Fortsetzung)

10.4 Die Charakterisierung in Wittdün

10.4.1 Beschreibung der Charakteristika in Wittdün und Vergleich zwischen den Pegeln

Der Verlauf der Windstaukurve und damit die Reaktion des Wassers auf den Windverlauf in der Deutschen Bucht zeigt für Wittdün ein recht erstaunliches Phänomen. Obwohl dieser Inselpegel vor dem Watt in wesentlich weiter nördlich exponierter Lage als Cuxhaven liegt, zeigen die Windstaukurven einen fast verblüffend ähnlichen Verlauf. Auch zeigt der allgemeine Charakter sehr viel Ähnlichkeit mit Cuxhaven, im Gegensatz zu Norderney und Helgoland. Diese haben insgesamt einen etwas flacheren Verlauf und benötigen zum Erreichen eines hohen Windstauwertes und Sturmflutscheitels insgesamt längere Parameter. Norderney bildet mit seinen Windstaukurven fast einen Übergang vom Hochseebereich mit Helgoland zur Küste mit Cuxhaven.

Langer Anstieg - langer Scheitel - langer Abfall

Auch in Wittdün kann die Kombination aus drei langen Parametern zu sehr schweren Sturmfluten führen. So ist die Sturmflut vom 16.02.1962 in dieser Kategorie, liegt aber mit einem Anstieg von 6,5 h/m ebenso wie in Cuxhaven und Norderney im Grenzbereich zu kurz. In der Regel entstehen in dieser Kategorie jedoch niedrige Sturmfluten und Kettenfluten. Dies entspricht dem grundsätzlichen Bild von Cuxhaven, Wittdün und Norderney in dieser Kategorie. Da an allen vier Pegeln aber auch sehr schwere Sturmfluten mit drei langen Parametern entstehen können, muß ihre Entwicklung weiterhin beobachtet werden.

Langer Anstieg – langer Scheitel – kurzer Abfall

In Wittdün werden im Gegensatz zu Helgoland und gleich mit Cuxhaven auch schwere Sturmfluten gebildet. Dies ist wie in Cuxhaven damit zu erklären, daß die Windstaumaxima um HW liegen und damit bei relativ geringen Windstauhöhen bereits relativ hohe Scheitel produzieren. Norderney bildet mit niedrigen schweren Sturmfluten und niedrig schweren Windstaumaxima den Übergang von Helgoland zu Cuxhaven und Wittdün.

Langer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

Mit 32 Sturmfluten umfaßt diese Kategorie ebenso wie in Cuxhaven und Helgoland die Kategorie mit der größten Anzahl an Sturmfluten. Auch in Norderney gibt es sehr viele Sturmfluten in dieser Kategorie, ist aber mit 25 geringfügig geringer in der Anzahl als in III.

Auch in Wittdün werden wie in Cuxhaven sehr hohe Windstaumaxima erreicht, die aufgrund des Schwerpunktes der Peaks bei Niedrigwasser in Wittdün bisher nur zu schweren Sturmfluten geführt haben. Dies steht im Gegensatz zu Helgoland, wo in dieser Kategorie sehr schwere Sturmfluten erreicht werden. Auch hier nimmt Norderney eine Zwischenposition ein, da hier zwar sehr hohe Windstaupicks erreicht werden aber nur schwere Hochwasserscheitel.

Langer Anstieg – kurzer Scheitel – kurzer Abfall

Ebenso wie in Helgoland und im Gegensatz zu Cuxhaven werden in dieser Kategorie nur niedrige Sturmfluten erreicht, aber niedrig schwere Windstaupicks. In diesem Fall bildet Wittdün quasi mit seiner Insellage die Zwischenposition zwischen Helgoland und Cuxhaven. Während

in Helgoland Windstaupeak und Sturmflutscheitel niedrig bleiben, werden in Wittdün auch schon mal schwere Scheitel aber nur niedrige Windstau maxima ausgebildet. In Cuxhaven können hingegen schwere Scheitel und schwere Windstau peaks erreicht werden. Den Übergang bildet erneut Norderney, wo niedrige bis (niedrig) schwere Windstauscheitel und leichte bis (niedrig) schwere Hochwasserscheitel erreicht werden.

Insgesamt kommt die Windsituation, die zu dieser Kategorie führt, für alle Pegel selten vor und hat keine nennenswerten Folgen.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – kurzer Abfall

Wie in Cuxhaven bilden die sehr schweren Windstauscheitel in Wittdün leichte bis schwere Sturmfluten aus. Dies ist deshalb erstaunlich, weil die Erkenntnisse zu Helgoland, Norderney und Cuxhaven ergaben, daß von dem Hochseepegel Helgoland über die vorgelagerten Inseln zur Küste die hohen Windstau maxima um NW zunehmend Einfluß auf die Hochwasserscheitelhöhe haben. Dies trifft jetzt bei Wittdün nicht zu. Hier verhält sich der Windstau wie an der Küste in Cuxhaven, was aber die Erkenntnisse zu Norderney und Helgoland nicht widerlegt, sondern dahingehend ergänzt, daß Lage und Topographie der Insel zu Reaktionen des Windstaus führen können wie an der Küste.

Kurzer Anstieg – kurzer Scheitel – langer Abfall

Dies ist einer der wichtigsten Kategorien, da hier die Kombinationen aus sehr hohen Windstau maxima und sehr hohen Hochwasserscheiteln zusammentreffen. Hier trifft ein kurzer Anstieg mit einer langen Komponente zusammen und führt deshalb zu sehr schweren Windstau maxima und sehr schweren Sturmfluten. Dies entspricht den Bedingungen in Cuxhaven und steht im Gegensatz zu Norderney und Helgoland, wo die sehr hohen Windstau maxima nur zu schweren Sturmfluten führen.

Für Wittdün muß angemerkt werden, daß in dieser Kategorie die zweithöchste Sturmflut im Untersuchungszeitraum auch noch eine Kettentide ist. Diese Kombination aus sehr hohem Windstau maximum, das zu einer sehr schweren Sturmflut und zu einer Kettentide führt, ist für den Küstenschutz die größte Bedrohung. In Wittdün muß dieser Kategorie deshalb die größte Bedeutung geschenkt werden.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel - kurzer Abfall

Wie in Cuxhaven werden in dieser Kategorie leichte bis schwere Windstau maxima gebildet, die leichte bis schwere (niedrige schwere) Sturmflutscheitel bewirken. Auch hier lassen sich einerseits die Pegel Norderney und Helgoland sowie andererseits Cuxhaven und Wittdün zusammenfassen.

Kurzer Anstieg – langer Scheitel – langer Abfall

Während in Norderney und Helgoland in dieser Kategorie sehr hohe Sturmflutscheitel erreicht werden, werden in Wittdün und Cuxhaven nur schwere Hochwasserscheitel gebildet.

Zwei Scheitel

Windstaukurven mit zwei Windstau maxima treten in Wittdün ebenso häufig auf wie in Cuxhaven. An allen vier Pegeln ist allerdings bemerkenswert, daß trotz langer Dauer auch hohe Windstauhöhen und hohe Hochwasserscheitel erreicht werden.

10.4.2 Häufigkeiten der Kategorien in Wittdün

Auch in Wittdün liegen die größten Häufigkeiten in den Kategorien *lkl*, gefolgt von *lll* und *kkk* (Tab. 10-7). In diesen Sturmfluten treten in erster Linie niedrige bis schwere Sturmfluten auf. Absolut und relativ gesehen liegt in *lkl* auch die größte Zunahme an Sturmfluten vor.

	lll	llk	lkl	lkk	kkk	kkk	klk	klk	2
1913-95	29	7	32	6	7	17	4	10	5
1913-54	11	4	5	3	3	6	2	6	1
1955-95	18	3	27	3	4	11	2	4	4
Kettentiden	9 (2 * 3)	0	2	0	0	5	1	5	5
absoluter und prozentualer Anstieg	+ 7 + 63%	-1 - 25%	+ 22 + 540%	0 0%	+ 1 + 25%	+ 4 + 83 %	0 0%	- 2 - 33%	+ 3 + 300 %

Tab. 10-7: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert

10.4.3 Schlußfolgerungen für die Entwicklung der Sturmfluten und des Sturmflutklimas

1. Die Kategorien *lll* und *lkl* zeigen in Wittdün neben *kkk* die größte absolute und relative Zunahme. Da in den Kategorien *lll* und *lkl* in erster Linie niedrige bis schwere Sturmfluten gebildet werden, erklärt die deutliche Zunahme die größere Häufigkeit an niedrigen Sturmfluten in den letzten Jahrzehnten (s. auch Cuxhaven). Weiterhin bestätigt diese Zunahme die Tatsache, daß die Anzahl an Kettentiden zugenommen hat. Da aber auch sehr schwere Sturmfluten auftreten können, muß diese Zunahme an Sturmfluten in dieser Kategorie auch hinsichtlich des möglichen Eintritts an sehr hohen Sturmfluten mit Aufmerksamkeit betrachtet werden.
2. Die Kategorie *kkk* zeigt eine Zunahme in der Häufigkeit. Dies muß beachtet werden, da hier Windsituationen auftreten können, die zu sehr hohen Windstaumaxima und sehr hohen Sturmflutscheiteln führen können.

	III	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	135 cm - 308 cm 200 cm - 250 cm = 13 250 cm - 300 cm = 3 < 200 cm = 12; > 200 cm = 15; > 300 cm = 1	niedrige bis mittelhohe Windstaumaxima; Allerdings liegt ein hohes Windstaumaximum vor (16.02.1962).
Anstiegsneigung	6,5 h/m am 16.02.1962 (höchste Flut im Untersuchungszeitraum)	
Scheitelhöhe	von 700 cm bis 914 cm 700 - 750 = 9 750 - 800 = 18 800 - 850 = 6 850 - 900 = 2 > 900 cm = 1	Von niedrig bis sehr schwer. Der größte Teil liegt jedoch im Bereich der leichten Sturmfluten. Der allgemeine Charakter einschließlich der resultierenden Windstaumaxima und Scheitelhöhen entspricht jenem in Cuxhaven.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	17 NW 12 HW	leichter Schwerpunkt bei NW
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	8 Winstaukurven mit mehr als 1 Sturmflutscheitel; davon 2 mit 3 Sturmflutscheiteln.	Entsprechend der Erwartung in dieser Kategorie führen drei lange Komponenten häufig zu Windstaukurven mit mehr als einem Sturmflutscheitel.
Beispiel	Sturmflut Nr. 108 vom 17.11.1971	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün

	llk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	120 cm - 246 cm 100 cm - 200 cm = 2 200 cm - 250 cm = 5 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 2; > 200 cm = 5; > 300 cm = 0	leicht bis mittelschwer
Anstiegsneigung	8 h/m am 06.12.1973 mit 844 cm PN (schwer)	
Scheitelhöhe	von 711 cm bis 844 cm 700 - 750 = 1 750 - 800 = 2 800 - 850 = 4 850 - 900 = 0 > 900 cm = 0	leicht bis schwer mit einem leichten Schwerpunkt bei schweren Sturmfluten
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	3 NW 4 HW	in etwa gleichgewichtig
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	0	Die Tatsache, daß zwar Anstieg und Scheitel lang sind aber nicht der Abfall, führt dazu, daß keine Kettentiden entstehen.
Beispiel	Sturmflut Nr. 48 vom 26.01.1944	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	lkl	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	115 cm - 315 cm 200 cm - 250 cm = 19 250 cm - 300 cm = 3 < 200 cm = 9; > 200 cm = 22; > 300 cm = 1	Niedrige bis sehr schwere Windstaumaxima, mit einem deutlichen Schwergewicht bei niedrigen Windstaumaxima. Trotzdem können auch hohe Maxima vorkommen.
Anstiegsneigung	7,5 h/m am 06.11.1985 mit 818 cm PN (schwer)	
Scheitelhöhe	von 684 cm bis 838 cm 700 - 750 = 13 750 - 800 = 10 800 - 850 = 9 850 - 900 = 0 > 900 cm = 0	von niedrig bis schwer mit einem deutlichen Übergewicht in der Anzahl (an niedrigen Sturmfluten)
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	23 NW 8 HW	Deutliches Schwergewicht auf Winstaupeaks um Niedrigwasser, was erklärt, weshalb auch bei hohen Windstaumaxima recht geringe Scheitelhöhen erreicht werden.
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	2	Eine Kombination aus kurz mit einem langen Abfall führt häufig auch an den anderen Pegeln zu Kettentiden.
Beispiel	Sturmflut Nr. 168/169 vom 06.11.1985	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	lkk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	141 cm - 268 cm 100 cm - 200 cm = 2 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 2; > 200 cm = 3; > 300 cm = 0	leicht bis niedrige schwere Peaks
Anstiegsneigung	6,5 h/m am 04.1.1917 (leichte Flut mit 702 cm)	
Scheitelhöhe	von 702 cm bis 801 cm 700 - 750 = 3 750 - 800 = 1 800 - 850 = 1 850 - 900 = 0 > 900 cm =	überwiegend leichte Sturmfluten
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	3 NW 2 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	0	
Beispiel	Sturmflut Nr. 14c vom 04.01.1917	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	kkk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	216 cm - 351 cm 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 3 < 200 cm = 0; > 200 cm = 6; > 300 cm = 1	hohe bis sehr hohe Windstaumaxima
Anstiegsneigung	1,5 h/m am 10.2.1949 mit 351 cm (sehr kurz)	
Scheitelhöhe	von 724 cm bis 820 cm (24.12.1918) 700 - 750 = 2 750 - 800 = 3 800 - 850 = 2 850 - 900 = 0 > 900 cm = 0	Leichte bis schwere Sturmfluten; KEINE SEHR SCHWEREN STURMLFUTEN. Dies entspricht der Erkenntnis, daß kurze Anstiege hohe Windstaumaxima produzieren, für eine sehr hohe Sturmflut aber eine lange Komponente enthalten sein muß, um das Windstaumaximum auch bei HW auftreten zu lassen.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	6 NW 1 HW	Deutliches Übergewicht bei NW, weshalb die Windstaumaxima bisher keine sehr hohen Hochwasserscheitel produziert haben.
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	0	
Beispiel	Sturmflut Nr. 57 cm vom 10.02.1949	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	kkI	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	168 cm - 368 cm 200 cm - 250 cm = 6 250 cm - 300 cm = 5 < 200 cm = 4; > 200 cm = 11; > 300 cm = 5	hohe bis <u>sehr hohe</u> Windstaumaxima
Anstiegsneigung	1,0 h/m am 24.02.1967 mit 832 cm	
Scheitelhöhe	von 736 cm bis 908 cm (24.11.1981; Kettentide) 700 - 750 = 3 750 - 800 = 10 800 - 850 = 7 850 - 900 = 3 > 900 cm = 1	leicht bis sehr schwer (2. höchste)
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	15 NW 4 HW	deutliche Konzentration um NW
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	3 mit mehr als einem Scheitel; davon 1 mit 3 Scheiteln (24.11.1981)	langer Abfall führt zu Kettentiden
Beispiel	Sturmflut Nr. 94 vom 24.02.1967	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	klk	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	239 cm - 273 cm 200 cm - 250 cm = 2 250 cm - 300 cm = 0 < 200 cm = 2; > 200 cm = 2; > 300 cm = 0	leicht bis hoch (nicht sehr hoch)
Anstiegsneigung	2,0 h/m am 05.10.1917 (leichte Flut)	
Scheitelhöhe	von 750 cm bis 818 cm 700 - 750 = 1 750 - 800 = 1 800 - 850 = 3 850 - 900 = 0 > 900 cm = 0	schwer (nicht sehr schwer) Die Kombination aus kurzem Anstieg und langem Scheitel führt zu schweren Sturmfluten.
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	4 NW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	1	
Beispiel	Sturmflut Nr. 14 vom 25.10.1917	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	kll	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	143 cm - 309 cm 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 2 < 200 cm = 2; > 200 cm = 5; > 300 cm = 2	leichte bis schwere Windstaumaxima mit Schwerpunkt bei den schweren Windstaumaxima
Anstiegsneigung	4,5 h/m am 27.10.1936 (schwere Flut)	
Scheitelhöhe	von 665 cm bis 905 cm 700 - 750 = 3 750 - 800 = 4 800 - 850 = 4 850 - 900 = 1 > 900 cm = 0	leicht bis sehr schwer
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	7 NW 2 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	5	
Beispiel	Sturmflut Nr. 36/36a vom 27.10.1936	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

	2 Scheitel	Bewertung und Bemerkungen
Windstauhöhe	172 cm - 321 cm 200 cm - 250 cm = 3 250 cm - 300 cm = 2 < 200 cm = 3; > 200 cm = 5; > 300 cm = 1	leicht bis sehr schwer
Anstiegsneigung	8 h/m am 26.02.1990 (Nr. 187)	
Scheitelhöhe	von 759 cm bis 896 cm (am 21.01.1976; 4. höchste in WIT) 700 - 750 = 0 750 - 800 = 7 800 - 850 = 4 850 - 900 = 3 > 900 cm = 0	leicht bis (sehr) schwer
Lage des Windstaumaximums zur Tidephase	4 NW 2 HW	
Windstaukurven mit mehr als einem Scheitel	alle	
Beispiel	Sturmflut Nr. 187-191 vom 26.02.1990	

Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün (Fortsetzung)

10.5 Zusammenfassender Vergleich der Pegel

1. Es sind die Kategorien vergleichbar und ihre Aussagen, es fallen aber nicht zwangsläufig die gleichen Sturmfluten in diese Kategorie, weil auch die spezifische Exposition und Topographie vor Ort sowie die gleiche Windsituation zu differierenden Charakteren führen kann!
2. An allen vier Pegeln gibt es die größte Häufigkeit an Windstaukurven in der Kategorie *lkl*, gefolgt von *lll* und *kkk*. Nur in Cuxhaven enthalten die Kategorien *lll* und *kkk* etwa die gleiche Häufigkeit.
3. Kurze Anstiege führen in Cuxhaven und Wittdün zu sehr hohen Windstaumaxima, die in der Regel um NW liegen. Auch in Helgoland und Norderney kann davon ausgegangen werden, daß kurze Anstiege zu Windstaupeaks um Niedrigwasser führen. In Cuxhaven und Wittdün führt die Kombination mit einer langen Komponente dann häufig zu schweren bis sehr schweren Sturmfluten, in Helgoland und Norderney nur zu schweren Sturmfluten.
4. Dies kehrt sich in der Kategorie *kkk* um. Während in Wittdün und Cuxhaven maximal schwere Sturmfluten in dieser Kategorie auftreten, treten in Norderney und Helgoland sehr schwere Sturmfluten auf.
5. Das bedeutet, daß in Norderney und Helgoland insgesamt flachere Windstaukurven nötig sind, um eine hohe Sturmflut zu erreichen, als in Wittdün und Cuxhaven.
6. Lange Abfälle führen an allen Pegeln zu Kettentiden!
7. An allen vier Pegeln können Kettentiden auch zu schweren Sturmflutscheiteln führen. Die Kombination aus langer Dauer und hohen Hochwasserscheiteln birgt eine deutliche Gefahr.
8. An allen vier Pegeln nehmen Kettentiden zu.
9. An allen Pegeln liegt eine Zunahme in jenen Kategorien vor, in denen auch schwere und sehr schwere Sturmfluten auftreten. In den weiteren Untersuchungen der vorliegenden Arbeiten wird diese Tatsache detaillierter zu untersuchen sein.

11 Die Windstauparameter in Cuxhaven

Mit der Untersuchung der Entwicklung der Windstauparameter in den letzten einhundert Jahren wird das Sturmflutklima in Hinblick auf die Komponenten Änderung der Windgeschwindigkeit, Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit und Änderung des Windgeschwindigkeitsabfalls analysiert. Um neben der Erfassung der Änderung einzelner Komponenten des Sturmflutklimas die Auswirkungen auf die Sturmfluten bewerten zu können, muß die Abhängigkeit der einzelnen Parameter voneinander betrachtet werden, ohne die Zeit zu berücksichtigen. Aus der Kombination der inneren Abhängigkeit der einzelnen Komponenten und ihrer jeweiligen Entwicklung in den letzten einhundert Jahren lassen sich mögliche zukünftige Veränderungen der Sturmfluten und ihre Konsequenzen erfassen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Ermittlung einer maximalen Windstaukurve. Hieran knüpft die Beantwortung der Frage, ob sich das Sturmflutklima so verändert, daß die Möglichkeit des Eintretens dieser maximalen Windstaukurve vergrößert bzw. verringert wird.

11.1 Korrelation der Windstauparameter

11.1.1 Anstiegsneigung zu Windstaumaximum

Wie in Abb. 11-1 zu erkennen ist, werden Windstaumaxima zwischen 200 cm und 430 cm bei Anstiegsneigungen von 1 h/m bis 26 h/m erreicht. Dabei weist der größte Anteil der Sturmfluten eine Anstiegsgeschwindigkeit von 4 h/m bis 9 h/m auf, die eine Windstauhöhe von 200 cm bis 310 cm bildet. Interessant sind nicht nur die ordinären, sondern besonders die hohen Sturmfluten. Abb. 11-1 zeigt, daß niedrige Windstauhöhen bei jeder Anstiegsneigung erreicht werden, sehr hohe Maxima dagegen nur bei sehr kleinen Anstiegsneigungen.

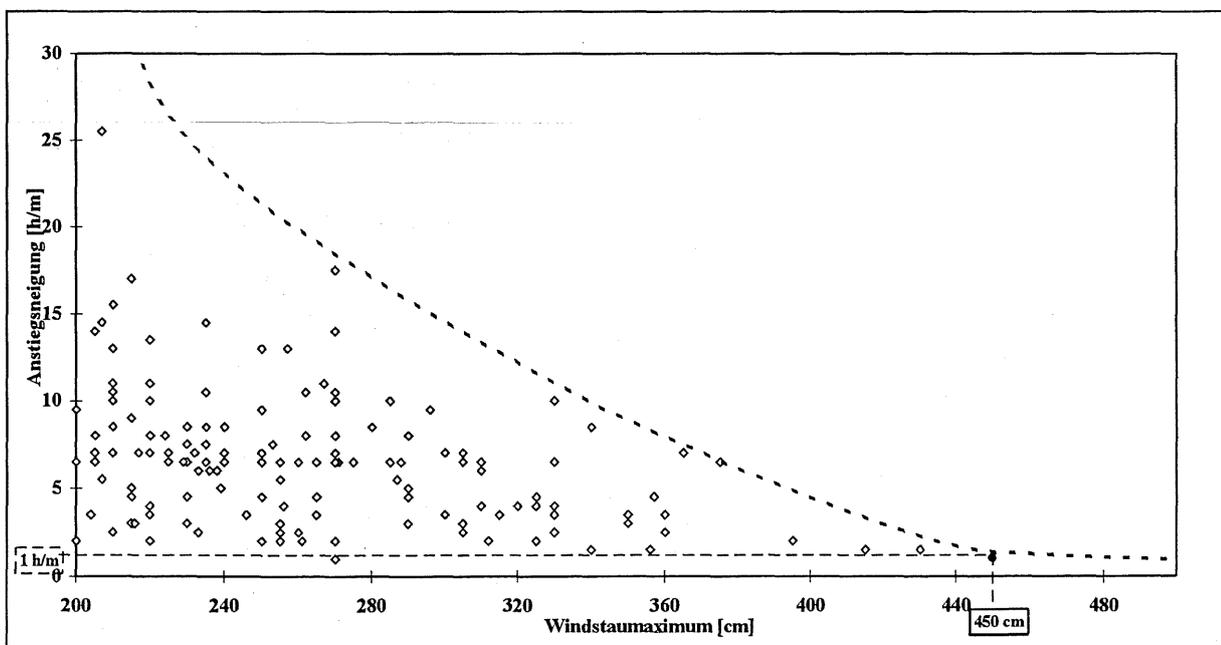


Abb. 11-1: Parameterauswertung der Windstaukurven in Cuxhaven seit 1901: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum

Kurzfristige, schnelle Änderungen der Windgeschwindigkeit erreichen die größten Windstaumaxima.

Werden die maximalen Anstiegsgeschwindigkeiten mit den jeweils maximal zu erreichenden Windstauhöhen als Einhüllende verbunden, wird diese Korrelation noch deutlicher. Setzt man die Linie weiter fort, so zeigt sich aus der Analyse der bisher eingetretenen Sturmfluten, daß der Faktor „Änderung der Anstiegsgeschwindigkeit“ keine größere Windstauhöhe als 450 cm produzieren kann.

11.1.2 Scheiteldauer zu Windstaumaximum

Während sich im 10jährig übergreifenden Mittel eine Konzentration der Scheiteldauer zwischen 5 h und 7 h zeigt (Abb. 11-5), weist die Darstellung aller Scheiteldauern in Relation zum Windstaumaximum (Abb. 11-2) die deutlich größte Häufung bei einer Scheiteldauer zwischen 1 h und 5 h auf. Die Vielzahl an sehr langen Einzelereignissen bewirkt die deutliche Verschiebung des mittleren Wertes in Richtung längerer Dauer.

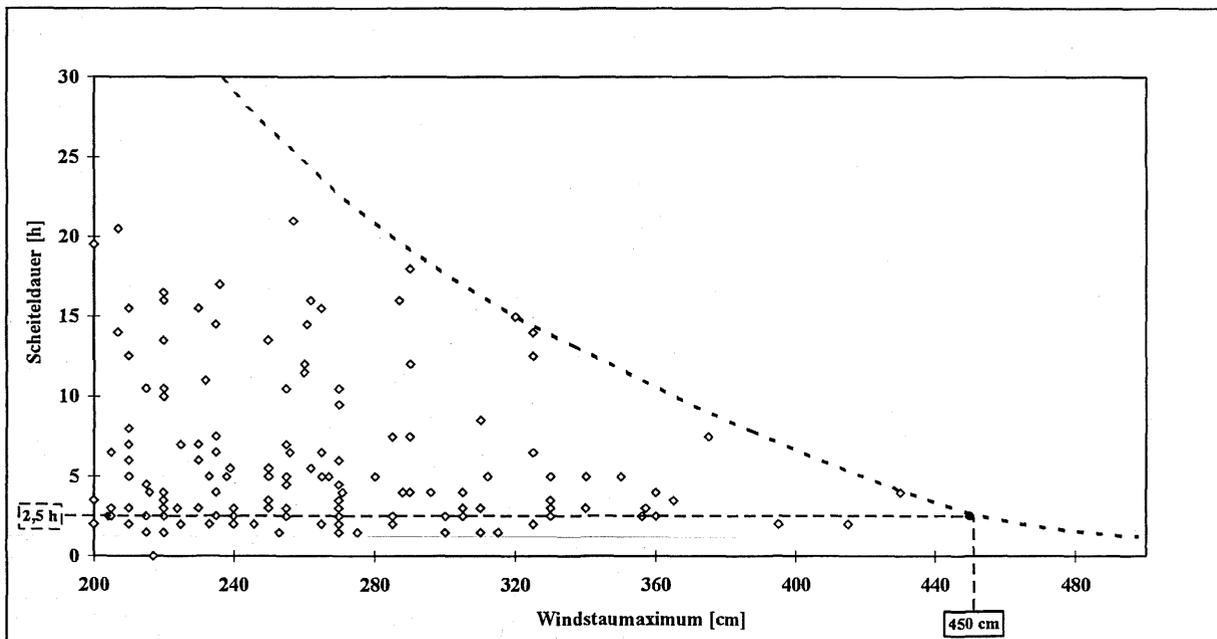


Abb. 11-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Cuxhaven seit 1901: Scheiteldauer zu Windstaumaximum

Windstauhöhen von 200 cm bis 430 cm werden bei Scheiteldauern in der Spannweite von 1 h bis 5 h erreicht, so daß auf den ersten Blick keine Abhängigkeit zwischen Scheiteldauer und Windstauhöhe zu bestehen scheint. Bei Betrachtung des gesamten Spektrums der Scheiteldauer zeigt sich aber, daß Windstauhöhen zwischen 200 cm und 260 cm von Scheiteldauern zwischen 1 h und 21 h erreicht werden und sich mit zunehmender Windstauhöhe die Scheiteldauer verringert. Zwar wird ein Windstaumaximum von 330 cm noch von einer Scheiteldauer von 12 h erreicht, bei noch größeren Maxima nimmt die Scheiteldauer jedoch deutlich ab.

Insgesamt läßt sich oberhalb eines Windstaumaximum von 290 cm ein deutlicher Trend in Richtung kürzere Scheiteldauern bei höheren Windstaumaxima erkennen.

Nach den vorliegenden Daten ist davon auszugehen, daß der durch die Anstiegskennzahl berechnete maximale Windstauwert von 450 cm bei einer Scheiteldauer von etwa 2,5 h erreicht wird.

11.1.3 Abfallneigung zu Windstaumaximum

Bei der Korrelation Abfallneigung zu Windstaumaxima (Abb. 11-3) sind zwei Achsen auffällig. Zum einen wird eine Windstauhöhe von 220 cm bei fast allen Abfallneigungen zwischen 2 h/m und 28 h/m erreicht. Zum anderen läßt sich auch hier eine äußere Einhüllende, mit einer Abfallneigung von 28 h/m bis zu 7,5 h/m bei einer Windstauhöhe von 220 cm bis 430 cm definieren. Innerhalb dieses Dreiecks liegt der größte Teil aller Abfallneigungen.

Somit könnte auch hier interpretiert werden: je schneller der Wind zusammenbricht, desto höher wird das Windstaumaximum. Dies wäre jedoch falsch, da noch bei einer Windstauhöhe von nahezu 350 cm die gesamte Streubreite an Abfallkennzahlen erreicht wird und bei 390 cm der Wind sehr viel schneller abflaut als bei 430 cm. Allerdings bleibt bemerkenswert, daß mit steigendem Windstaumaximum häufiger kleinere Abfallkennzahlen auftreten, und auf maximale Windstauhöhen grundsätzlich ein schnelles Abflauen der Windgeschwindigkeit folgt. Die Tatsache, daß bei niedrigen Windstaumaxima die absolut höchsten Abfallkennzahlen erreicht werden, läßt den Schluß zu, daß sehr häufig die folgende Tide erhöht ist, da der Abfall in Relation zur Höhe langsamer ist. Bei einem Windstaumaximum von 250 cm wäre bei Hochwasser eine Abfallkennzahl von 12 h/m notwendig, um das folgende Hochwasser 100 cm über das mittlere Hochwasser zu heben.

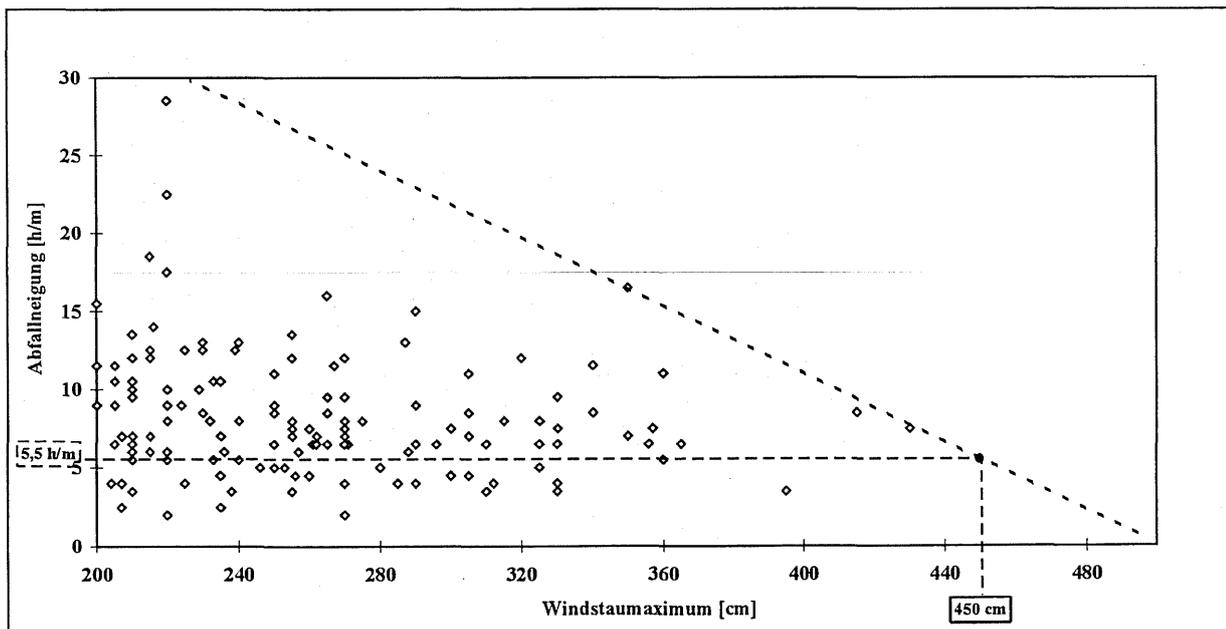


Abb. 11-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Cuxhaven seit 1901: Abfallneigung zu Windstaumaximum

Die häufigste Abfallneigung liegt bei etwa 7,5 h/m mit einer Spannbreite von 4 h/m bis 11 h/m. In dieser Spannbreite werden Windstaumaxima von 200 cm bis 430 cm erreicht.

Zwischen Abfallkennzahl und Windstaumaximum läßt sich kein direkter Zusammenhang erkennen. Allerdings werden sehr hohe Windstaumaxima nur bei mittleren Abfallkennzahlen (bis 9 h/m) erreicht. Sehr hohe Sturmflutscheitel sind in Cuxhaven gekennzeichnet durch einen mittleren Scheitel oder mittleren bis langsamen Abfall.

11.1.4 Sonstige Korrelationen

Neben diesen auf den Windstauscheitel bezogenen Korrelationen soll überprüft werden, inwieweit Abhängigkeiten zwischen den Parametern

- Anstiegsneigung zu Scheiteldauer,
- Abfallneigung zu Scheiteldauer und
- Anstiegsneigung zu Abfallneigung

existieren. Grundsätzlich sind bei allen drei Vergleichen zunächst keine deutlichen Abhängigkeiten zu erkennen. Allerdings ist bei den Korrelationen der Scheiteldauer sowohl mit dem Anstieg als auch mit dem Abfall die größte Häufung bei einer Scheiteldauer von 0 bis 5 h festzustellen. Auch läßt sich erkennen, daß mit zunehmender Anstiegsneigung bis 12,5 h/m die Scheiteldauer auf über 20 h zunimmt. Folglich nimmt tendenziell bei größerer Anstiegsneigung auch die Scheiteldauer zu. Von einer signifikanten Korrelation kann aber nicht gesprochen werden, da insgesamt die Streubreite zu groß ist. Ebenso ist die mögliche Aussage, daß lange Scheitel große Abfallneigungen produzieren, als nicht signifikant zu bewerten. Auch die Frage, ob schnelle Windgeschwindigkeitsänderungen in der Regel zu einem schnellen Abflauen der Windgeschwindigkeit führen könnten, kann nur mit nein beantwortet werden.

Bei Korrelation der Parameter Anstiegsneigung zu Scheiteldauer, Abfallneigung zu Scheiteldauer und Anstiegsneigung zu Abfallneigung lassen sich keine signifikanten Abhängigkeiten erkennen.

11.2 Entwicklung der Parameter

Die Entwicklung der Parameter in den letzten knapp 100 Jahren wird mit 10jährig übergreifenden Mittelwerten berechnet, um die generelle Entwicklung erkennen zu können.

11.2.1 Der Anstieg

Anhand der Entwicklung der Anstiegsneigung während der letzten 100 Jahre läßt sich ablesen, ob die Häufigkeit von Windsituationen, in denen sehr schnell maximale Windgeschwindigkeiten erreicht werden, zunimmt, oder aber eher eine Tendenz zu langsameren Anstiegen vorliegt. Abb. 11-4 zeigt, daß über den gesamten Untersuchungszeitraum eine leichte Tendenz zu kleineren Anstiegsneigungen existiert. Dieser Trend ist ausschließlich mit den ausgesprochen großen Anstiegsneigungen im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts zu erklären. Ab 1915 berechnet, läßt sich kein nennenswerter Trend mehr erkennen. Somit läßt sich zusammenfassen:

Ein nennenswerter Trend ist nicht vorhanden, maximal eine leichte Tendenz zu geringeren Anstiegsneigungen.

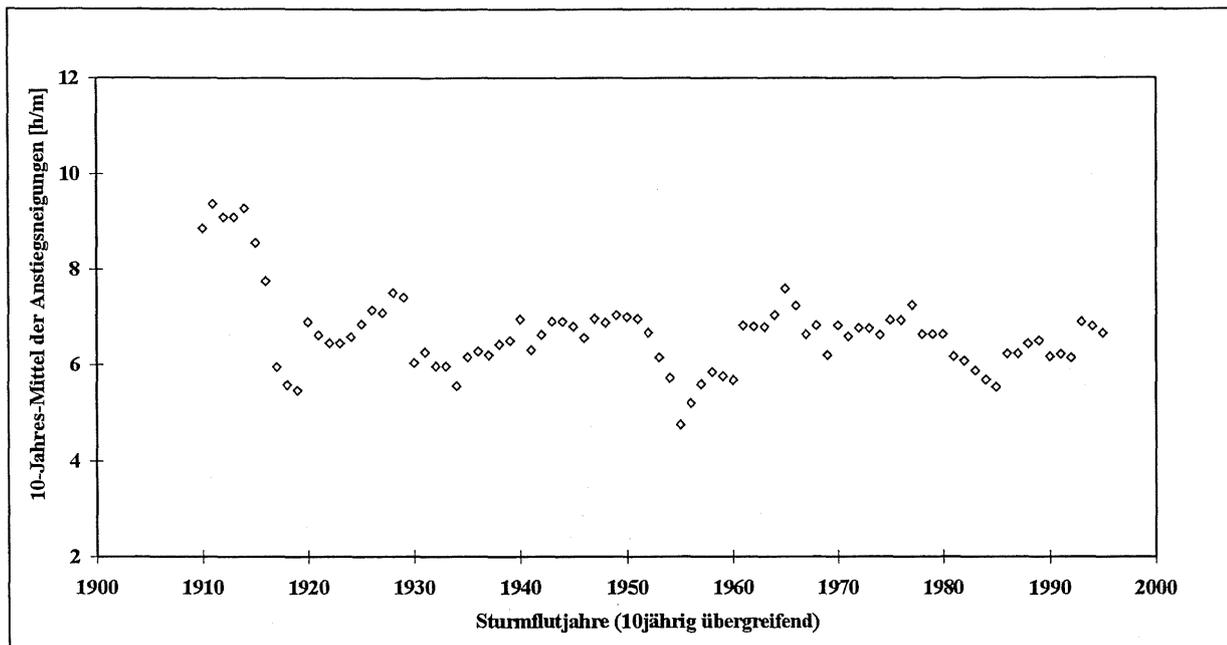


Abb. 11-4: Entwicklung der Anstiegsneigung in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)

Diese leichte Tendenz zu einer geringeren Anstiegsneigung darf nicht unterschätzt werden. Im Zusammenhang mit der Tatsache, daß die Höhe der Windstaumaxima bei kleinerer Anstiegsneigung zunimmt, könnte dies auf die mögliche Gefahr hinweisen, daß höhere Windstaumaxima aufgrund der Verkleinerung der Anstiegsneigung eher oder häufiger erreicht werden könnten. Werden jedoch die Einzelwerte betrachtet, so ist zu erkennen, daß die Spannbreite zwischen 5,5 h/m und 7,5 h/m liegt, d.h. jener Anstiegsneigung, bei der lediglich maximale Höhen zwischen 200 cm und 320 cm erreicht werden.

Aus der Entwicklung der letzten 100 Jahren läßt sich **nicht** die Möglichkeit ablesen, daß in den nächsten Jahren sehr hohe Windstaumaxima oder gar ein maximaler Windstauwert eher eintritt als bisher.

11.2.2 Die Scheiteldauer

Die Scheiteldauer stellt die Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit dar und ist deshalb von großer Bedeutung, weil eine lange Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit das Windstaumaximum über eine Tidephase länger andauern läßt.

Mit dem 10jährigen übergreifenden Mittel läßt sich für 1901-1995 ein Trend berechnen, der grundsätzlich deutlich eine Abnahme der Scheiteldauer nachweist (Abb. 11-5). Bei genauerer Betrachtung der Kurve lassen sich zwei Phasen unterscheiden: zum einen der Zeitraum 1901 bis Mitte der vierziger Jahre, der eine große Streubreite mit Daten von 4,5 h bis 9,5 h und einer mittleren Dauer von etwa 6,5 Stunden aufweist; zum anderen der Zeitraum von Mitte der sechziger Jahre bis Anfang der neunziger Jahre. Hier liegt eine viel geringere Streubreite mit einer Dauer zwischen 5 h und 6,5 h vor. Demzufolge könnte hier, entsprechend vieler klimatologischer Theorien, von einem „Sprung“ der Klimaänderung hin zu kürzeren Scheiteldauern gesprochen werden. Da in den vierziger bis fünfziger Jahren eine deutliche Verkürzung der Scheiteldauer zu verzeichnen ist, weist der genaue Verlauf der Scheitelentwicklung keinen „Sprung“ auf. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts steigt die Scheiteldauer tendenziell wieder an. Sie erreicht jedoch ein niedrigeres Niveau als in der ersten Hälfte des Jahrhunderts.

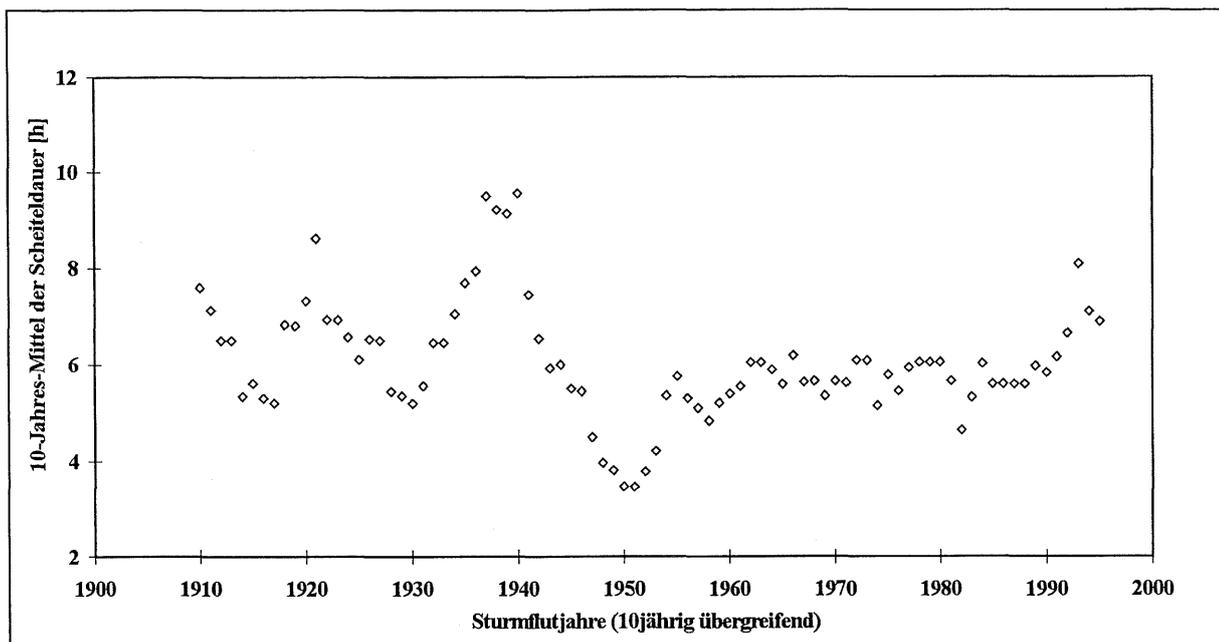


Abb. 11-5: Entwicklung der Scheiteldauer in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)

Seit Mitte der achtziger Jahre zeigt sich allerdings wieder ein deutlicherer Anstieg der Scheiteldauer in Richtung des Niveaus von 1901-1940. Demzufolge muß die o.g. generelle Verkürzung der Scheiteldauer seit 1901 mit Vorsicht interpretiert werden. Sie könnte jedoch für die Bildung eines sehr hohen oder gar maximalen Windstauwertes relevant sein, da hohe Windstau maxima (ab 330 cm) bei kurzen Scheiteldauern zwischen 2 h - 3 h auftreten (vgl. Abb. 11-2). Da eine Verkürzung tatsächlich nur bis Mitte der achtziger Jahre bei knapp 6 h vorliegt, ergibt sich für die nächsten Jahre keine Tendenz zum schnelleren Erreichen eines maximalen Windstauwertes.

Die Entwicklung der Scheiteldauer zeigt eine leichte Verkürzung von der ersten zur zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts mit Tendenz zu einer deutlichen Zunahme der Scheiteldauer in den letzten Jahren.

Die generelle Verkürzung führt nicht zu der Möglichkeit, daß in den nächsten Jahren sehr hohe oder gar maximale Windstauwerte eher eintreten als bisher.

11.2.3 Die Windstauscheitelhöhe

Im 10jährig übergreifenden Mittel zeigt die maximale Windstauscheitelhöhe die geringe Tendenz von 5 cm - 10 cm Anstieg in nahezu hundert Jahren (Abb. 11-6). Auch hier ließe sich, entsprechend der Theorie einer plötzlichen, sprunghaften Klimaänderung in den fünfziger Jahren, der „Sprung“ von 5 cm festlegen. Letztendlich läßt sich aber sowohl in dem sprunghaften Anstieg als auch in der über den gesamten Zeitraum berechneten Tendenz von einem signifikanten Trend nicht sprechen. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß der 10jährig übergreifende Mittelwert bei der Prognosenbildung der Scheitelhöhe die Entwicklung zu stark glättet. Sehr viel genauer ist die Berechnung der Entwicklung, wenn sämtliche Scheitel oder aber der höchste Scheitel eines jeden Jahres betrachtet wird.

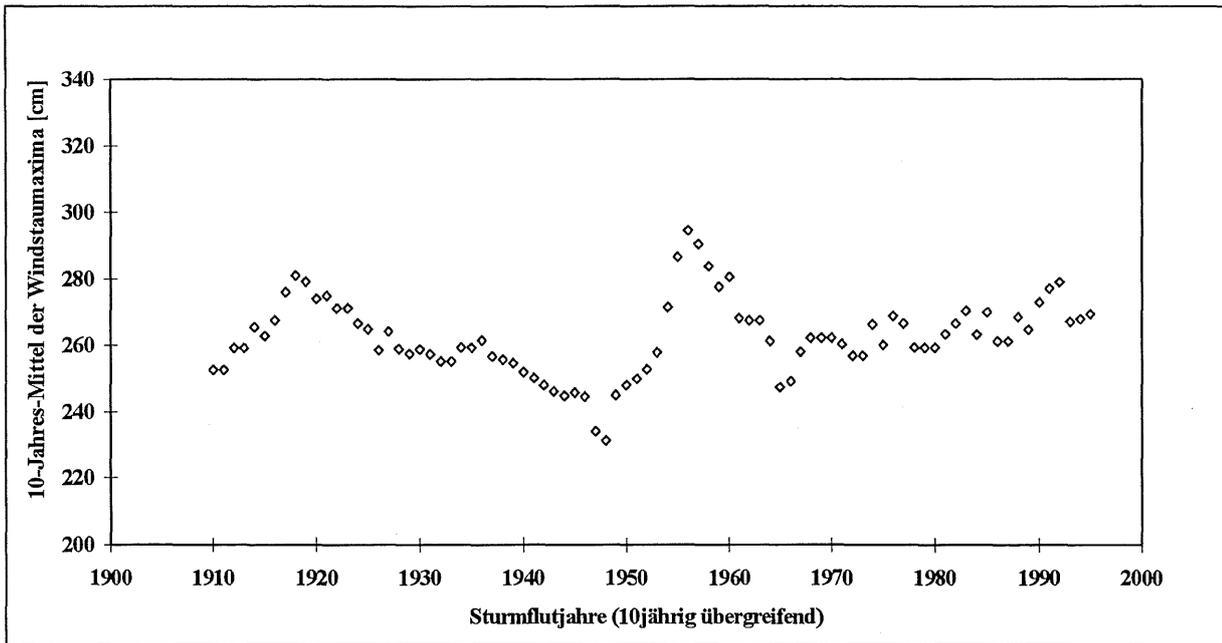


Abb. 11-6: Entwicklung des Windstaumaximums in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)

Werden alle Windstauscheitel berücksichtigt (Abb. 11-7), ist eine absolute Erhöhung der maximalen Werte - unabhängig zur Tidephase - in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu erkennen. Die maximale Windstauhöhe stieg von 357 cm (1922 und 1927) auf 395 cm (1947) und im Maximum auf 430 cm (1967), also um über 70 cm. Hieraus eine Regression zu berechnen würde bedeuten, daß ein sehr starker Anstieg der Windstauwerte prognostiziert werden würde, der nicht der realen Entwicklung entspräche. Bei einer Trendlinie durch alle Windstaumaxima, läßt sich dagegen kein Anstieg erkennen (255 cm bis 260 cm). Wird die lineare Trendlinie allerdings durch die höchsten Werte pro Sturmflutjahr gelegt (Abb. 11-8), ist ein Anstieg von 260 cm (1901) auf 310 cm (1995) deutlich auszumachen, bei polynomischer Berechnung dritten Grades immerhin noch von 290 cm (1901) bis 310 cm (1995).

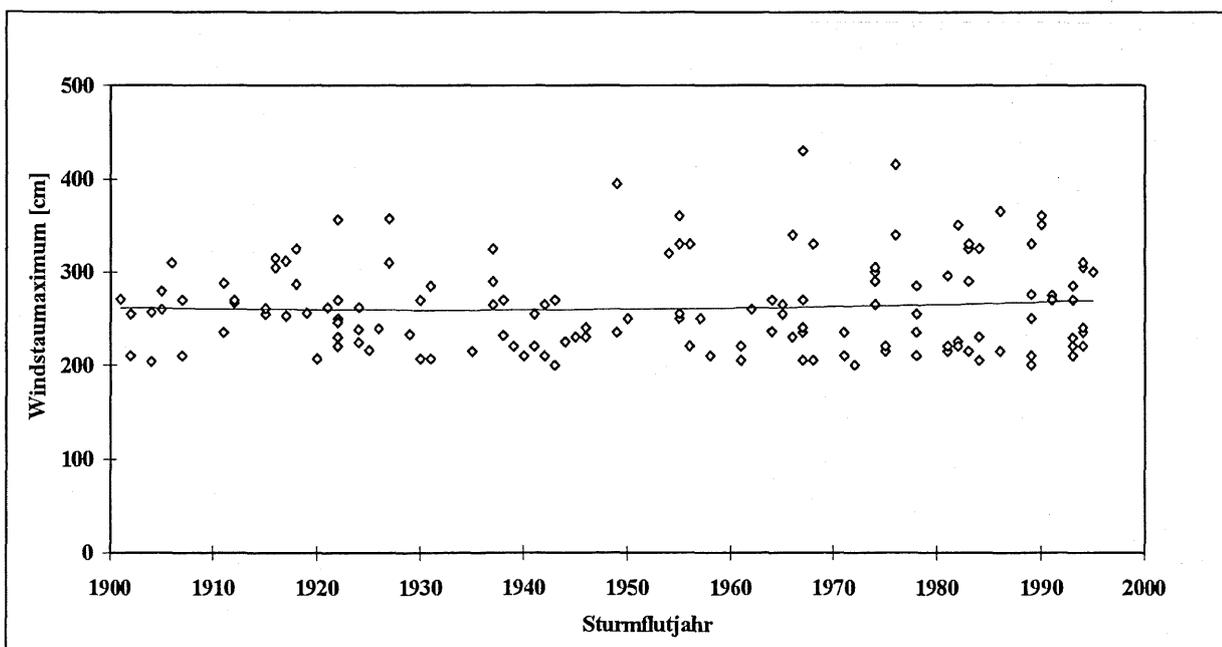


Abb. 11-7: Entwicklung der Windstaumaxima in Cuxhaven seit 1901 (unabhängig von der Tidephase)

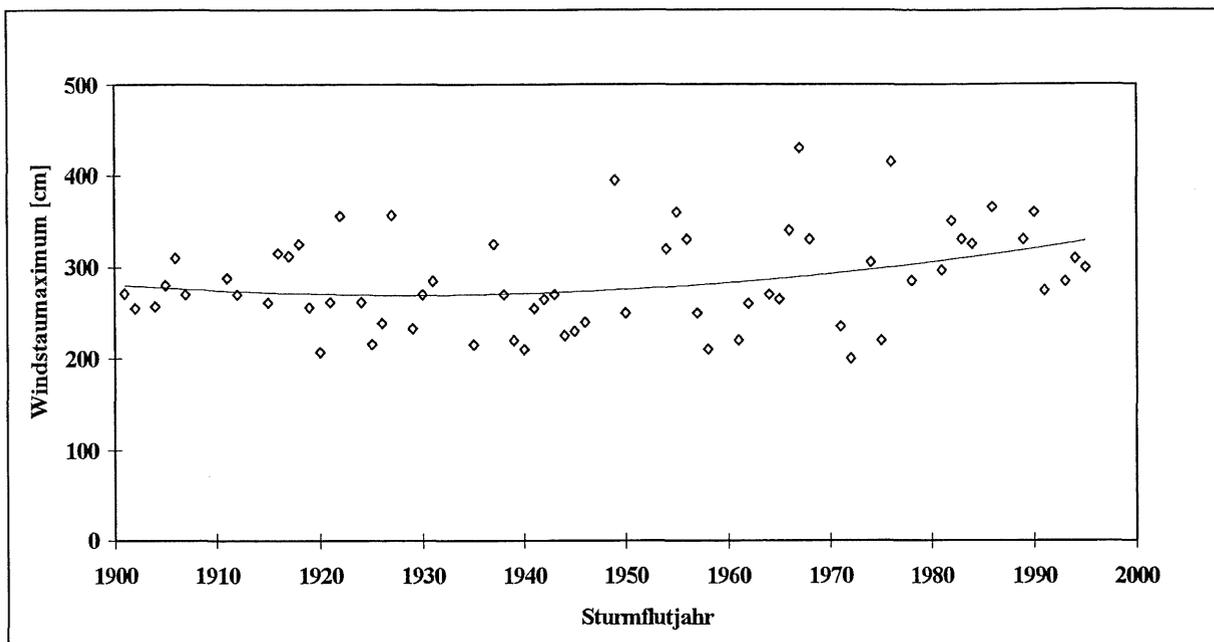


Abb. 11-8: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Cuxhaven seit 1901 (unabhängig von der Tidephase)

Daß sich auf der Grundlage dieser Ziffern wiederum große Differenzen bei der Prognosenbildung ergeben, ist zwangsläufig. Ein Anstieg um 50 cm in den letzten 100 Jahren, extrapoliert auf die nächsten 50 Jahre, prognostiziert einen wesentlich höheren Wert als ein berechneter Anstieg um 20 cm in den letzten 100 Jahren. Zu beachten ist, daß bei diesen Tendenzen der Anstieg des mittleren Hochwassers bereits berücksichtigt wurde.

Wird die Lage des Windstaumaximums zur Tidephase berücksichtigt, so zeigt sich ebenso wie bei Betrachtung aller Windstaumaxima nur ein geringfügiger Anstieg der Höhe der Windstauscheitel. Es ergibt sich um Tideniedrigwasser ein Anstieg von fast 10 cm in 100 Jahren, während um Tidehochwasser ein Sinken von über 5 cm zu verzeichnen ist. Zu beachten ist, daß für die Berechnung von Deichhöhen die differenziertere Betrachtung der Windstauscheitelhöhen getrennt nach Tidephasen weniger in ihrer zeitlichen Entwicklung als vielmehr nach ihrer Überschreitungswahrscheinlichkeit erfolgen muß.

11.2.4 Der Abfall

Für die Entwicklung der Neigung (h/m) im Abfall der Windstaukurve läßt sich im 10jährig übergreifenden Mittel ein deutlich positiver Trend seit 1901 berechnen (Abb. 11-9). Es existiert insgesamt eine Tendenz zu langsameren Abflauen der Windgeschwindigkeit. Somit zeigen die an die Sturmflut anschließenden Tiden häufiger einen erhöhten Wasserstand.

1900 bis 1935 lag im 10jährig übergreifenden Mittel der mittlere Abfall bei 7 h/m; 1935 bis 1995 dagegen bei 9 h/m. Allerdings läßt sich auch hier in den letzten 10 Jahren (1985-1995) ein deutliche Tendenz zu kürzeren Abfallzeiten erkennen.

Die Entwicklung im Abfall der Windstaukurven zeigt einen sprunghaften Anstieg von 7 h/m auf 9 h/m in den 30er Jahren, der in den letzten 10 Jahren wieder kontinuierlich und deutlich abnimmt. Eine Verlängerung der Abfallneigung hat zur Folge, daß häufiger Windstaukurven auftreten, die mehr als eine Tide erhöhen.

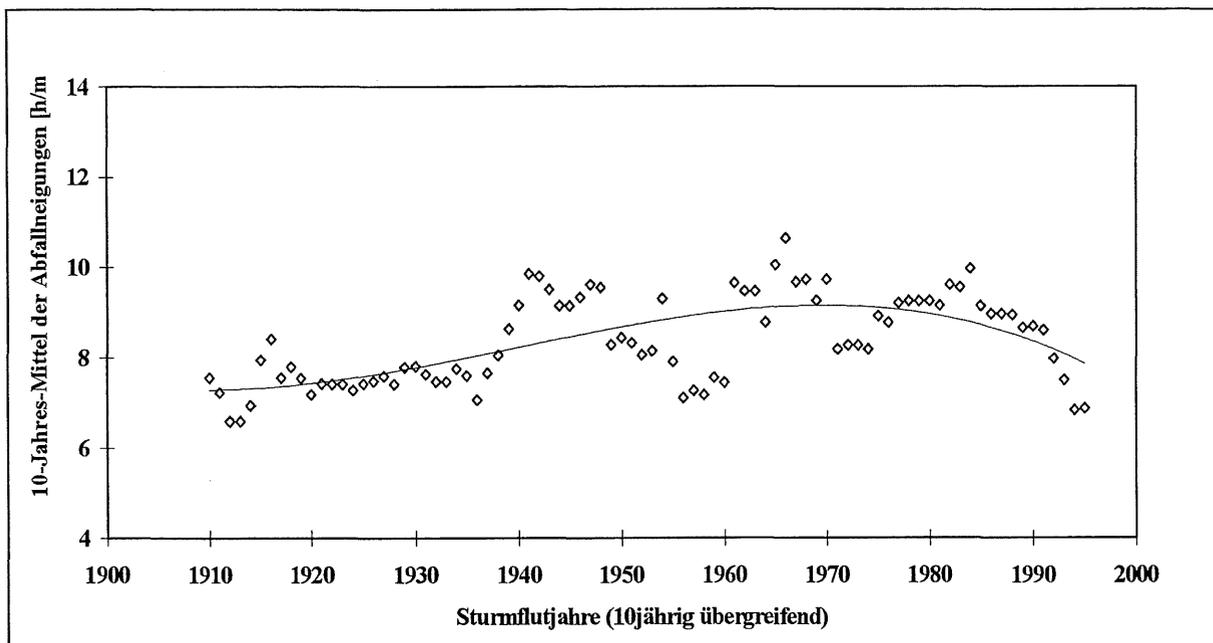


Abb. 11-9: Entwicklung der Abfallneigung in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)

11.3 Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe

11.3.1 Auswirkung der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven

Werden die 10 höchsten Sturmflutscheitel in Cuxhaven betrachtet, so zeigt sich, daß der höchste Scheitel mit 1010 cm PN am 03.01.1976 von einem kurzen Anstieg mit einem kurzen Scheitel in der Windstaukurve gebildet wurde. Doch bereits die zweithöchste Sturmflut vom 16.02.1962 mit 995 cm PN weist in der Windstaukurve einen langen Anstieg mit einem langen Scheitel und einem langen Abfall auf. Allerdings muß betont werden, daß es sich hierbei um Grenzwerte handelt, die mit 6,5 h/m und mit einem Windstaumaximum von 375 cm deutlich in der Linie - je höher das Windstaumaximum um so kürzer der Anstieg - liegen (vgl. Abb. 11-1). Auch die dritthöchste Sturmflut vom 21.01.1976 liegt mit 2 Scheiteln von 335 cm und 250 cm ebenso in dieser Korrelation wie die folgenden.

Von den 10 höchsten Sturmfluten werden die höheren von einem kurzen Anstieg gebildet und vier weitere von einem langen Anstieg, der im Genzbereich zur Definition „kurz“ liegt. Damit die hohen Windstaumaxima zu schweren und sehr schweren Sturmfluten führen, muß mindestens eine lange Komponente enthalten sein. Diese kann ein langer Scheitel oder aber ein langer Abfall sein.

11.3.2 Auswirkung der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe in St.Pauli

Auch flußaufwärts in Hamburg-St.Pauli laufen jene Sturmfluten hoch auf, die durch einen kurzen Anstieg in Cuxhaven gebildet werden. Hier wird das Phänomen besonders deutlich, da auch die Sturmfluten vom 24.11.1981, 10.01.1995 und vom 03.01.1976 durch kurze Anstiege gekennzeichnet sind. Dies ist deshalb erstaunlich, weil angenommen werden mußte, daß eine langsame Windgeschwindigkeitsänderung und damit eine insgesamt längere Winddauer das Wasser im Flußlauf eher staut als ein kurzzeitiger schneller Windgeschwindigkeitsanstieg.

Dies ist der Fall bei der Sturmflut vom 28.01.1994 und bei den schweren aber nicht sehr schweren Sturmfluten. Sehr schwere Sturmfluten treten in Cuxhaven zu gleichen Teilen mit kurzen und langen Anstiegen auf. Es ist aber zu beachten, daß die maximalen Windstauwerte in Cuxhaven bei kurzen Anstiegen vorkommen. In Kombination mit langen Komponenten (lange Scheiteldauer oder lange Anstiegsgerade) führen diese sehr hohen Windstaumaxima auch in St. Pauli zu sehr schweren Sturmfluten.

In Hamburg-St. Pauli treten die sehr schweren Sturmfluten bei kurzen Anstiegen auf. Die schweren Sturmfluten werden dagegen häufiger von langen Anstiegen gebildet. Auch für St. Pauli gilt, daß mindestens eine lange Komponente vorhanden sein muß, damit das hohe Windstaumaximum zu einem hohen Sturmflutscheitel führt.

11.4 Veränderung des Charakters der mittleren Windstaukurve in den letzten 100 Jahren in Cuxhaven

Während sich die Änderung von Anstieg, Abfall und Scheiteldauer aus den 10jährig übergreifenden Mittelwerten gut ablesen läßt, wird der mittlere maximale Windstauwert aus der Berechnung des Trends aller Windstauwerte und der höchsten pro Jahr genommen. Der maximale Wert für 1995 ist bei allen Berechnungen bei 310 cm. Für den Beginn des 20. Jahrhunderts ist er nicht so eindeutig zu definieren und liegt zwischen 260 cm und 290 cm. Es wird von einer mittleren Höhe von 270 cm für 1900 ausgegangen.

Der Vergleich der beiden Windstaukurven (Abb. 11-10 u. Abb. 11-11) zeigt eine sehr deutliche Verlängerung der Sturmflut im Abfall der Windstaukurve. Das bedeutet, daß nachfolgende Tiden einen erhöhten Wasserstand aufweisen, der von „leicht erhöht“ bis zu „erneuter Sturmflut“ reicht. Wenn man weiterhin bedenkt, daß die extremen Windstaukurven der Kategorien *kurz-kurz-kurz* und *lang-lang-lang* bezüglich der Anzahl zugenommen haben, wird deutlich, daß das Einzelereignis, welches längere Dauern aufweist, im Vergleich zur mittleren Windstaukurve erheblich länger geworden ist. Dagegen hat die Verkürzung der Scheiteldauer um 1 h keinen nennenswerten Einfluß auf weitere Sturmfluten.

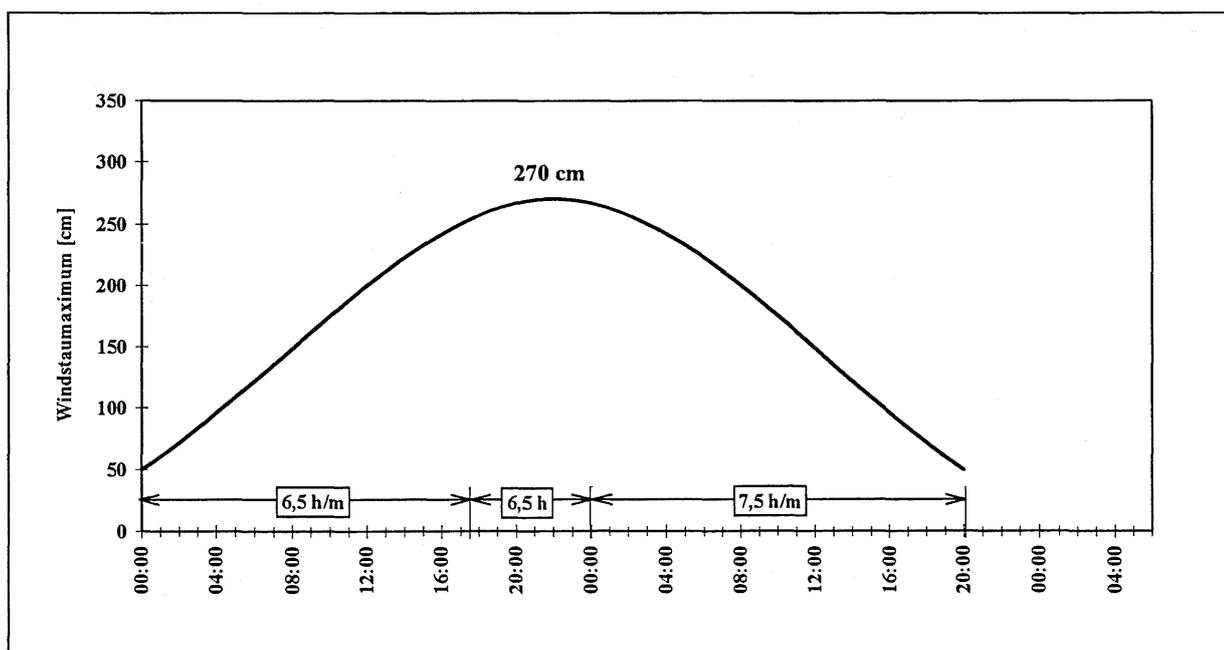


Abb. 11-10: Mittlere Windstaukurve in Cuxhaven um 1900

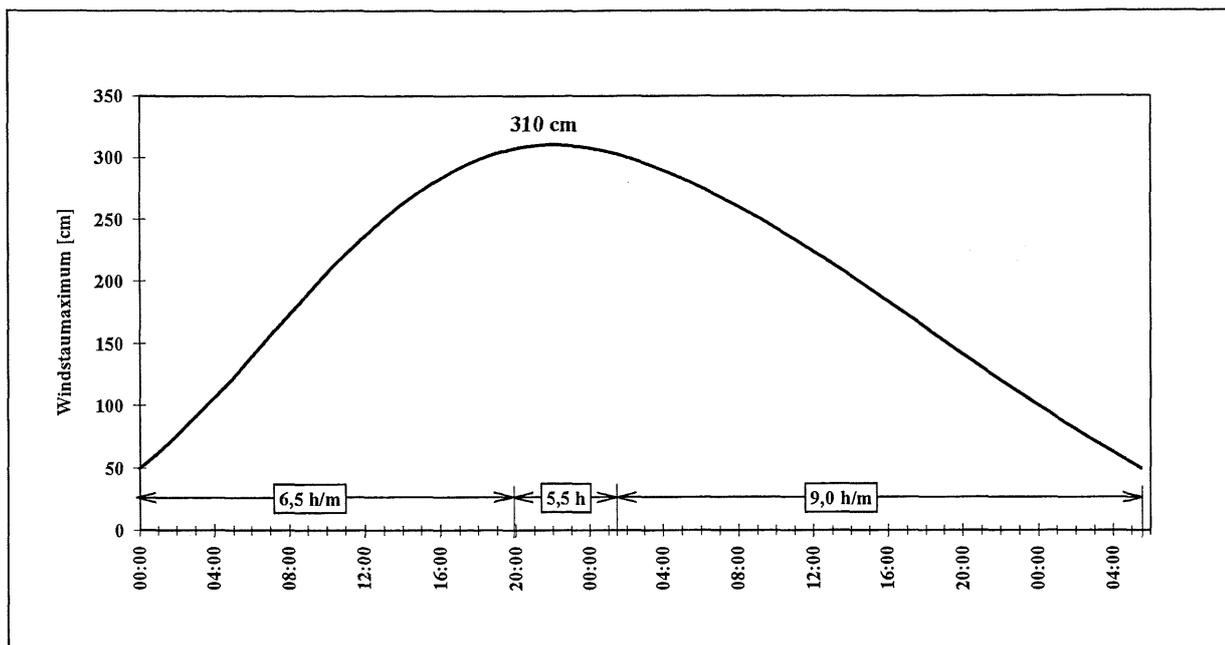


Abb. 11-11: Mittlere Windstaukurve in Cuxhaven um 2000

Die Windstaukurve veranschaulicht einen deutlichen Anstieg der Windstaumaxima. Dieser wurde jedoch nicht aus einer mittleren Höhe aller Windstaumaxima gebildet, sondern vielmehr aus den höchsten Windstaumaxima pro Jahr (s.o.). Es ist deshalb zu berücksichtigen, daß der Anstieg des Windstaumaximums auch wesentlich geringer angesetzt werden kann. Somit ist davon auszugehen, daß die dargestellten mittleren Windstaukurven ihr Windstaumaximum um Tideniedrigwasser bis kurz vor Tidehochwasser hatten.

Die mittlere Windstaukurve ist in den letzten 100 Jahren länger geworden. Dies kann mit der deutlichen Verlängerung des Abfalls erklärt werden.

11.5 Die maximale Windstaukurve in Cuxhaven

Eine Windstaukurve, die einen maximalen Windstauwert konstruiert, ist für zukünftige Berechnungen des Küstenschutzes von großem Wert. Es muß aber berücksichtigt werden, daß sie statistisch betrachtet nicht möglich ist, da eine Eintrittswahrscheinlichkeit von Null nicht existiert. Davon muß aber theoretisch ausgegangen werden, wenn ausgesagt wird, „höher geht es nicht“. Deshalb wird hier die Formulierung gewählt, daß aufgrund der Ergebnisse unter den momentanen Klimabedingungen und topographischen Voraussetzungen es nicht möglich ist, daß die Windstauwerte die in Abb. 11-12 dargestellte Kurve überschreiten.

In einer ergänzenden Untersuchung haben OUMARACI und KORTHAUS (1998) Verteilungsfunktionen für die Windstaumaxima in Cuxhaven nach Hoch- und Niedrigwasser getrennt berechnet. Verwendet wurden Extremalverteilungen wie die Exponential-, Gumbel-, Log-Gumbel-, Weibull-, Log-Weibull und eine modifizierte Rayleigh-Verteilungsfunktion.

Es zeigte sich, daß mit Hilfe der Weibull-3 (3-parametrische Weibull Verteilung) und der Log-Weibull-Verteilung generell die beste Datenanpassung zu erzielen ist, wobei OUMARACI und KORTHAUS (1998) der in der Regel besser passenden Weibull-3-Verteilung den Vorzug geben.

Bei einer Extrapolation kann mit Hilfe sämtlicher Funktionen für ein Windstaumaximum bei T_{hw} ein Wert zwischen 390 cm und 415 cm berechnet werden, wobei der bisher höchste eingetretene Wert bei T_{hw} mit 375 cm am 16.02.1962 erreicht wurde. Bei T_{nw} wird ein Wert um 450 cm ermittelt (bes. deutlich bei Weibull-3). Hier ist der bisher höchste erreichte Wert bei 430 cm am 23.02.1967. Einschränkend ist zu berücksichtigen, daß nach OUMARACI und KORTHAUS (1998) der Datensatz für die Extrapolation zu gering ist, so daß die aus den Grafiken entnommenen Werte nur bedingt Folgerungen zulassen.

JENSEN (1996) berechnete ebenfalls für Windstaumaxima Verteilungsfunktionen, die allerdings nicht nach T_{hw} und T_{nw} differenziert wurden, und erklärt die Jenkinson-Funktion als vergleichsweise sehr gut geeignet, da sie eine begrenzte Extrapolation ermöglicht. Die Problematik der Extrapolation sieht er in der Tatsache der nicht äquidistanten Datenreihe. Die Extrapolation mit Jenkinson-C ergibt bei $T=300$ Jahre bei Normalverteilung eine Spannbreite von 420 cm bis 625 cm. Die vorliegenden Auswertungen zeigen, daß diese Werte als viel zu hoch einzustufen sind und daher nicht erreicht werden können.

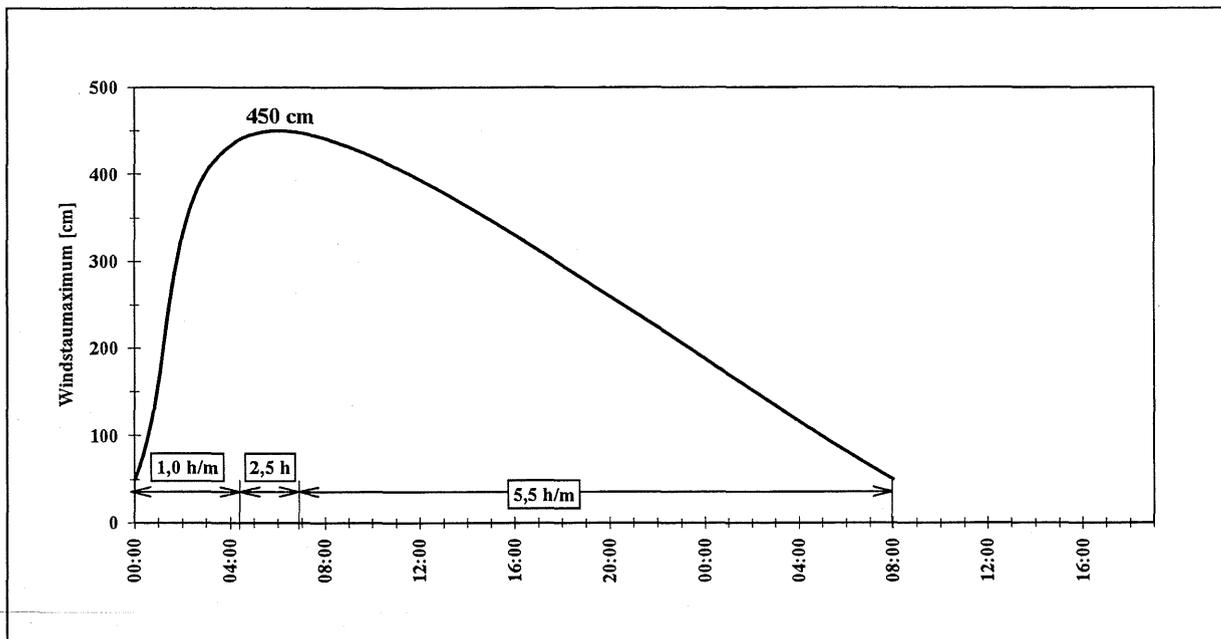


Abb. 11-12: Maximale Windstaukurve für Cuxhaven

Unter den momentanen Bedingungen ist höchstens eine Windstaukurve mit 450 cm Höhe und einem Anstieg von 1 h/m, 2,5 h Dauer und 5,5 h/m Abfall zu erwarten.

11.6 Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Cuxhaven

1. Der Anstieg zeigt eine leichte Tendenz zu kürzeren Neigungen, so daß aufgrund der Entwicklung der letzten 100 Jahre die Gefahr abgeleitet werden kann, daß eher höchste Windstaumaxima produziert werden. Da die Werte jedoch im Bereich zwischen 5,5 h/m und 7,5 h/m liegen, kann von der Möglichkeit, daß maximale Windstaumaxima aufgrund von kürzeren Anstiegsneigungen eher eintreten als bisher, nicht gesprochen werden. Allerdings

ist mit hohen Windstaumaxima bis 400 cm eher zu rechnen, da sie in dieser Anstiegsneigung auftreten.

2. Die Scheiteldauer zeigt einen geringen Trend in Richtung kürzere Dauer, so daß der Wind in der Dauer seiner maximalen Geschwindigkeit insgesamt nicht zugenommen hat. Es bleibt zu berücksichtigen, daß durchaus einzelne lange Dauern häufiger auftreten können, die hier durch das gleitende Mittel eliminiert wurden.

Die Tendenz zu kürzerer Dauer bedeutet keine Warnung in der Hinsicht, daß hohe Windstaumaxima eher auftreten, da lediglich eine Verkürzung auf 6 h erfolgte. Hohe bis sehr hohe Windstaumaxima treten bei 2 h bis 5 h auf. Hohe Scheitelwerte sowohl in Cuxhaven als auch in St. Pauli benötigen neben einem hohen Windstauwert einen relativ langen Scheitel oder einen langen Abfall. Demzufolge bedeutet diese Veränderung im Sturmflutklima keine erhöhte Gefahr des Eintretens eines sehr hohen Scheitels.

3. Zwischen 1935 und 1985 lag eine Tendenz zu einem langsameren Abflauen des Windes vor, so daß nachfolgende Tiden einen erhöhten Wasserstand aufweisen konnten. Das bedeutet aber auch für diesen Parameter eine Verringerung der Möglichkeit des Eintretens eines maximalen Windstauwertes. Diese Tendenz nimmt in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wieder leicht ab.
4. In Kap. 8 wird erläutert, daß lange Abfälle in den Küstenstädten zu hohen Sturmflutscheiteln flußaufwärts (z.B. in Hamburg) führen können. Eine Tendenz zu langsameren Abflauen des Windes kann daher einen positiven Trend zu höheren Sturmflutscheiteln in den flußaufwärts liegenden Orten bewirken.

11.7 Erkenntnisse für den Sturmflutschutz

1. Da Anstiegskennzahlen bis 6 h/m zu hohen Windstaumaxima und hohen Sturmflutscheiteln führen, ist eine frühzeitige Vorhersage nur für leichte bis schwere Sturmfluten möglich. Es muß daher weiterhin mit Sicherheitsvorkehrungen in kurzen Zeiträumen gearbeitet werden, da sehr schwere Sturmfluten in relativ kurzer Zeit ansteigen.
2. Kurze Anstiege verursachen in Cuxhaven hohe Windstaumaxima. Es muß aber mindestens eine lange Dauer - Scheitel oder Abfall - hinzukommen, daß diese Windstaumaxima schwere bis sehr schwere Sturmflutscheitelhöhen bilden. Der Grund hierfür ist, daß die meist bei Tideniedrigwasser liegenden hohen Windstaumaxima mithilfe der langen Scheiteldauer oder des langsamen Abfalls über Tidehochwasser hinweggezogen werden müssen.

12 Die Windstauparameter in Helgoland

12.1 Korrelation der Windstauparameter

12.1.1 Anstiegsneigung zu Windstaumaximum

40 % der Sturmfluten in Helgoland treten bei einer Anstiegsneigung zwischen 5 h/m und 10 h/m mit einem Windstaumaximum von 175 cm bis 255 cm auf, wobei hiervon 75 % eine Windstauhöhe von 175 cm bis 215 cm erreichen (Abb. 12-1). Weitere 30 % aller Windstaukurven in Helgoland haben bei einer Anstiegsneigung zwischen 3 h/m und 14 h/m eine Windstauhöhe zwischen 160 cm und 260 cm. 28% streuen sehr weit und umfassen die Extreme von sehr niedrigen (125 cm) und sehr hohen Windstaumaxima (300 cm) sowie von sehr kurzen (2 h/m) bis sehr langen Anstiegsneigungen (20 h/m). Ein Wert verbleibt aufgrund seiner großen Anstiegsneigung von 23 h/m außerhalb der Ellipse, zwei weitere liegen nur mittelbar daneben.

Die meisten Windstaumaxima werden von Anstiegsneigungen zwischen 5 h/m und 10 h/m gebildet und erreichen Höhen zwischen 175 cm und 255 cm.

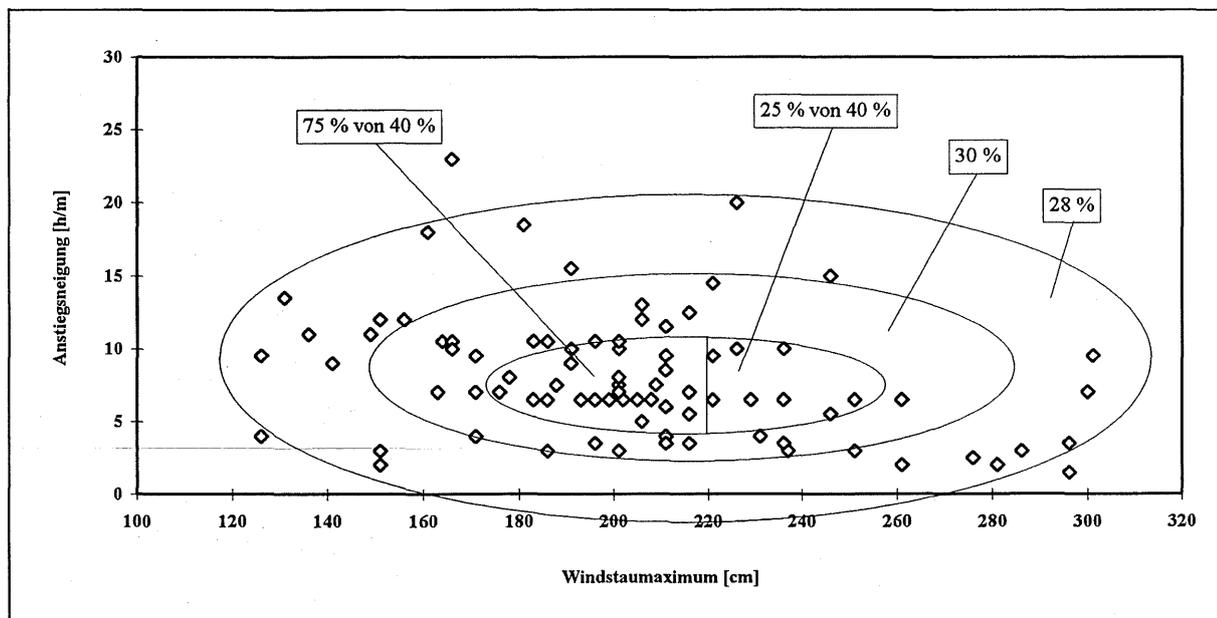


Abb. 12-1: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Häufigkeit)

Die Frage zu beantworten, welche Anstiegsneigung ein hohes Windstaumaximum bewirkt und inwiefern es vom Faktor Anstieg abhängig ist, stellt sich für Helgoland weitaus schwieriger dar da

1. die Zeitreihe wesentlich kürzer ist als in Cuxhaven;
2. die Daten sich nicht eindeutig einem Grenzwert nähern.

Der letzte Punkt wird besonders bei der Berechnung der Überschreitungswahrscheinlichkeit deutlich. Hier ist zu erkennen, daß sich aus den 10 höchsten Werten maximal eine leicht gekrümmte Exponentialfunktion berechnen läßt. Von einem Erreichen eines asymptotischen

gekrümmte Exponentialfunktion berechnen läßt. Von einem Erreichen eines asymptotischen Grenzwertes, der die maximal zu erreichende Höhe abbilden würde (SIEFERT, 1998), kann bei dieser Datenreihe nicht gesprochen werden. Auch die Analyse der Korrelation Anstiegsneigung zu Windstaumaximum weist demzufolge keinen eindeutigen Trend zu einem Maximalwert auf. Werden die Daten in einer gebogenen Einhüllenden verbunden, liegt der maximale Wert bei 310 - 330 cm.

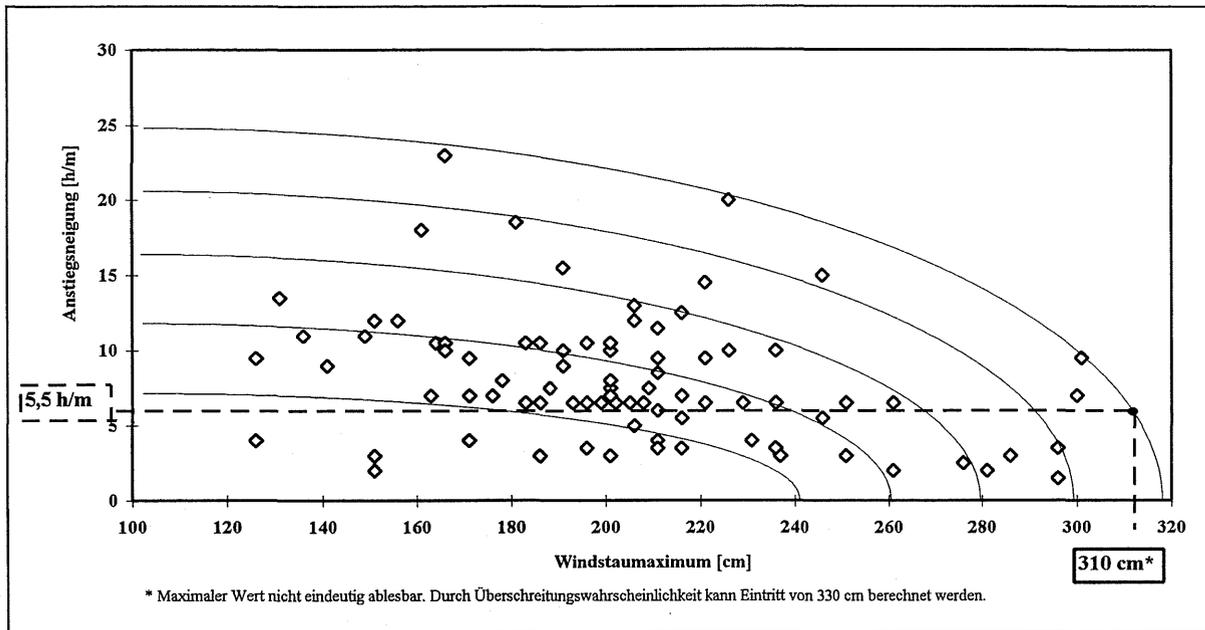


Abb. 12-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Einhüllende)

Für Helgoland läßt sich nicht aussagen, daß kürzere Anstiege grundsätzlich höhere Scheitel verursachen. Es zeigt sich jedoch auch hier, daß hohe Windstau maxima von kurzen Anstiegsneigungen gebildet werden, die höchsten Maxima aber von Anstiegen mit Neigungen zwischen 7 h/m und 10 h/m. Das bedeutet, daß ein maximaler Wert zwischen 3 h/m und 10 h/m liegen muß. Für Helgoland läßt sich eine Einhüllende definieren, die sich in der Punktwolke in niedrigen Höhenniveaus in Relation zur Anstiegsneigung wiederholt (Abb. 12-2). Wird ein aus der Korrelation und der berechneten Überschreitungswahrscheinlichkeit entnommener maximaler Wert von 310 cm zugrunde gelegt und mit der äußeren Einhüllenden geschnitten, ergibt sich eine Anstiegsneigung von 5,5 h/m. Bei Berechnung einer maximalen Windstaukurve sollte aus o.g. Gründen die Spannbreite berücksichtigt werden, welche bei linearer Extrapolation der Regressionsgeraden mit einer Höhe von 330 cm bei der Berechnung der Überschreitungswahrscheinlichkeit erreicht werden würde. Bei einer gekrümmten Extrapolation sollte mit einem maximalen Wert von 310 cm gerechnet werden. Wird der höhere Wert von 330 cm mit der Einhüllenden berücksichtigt, ergibt sich wie in Cuxhaven eine Anstiegsneigung von 1 h/m. Da dieser Wert jedoch nicht mit den bisher aufgetretenen Daten zu korrelieren ist, wird 5,5 h/m als realistische Größe vorausgesetzt.

Hohe Windstauwerte werden in Helgoland bei kurzen Anstiegen erreicht, sehr hohe bei einer mittleren Anstiegsneigung. Aus der Bildung einer Einhüllenden in Verbindung mit der Berechnung eines maximalen Wertes aus Überschreitungswahrscheinlichkeit und Scheiteldauer, ergibt sich eine Anstiegsneigung von 5,5 h/m, bei welcher der maximale Windstauwert eintreten kann.

12.1.2 Scheiteldauer zu Windstaumaximum

In Helgoland treten alle Windstauhöhen bei einer Scheiteldauer zwischen 3 h und 5 h auf. In dieser Spanne befinden sich auch die meisten Windstaumaxima. Für lange Scheiteldauern liegt demgegenüber eine Begrenzung vor. Bei Scheiteldauern von mehr als 15 h treten keine Windstaumaxima über 190 cm auf, so daß also lange Scheiteldauern keine hohen Windstaumaxima verursachen. Bis 185 cm Windstauhöhe steigt die Dauer kontinuierlich an, um dann ebenso kontinuierlich mit zunehmender Scheitelhöhe wieder abzunehmen (Abb. 12-3). Entsprechend kann für Helgoland festgestellt werden, daß die Höhen der Windstaumaxima ab ≥ 185 cm größer werden bei abnehmender Scheiteldauer. In Helgoland hat folglich die Scheiteldauer einen deutlichen Einfluß auf die Höhe des Windstaumaximums. Wird der abfallende Ast des Dreiecks verlängert, ergibt sich ein maximal möglicher Stau von 310 cm. Deutlich ist zu erkennen, daß bei einer Scheiteldauer von 4 h die Möglichkeit für das Auftreten eines sehr hohen Windstauscheitel am größten ist.

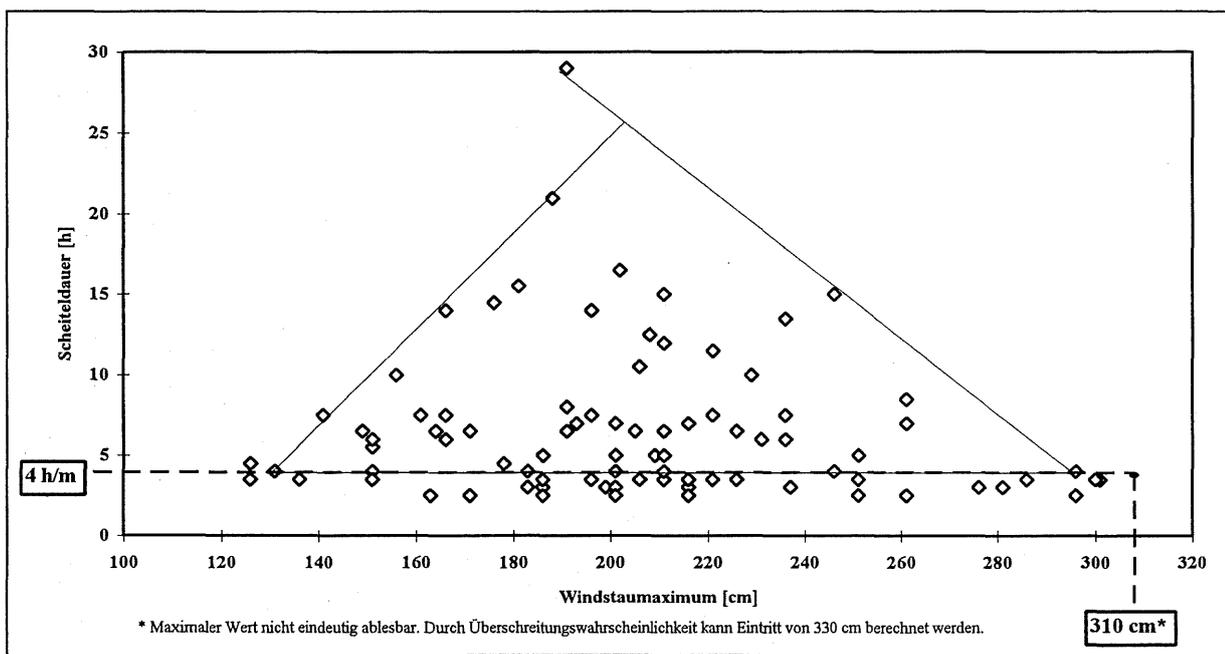


Abb. 12-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Scheiteldauer zu Windstaumaximum

In Helgoland besteht eine Abhängigkeit der Scheiteldauer zum Windstaumaximum. Lange Scheiteldauern verursachen kleinere Windstaumaxima, während kurze Scheitel hohe Maxima produzieren. Ein maximal möglicher Windstauwert würde bei 4 h auftreten.

12.1.3 Abfallneigung zu Windstaumaximum

In Helgoland treten bei Abfallneigungen zwischen 4 und 15 h/m alle möglichen Windstauhöhen auf. Bei längeren Abfallneigungen erreichen die Windstaumaxima nur noch Werte bis 215 cm, so daß für die Abfallneigung genau wie für die Scheiteldauer in Helgoland gilt, daß bei sehr langen Abfalldauern keine hohen Windstaumaxima vorkommen. Insgesamt ist die Streubreite der Windstaumaxima zur Abfallneigung sehr groß. Aus der Korrelation Abfallneigung zu Windstaumaximum ist zu erkennen, daß sehr hohe Windstaumaxima um eine Abfallneigung

von 7 h/m liegen. Bei hohen und sehr hohen Windstaumaxima reduziert sich die Windgeschwindigkeit in Helgoland weder schnell noch langsam. Bei einer maximalen Windstaukurve ist deshalb von 7 h/m Abfallneigung auszugehen.



Abb. 12-4: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Abfallneigung zu Windstaumaximum

Lange Abfallneigungen treten nur bei niedrigen Windstaumaxima auf. Sehr hohe Windstaumaxima treten bei einer mittleren Dauer von 7 h/m auf. Aus allen Kurven seit 1940 läßt sich für eine maximale Windstaukurve eine Abfallneigung von 7 h/m errechnen.

12.2 Entwicklung der Parameter

12.2.1 Der Anstieg

In Helgoland zeigt sich eine deutliche Zunahme der Anstiegsneigungen von 7,5 h/m auf knapp 9 h/m (Abb. 12-5). Die höchsten Windstaumaxima in Helgoland kommen bei einer Anstiegsneigung zwischen 7 h/m und 10,5 h/m vor. Ein Trend zu einer grundsätzlich längeren Anstiegsneigung von 9 h/m bedeutet also, daß die Möglichkeit des Eintritts eines hohen bis sehr hohen Windstaumaximum unverändert bleibt. Setzt sich dieser Trend fort, würde er sich aus dem Bereich der Bildung von maximalen Windstauscheiteln heraus bewegen, d.h. die Möglichkeit ihres Eintritts würde geringer werden. Die letzten Mittelwerte deuten aber eher einen Trend zur erneuten Verkürzung des Anstiegs an.

Ein maximaler Windstauwert liegt nach Kap. 12.1.1 zwischen 310 cm und 330 cm vor. Aus der Einhüllenden ergibt sich eine Anstiegsneigung von 5,5 h/m. Da ein Trend in Richtung längerer Anstiegsneigungen festzustellen ist, resultiert aus diesen Ergebnissen keine erhöhte oder beschleunigte Gefahr für die Möglichkeit des Eintritts eines höheren Windstaumaximums als bisher.



Abb. 12-5: Entwicklung der Anstiegsneigung in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)

Der Anstieg der Windstaukurven in Helgoland wird tendenziell länger. Die Möglichkeit des Eintretens eines hohen bis sehr hohen Scheitels wird dadurch nicht vergrößert.

12.2.2 Die Scheiteldauer

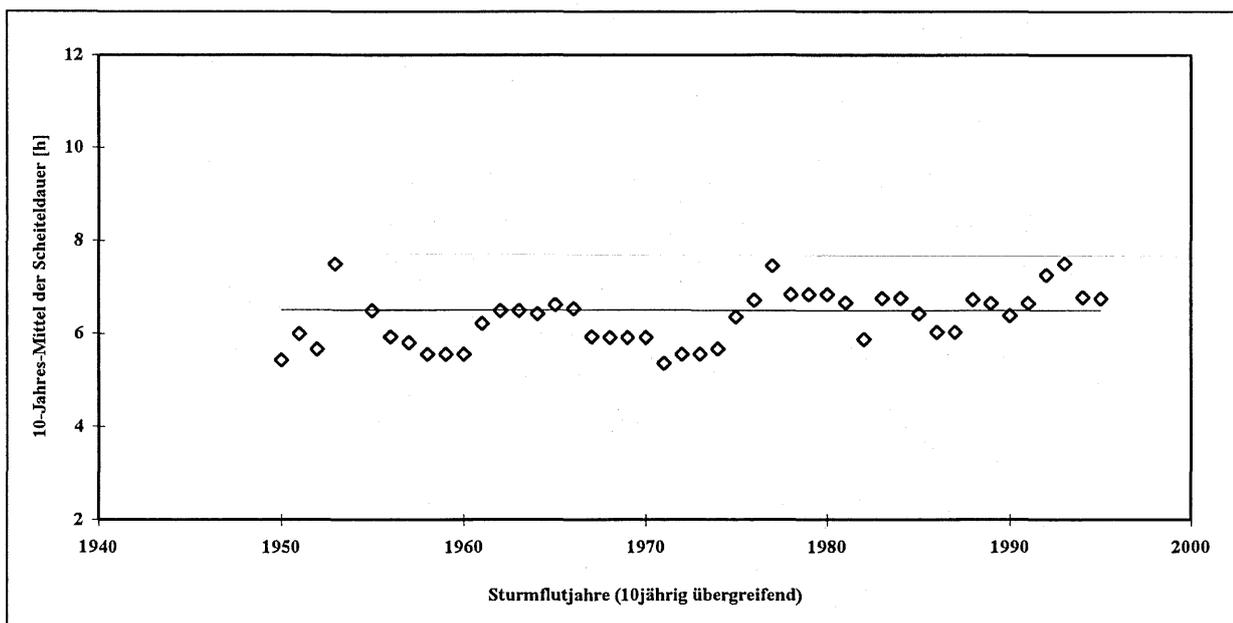


Abb. 12-6: Entwicklung der Scheiteldauer in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)

Die Scheiteldauer weist tendenziell keine Veränderung auf (Abb. 12-6). Demzufolge läßt sich aus der Entwicklung der letzten 60 Jahre keine geänderte Gefahrensituation ablesen. Aus der Entwicklung des Sturmflutklimas läßt sich keine Tendenz zu höheren Scheiteln erkennen.

Die Scheiteldauer weist keinerlei Veränderungen auf.

12.2.3 Die Windstauscheitelhöhe

Die Windstauscheitelhöhe in Helgoland zeigt bei Berechnung einer linearen Trendlinie über 10jährig übergreifende Mittelwerte keinen Anstieg. Erfolgt die Berechnung des Trends polynomisch, ergibt sich ein Anstieg von ca. 20 cm (Abb. 12-7). Dieser Wert ist mit den deutlich niedrigeren Windstaumaxima in den fünfziger Jahren zu erklären, welche aber für eine statistisch signifikante Trendaussage nicht ausreichen. Weiterhin läßt sich in den letzten sechs Mittelwerten ein Anstieg erkennen, der jedoch innerhalb des Rauschens der maximalen Werte liegt.

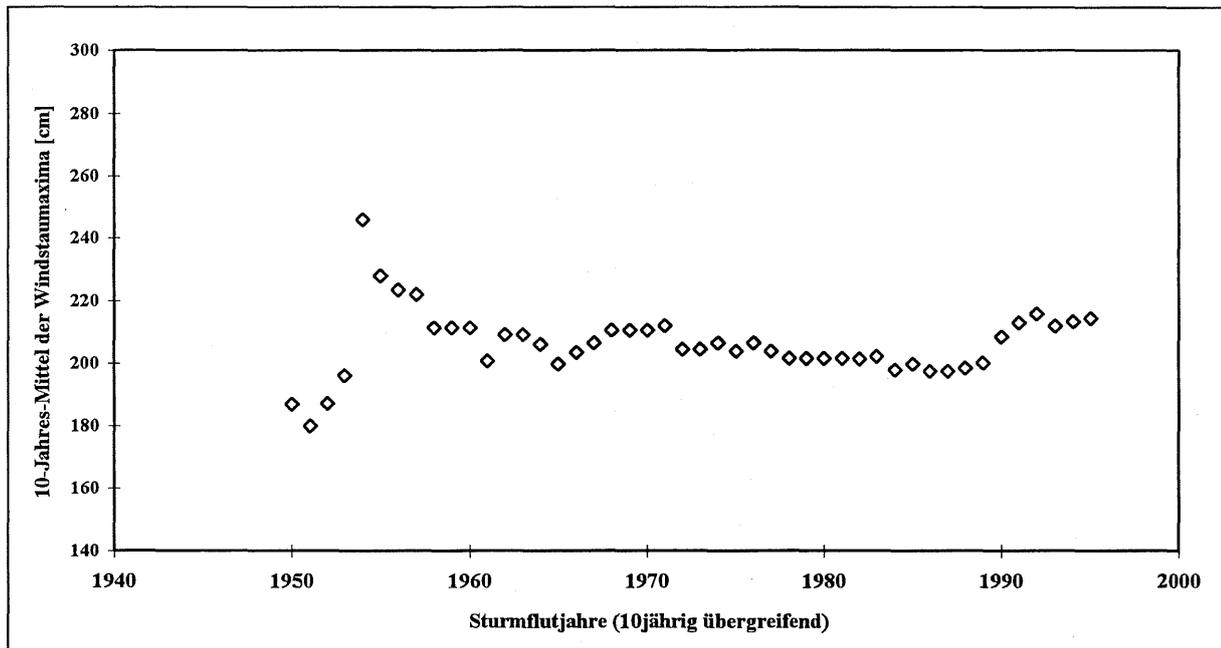


Abb. 12-7: Entwicklung des Windstaumaximums in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)

Die Bildung von 10jährig übergreifenden Werten kann nur eine allgemeine Tendenz nachweisen, bei der einzelne Peaks herausfallen. Diese werden durch die Darstellung sämtlicher Windstauscheitel (Abb. 12-8) sowie des maximalen Windstauwertes pro Sturmflutjahr (Abb. 12-9) erfaßt. Prognosen für einen maximalen Windstauwert können dagegen weder durch eine solche Darstellung noch durch übergreifende Mittelwerte aufgestellt werden. Diese können durch Verfahren erfolgen, wie sie von SIEFERT (1998) durch Berechnung der Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstaumaxima, getrennt nach Hoch- und Niedrigwasser, durchgeführt wurden.

Die Darstellung aller Windstaumaxima zeigt eine Spannweite von 125 cm bis 300 cm. Hohe Werte sind erst seit den sechziger Jahren vorzufinden. Von 1940 bis 1960 ist die Spannweite mit 150 cm bis 2215 cm (1940-50) und 125 cm bis 260 cm (1950-60) geringer. Die Vergrößerung der Spannweite zeigt mit Beginn der sechziger Jahre gleichzeitig eine Erhöhung der Windstaumaxima an, so daß zwangsläufig bei der Berechnung eines Trends für diesen Zeitraum ein Anstieg zu verzeichnen ist. Dieser pendelt sich aber nach Erhöhung in den sechziger Jahren auf diesem Niveau ein und zeigt sich in den letzten 35 Jahren nicht mehr verändert. Da diese Untersuchungsreihe genau zum Zeitraum des Minimums bezüglich Anzahl und Höhe in Cuxhaven beginnt, sind Zweifel über die Korrektheit der Berechnung des Anstiegs - zumal er minimal ist - berechtigt.

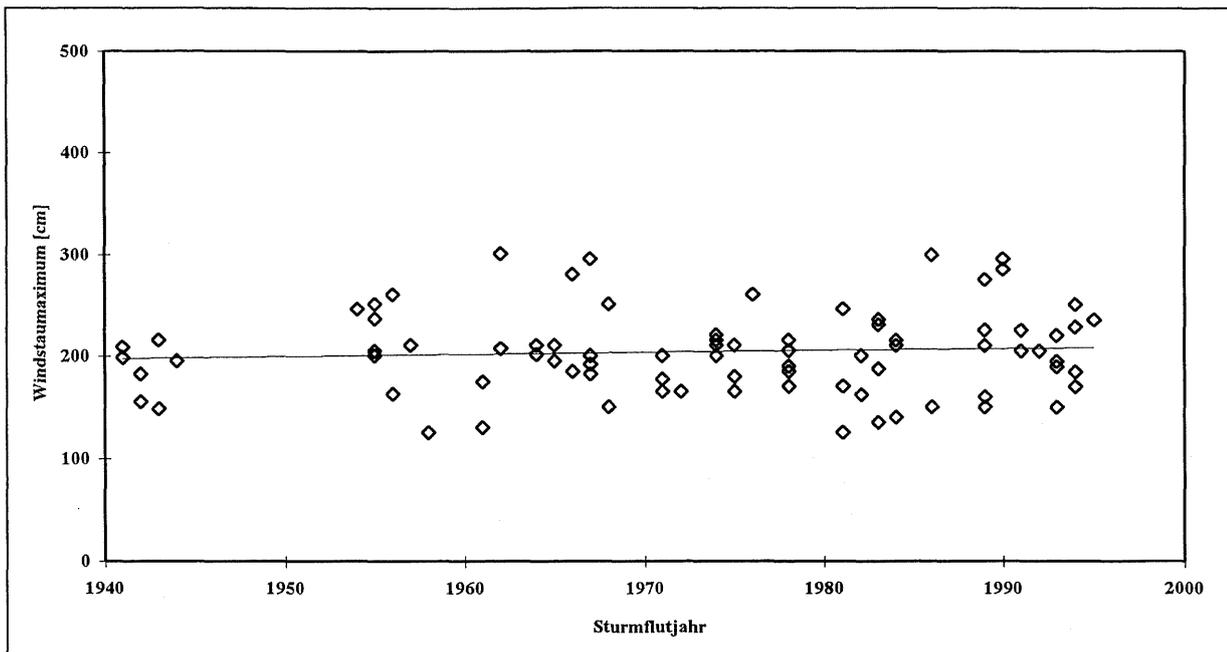


Abb. 12-8: Entwicklung der Windstaumaxima in Helgoland seit 1940 (unabhängig von der Tidephase)

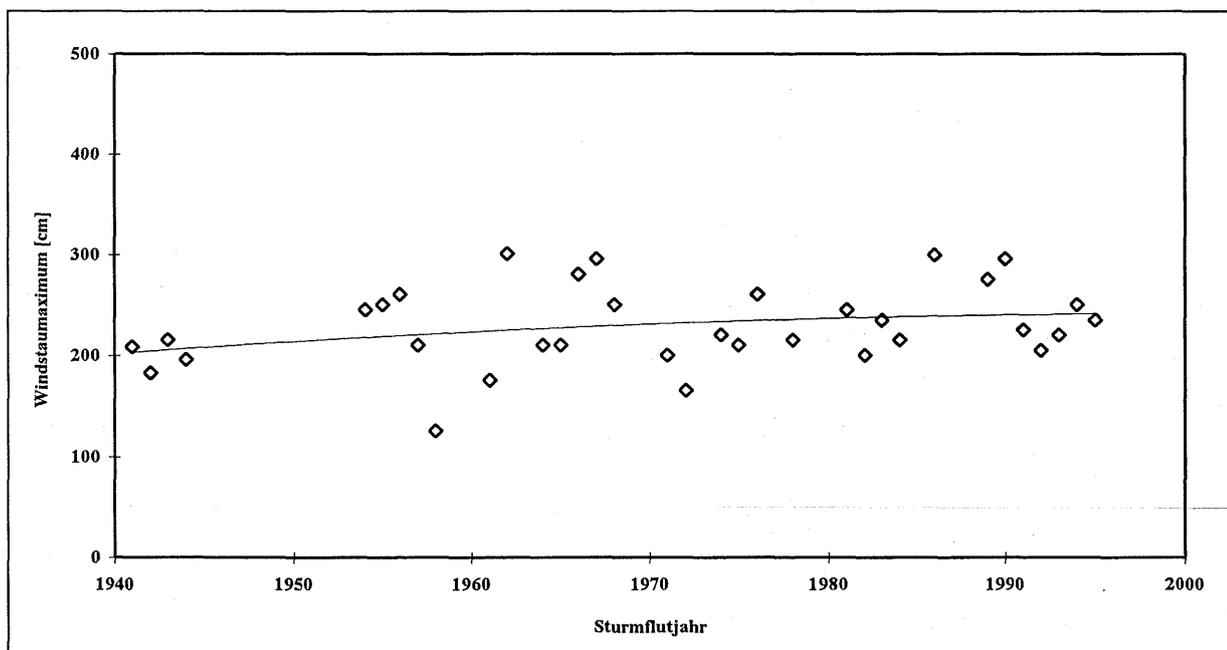


Abb. 12-9: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Helgoland seit 1940 (unabhängig von der Tidephase)

In der Darstellung der höchsten Windstauwerte pro Sturmflutjahr (Abb. 12-9) verstärkt sich dieser Trend deutlich, nimmt in den letzten Jahren jedoch wieder ab. Die Höhe der Windstaumaxima um 1995 ist aber immer noch um 40 cm höher als 1940, wobei die Erhöhung wiederum vor allem in den sechziger Jahren erfolgte. Ab dann schwanken die Werte in mehr oder weniger großen Abweichungen um 250 cm.

Werden die Windstaumaxima nach Tidehoch- und Tideniedrigwasser getrennt über die Zeit betrachtet, so bestätigt sich kein bzw. nur ein geringer Anstieg der Windstaumaxima. In beiden Fällen steigt das Windstaumaximum um ca. 10 cm an.

In Helgoland ist bei Betrachtung der höchsten Windstaumaxima pro Sturmflutjahr ein Anstieg der Windstaumaxima von fast 40 cm zu berechnen. Werden sämtliche Windstauwerte miteinbezogen, so erhöht sich zwar die Spannbreite zwischen den höchsten und niedrigsten Werten und damit auch die absolute Höhe, ein Trend läßt sich dann aber kaum noch feststellen. Die Berechnung der 10jährig übergreifenden Mittelwerte bestätigt dies und gibt keinen Trend in Richtung höherer Windstaumaxima an.

12.2.4 Der Abfall

Die Abfallneigung hat in Helgoland seit 1940 grundsätzlich von 10 h/m auf 11,5 h/m zugenommen (Abb. 12-10). Seit 1985 endet die bis dahin kontinuierliche Verlängerung im 10jährig übergreifenden Mittel mit einem Maximum von 13 h/m und reduziert sich wieder auf 10,5 h/m. Bei Berechnung dieses linearen Trends ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Neigung von 13 h/m bereits Mitte der fünfziger Jahre überschritten wurde. Da die 10jährig übergreifenden Mittel erst 1940 beginnen und außerdem eine große Streuung der Daten 1950 bis 1960 vorliegt, muß der generelle Anstieg durch die ersten Daten verursacht worden sein. Ein Vergleich mit Cuxhaven zeigt allerdings, daß auch hier ein Anstieg der Abfalldauer vorliegt, der über eine Phase größerer Streubreite in den vierziger Jahren auf ein Niveau längerer Dauer gehoben wird (vgl. Kap. 11.2.4). Legt man diese Daten als Vergleich zugrunde, bestätigt sich die geringfügige Verlängerung der Dauer im Abfall.

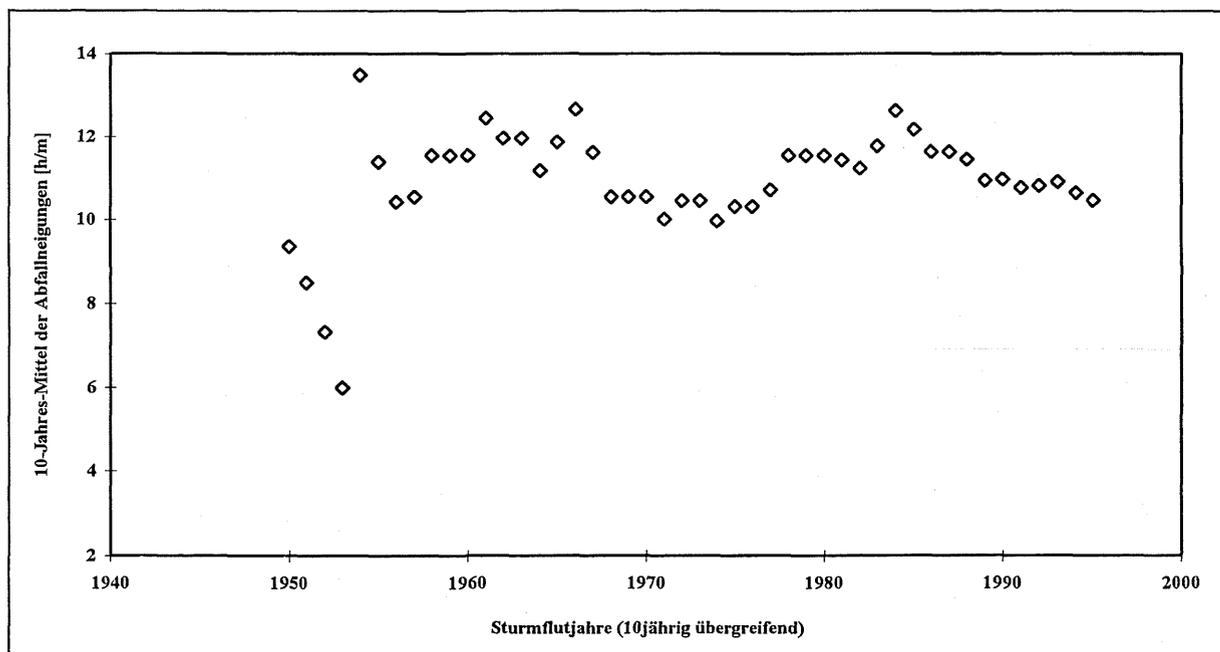


Abb. 12-10: Entwicklung der Abfallneigung in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)

Die Größenordnung von 10 h/m auf 11,5 h/m, in der sich die Verlängerung des Anstiegs bewegt, ist jedoch insgesamt irrelevant. Die maximalen Windstauwerte liegen bei 7 h/m, so daß eine Verlängerung der Dauer die Möglichkeit, daß dieser maximale Wert eintritt, verringert.

Es zeigt sich eine Verlängerung der Abfallneigung seit 1940, die sich in den letzten Jahren wieder reduziert. Die Verlängerung führt nicht zu einem größeren Risiko des Eintritts eines maximalen Windstauscheitels.

12.3 Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe

Die 10 höchsten Sturmfluten in Helgoland liegen zwischen 860 cm PN (16.02.1962) und 778 cm PN (20.12.1991) mit vorwiegend langen Anstiegsneigungen (6 von 10; 1 x 2 Scheitel), langer Scheiteldauer (6 von 10; 1 x 2 Scheitel) und überwiegend langem Abfall. Allerdings tritt die Kombination, daß alle drei Parameter lang sind, sehr selten auf; in der Regel ist eine kurze Komponente enthalten.

Hohe bis sehr hohe Sturmfluten werden durch langsame Windgeschwindigkeitszunahme, lange Scheiteldauern und langsames Abflauen der Windgeschwindigkeit gebildet.

12.4 Veränderung des Charakters der Windstaukurven in den letzten 60 Jahren in Helgoland

Die mittlere Windstaukurve für Helgoland ist nicht nur hinsichtlich der Veränderung des Sturmflutcharakters von Bedeutung, sondern auch als Vergleich der Veränderung der Windstaukurve vom Tiefen Wasser vor dem Watt zur Küste.

Der mittlere maximale Windstauwert für Helgoland zeigt für den Beginn der Untersuchung (um 1940) weder große Differenzen zwischen den verschiedenen Auswahlkriterien der Windstaumaxima (alle Maxima, nur das höchste Maximum pro Sturmflutjahr und 10-Jahres-Mittel), noch zwischen den verschiedenen Berechnungsformen. So liegt der Ausgangswert 1940 bei 195 cm bis 205 cm. Bei den Werten um 1995 dagegen existiert eine sehr große Spannbreite: von 205 cm bei Zugrundelegung aller Maxima sowie der 10jährig übergreifenden Mittelwerte bis hin zu 245 cm bei Begrenzung der Daten auf den höchsten Windstauwert pro Jahr. Wieder wird deutlich, wie groß die Unterschiede je nach Datenauswahl sind. Es zeigt sich einmal mehr, daß die Bearbeitung des gesamten Sturmflutverlaufs über die Windstaukurve und der sich daraus ergebenden mittleren und maximalen Windstaukurve die tatsächliche Entwicklung wesentlich genauer erfaßt und zwingend notwendig ist, um die Änderung des Sturmflutklimas und deren Auswirkungen zu erfassen. Um die Veränderung hervorzuheben, wird hier als mittlerer maximaler Wert 240 cm gewählt. Es ist davon auszugehen, daß die dargestellten Windstaukurven mit diesem Maxima etwa 1 h bis 3 h nach Tideniedrigwasser auftreten.

Ein Vergleich der Windstaukurven (Abb. 12-11 u. Abb. 12-12) zeigt, daß die Veränderungen in Helgoland in den letzten knapp 60 Jahren relativ groß sind. So verlängern sich Anstieg (von 7,5 h/m auf 9 h/m) und Abfall (von 10 h/m auf 11,5 h/m) um jeweils 1,5 Stunden. Die Differenz im Abfall stellt eine Tendenz zu längeren Sturmfluten mit erhöhten nachfolgenden Tiden dar. Bei einem Windstaumaxima von 240 cm und 10 h/m Abfall bedeutet 1,5 h/m jedoch nur eine geringe Verlängerung der Windstaukurve. Der längere Anstieg verlängert die Windstaukurve ebenso. Die Möglichkeit, daß ein maximaler Windstauscheitel eintritt, wird damit unwahrscheinlicher.

Insgesamt zeigt Helgoland nach Norderney den größten Anstieg in der Dauer. Dies ist damit zu erklären, daß die Berechnungen 1940 beginnen, das heißt dem "Tal" von Dauer, Höhe und Häufigkeiten der Sturmfluten. Es ist anzunehmen, daß der Anstieg geringer wäre, wenn die Ausgangsbasis auch bei diesen Pegeln 1900 gewesen wäre.

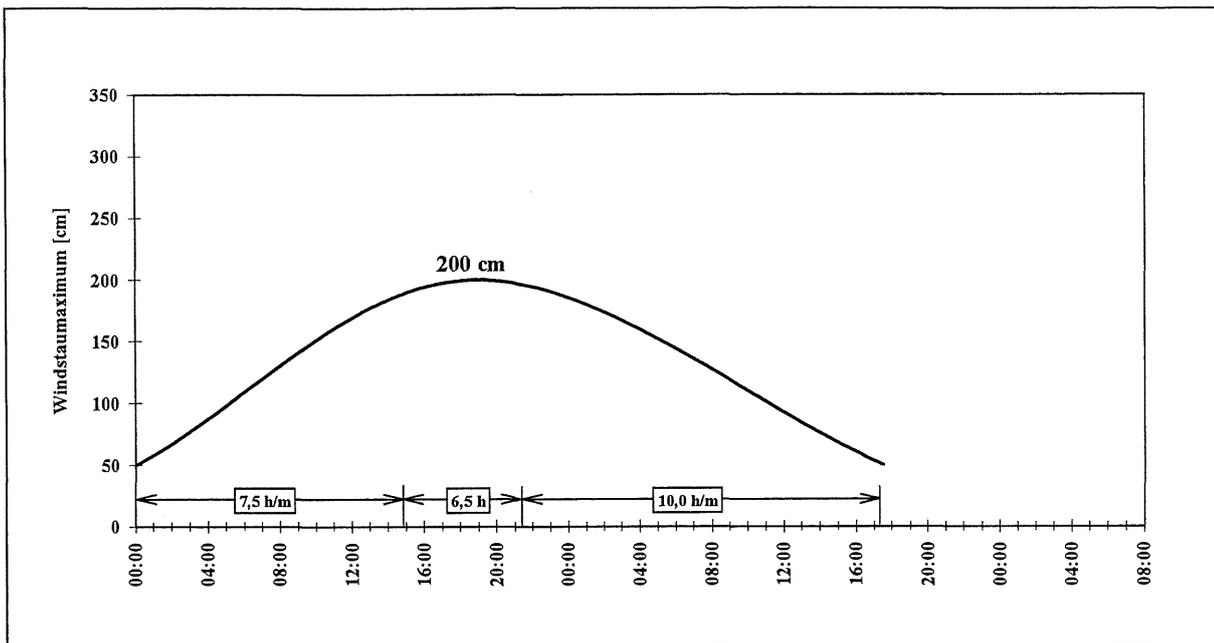


Abb. 12-11: Mittlere Windstaukurve in Helgoland um 1940

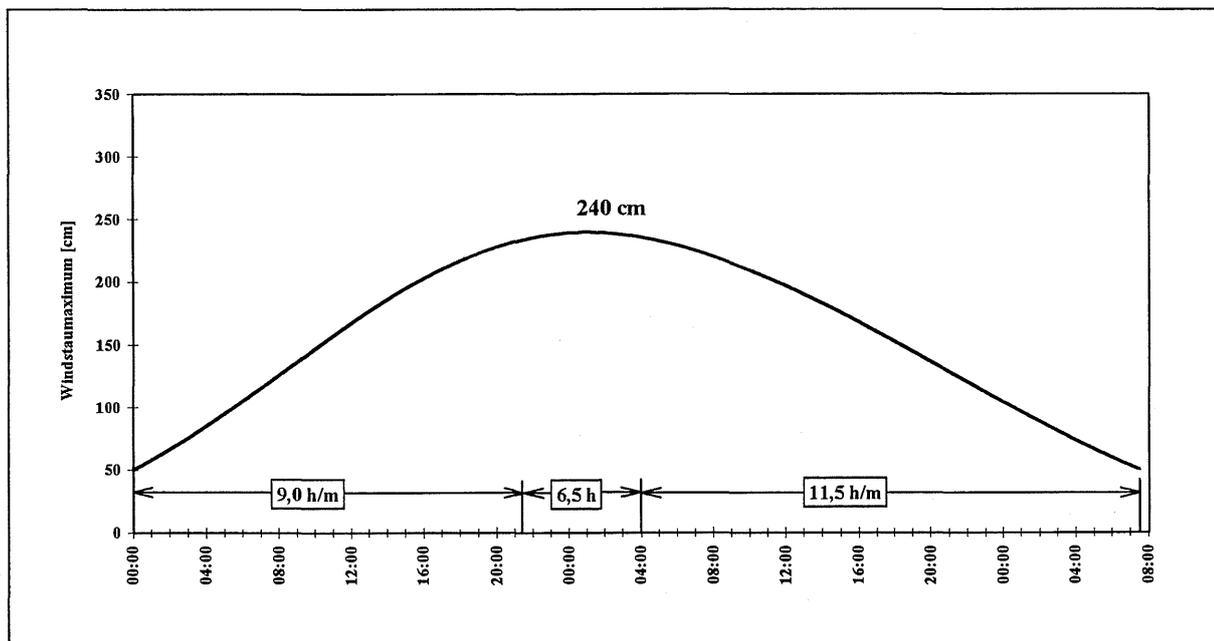


Abb. 12-12: Mittlere Windstaukurve in Helgoland um 2000

In Helgoland hat sich die mittlere Windstaukurve seit 1940 deutlich in Abfall- und Ansteigsneigung verlängert. Tendenzen zum beschleunigten Erreichen maximaler Windstauhöhen aufgrund des Anstiegs und der Scheiteldauer sind durch den Vergleich der mittleren Windstaukurven nicht zu erkennen.

12.5 Die maximale Windstaukurve in Helgoland

Die maximale Windstaukurve in Helgoland geht von einem Windstaumaximum von 330 cm aus (Abb. 12-13). Dieser Wert ergibt sich aus den Korrelationen der Parameter, die auf das Windstaumaximum bezogen sind. Werden zum Vergleich die Berechnungen der

Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Windstauhöhen getrennt nach Niedrigwasser und Hochwasser herangezogen, so zeigt sich, daß der Wert relativ hoch angesetzt ist. Für 1:100 Jahre wird für Windstaumaxima um Tnw eine Höhe von etwa 310 cm berechnet, um Thw von etwa 290 cm (SIEFERT, 1998). Der Kurvenverlauf der Daten ist jedoch nicht asymptotisch. Demzufolge ist davon auszugehen, daß die Datenreihe nicht lang genug ist und/oder die maximal möglichen Höhen noch nicht annähernd erreicht wurden. So muß zwangsläufig der maximale Wert, der sich aus den Sturmfluten und deren inneren Abhängigkeiten ergibt, wesentlich höher sein.

Werden zur weiteren Kontrolle die Ergebnisse von OUMARACI und KORTHAUS (1998) hinzugezogen, so zeigt sich bei der Regressionsberechnung für Thw über Gumbel ein Ergebnis von 330 - 340 cm; alle anderen Funktionen ermitteln Windstaumaxima, die als viel zu hoch einzustufen sind. Für die Berechnung bei Tnw liegen die Höhen für 99.0 bei Weibull bei 380 cm, bei Gumbell sowie bei Log-Weibull und Weibull-3 bei 340 cm und bei Weibull-2 bei 310 cm. Demzufolge befindet sich der aus der inneren Abhängigkeit der Daten ermittelte Wert von 310 cm gut im Rahmen dieser stark streuenden Werte. Auch hier wird deutlich, daß eine Betrachtung der gesamten Sturmflutverläufe zwingend ist, um gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen herauszuarbeiten.

Die maximale Windstaukurve in Helgoland kann in dieser Form die Kurve für einen maximalen Scheitel sein und in dieser Höhe auch bei Hochwasser auftreten. Zusätzlich kann aber auch eine große Scheiteldauer möglich werden, so daß sehr hohe Sturmfluten bei maximaler Höhe länger andauern können.

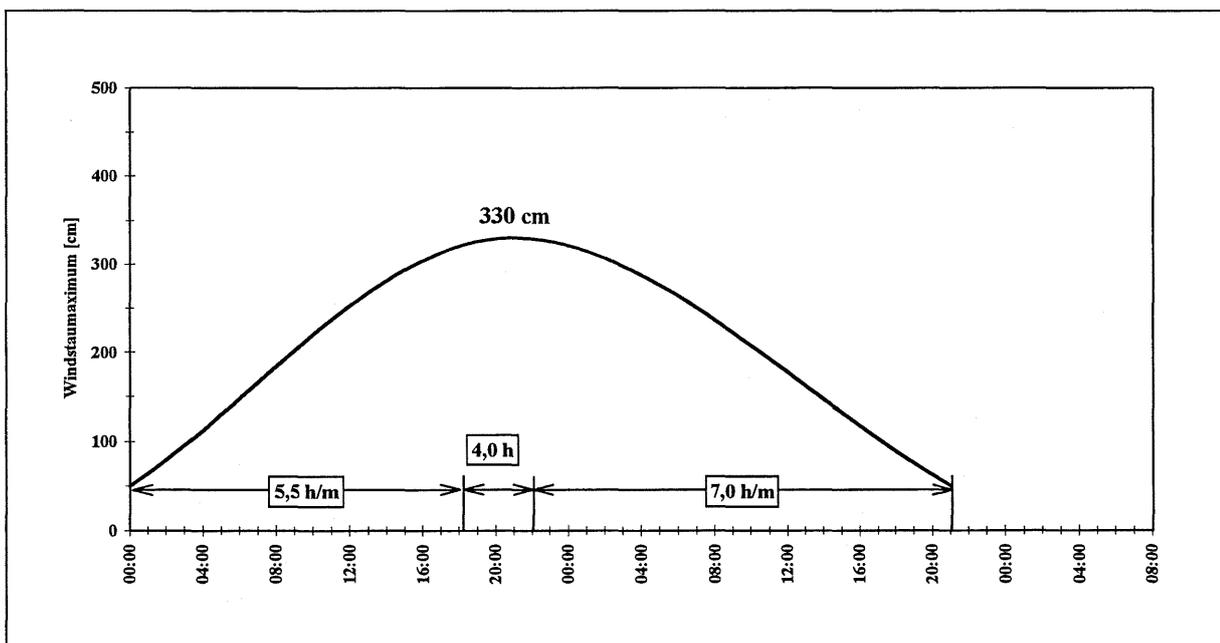


Abb. 12-13: Maximale Windstaukurve für Helgoland

Die maximale Windstaukurve für Helgoland weist einen Anstieg von 5,5 h/m, eine Scheiteldauer von 4 h und einen Abfall von 7 h/m auf. Sie ist damit deutlich länger als die maximale Windstaukurve in Cuxhaven. Da sie in dieser Form auch bei Thw auftreten kann, bildet sie somit auch die Windstaukurve für eine sehr schwere Sturmflut ab.

12.6 Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Helgoland

1. Es zeigt sich eine Tendenz zu längeren Anstiegsneigungen. Es besteht also keine Tendenz zu höheren Windstaumaxima, sondern zu Maxima, die durch längere Anstiegsneigungen gebildet werden. Ein höheres Windstaumaximum als bisher würde bei einer Neigung von 5,5 h/m eintreten. Da die Windentwicklung in den letzten Jahren keineswegs auf kürzere Anstiegsneigungen hinweist, besteht keine Gefahr des „beschleunigten“ Eintretens eines maximalen Windstauwertes.
2. Da die Scheiteldauer keine Tendenz zur Verlängerung oder Verkürzung in den letzten 60 Jahren aufweist, läßt sich aus dieser Entwicklung keine geänderte Gefahrensituation in Hinblick auf höhere Scheitel erkennen. Aus dem Sturmflutklima läßt sich ebenfalls keine „beschleunigte“ Entwicklung zu höheren Scheiteln ablesen.
3. Die Windstauscheitelhöhe zeigt bei Berechnung der Entwicklung einen Trend zu geringfügig größeren Höhen um jeweils 10 cm. Wird der Trend über die Zeit mit dem höchsten Windstaumaximum pro Sturmflutjahr ermittelt, zeigt sich ein Anstieg in der Größenordnung von 40 cm in den letzten 60 Jahren.
4. In der Tendenz nimmt die Abfallneigung seit 1940 zu, verringert sich in den letzten Jahren aber wieder. Die Verlängerung führt zu keinem größeren Risiko des Eintritts eines maximalen Windstauscheitels.

13 Die Windstauparameter in Norderney

13.1 Korrelation der Windstauparameter

13.1.1 Anstiegsneigung zu Windstaumaximum

In Norderney treten die meisten Windstaumaxima zwischen 140 cm und 330 cm bei einer Anstiegsneigung zwischen 5 h/m und 8 h/m auf.

Bei einer Anstiegsneigung zwischen 4 h/m und 9 h/m mit einer Windstauhöhe von 165 cm bis 280 cm befinden sich 58% aller Windstaumaxima (Abb. 13-1). In der sich nach außen anschließenden Ellipse mit den Eckdaten 2 h/m bis 12 h/m und 140 cm bis 300 cm liegen nur noch 26% aller Windstaukurven von Norderney. Die verbleibenden ca. 16% werden von einer Ellipse mit 110 cm bis 330 cm Höhe bei Anstiegsneigungen zwischen 2 h/m und 14 h/m umfaßt. Insgesamt ist die Streubreite dieser Korrelation in Norderney im Vergleich zu Cuxhaven und Helgoland recht gering. Ausnahme bilden sechs Extremwerte, die bei Anstiegsneigungen zwischen 15 h/m bis 34 h/m maximal 245 cm erreichen.

In Norderney werden Windstaumaxima zwischen 140 cm und 330 cm erreicht. Sie treten bei einer Anstiegsneigung zwischen 5 h/m und 8 h/m auf.

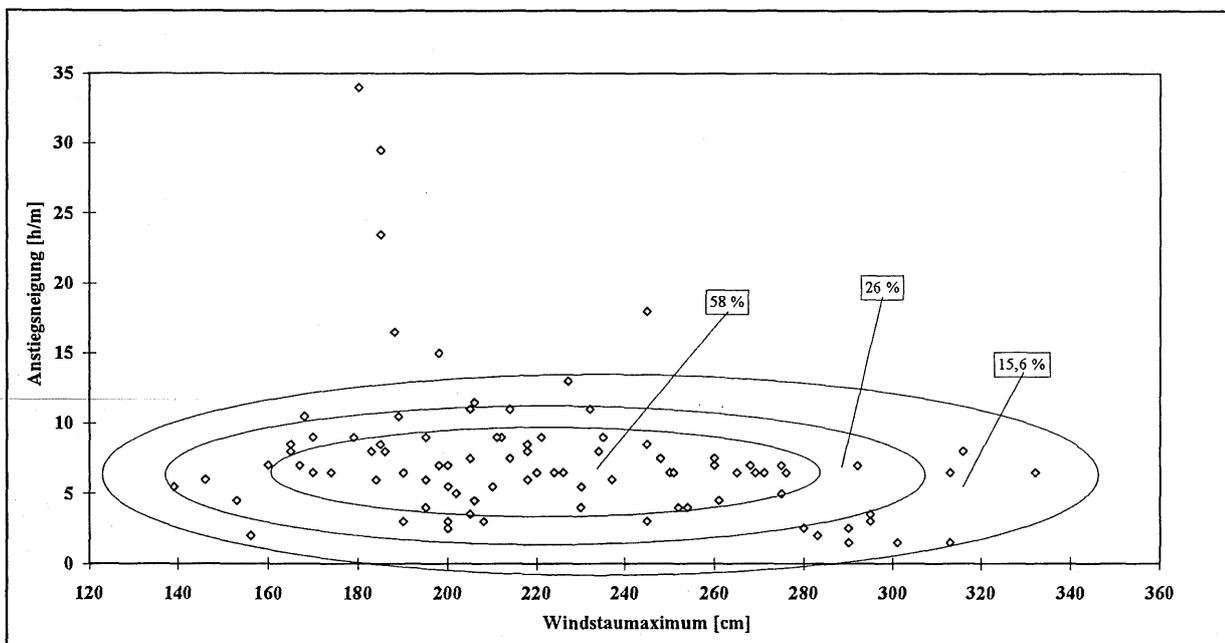


Abb. 13-1: Parameterauswertung aller Windstaukurven in Norderney seit 1936: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Häufigkeit)

Hohe Windstaumaxima ab 300 cm wurden bisher von kurzen Anstiegsneigungen mit 2 h/m gebildet, sehr hohe Windstaumaxima allerdings von den Anstiegsneigungen, die alle Windstaumaxima bilden könnten, nämlich zwischen 7 h/m und 9 h/m. Ebenso wie in Helgoland läßt sich auch hier nicht aussagen, daß hohe Windstaumaxima von kurzen Anstiegsneigungen gebildet werden, sondern vielmehr, daß sehr hohe Scheitel eine mittlere Anstiegsneigung aufweisen, bei der die grundsätzliche Bildung eines Windstaus am wahrscheinlichsten ist. Bei genauerer Betrachtung lassen sich jedoch auch hier Korrelationslinien erkennen (Abb. 13-2).

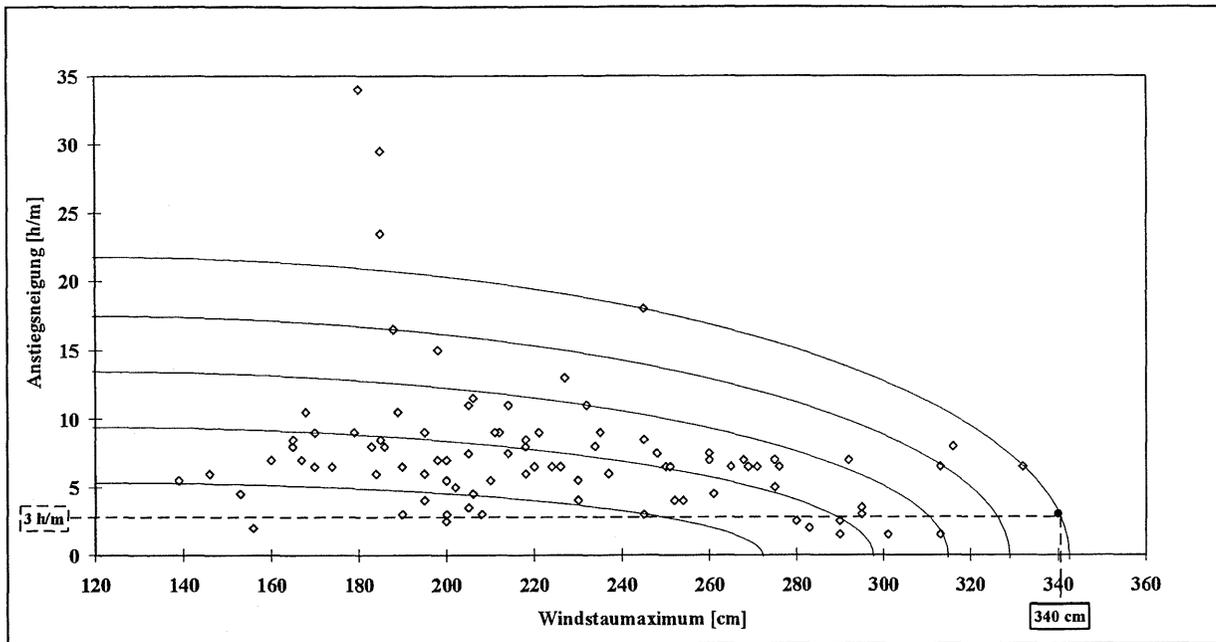


Abb. 13-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Norderney seit 1936: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Einhüllende)

Ebenso wie in Cuxhaven läßt sich aus ihnen ein maximaler Wert ablesen, der für die Darstellung einer maximalen Windstaukurve genutzt werden kann. Dieser Wert, berechnet aus einer Anstiegsgeraden mit 3 h/m, beträgt 340 cm.

Die Korrelation von Windstaumaximum und Anstiegsneigung ergibt einen maximalen Windstauwert von 340 cm bei einem Anstieg von 3 h/m.

13.1.2 Scheiteldauer zu Windstaumaximum

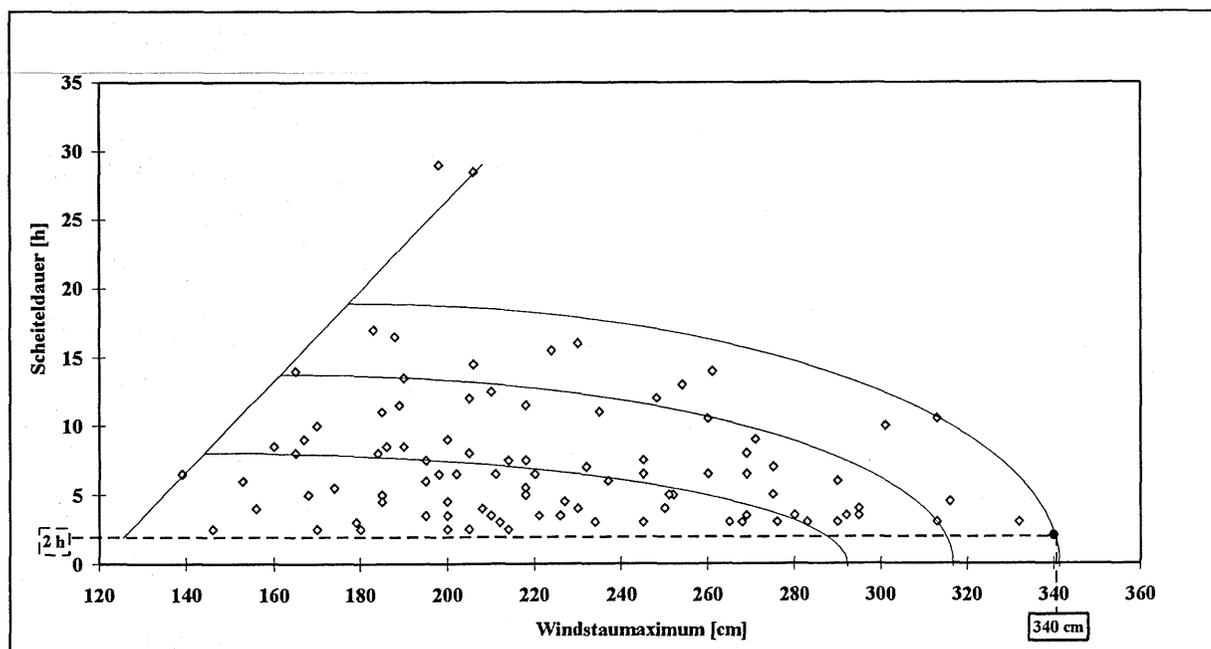


Abb. 13-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Norderney seit 1936: Scheiteldauer zu Windstaumaximum

Die Scheiteldauern in Norderney betragen zwischen 2 h und 3 h (Abb. 13-3). Das bedeutet, daß Windstaumaxima bis 210 cm bei allen Scheiteldauern auftreten, höhere Windstaumaxima aber nur von geringeren Dauern erreicht werden. Während Windstaumaxima von 210 cm noch von Scheiteldauern bis 27 h gebildet werden, weisen Windstaumaxima von 315 cm nur noch Scheiteldauern von 10 h und Maxima größer als 318 cm lediglich Scheiteldauern von 5 h bis 3 h auf. Deutlich wird hieran, daß hohe Windstaumaxima von kürzeren Scheiteln gebildet werden. Aus der Verbindung extremer Windstaumaxima ergibt sich ein maximaler Wert von fast 340 cm. Da die niedrigsten Dauern um 2 h schwanken, ist nicht davon auszugehen, daß sie bei 340 cm kürzer werden.

Hohe Windstaumaxima werden von kurzen Scheiteln gebildet. Ein maximaler Windstauwert von 340 cm würde von einer Scheiteldauer von 2 h gebildet werden.

13.1.3 Abfallneigung zu Windstaumaximum

Auch in Norderney liegt eine große Streuung bei der Korrelation Abfallneigung zu Windstaumaximum vor (Abb. 13-4). Zwar werden nur geringe Windstaumaxima bei sehr langen Abfallneigungen erreicht (bei 31 h/m 155 cm), bei 20 h/m existieren jedoch noch Maxima von 240 cm, bei 17 h/m Abfallneigung sogar noch von 300 cm.

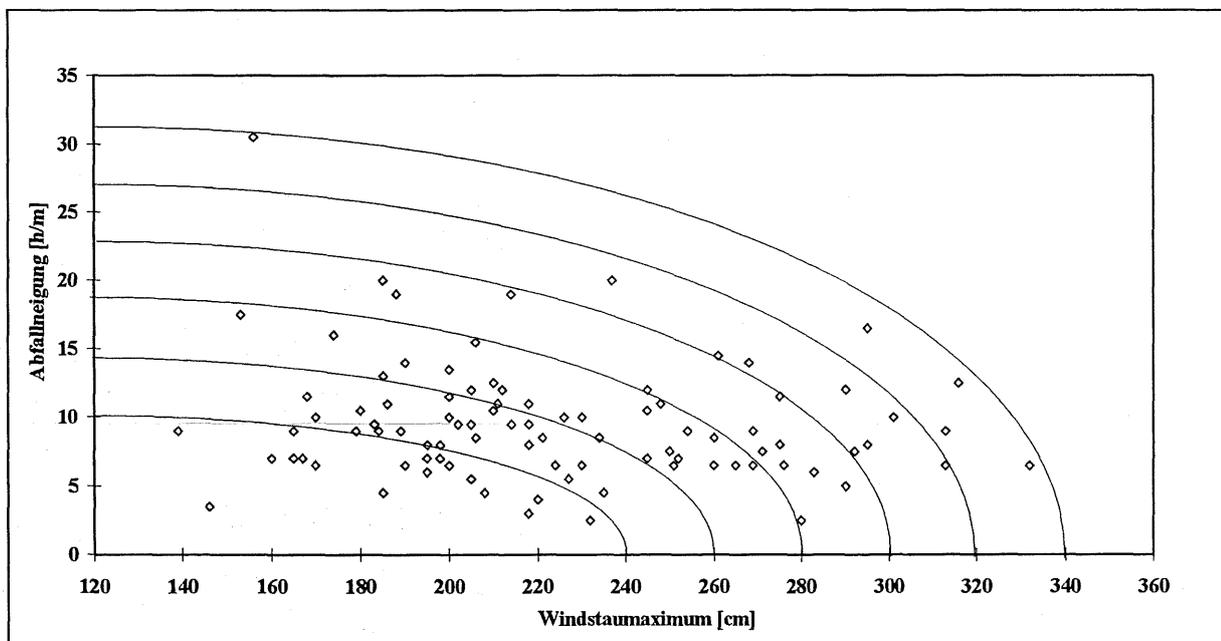


Abb. 13-4: Parameterauswertung der Windstaukurven in Norderney seit 1936: Abfallneigung zu Windstaumaximum

Trotzdem liegt bei den maximalen Werten mit 7 h/m kein sehr langer Abfall vor. Er ist aber dennoch so groß, daß auch hier von einem raschen Zusammenbrechen des Windes nach Erreichen eines sehr hohen Windstaumaximums nicht gesprochen werden kann.

Die Verbindung der äußeren Maxima ergibt wiederum einen Grenzwert, der wie im Anstieg bei 340 cm liegt. Die Werte und Kurven lassen nicht rückschließen, daß eine sehr kurze Abfallneigung bei diesem Wert vorkommen würde. Es ist eher eine Neigung zwischen 5 h/m

und 7 h/m zu erwarten, so daß für die maximale Windstaukurve eine Abfallneigung von 6 h/m festgelegt werden kann.

In Norderney treten relativ große Windstauhöhen bei langen Abfallneigungen auf. Maximale Windstauwerte werden zwischen 5 h/m und 7 h/m erreicht.

13.2 Entwicklung der Parameter

Die Entwicklung der Parameter während der letzten 60 Jahre werden mit einem 10jährig übergreifenden Mittel berechnet, um die generelle Entwicklung besser erkennen zu können.

13.2.1 Der Anstieg

In Norderney läßt sich ein eindeutiger linearer Trend zu einer längeren Anstiegsdauer in einer Größenordnung von 5,5 h/m - 7 h/m für 1945 (je nach Berechnungsart) auf 8 h/m - 9 h/m für 1995 ermitteln (Abb. 13-5). Werden jedoch die Daten der drei letzten Jahre 1992-1995, die aufgrund der geringen Datenlage (noch) nicht als neuer Trend anzusehen sind, aus der Berechnung herausgenommen, so ergibt sich insgesamt ein Trend von 6 h/m auf 7,5 h/m. Aus den Daten ließe sich auch ein sprunghafter Anstieg erkennen, der Anfang der sechziger Jahre ebenso zu einer Verlängerung der Anstiegsneigung von 6 h/m auf 7,5 h/m führt. Das heißt, daß in der Tendenz die Windgeschwindigkeit in den letzten Jahrzehnten langsamer ihr Maximum erreicht. Der erneute Anstieg zu Beginn der neunziger Jahre bestätigt diesen Trend zu einer längeren Anstiegsneigung.

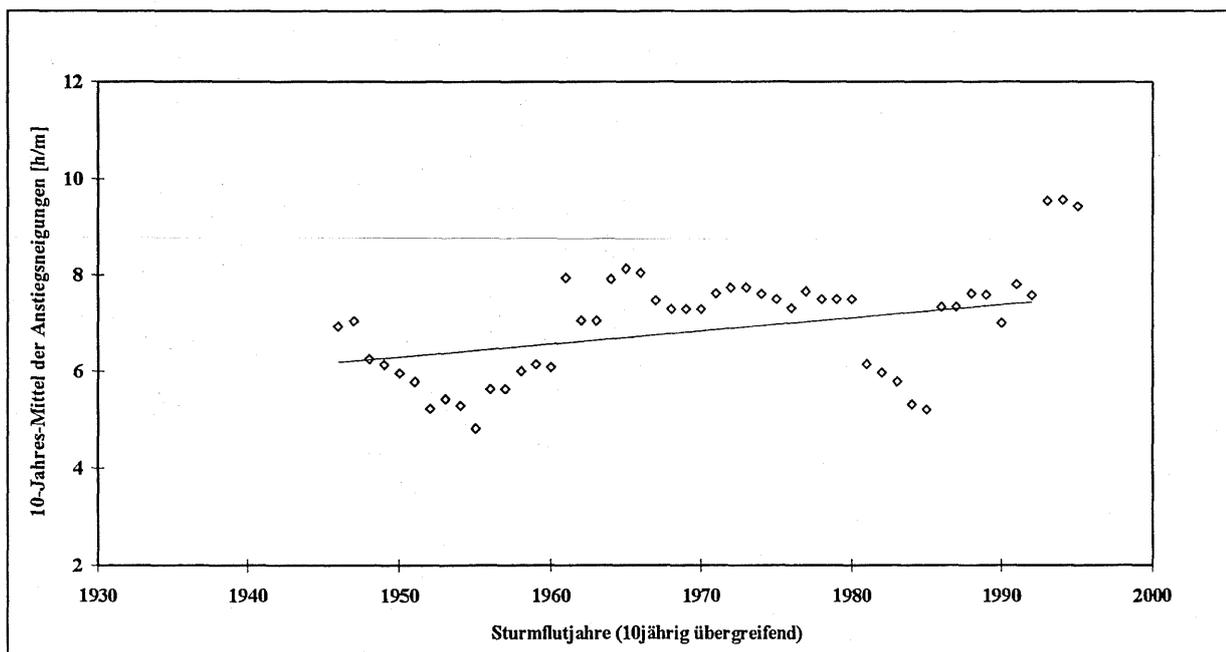


Abb. 13-5: Entwicklung der Anstiegsneigung in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)

Es liegt eine Tendenz zu einem langsameren Anstieg der Windgeschwindigkeit vor.

13.2.2 Die Scheiteldauer

Sehr hohe Windstaumaxima werden bei Scheiteldauern von 2 h bis 3 h erreicht. In Norderney weist die Scheiteldauer jedoch weder linear noch sprunghaft eine Tendenz zu einer Verkürzung oder Verlängerung auf (Abb. 13-6). Daher kann von der Scheiteldauer kein erhöhtes Risiko in Richtung höherer Windstaumaxima abgeleitet werden.

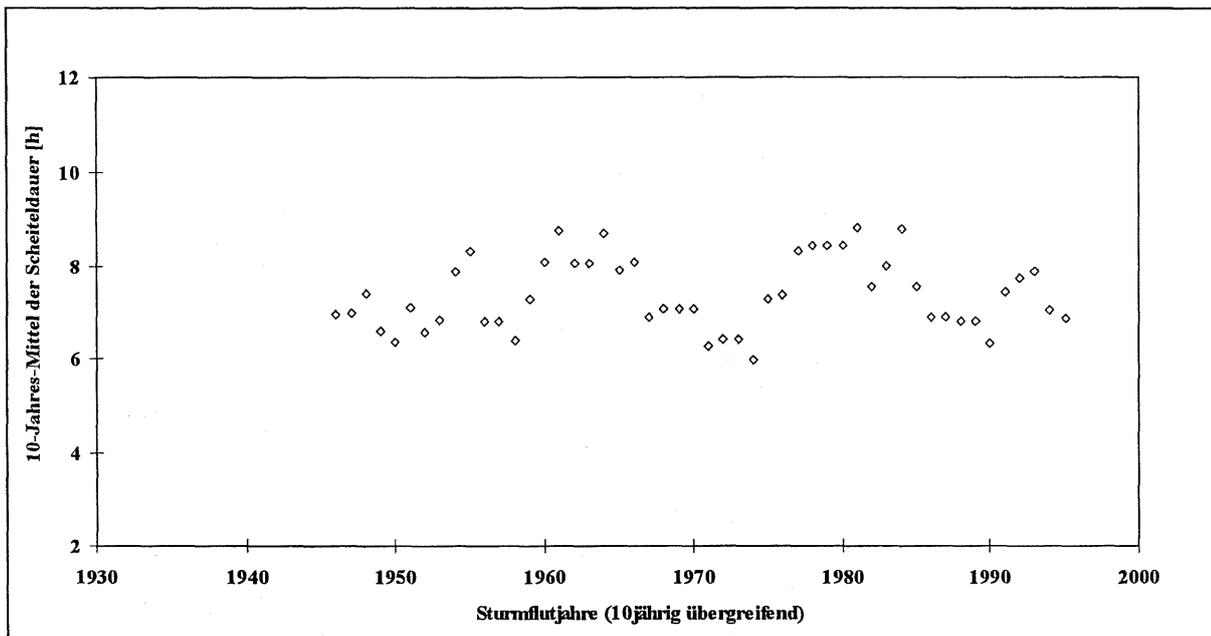


Abb. 13-6: Entwicklung der Scheiteldauer in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)

Die Scheiteldauer in Norderney zeigt in ihrer Entwicklung keinerlei Veränderung.

13.2.3 Die Windstauscheitelhöhe

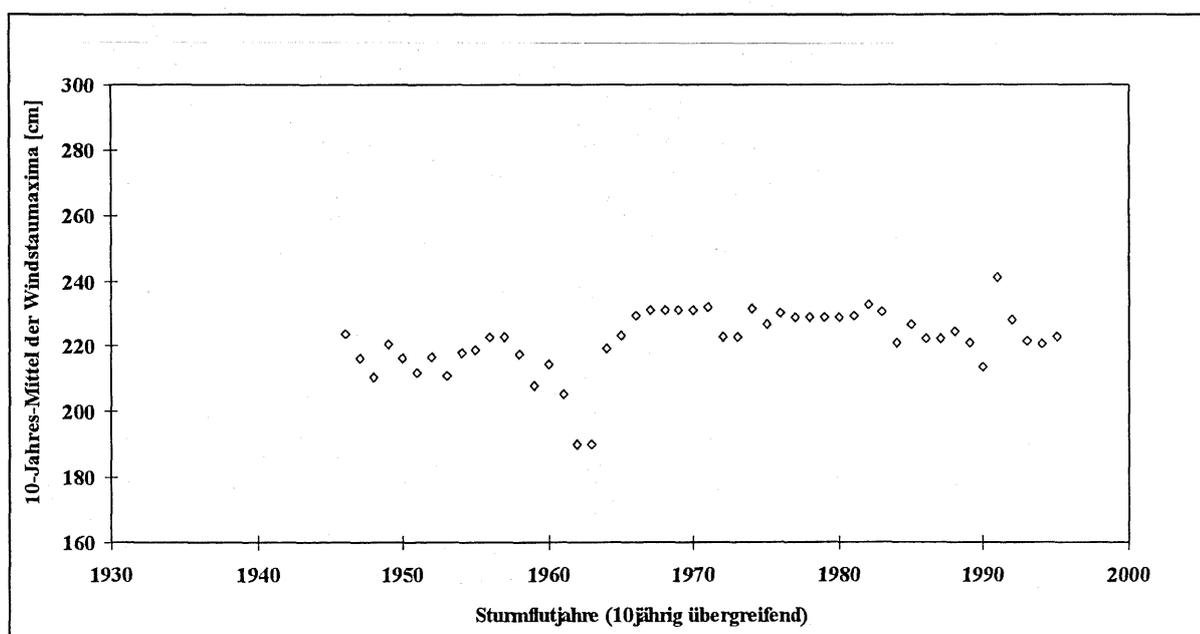


Abb. 13-7: Entwicklung des Windstaumaximums in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)

Die Windstauscheitelhöhe in Norderney zeigt im 10jährig übergreifenden Mittel einen Anstieg um gut 10 cm (Abb. 13-7). Die Spannweite in der Darstellung sämtlicher Windstaumaxima (Abb. 13-8) reicht 1937 von 184 cm bis 282 cm, nimmt dann in den sechziger Jahren auf 167 cm bis 313 cm leicht zu, um nach kurzer Reduzierung eine maximale Spannweite von 139 cm bis 332 cm in den 80er Jahren zu erreichen. In den neunziger Jahren nimmt die Spannweite wieder deutlich ab - sowohl durch Anstieg der niedrigen Werte als auch durch Verringerung der hohen Werte. Es kann also fast von einem wellenförmigen Verlauf gesprochen werden, indem die Daten phasenweise mal eine größere und mal eine geringere Spannweite aufweisen. Bei der Berechnung eines Trends zeigt sich nahezu kein Anstieg, bei einer polynomischen Trendberechnung dritter Ordnung wird sogar ein Abfall berechnet.

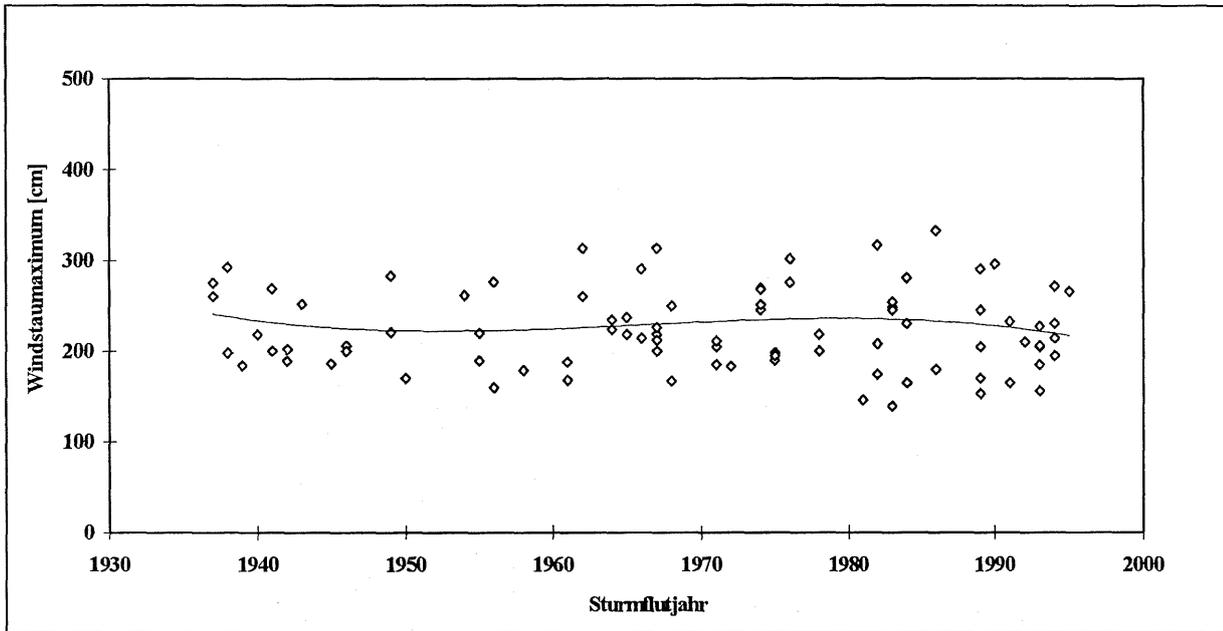


Abb. 13-8: Entwicklung der Windstaumaxima in Norderney seit 1936 (unabhängig von der Tidephase)

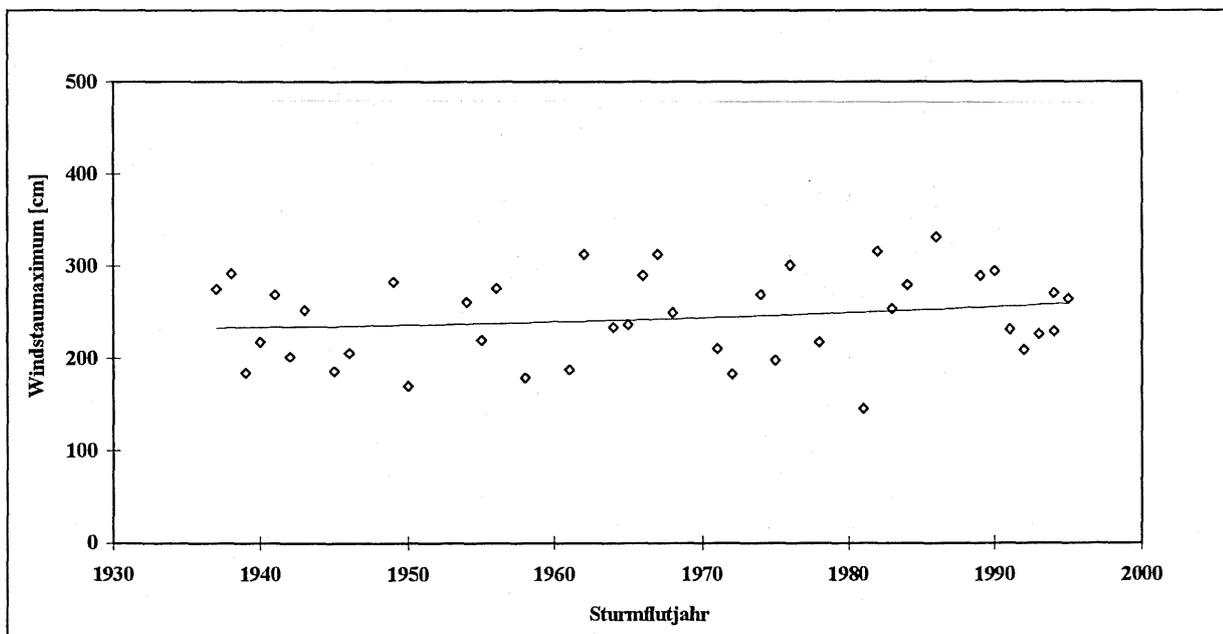


Abb. 13-9: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Norderney seit 1936 (unabhängig von der Tidephase)

Werden die maximalen Windstauwerte pro Jahr betrachtet (Abb. 13-9), erhöhen sich die Werte Anfang der sechziger Jahre über die 300 cm Marke und bleiben in ihren maximalen Höhen auf diesem Niveau, wobei der höchste Windstauwert von 1982 der insgesamt niedrigste Wert ist. Wird ein Trend berechnet, ergibt sich ein Anstieg von etwa 30 cm.

Bei einer differenzierten Betrachtung der Windstaumaxima nach den Tidephasen zeigt sich in der Entwicklung, daß die Windstaumaxima bei Tideniedrigwasser insgesamt um ca. 5 cm absinken und bei Tidehochwasser um 10 cm ansteigen.

Das Windstaumaximum steigt seit 1936 sowohl bei der Berechnung über die 10jährig übergreifenden Mittelwerte als auch bei der Betrachtung aller Windstaumaxima nur geringfügig an. Werden zur Trendberechnung die höchsten Windstaumaxima pro Jahr zugrunde gelegt, so läßt sich ein Ansteigen von ca. 30 cm ermitteln.

13.2.4 Der Abfall

In Norderney nimmt die Abfallneigung tendenziell von 8 h/m auf 9,5 h/m zu (Abb. 13-10). Die höchsten Windstaumaxima treten bei relativ niedrigen Abfallneigungen auf, d.h. wenn der Wind mit 5 h/m bis 7 h/m abflacht (Abb. 13-4). Das bedeutet, daß der Trend zu längerer Abfallneigung die Möglichkeit von hohen Windstaumaxima verringert.

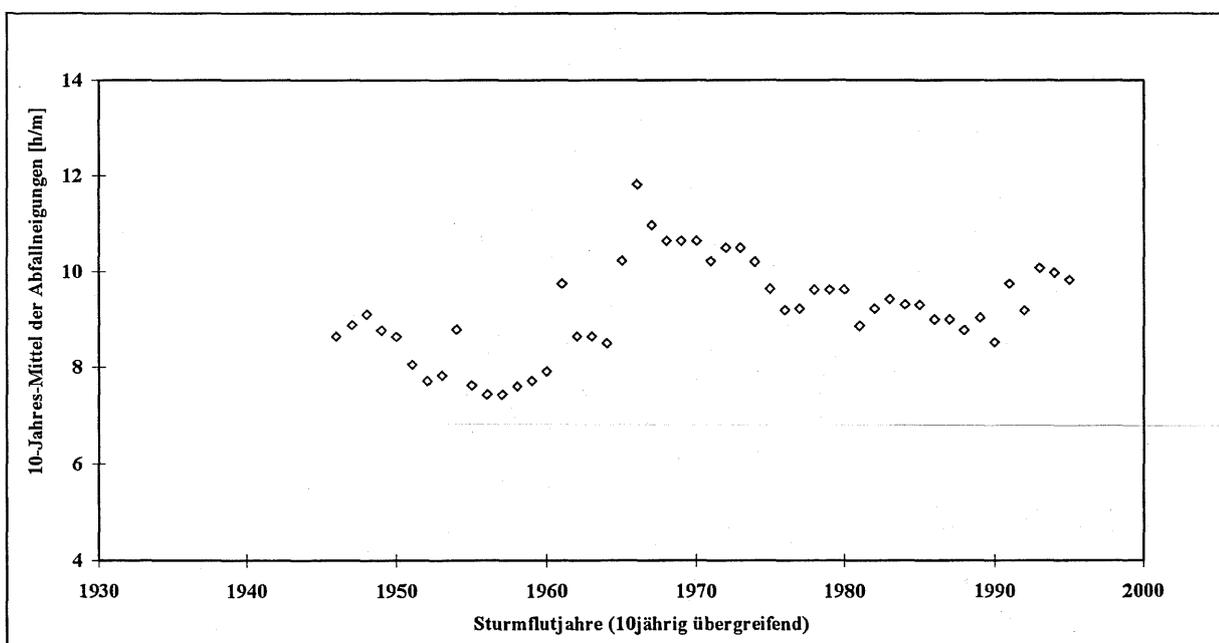


Abb. 13-10: Entwicklung der Abfallneigung in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)

Die Abfallneigung verlängert sich tendenziell und verringert damit die Möglichkeit des Eintretens eines maximalen Windstauwertes.

13.3 Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe

Die 10 höchsten Sturmfluten in Norderney haben eine Scheitelhöhe von 849 cm bis 910 cm PN. Ebenso wie die Korrelation Anstiegsneigung zu Windstaumaximum weisen auch die 10 höchsten Sturmflutscheitel eine lange Anstiegsneigung auf, die im Grenzbereich zu kurz, d.h.

zwischen 6,5-7 h/m und 9 h/m liegt. Eine Ausnahme bildet die Sturmflut vom 03.01.1976 mit einem besonders kurzen Anstieg von nur 1,5 h/m. Dagegen benötigt eine sehr hohe Windstaukurve in Norderney nur eine kurze Scheiteldauer. In den bisher aufgetretenen hohen und sehr hohen Sturmfluten war dies nicht der Fall; es lag immer eine lange Scheiteldauer vor. Die Sturmflut vom 21.01.76 hatte zwar eine kurze Scheiteldauer, allerdings existieren hier zwei Windstauscheitel, so daß es sich insgesamt um eine lange Scheiteldauer handelte. Beim Abfall entsprechen die bisher eingetretenen Windstaumaxima einer maximalen Windstaukurve in Norderney. Demzufolge muß für eine schwere Sturmflut in Norderney neben einer Anstiegsneigung zwischen 3 h/m und 7 h/m eine lange Scheiteldauer vorhanden sein, um das Windstaumaximum über die Tide zum Tidehochwasser „hinwegzuziehen“.

Die 10 höchsten Sturmfluten wurden von langen Anstiegen, langen Scheiteldauern und langen Abfällen gebildet. Eine Windstaukurve, die einen hohen bis sehr hohen Tidehochwasserscheitel bewirken soll, muß eine lange Scheiteldauer vorweisen.

13.4 Veränderung des Charakters der Windstaukurven in den letzten 70 Jahren in Norderney

Der mittlere maximale Windstauwert, berechnet aus der Trendlinie für 1936, schwankt zwischen 215 cm (errechnet aus den 10jährig übergreifenden Mittelwerten) und 230 cm (basierend auf den maximalen Windstauwerten pro Jahr) (Abb. 13-11). Da bei Berechnung einer Trendlinie über sämtliche Windstaumaxima ebenfalls ein Ausgangswert von 230 cm zu ermitteln ist, wird dieser Wert als Windstaumaximum für 1930 festgelegt. Für den maximalen Windstauwert 1995 wird 260 cm gewählt, da dieser Wert den maximal möglichen Anstieg repräsentiert (Abb. 13-12).

Da sich in Norderney die Windstaumaxima relativ gleichmäßig auf die Tidephasen verteilen, können die dargestellten Windstaukurven zu allen Tidephasen auftreten. Bei Tidehochwasser werden sie dabei rund 20 cm niedrigere Windstaumaxima erreichen als bei Niedrigwasser.

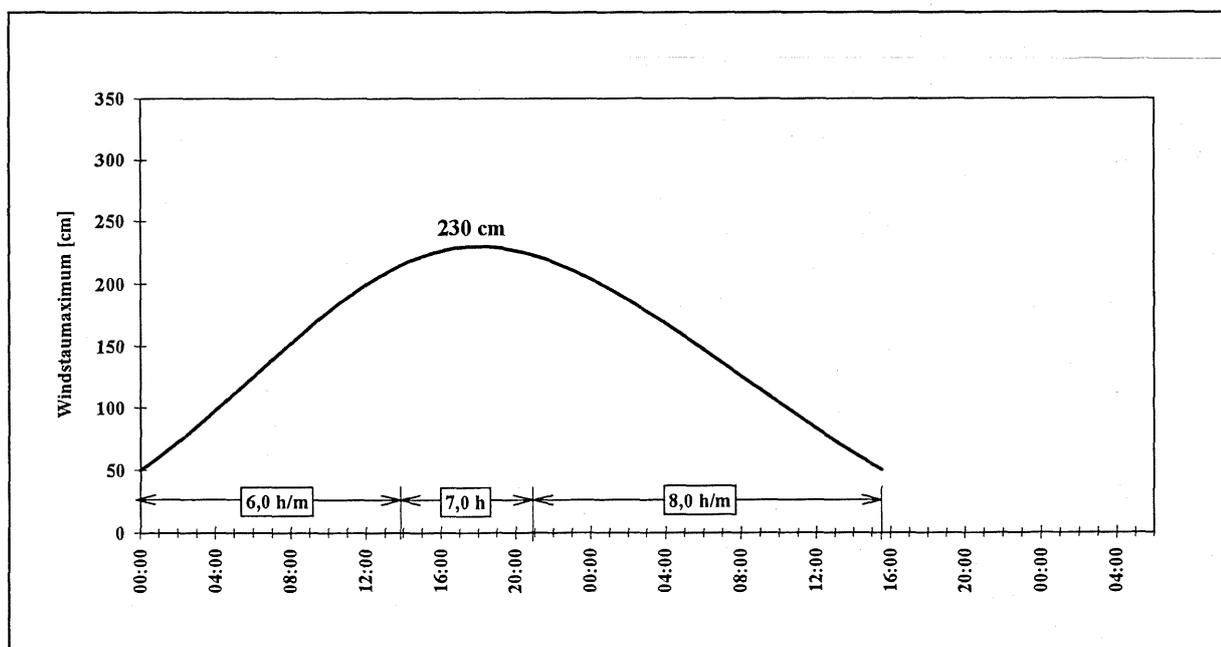


Abb. 13-11: Mittlere Windstaukurve in Norderney um 1930

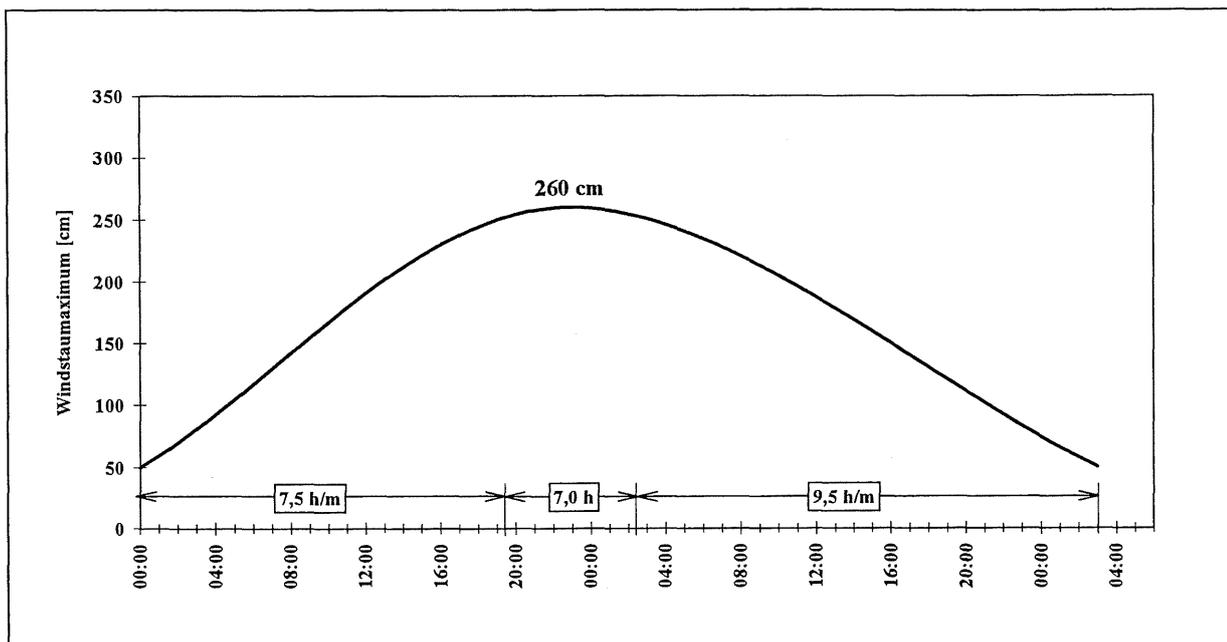


Abb. 13-12: Mittlere Windstaukurve in Norderney um 2000

Es zeigt sich, daß die Windstaukurve in Norderney insgesamt deutlich länger geworden ist. So ist der Anstieg von 6 h/m auf 7,5 h/m und der Abfall von 8 h/m auf 9,5 h/m gestiegen. Diese Entwicklung läßt eindeutig auf eine Zunahme von Kettentiden schließen, gleichzeitig aber auch auf eine Verringerung der Gefahr des Eintritts eines maximalen Windstaus.

13.5 Die maximale Windstaukurve in Norderney

Die maximale Windstaukurve in Norderney hat 340 cm im Maximum und besteht aus 3 h im Anstieg, 2 h in der Dauer und 6 h im Abfall (Abb. 13-13).

Werden auch hier zur Kontrolle die Berechnungen der Überschreitungswahrscheinlichkeit hinzugezogen, bestätigt sich dieser Wert für Windstaumaxima bei Tideniedrigwasser. Da er fast idealtypisch einer Asymptote entspricht, ist er als Wert einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1:200 Jahren geeignet, zumal die Höhe bei Thw um 270 cm liegt.

Die Untersuchungen von OUMERACI und KORTHAUS (1998), die verschiedene Verteilungsfunktionen für die Windstaumaxima getrennt nach Tideniedrig- und Tidehochwasser berechnet haben (s. Kap. 11.5), zeigen, daß für die Windstaumaxima um Thw mit Gumbel 350 cm und mit Weibull 3 etwa 340 cm bei je 99.0 berechnet werden kann. Bei Tnw ergibt sich mit Gumbel 380 cm mit Mod Rayleigh 375 cm und Weibull-3 etwa 370 cm bei je 99.0. Sie liegen damit allesamt wesentlich höher als die hier als maximaler Windstauwert angegebene Höhe. Dies ist damit zu begründen, daß erstens Regressionsrechnungen immer unendlich sind, auch wenn die Naturgegebenheiten dies unmöglich erscheinen lassen, und zweitens von OUMERACI und KORTHAUS (1998) selbst eingeschränkt wird, daß Prognosenbildungen in diesem Fall nicht fundiert und abgesichert möglich sind. Hier wird erneut deutlich, daß die zukünftige Entwicklung nicht anhand der Betrachtung eines einzelnen Punktes der Sturmflut - unabhängig ob Sturmflut- oder Windstauscheitel - möglich ist, sondern vielmehr der gesamte Verlauf und dessen inneren Abhängigkeiten hinzugezogen werden müssen.

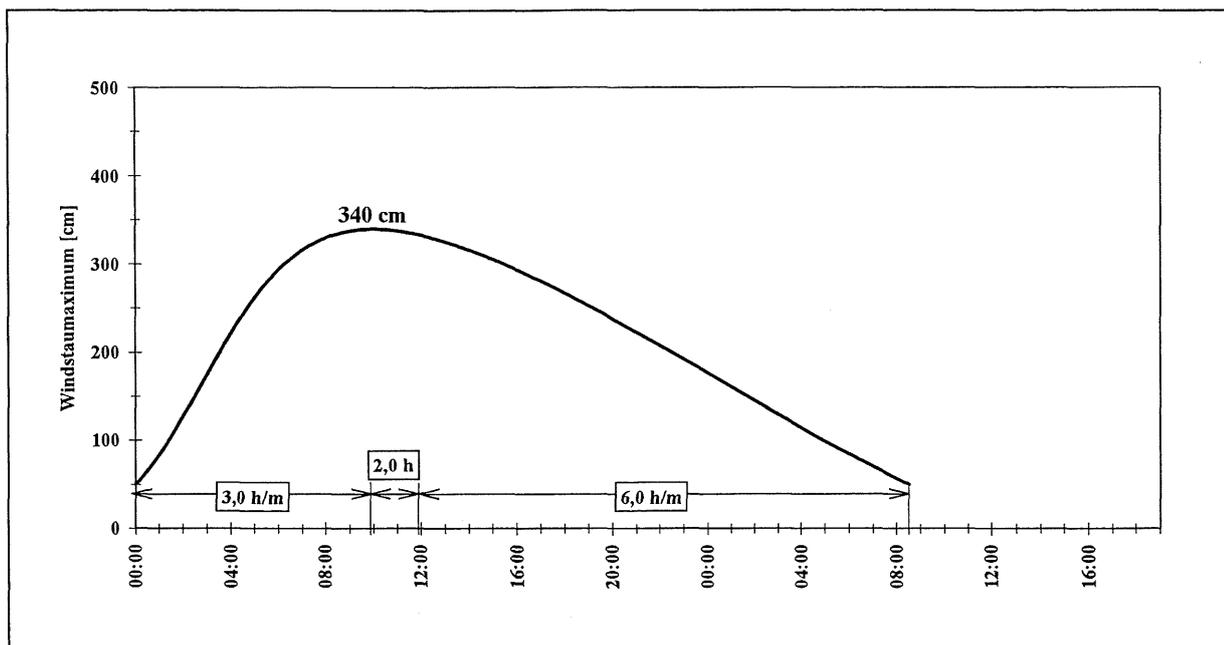


Abb. 13-13: Maximale Windstaukurve für Norderney

In Norderney lagen die Windstau maxima zur Tidephase bisher bei schweren bis sehr schweren Sturmfluten in etwa gleichmäßig verteilt um Hoch- und Niedrigwasser. Demzufolge kann die hier dargestellte Kurve auch zu einer sehr schweren Sturmflut führen. Dazu muß allerdings ergänzend eine lange Scheiteldauer vorhanden sein.

13.6 Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Norderney

1. Die Anstiegsneigung verlängert sich. Die Tendenz von 5,5 h/m - 6 h/m auf 7,5 h/m - 8 h/m bedeutet, daß die Anstiegsgeschwindigkeit in die Richtung tendiert, in der die meisten Sturmfluten und Windstauhöhen vorkommen. Ein sehr hoher Windstauwert wird jedoch mit einer Anstiegsgeschwindigkeit zwischen 3 h/m und 6 h/m erreicht. Demzufolge bedeutet diese Tendenz zu langsamen Windgeschwindigkeitsänderungen, daß die Möglichkeit des Eintritts eines sehr hohen Windstauscheitels geringer wird.
2. Die Windstau maxima weisen bei der Berechnung eines Trends über sämtliche Windstauwerte und im 10jährig übergreifenden Mittel nahezu keinen Anstieg auf. Werden nur die höchsten Windstauwerte pro Jahr zu Grunde gelegt, wird ein Anstieg von 30 cm über den gesamten Zeitraum ermittelt, der jedoch in den letzten Jahren wieder rückläufig ist.
3. Die Scheiteldauer zeigt keinerlei Tendenz, weder zur Verlängerung noch zur Verkürzung. Demzufolge bleibt das Risiko des Eintritts eines hohen Scheitels bezüglich der Scheiteldauer wie in den letzten Jahrzehnten.
4. Die Abfallgeschwindigkeit nimmt von 8 h/m auf 9,5 h/m zu. Da sehr hohe Windstau maxima bisher bei Abfallgeschwindigkeiten zwischen 5 h/m und 7 h/m erreicht wurden und davon auszugehen ist, daß bei höheren Maxima dies auch der Fall sein wird, forciert die Abfallneigung das Risiko eines sehr hohen Windstau maximums nicht.

14 Die Windstauparameter in Wittdün

14.1 Korrelation der Windstauparameter

Die Korrelationen der Windstauparameter für Wittdün zeigen eine große Ähnlichkeit mit denen von Cuxhaven. Dies ist deshalb überraschend, da Unterschiede zwischen diesen Pegeln vor allem aufgrund der unterschiedlichen Topographie zu erwarten waren. Demzufolge müßte es drei Gruppen geben: Küstenpegel (Cuxhaven), Tiefes Wasser vor dem Watt (Helgoland) und vorgelagerte Wattinsellage (Norderney und Wittdün).

14.1.1 Anstiegsneigung zu Windstaumaximum

Für Wittdün zeigt sich eine große Spannbreite in der Anstiegsneigung (Abb. 14-1). Zwar liegt der größte Teil der Windstaukurven zwischen 5 h/m und 10 h/m mit Windstaumaxima von 190 cm und 280 cm, darüber hinaus ist aber eine recht gleichmäßige Verteilung vorzufinden.

Auch für Wittdün ist, ebenso wie für Cuxhaven, festzustellen: Je kleiner die Anstiegsneigung ist, desto höher kann das Windstaumaximum werden. Ebenso läßt sich hier der Umkehrschluß bilden, daß sehr kleine Windstaumaxima (bis 160 cm) nicht von Anstiegsneigungen < 5 h/m gebildet werden.

Aufgrund der eindeutigen Korrelation "je kürzer desto höher", läßt sich auch für Wittdün ein Grenzwert ermitteln. Wird ein Bogen angelegt, so würde dieser Wert bei 370 cm liegen, also bei einem bereits eingetretenen Wert; wird er linear ermittelt, ergibt sich 390 cm. Da über die Berechnung der Überschreitungswahrscheinlichkeit kein eindeutiger maximaler Wert zu ermitteln ist, sollte in diesem Fall die Spannbreite berücksichtigt werden, die zwischen 370 cm und 390 cm bei einer Anstiegsneigung von 1 h/m liegt.

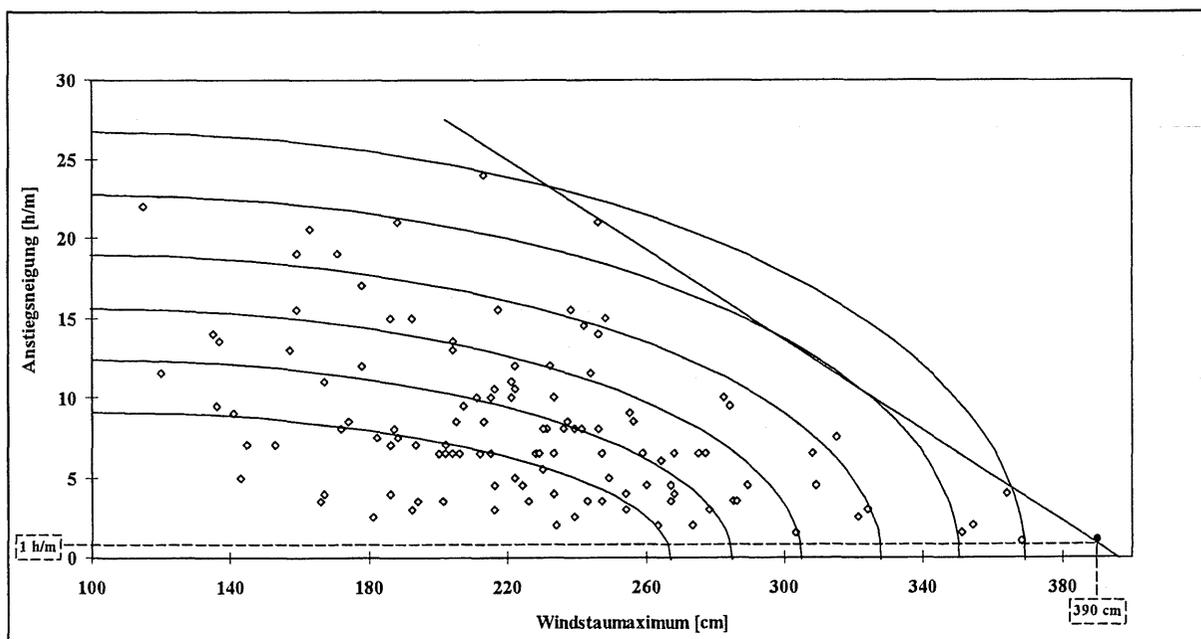


Abb. 14-1: Parameterauswertung der Windstaukurven in Wittdün seit 1914: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum

Hohe und sehr hohe Windstaumaxima werden von kurzen Anstiegsneigungen gebildet. Eine Grenzwertspanne von 370 cm bis 390 cm liegt bei einer Anstiegsneigung von 1 h/m.

14.1.2 Scheiteldauer zu Windstaumaximum

Auch die Scheiteldauer zeigt eine relativ gleichmäßige Verteilung bei der Darstellung Windstaumaxima im Verhältnis zu Scheiteldauer (Abb. 14-2). Zwischen 2 h und 4 h treten alle Windstauhöhen von 110 cm bis 370 cm auf. Für lange Dauern gibt es auch hier wieder eine Grenzhöhe von 200 cm, die noch bei einer Dauer von fast 30 h auftritt. Oberhalb dieser Höhe gilt: je kürzer die Scheiteldauern, desto höher kann ein Windstaumaximum sein. Ebenso wie in Norderney und Helgoland treten aber die höchsten Windstaumaxima nicht bei ganz kurzen Scheiteldauern auf, sondern bei der häufigsten Dauer zwischen 3 h und 5 h.

Es läßt sich auch hier ein Grenzwert ermitteln, welcher bei Berechnung einer Einhüllenden bei 370 cm einen Wert von 3 h aufweist und bei 390 cm etwa einen von 2,5 h.

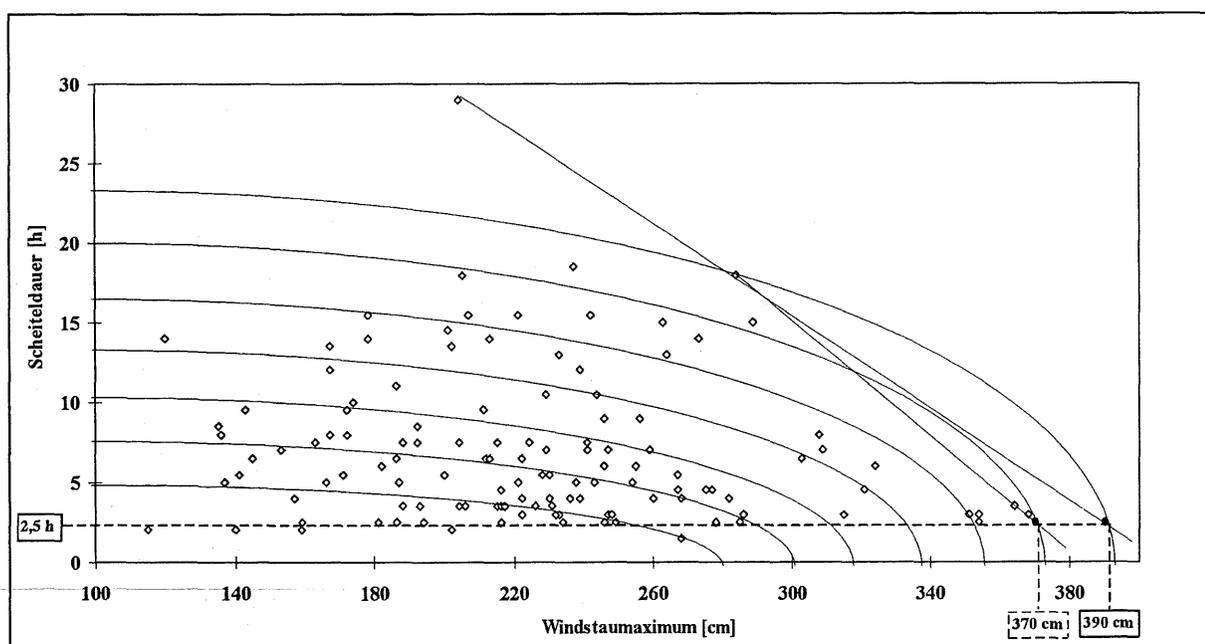


Abb. 14-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Wittdün seit 1914: Scheiteldauer zu Windstaumaximum

Je kürzer die Scheiteldauer desto höher wird das Windstaumaximum. Höchste Windstaumaxima treten bei 2,5 h bis 3 h auf.

14.1.3 Abfallneigung zu Windstaumaximum

Auch bei der Abfallneigung zeigt sich eine große Streubreite (Abb. 14-3). Der Bereich größter Häufigkeit liegt zwischen 5 h/m und 12 h/m bei einer Windstauhöhe zwischen 180 cm und 290 cm. Nahezu alle Windstaumaxima treten bei einer Abfallgeschwindigkeit von 7 h/m auf.

Die Abhängigkeiten der Windstaumaxima von der Abfallneigung stellen sich wiederum so dar, daß bei den größten Abfallneigungen bis zu 27 h/m Windstaumaxima von höchstens 200 cm

auftreten. Von dieser Höhe an gilt auch hier die Aussage: je kürzer der Abfall, desto höher das Windstaumaximum. Ebenso wie bei allen anderen Pegeln gilt dies nicht bis ins Unendliche. Offensichtlich gehört zum kurzen Anstieg und kurzen Scheitel auch hier ein längerer Abfall, der nach den bisherigen Werten um 7 h/m liegt.

Legt man den Grenzwert 390 cm fest, ergibt sich bei linearer Verbindung eine Abfallneigung von 5,5 h/m. Auch hier ist es jedoch sinnvoller, die Gruppierung an hohen Windstaumaxima um 7 h/m zu berücksichtigen. Für eine maximal mögliche Windstaukurve sollte deshalb der Wert 7 h/m zugrundegelegt werden.

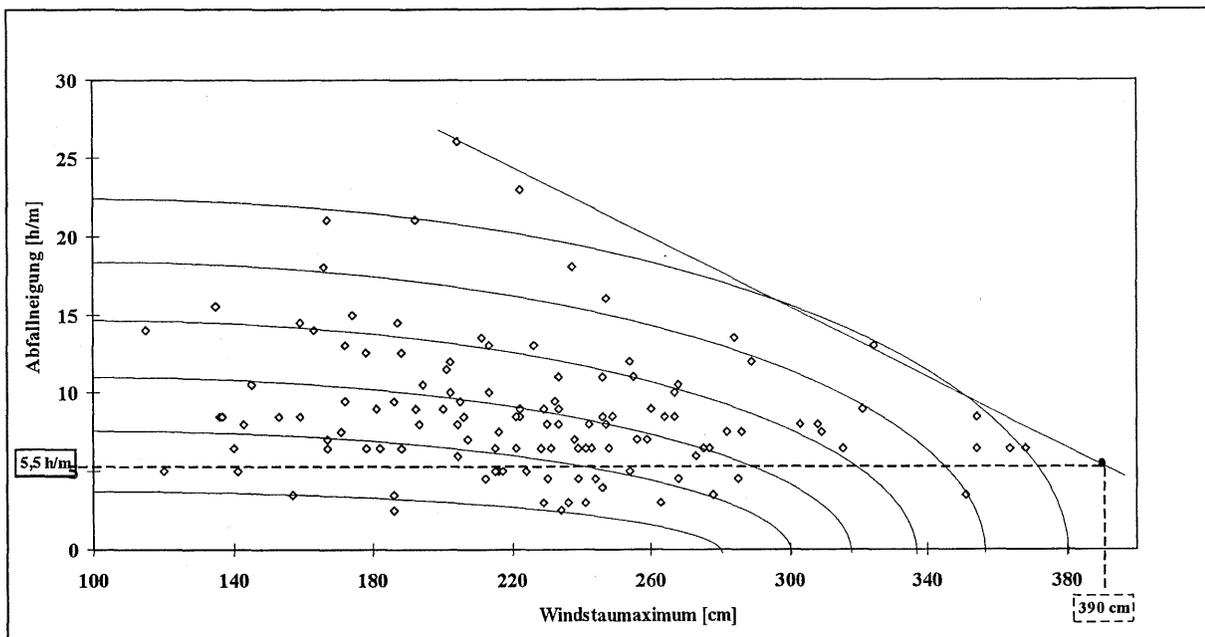


Abb. 14-3: Parameterevaluation der Windstaukurven in Wittdün seit 1914: Abfallneigung zu Windstaumaximum

Es ist kein direkter Zusammenhang zwischen Abfallkennzahl und Windstaumaximum zu erkennen. Sehr hohe Windstaumaxima werden bei einer Abfallkennzahl von 7 h erreicht.

14.2 Entwicklung der Parameter

Die Entwicklung der Parameter in den letzten 80 Jahren werden mit einem 10jährig übergreifenden Mittel berechnet, um die generelle Entwicklung besser erkennen zu können.

14.2.1 Der Anstieg

Für Wittdün läßt sich für den Zeitraum 1914 bis 1995 tendenziell eine deutliche Verkürzung der Anstiegsneigung von 8,5 h/m auf 7,5 h/m berechnen (Abb.14-4). Es liegt aber eine relativ große Spannbreite vor, die in den sechziger Jahren ihren Höhepunkt erreicht, sich aber in den letzten Jahren auf niedrigerem Niveau einpendelt. Die große Spannbreite läßt die Annahme zu, daß eine Verlängerung der Anstiegsneigung in den nächsten Jahren möglich ist.

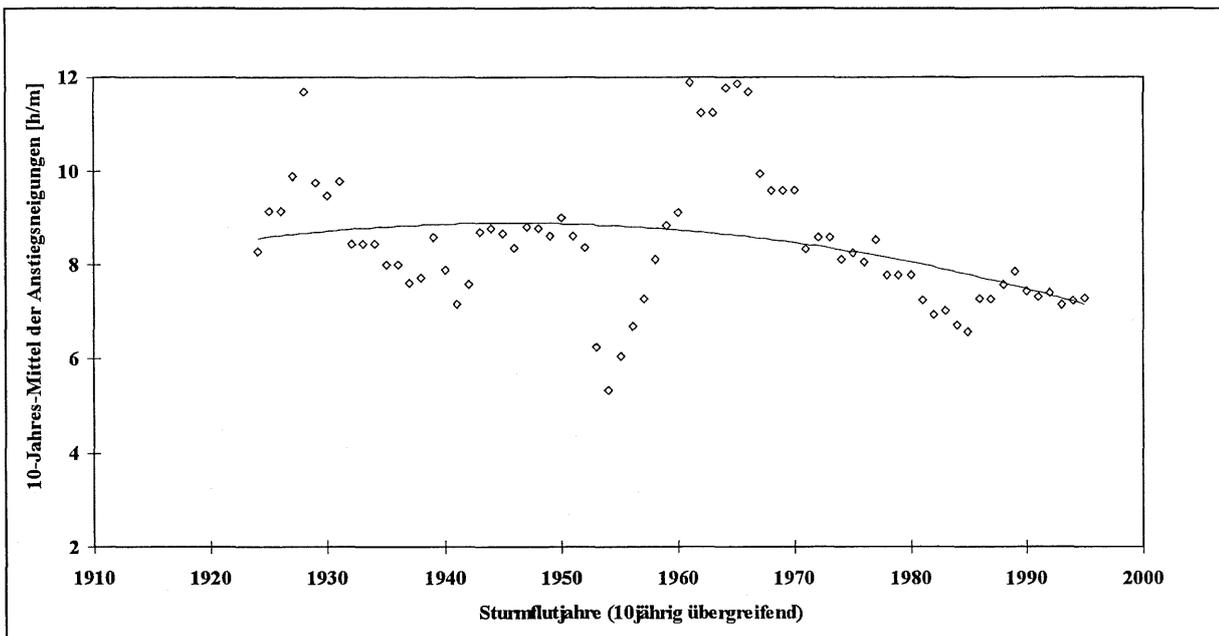


Abb. 14-4: Entwicklung der Anstiegsneigung in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)

Für Wittdün gilt ebenso wie für Cuxhaven, daß kürzere Anstiegsneigungen höhere Windstau maxima produzieren. Das bedeutet, daß durch die allgemeine Verkürzung der Anstiegsneigung das Risiko zu sehr hohen Scheiteln wächst. Da aber eine Neigung von 7,5 h/m nicht zu Extremwerten führt, hat diese Tendenz keine Auswirkungen auf ein erhöhtes Risiko des Eintretens eines maximalen Windstauwertes von 370 cm bis 390 cm.

Die Anstiegsneigung verkürzt sich insgesamt deutlich um 1 h/m. Da aber eine Anstiegsneigung von 7,5 h/m nicht zu Extremwerten führt, hat diese Tendenz keine Auswirkungen auf ein erhöhtes Risiko des Eintretens eines sehr hohen Windstauwertes.

14.2.2 Die Scheiteldauer

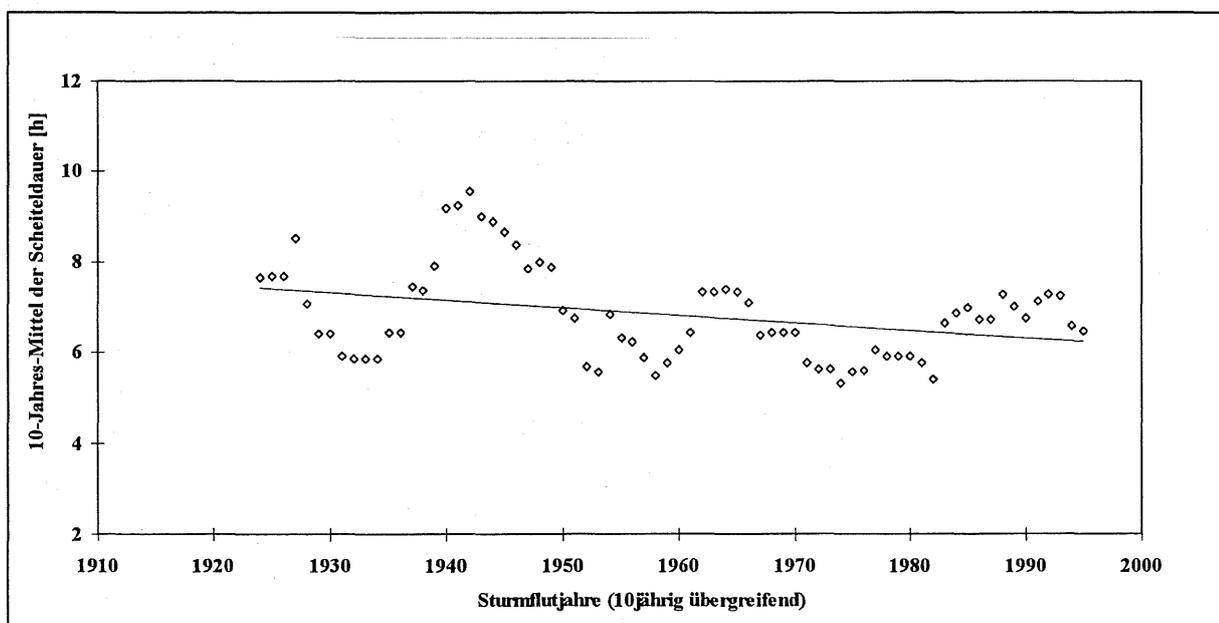


Abb. 14-5: Entwicklung der Scheiteldauer in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)

Die Scheiteldauer weist ebenso wie die Anstiegsneigung eine deutliche Verkürzung auf (Abb. 14-5). Sie nimmt von 7,2 h auf 6,2 h ab.

Hohe bis sehr hohe Windstauwerte werden in Wittdün bei einer mittleren Dauer, zwischen 3 h und 5 h, erreicht (vgl. 14.1.2). Eine Verkürzung im mittleren Bereich der Scheiteldauer bedeutet also in der Tendenz die erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit eines sehr hohen Windstauwertes. Allerdings wird bei einer Scheiteldauer von 6,2 h kein Maximalwert des Windstaus erreicht. Dagegen sind bei 6,2 h nahezu alle anderen Windstauhöhen zu finden, so daß eine Tendenz in Richtung größerer Unberechenbarkeit der Höhe des Windstaumaximums im Hinblick auf die Scheiteldauer vorhanden ist.

Die Scheiteldauer zeigt in ihrer Entwicklung eine deutliche Verkürzung. Eine Reduzierung auf rund 6 h führt jedoch nicht zu einem erhöhten Risiko des Eintritts eines sehr hohen Windstaumaximums.

14.2.3 Die Windstauscheitelhöhe

Die maximale Windstauscheitelhöhe in Wittdün zeigt im 10jährig übergreifenden Mittel einen deutlichen Anstieg von rund 20 cm (Abb. 14-6). Werden sämtliche Windstaumaxima pro Jahr betrachtet (Abb. 14-7), bestätigt sich dieser Trend (polynomisch 2. Grades), wobei hier keine Veränderung der Spannbreite vorliegt, die ja bei der 10jährig übergreifenden Mittelwertbildung den Anstieg eliminieren würde. Vielmehr erhöhen sich tendenziell die niedrigsten Windstauwerte, so daß sich der Trend weniger durch den Anstieg der höchsten Werte errechnet (von 354 cm in den zwanziger Jahren auf 364 cm in den neunziger Jahren), als vielmehr durch die Erhöhung der niedrigen Windstaumaxima.

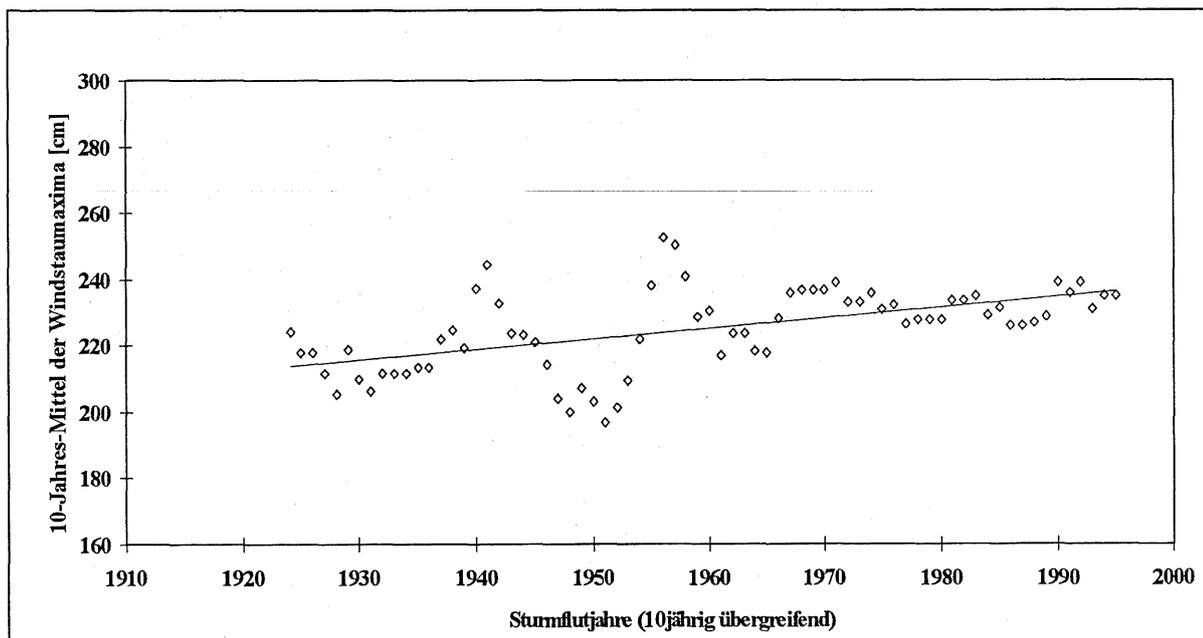


Abb. 14-6: Entwicklung des Windstaumaximums in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)

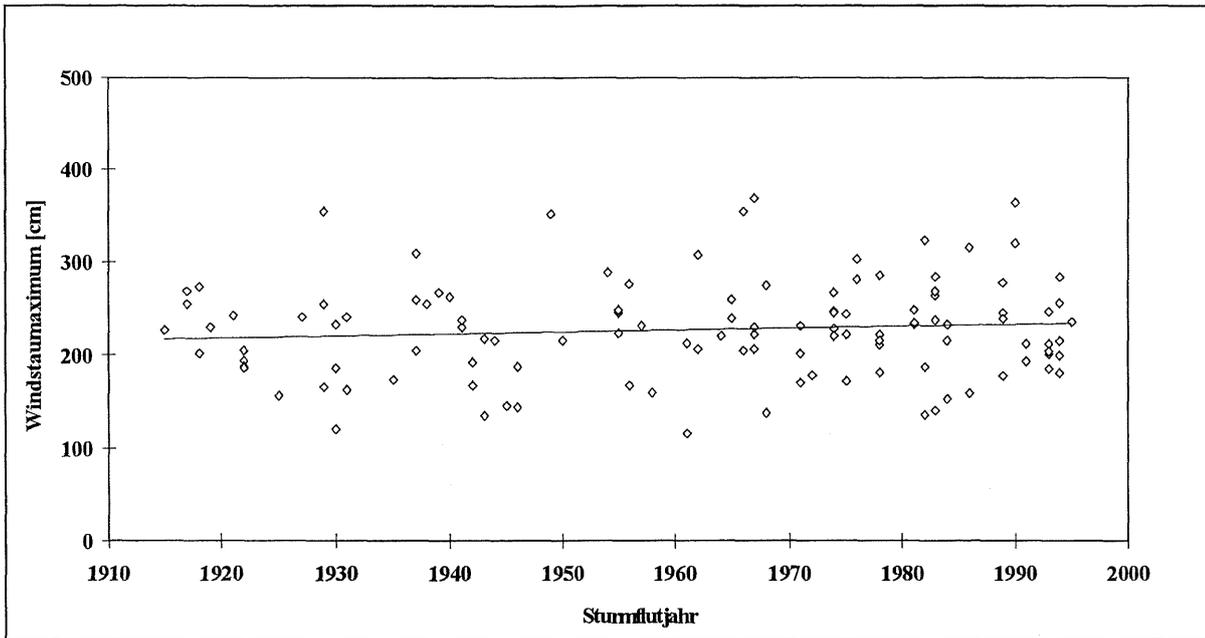


Abb. 14-7: Entwicklung der Windstaumaxima in Wittdün seit 1914 (unabhängig von der Tidephase)

Werden die höchsten Windstaumaxima pro Jahr im Verlauf der letzten fast einhundert Jahre untersucht (Abb. 14-8), so verstärkt sich o.g. Trend deutlich, was wiederum mit der besagten Erhöhung der niedrigen Windstaumaxima zu erklären ist. Bei den höchsten Windstaumaxima pro Jahr liegt ein deutlicher, kontinuierlicher Anstieg von nahezu 60 cm seit 1916 vor. Werden die Windstauscheitel getrennt nach Tidehoch und -niedrigwasser in ihrer Entwicklung betrachtet, so kann bei beiden kein Anstieg festgestellt werden.

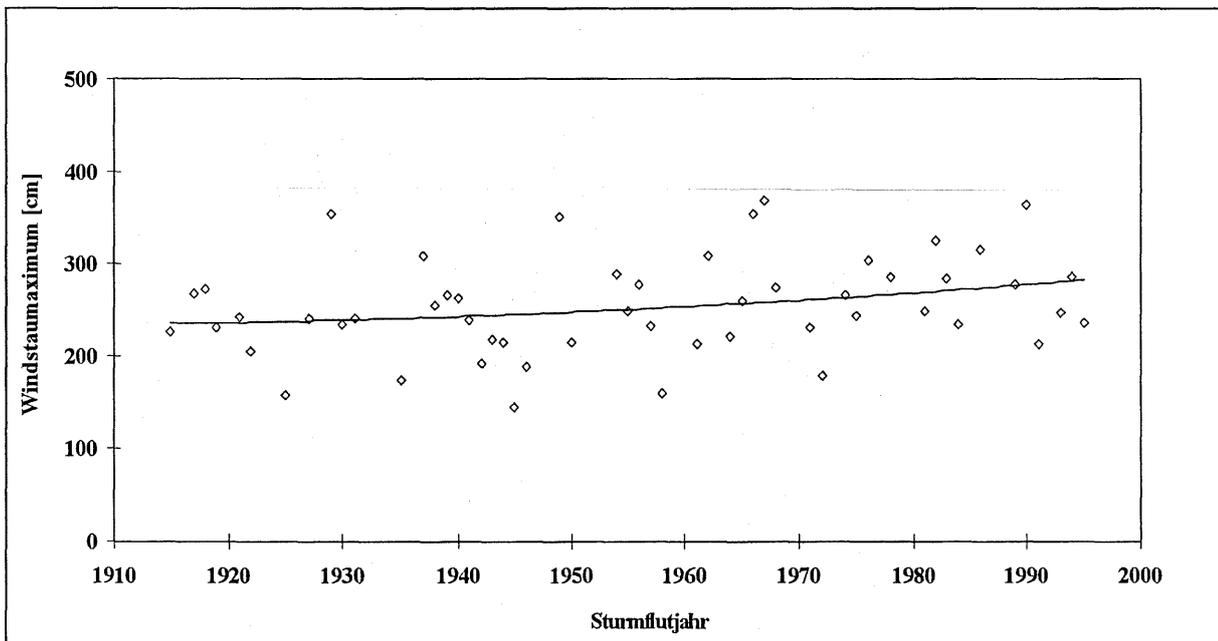


Abb. 14-8: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Wittdün seit 1914 (unabhängig von der Tidephase)

14.2.4 Der Abfall

Die Neigung im Abfall der Windstaukurve zeigt in ihrer Entwicklung eine leichte Zunahme in Richtung Verlängerung des Abfalls, der nicht signifikant ist (Abb. 14-9).

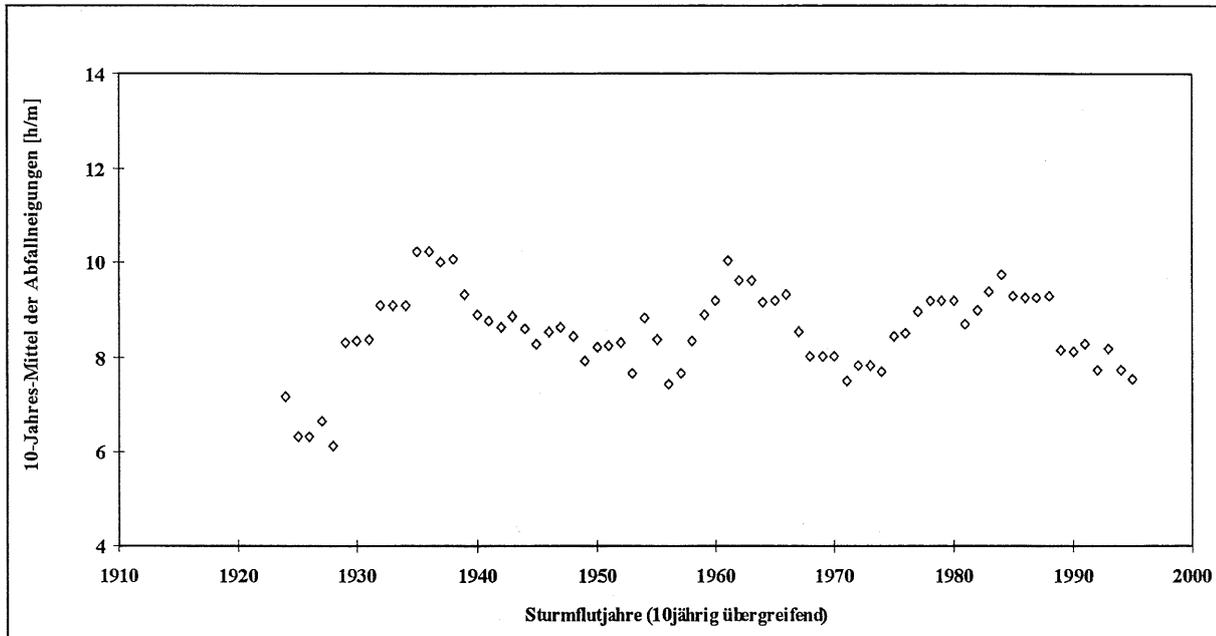


Abb. 14-9: Entwicklung der Abfallneigung in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)

14.3 Auswirkungen der Parameter auf die Sturmflutscheitelhöhe

Werden die 10 höchsten Sturmflutscheitel in Wittdün herausgegriffen, so zeigt sich, daß vier von ihnen von einem kurzen Anstieg gebildet werden, drei weitere von einem kurzen Anstieg im Rahmen von 2 Scheiteln und nur vier von einem langen Anstieg. Die Scheitelhöhe der 10 höchsten Sturmfluten liegt zwischen 861 cm PN (23.01.1993) und 914 cm PN (16.02.1962). Im Gegensatz zu Cuxhaven ist hier die höchste Sturmflut jene von 16.02.1962 und wird von einem langen Anstieg gebildet. Dieser liegt mit einer Neigung von 6,5 h/m, ebenso wie in Cuxhaven, im Grenzbereich zu kurz und befindet sich mit einem Windstaumaximum von 308 cm im Rahmen der Korrelation: je höher das Windstaumaximum, desto kürzer die Anstiegsneigung. Diese Sturmflut hat mit einem Windstaumaximum von 308 cm noch nicht das maximal erreichbare Windstau- und damit auch nicht das Scheitelmaximum. Die nachfolgenden, niedrigeren Sturmfluten werden von kurzen Anstiegen gebildet. Ebenso wie die maximal mögliche Windstaukurve, die von einem kurzen Anstieg, einem kurzen Scheitel und einem langen Abfall gebildet wird, benötigt eine Sturmflut zum Erreichen eines sehr hohen Scheitels mindestens eine lange Komponente. Diese wurde bisher häufig, wie bei der maximal möglichen Windstaukurve, von einem langen Abfall gebildet, seltener ergänzt durch eine lange Dauer. Im Extremfall wird die lange Komponente sogar durch zwei Windstauscheitel in einer langen Windstaukurve gebildet. Es ist demzufolge davon auszugehen, daß die maximal mögliche Windstaukurve gleichzusetzen ist mit der Windstaukurve, die bei einem maximalen Sturmflutscheitel auftritt.

In Wittdün liegt ein eindeutiges Peak der Sturmflutanzahl um T_{nw} vor. Die 10 höchsten Sturmfluten zeigen aber eine deutlich halbierte Verteilung, d.h. 50 % traten 1 h vor T_{nw} und

50 % 1 h vor Thw auf, so daß sich bestätigt, daß die maximal mögliche Windstaukurve auch jene ist, die ihr Maximum um Thw haben kann und eine maximale Sturmflut entstehen läßt.

Die 10 höchsten Sturmfluten wurden von kurzen bis mittellangen Anstiegen gebildet. Damit die hohen Windstaumaxima zu schweren bis sehr schweren Sturmfluten führen können, muß mindestens eine lange Komponente enthalten sein. Diese wird in der Regel von einem langen Abfall gebildet und seltener von einer langen Scheiteldauer ergänzt.

14.4 Veränderung des Charakters der Windstaukurven in den letzten 90 Jahren in Wittdün

Auch für Wittdün wird zur Erfassung der Änderung des Charakters der Windstaukurve eine mittlere Tidekurve für die erste Hälfte und eine weitere für das Ende des 20. Jahrhunderts errechnet.

Bei der Berechnung des mittleren maximalen Windstauwertes zeigen sich auch in Wittdün große Differenzen (s.o.). Im Gegensatz zu Cuxhaven schwankt hier aber nicht der Ausgangswert (mit 220 cm - 230 cm), sondern vielmehr der Wert für 1995, der je nach den zugrunde liegenden Maxima und Regressionsgeraden zwischen 240 cm und 280 cm variiert. Da auch bei der Berechnung des 10jährig übergreifenden Mittels (der maximal möglichen Windstaukurve) nur ein Anstieg von 20 cm ermittelt wurde und bei Auswahl des höchsten Wertes pro Jahr der Anstieg je nach Berechnungsmethode zwischen 20 cm und 60 cm schwankt, wird ein mittlerer Anstieg von 30 cm, also ein Windstaumaximum von 260 cm gewählt.

Anhand der gewählten Werte und der Verteilung der Windstaumaxima zur Tidephase ist ablesbar, daß die dargestellten Kurven ihr Windstaumaximum um Tideniedrigwasser hatten.

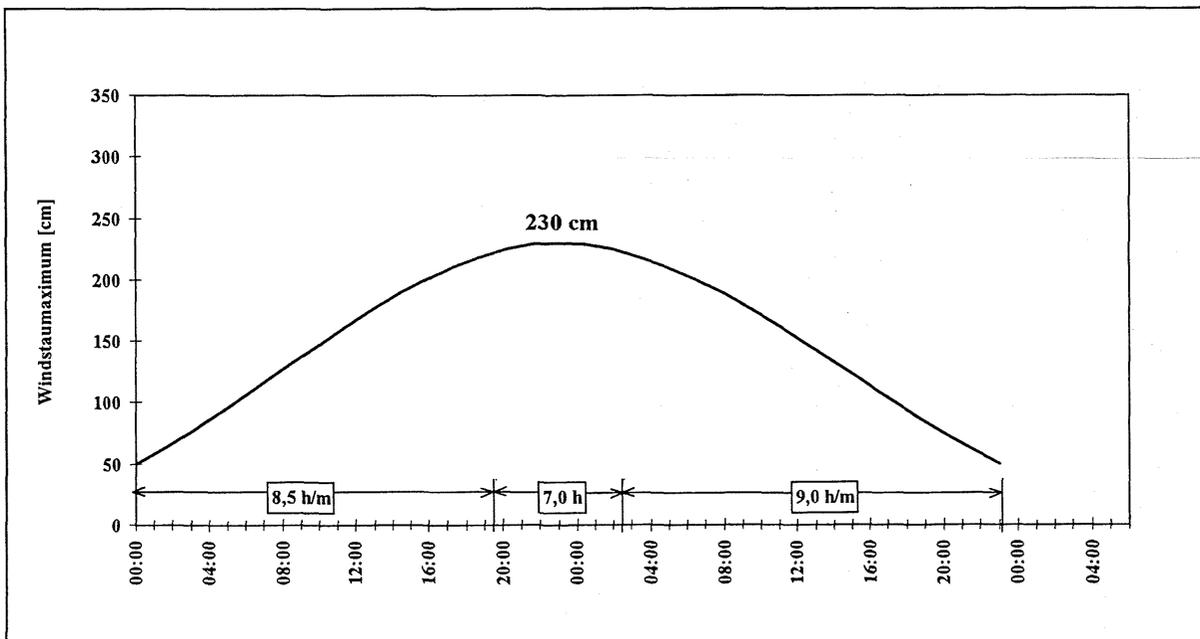


Abb. 14-10: Mittlere Windstaukurve in Wittdün um 1910

Der Vergleich der beiden Windstaukurven (Abb. 14-10 u. 14-11) zeigt deutlich, daß sich in Wittdün die Windstaukurven tendenziell verkürzt haben. Da die Verkürzung im Anstieg liegt,

sind in Wittdün höhere Windstau maxima zu erwarten. Ebenso verkürzt sich der Scheitelpunkt, während der Abfall gleich bleibt. Demzufolge zeigt Wittdün eine Tendenz zu höheren Scheiteln.

Die mittlere Windstaukurve in Wittdün ist deutlich kürzer geworden. Da die Verkürzung vor allem im Anstieg liegt, verursacht sie höhere Scheitel, wirkt sich auf die Sturmflutlänge aber nur geringfügig aus.

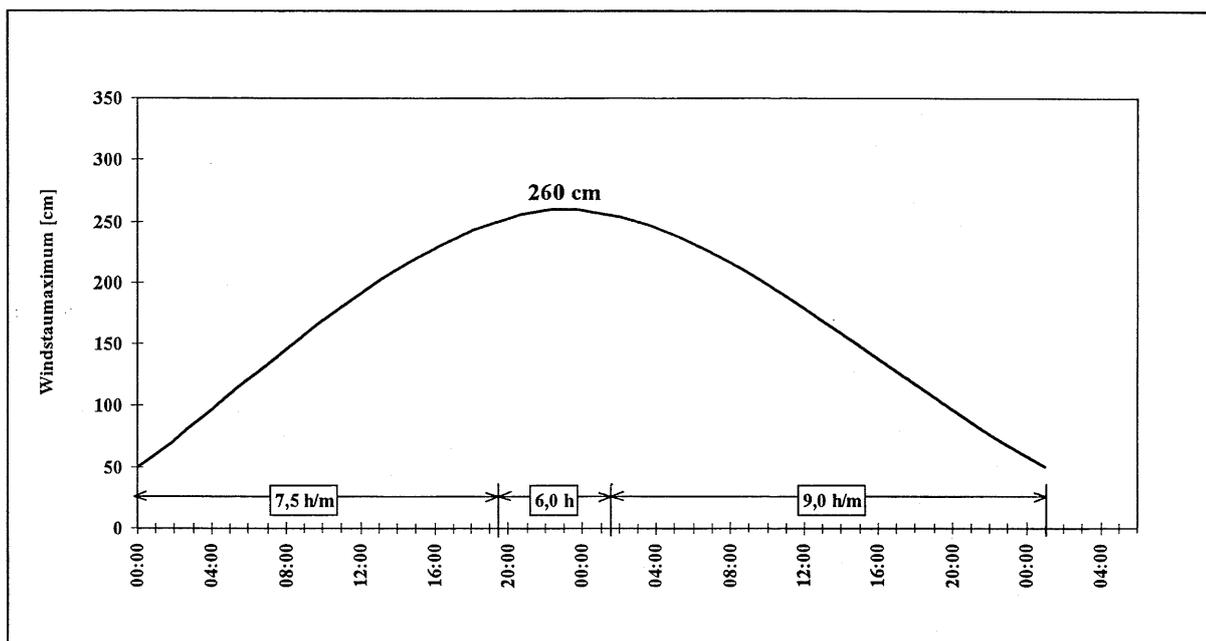


Abb. 14-11: Mittlere Windstaukurve in Wittdün um 2000

14.5 Die maximale Windstaukurve in Wittdün

Werden für Wittdün alle Parameter ausgewertet, so kann eine Windstaukurve unter den derzeitigen Klimabedingungen nicht höher als 390 cm werden, bei einem Anstieg von 1 h/m, 2,5 h Scheiteldauer und 7 h/m Abfallneigung (Abb. 14-12).

Werden zur Kontrolle des maximalen Windstauwertes die Berechnungen der Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstau maxima, getrennt nach Eintreten um Niedrig- und Hochwasser, hinzugezogen, wird deutlich, daß der Wert 390 cm für Wittdün sehr hoch ist und die oben genannte Spanne von 370 cm bis 390 cm bereits den Rahmen eines sehr hohen Windstauwertes angibt. Für die Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1:200 Jahre kann um Hochwasser ein Wert von 310 cm, um Niedrigwasser von 380 cm angegeben werden (SIEFERT, 1998). Das bedeutet, daß die berechnete maximal mögliche Windstaukurve nur unter optimalen Bedingungen auftreten kann und nicht gleichzusetzen ist mit dem zu erreichenden Hochwasserwert, der unterhalb dieses Wertes bei etwa 350 cm über MThw bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1:200 Jahren anzusiedeln ist.

Werden auch hier zur Ergänzung die Ergebnisse von OUMERACI und KORTHAUS (1998) herangezogen, so werden bei 99.0 für die Windstau maxima bei Thw über Gumbel 375 cm, Mod-Rayleigh 380 cm und Weibull-3 350 cm berechnet, bei Tnw über Gumbel 420 cm und Weibull-3 ca. 380 cm. Diese Werte entsprechen dem über die Korrelation ermittelten maximalen Windstauwert und lassen den Schluß zu, daß die maximal mögliche Windstaukurve

von Wittdün ihr Windstaumaximum sowohl um Thw als auch um Tnw erreichen kann und somit, wie oben beschrieben, auch als Kurve für eine maximale Scheitelhöhe gilt.

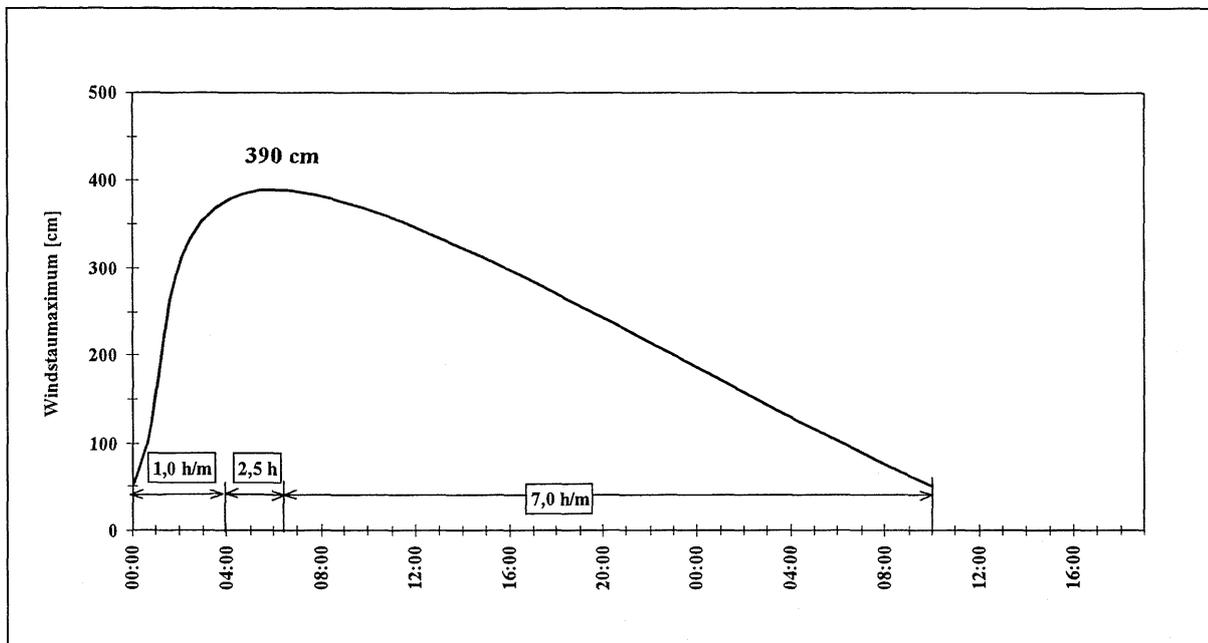


Abb. 14-12: Maximale Windstaukurve für Wittdün

14.6 Interpretation der Parameter hinsichtlich der Auswirkung der Windentwicklung auf die Sturmfluten für den Pegel Wittdün

1. Die Anstiegsneigung verkürzt sich. Da in Wittdün kurze Anstiege hohe Scheitel produzieren, steigt das Risiko zu sehr hohen Scheiteln an. Da aber 7,5 h/m Neigung nicht zu Extremwerten führt, hat diese Tendenz keine Auswirkungen auf ein erhöhtes Risiko des Eintretens eines maximalen Windstauwertes zwischen 370 cm und 390 cm. Die Tendenz muß aber beachtet und im Gesamtzusammenhang berücksichtigt werden (s.u.).
2. Die Windstau maxima zeigen einen deutlichen Anstieg in den letzten 100 Jahren, der - bei Berechnung eines Trends durch das 10jährig übergreifende Mittel sämtlicher Windstauscheitel - bei rund 20 cm liegt, hingegen bei knapp 60 cm bei Berechnung des Trends durch die höchsten Windstau maxima pro Jahr. In den letzten Jahren verkleinern sich die Windstau maxima wieder. Ob dies ein Absinken innerhalb eines rhythmischen Anstiegs ist oder ein Ende des positiven Trends, ist zur Zeit nicht erkennbar.
3. Die Scheiteldauer verkürzt sich auf 6,2 h. Sehr hohe Windstauwerte werden in Wittdün nicht bei sehr kurzer Dauer erreicht, sondern bei 3 h bis 5 h. Eine Verkürzung auf gut 6 h bedeutet also kein erhöhtes Risiko in Richtung für das Eintreten von sehr hohen Windstauwerten.
4. Die Abfallneigung zeigt keinerlei Tendenz. Die mittlere Abfallneigung liegt bei 9 h/m, eine sehr hohe Windstaukurve wird einen Abfall von 7 h/m erhalten. Infolgedessen liegt kein Trend bezüglich eines erhöhten Risikos in Wittdün vor.

15 Der regionale Vergleich der Windstaukurven

15.1 Die Windstaukurven um 1900 und 2000 im regionalen Vergleich

Grundsätzlich können die Windstaukurven der Pegel Norderney, Helgoland, Cuxhaven und Wittdün verglichen werden in:

- ihrer Gesamtdauer im allgemeinen,
- der Entwicklung der Gesamtdauer im Laufe des 20. Jahrhunderts,
- den grundsätzlichen Unterschieden im Charakter von Anstieg, Scheiteldauer und Abfall,
- den Unterschieden in der Entwicklung der Parameterkennzahlen im 20. Jahrhundert und
- der Frage nach der Symmetrie der Windstaukurve.

Die Gesamtdauer 1900 gemessen an den Kennzahlen (Tab. 15-1) - nicht an der absoluten Stundenzahl, die durch die Windstauhöhe beeinflusst ist - ist in Helgoland und Wittdün wesentlich größer als an den beiden anderen Pegeln. Norderney und Cuxhaven liegen mit 14 h/m in Anstieg und Abfall um gut 3 h/m kürzer als Helgoland und Wittdün. Dagegen weist die Scheiteldauer ein recht ausgewogenes Verhältnis auf, das bei allen vier Pegeln mit 6,5 h bis 7 h in etwa gleich ist.

1900	Anstieg h/m	Scheiteldauer h	Abfall h/m	Gesamt ca. 1900
Norderney	6	7	8	14 h/m & 7 h
Cuxhaven	6,5	6,5	7,5	14 h/m & 6,5 h
Helgoland	7,5	6,5	10	17,5 h/m & 6,5 h
Wittdün	8,5	7	9	17,5 h/m & 7h

Tab. 15-1 : Die Parameterkennzahlen der einzelnen Pegel um 1900 im Vergleich

2000	Anstieg h/m	Scheiteldauer h	Abfall h/m	Gesamt ca. 2000
Norderney	7,5	7	10	17,5 h/m & 7h
Cuxhaven	6,5	5,5	9	15,5 h/m & 5,5h
Helgoland	9	6,5	11,5	20,5 h/m & 6,5 h
Wittdün	7,5	6	9	16,5 h/m & 6 h

Tab. 15-2: Die Parameterkennzahlen der einzelnen Pegel um 2000 im Vergleich

Dies trifft sowohl für die Jahrhundertwende ins 20. Jahrhundert als auch ins 21. Jahrhundert zu. Um 2000 hat sich die Anstiegs- und Abfalldauer in Helgoland noch einmal verlängert und weist damit deutlich größere Kennzahlen als die anderen Pegel auf (Tab. 15-2 und Tab. 15-3, Abb. 15-1). Zu erklären ist dies mit der Lage der Insel im „Tiefen Wasser vor dem Watt“, also mit der Topographie. Dies manifestiert sich in der geringsten Windstauscheitelhöhe. In der Entwicklung im Laufe des Jahrhunderts zeigt sich aber, daß sich die um 1900 insgesamt recht gleichmäßige Dauer der Pegel Cuxhaven und Norderney auseinanderentwickelt, Wittdün und Cuxhaven sich aber annähern. So liegt jetzt eine deutliche Abstufung vor mit der kürzesten mittleren Dauer in Cuxhaven, gefolgt von Wittdün und dann Norderney, wobei Cuxhaven und Wittdün in der Gesamtstundenzahl durch die Scheiteldauer relativ ausgeglichen sind.

Demzufolge weist Norderney den größten Anstieg in der Dauer auf, in Wittdün verkürzt sich die mittlere Dauer. Bemerkenswert ist, daß sich die absolute Dauer in Relation zur Höhe bei allen Pegeln um 2000 ausgeglichen hat mit 54,17 h (Cuxhaven), 52,5 h (Norderney), 51,6 h (Helgoland) und 48,9 h (Wittdün).

1900:2000	Anstieg h/m	Scheitel h	Abfall h/m	Gesamt 1900:2000
Norderney	+1,5	±0	+2	+3,5 & ±0
Cuxhaven	±0	-1	+1,5	+1,5 & -1
Helgoland	±1,5	±0	+1,5	+3,0 & ±0
Wittdün	-1	-1	±0	- 1,0 & -1

Tab. 15-3: Die Differenzen der Parameterkennzahlen der einzelnen Pegel 1900:2000 im Vergleich

Hierzu werden die einzelnen Parameter in ihrer Entwicklung näher analysiert. An allen drei Pegeln, die eine Verlängerung zu verzeichnen haben (Hel, Cux, Nor), hat der Abfall einen großen Anteil der Verlängerung. Nur in Norderney und Helgoland weist auch der Anstieg eine Verlängerung auf. Im Gegenzug verkürzt sich der Anstieg in Wittdün.

	Regressionskoeffizient ab 1900 (Dauer absolut)	Regressionskoeffizient ab 1900 (Dauer relativ zur Anzahl)	Regressionskoeffizient ab 1940 (Dauer absolut)	Regressionskoeffizient ab 1940 (Dauer relativ zur Anzahl)
Cuxhaven	0,2304	0,0254	0,8731	0,8803
Wittdün	0,216	0,0029	0,8714	0,1539
Norderney			0,6658	0,1837
Helgoland			0,8292	0,3331

Tab. 15-4: Berechnung des Bestimmungsmaßes des Trends für Zeiträume ab 1900 und ab 1940

Wird der differierende Untersuchungszeitraum nicht in diese Betrachtung einbezogen, so weisen entsprechend der Ergebnisse des Anstiegs der Dauer und der Kennzahlen Norderney und Helgoland die größten Regressionskoeffizienten auf, Cuxhaven und Wittdün die geringsten (Tab. 15-4.). Wird allerdings der Zeitraum berücksichtigt und somit für alle Pegel der Anstieg ab 1940 berechnet, so weisen Cuxhaven und Wittdün den größten Anstieg auf gefolgt von Helgoland und erst dann Norderney. Diese Werte - berechnet anhand der Daten zur Dauer - machen deutlich, daß der absolut größte Anstieg der Dauer in Helgoland und Norderney einzig darin begründet ist, daß die Berechnung im „Tal“ der Sturmfluten beginnt, so daß der Anstieg verstärkt in die Berechnung einfließt. Demzufolge ist davon auszugehen, daß der Anstieg der Kennzahlen und der Dauer insgesamt geringer ausfallen würde, begänne die Berechnung auch in Helgoland und Norderney um 1900. Dafür spricht, daß die Gesamtdauer der Windstaukurven sich Ende des 20. Jahrhunderts wieder angeglichen hat. Es ist also davon auszugehen, daß - absolut gesehen - auch um 1900 die Windstaukurven in etwa eine gleiche Dauer hatten. Anhand der Berechnung der Regressionsgeraden ab 1940 für alle Pegel und ab 1900 für Cuxhaven und Wittdün können Schlußfolgerungen für Norderney und Wittdün in ihrer Entwicklung seit 1900 gezogen werden: Helgoland und Norderney hatten um 1900 eine längere Windstaukurve als 1940. Diese ist insgesamt bis zum Jahre 2000 angestiegen,

allerdings in geringerer Intensität als seit 1940. Relativ verbleibt eine Abnahme der Windstaukurve in Wittdün. Die Ergebnisse der Entwicklung der mittleren Windstaukurve entsprechen der Entwicklung der Dauer.

Das Windklima weist insgesamt keine Veränderung in der Deutschen Bucht auf, außer einer leichten Zunahme der Dauer der einzelnen Sturmfluten.

Hinsichtlich der Symmetrie der Windstaukurven zeigt sich, daß Wittdün durch seine Verkürzung im Scheitel deutlich symmetrischer geworden ist, während Norderney, Helgoland und Wittdün durch den längeren Abfall unsymmetrischer geworden ist. Damit ist Wittdün jene Windstaukurve, die sich in ihrer Tendenz, sich aufzurichten, in Richtung der maximalen Windstaukurve bewegt, während alle anderen Windstaukurven sich von dem Erreichen einer maximalen Windstaukurve entfernen.

- Helgoland weist die größten Kennzahlen um 2000 auf.
- Bis auf Wittdün weisen alle Windstaukurven eine deutliche Verlängerung in der Dauer auf, die in erster Linie durch den langsameren Abfall begründet ist. In Norderney und Helgoland verlängert sich auch der Anstieg.
- Die unterschiedliche Entwicklung an den äußeren südwestlichen (Norderney) und nordwestlichen (Wittdün) Rändern des Untersuchungsgebietes, lassen den Schluß zu, daß sich das Windklima verändert haben könnte in dem Sinne, daß die Zyklonen etwas weiter südlich ziehen.
- Ausschließlich Wittdün zeigt eine Tendenz zu größerer Symmetrie der mittleren Windstaukurve.
- Anhand des Vergleiches Cuxhaven und Wittdün mit Norderney und Helgoland läßt sich die Entwicklung von Helgoland und Norderney seit 1900 interpretieren. Es ist von einem relativen und absoluten Anstieg der Dauer in Norderney auch seit 1900 auszugehen, allerdings in geringerer Intensität.

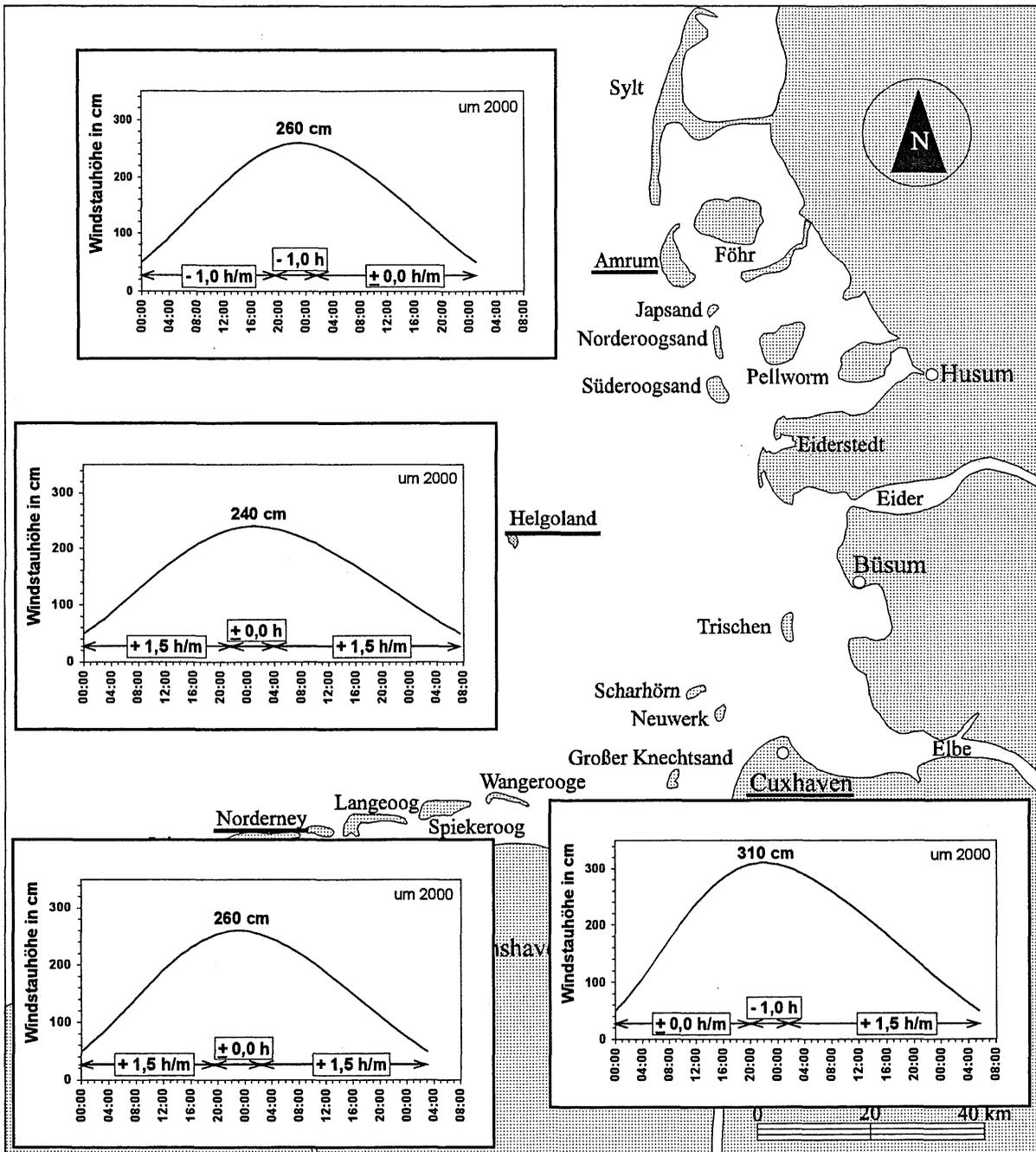


Abb. 15-1: Änderung der mittleren Windstaukurven in der Deutschen Bucht

15.2 Die maximal mögliche Windstaukurve im Vergleich

Die maximal mögliche Windstaukurve für Cuxhaven, Helgoland, Norderney und Wittdün unterscheidet sich sowohl durch die rein zeitlichen Komponenten wie der Länge der Parameter als auch durch ihre Symmetrie (Abb. 15-2). Die maximal mögliche Windstaukurve für Wittdün und Cuxhaven ist jeweils gekennzeichnet durch einen sehr kurzen Anstieg mit einer kurzen Scheiteldauer und einem langen Abfall, jene für Helgoland und Norderney durch einen mittleren Anstieg und Abfall.

Demzufolge weist die maximal mögliche Windstaukurve für Cuxhaven mit einer großen Asymmetrie (aufgrund eines sehr kurzen Anstiegs) und einem relativ langen Abfall eine große Ähnlichkeit mit der für Wittdün auf. Die Windstaukurve für Norderney richtet sich, durch den recht gleichmäßigen Verlauf, deutlich auf. Für Helgoland wird die maximal mögliche Windstaukurve mit einer insgesamt größeren Dauer noch symmetrischer.

Bei der großen Dauer und Gleichmäßigkeit der maximal möglichen Windstaukurve für Helgoland ist wiederum die Lage der Insel vor der Küste im Tiefen Wasser vor dem Watt und damit die Topographie ein entscheidender Faktor. Verblüffend ist auch die Ähnlichkeit der Windstaukurven für Wittdün und Cuxhaven, wie es schon bei den vorhergehenden Ergebnissen deutlich wurde. Möglich wäre, daß die maximal mögliche Windstaukurve in Norderney etwas steiler werden würde, wenn eine längere Datenreihe vorliegen würde.

Insgesamt können die Unterschiede in den Windstaukurven nur mit der jeweiligen Lage in der Deutschen Bucht erklärt werden. Zu beachten ist, daß diese maximal möglichen Windstaukurven für jeden Ort einzeln zu betrachten sind, da hier unter jeweils speziellen Ausgangsbedingungen ein maximaler Windstau entstehen kann. Deutlich wird, daß bei gleichen Bedingungen hohe Windstaumaxima in Cuxhaven und Wittdün zu erwarten sind und bei langsameren Verläufen hohe Windstaumaxima in Norderney und Helgoland.

Werden die Entwicklungen der Parameter im 10jährig übergreifenden Mittel betrachtet, so zeigt sich, daß für Norderney, Helgoland und Cuxhaven eine Tendenz zu längerer Dauer vorliegt, infolge von langsameren Abfällen und in Helgoland und Norderney auch langsameren Anstiegen. Demzufolge gilt für alle drei Pegel, daß ein „beschleunigtes“ Eintreten des maximalen Windstauwertes zur Zeit nicht vorliegt. Es liegt auch keine Tendenz in Richtung einer größeren Möglichkeit des Eintritts vor. Einzig in Wittdün weist die Verkürzung eine Tendenz in Richtung einer größeren Möglichkeit des Eintritts der maximalen Windstaukurve auf. Die Tendenz ist bisher aber noch zu gering und noch nicht im Bereich der sehr kurzen Anstiege.

Die maximal möglichen Windstaukurven für Cuxhaven und Wittdün haben - bedingt durch den sehr kurzen Anstieg - eine große Ähnlichkeit. Für Helgoland und Norderney ist die maximal mögliche Windstaukurve wesentlich symmetrischer mit längeren Anstiegen und Scheiteldauern.

Die Entwicklung der Parameter in Richtung längerer Dauer in Cuxhaven, Norderney und Helgoland führen dazu, daß die Möglichkeit des „beschleunigten“ Eintritts der maximal möglichen Windstaukurve zur Zeit nicht vorliegt. Nur für Wittdün weist die Verkürzung der Windstaukurve in Richtung einer etwas größeren Gefahr des Eintritts einer maximal möglichen Windstaukurve.

Für jeden Pegel ist eine eigene maximal mögliche Windstaukurve zu definieren, die aufgrund der Lage und Topographie zu verschiedenen Windklimaten auftreten kann.

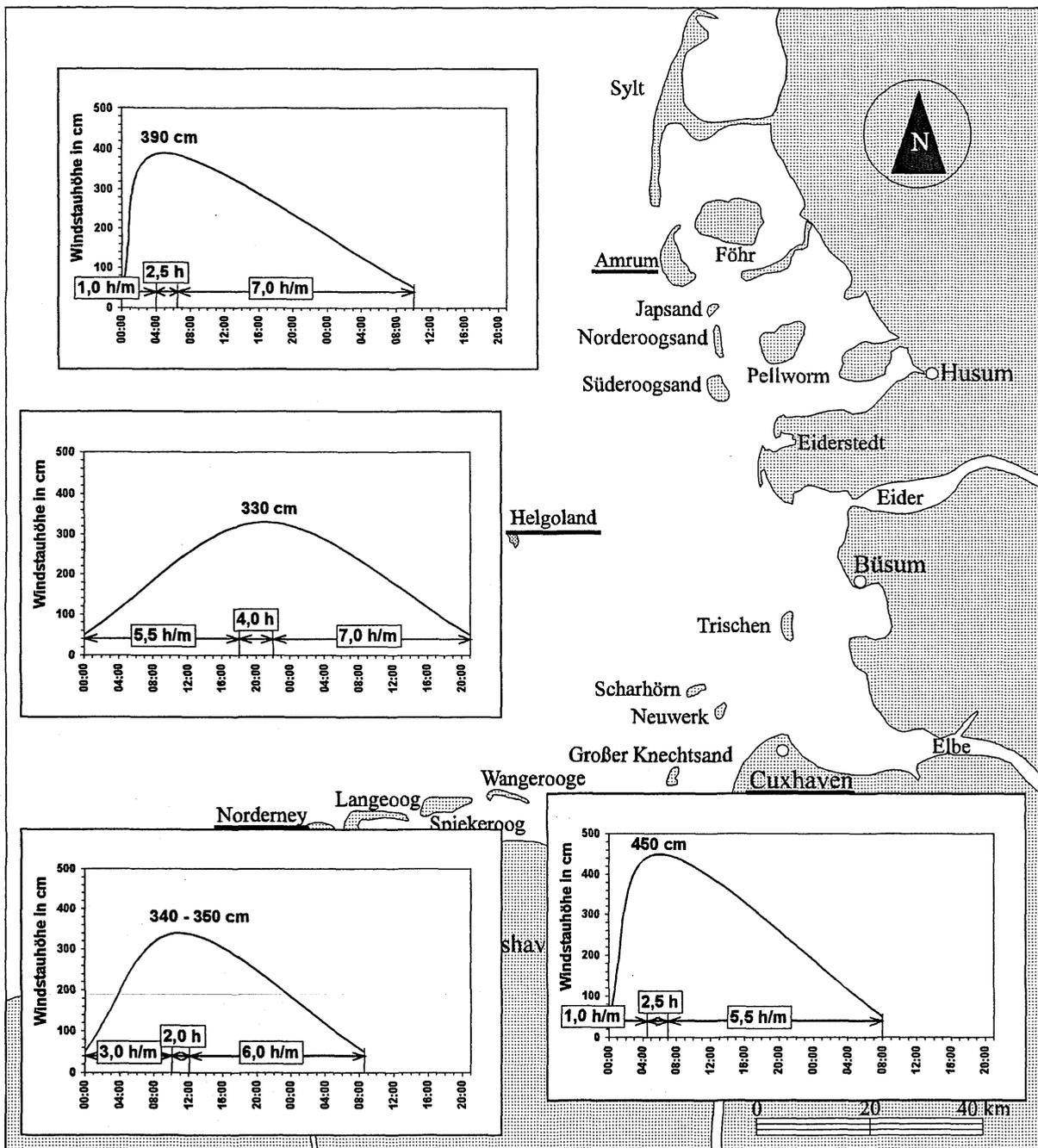


Abb. 15-2: Maximale Windstaukurven in der Deutschen Bucht

16 Die Dauer des Windstaus

Die Analyse der Dauer des Windstaus an den vier Pegeln erfolgt über die Berechnung der Dauer der einzelnen Höhenstufen in 50-cm-Schritten, die in einem Säulendiagramm aufgetragen werden. Auf diese Weise läßt sich anschaulich sowohl die Entwicklung der Gesamtdauer - anhand der 50-cm-Säule - als auch der einzelnen Höhenstufe ablesen. Zu berücksichtigen ist dabei, daß natürlich in die Dauer die Anzahl der Sturmflutscheitel (HThw) einfließt. Die Division der Dauer durch die Anzahl der Windstaukurven verdeutlicht einen mittleren Anstieg der Dauer pro Windstaukurve. Bei einem solchen Vorgehen werden Einzelereignisse sehr langer Dauer - etwa solche mit vier Sturmflutscheiteln (vier mal HThw) - relativiert. Somit muß die Betrachtung der Häufigkeiten der Windstauereignisse mit mehr als einem Scheitel bei der Interpretation berücksichtigt werden. Trotzdem gibt sie einen guten Anhalt über die relative Entwicklung der Dauer und unterstützt und bestätigt die Erkenntnisse zur mittleren Tidekurve.

16.1 Die Dauer des Windstaus in Cuxhaven

Bei Betrachtung der gesamten Dauer (Abb. 16-1), zeigt sich in Cuxhaven ein fast wellenförmiger Verlauf. Während die erste Wellenphase von 1901/10 bis 1951/60 andauert, beginnt die zweite 1951/60 und erreicht 1981/90 ihr momentanes Peak. In ihrer mittleren und in ihrer maximalen Dauer weist die zweite Wellenphase einen deutlichen Anstieg auf. In der Phase von 1901 bis 1950 wird die maximale Dauer 1921/30 mit etwas über 40 000 min erreicht. Im Zeitraum von 1960 bis 1990 wird die maximale Dauer 1981/90 mit knapp über 60 000 min erreicht.

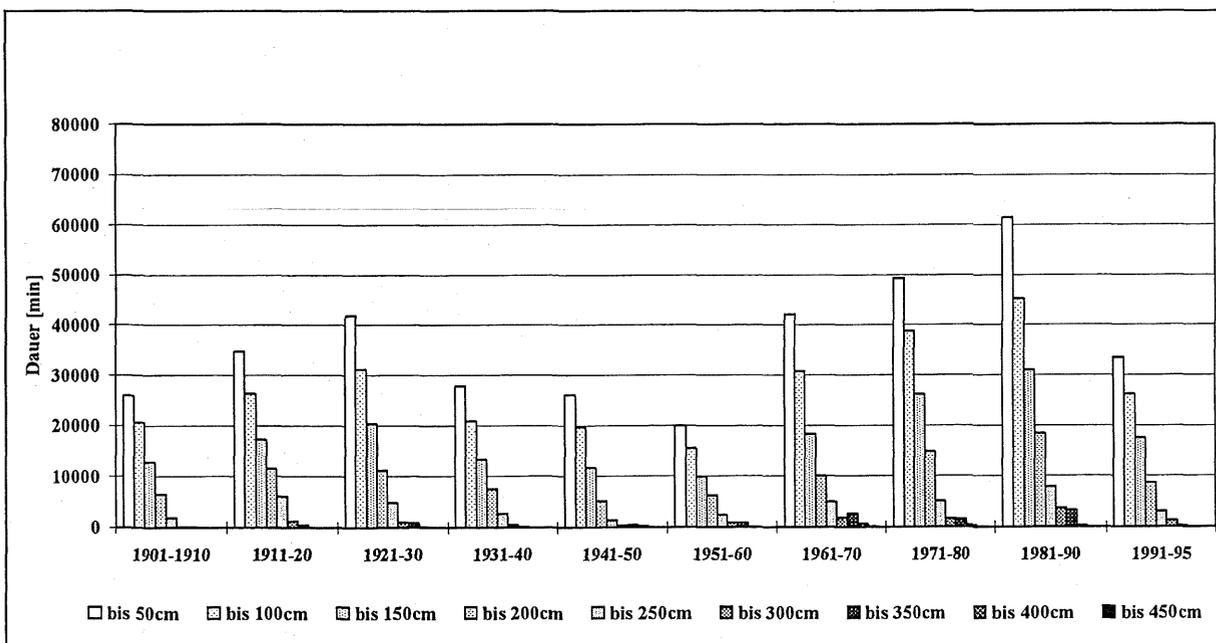


Abb. 16-1: Dauer des Windstaus in Cuxhaven seit 1901 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)

Gleichzeitig steigt auch die Dauer großer Windstauhöhen an wie die Dauer bei 300 cm, die auch 1981/90 ihr Maximum erreicht. Dies ist nicht damit zu begründen, daß hier sehr hohe Windstau maxima erreicht werden, sondern mit einem Sturmflutcharakter, der durch eine

längere Scheiteldauer in 300 cm einen „bauchigeren“ Verlauf aufweist. Die maximalen Windstauhöhen werden 1961/70 erreicht bei gleichzeitig geringerer Gesamtdauer von Windstauhöhen ≥ 250 cm. Demzufolge stehen also lange Windstauscheiteldauern nicht im direkten Zusammenhang mit dem Erreichen von größeren Windstaumaxima. Dies korreliert mit den Erkenntnissen zur maximalen Wind-staukurve.

Insgesamt hat also die Dauer der Sturmfluten in Cuxhaven zwar nicht kontinuierlich aber dennoch deutlich bis 1981/90 zugenommen. Dies korreliert zum einen mit der größeren Anzahl der Windstaukurven in den letzten Jahrzehnten, zum anderen mit dem häufigeren Auftreten von Windstaukurven, die mehr als einen definierten Sturmflutscheitel umfassen. Dies Ergebnis bestätigen auch Ergebnisse von FÜHRBÖTER und TÖPPE (1991), die eine deutliche Zunahme der Verweilzeit von Sturmfluten oberhalb von NN +2.0 m berechnet haben.

Wird die Windstaudauer in Relation zur Anzahl der Windstaukurven betrachtet, so zeigt sich ein etwas anderes Bild. Die „durchschnittliche“ Dauer liegt zwischen 2 000 und 2 500 min mit einem Anstieg seit 1951/60, der bei rund 2 h liegt. Da es sich um einen höhenunabhängigen Wert handelt, entspricht dies der Zunahme der mittleren Windstaukurve, wie es in Kap. 11 dargestellt worden ist.

Die Dauer ist in Cuxhaven absolut und relativ im Mittel angestiegen. Sie erreicht im Zeitraum 1981/90 ihr vorläufiges Maximum.

16.2 Die Dauer des Windstaus in Helgoland

In Helgoland wird die Dauer erst seit 1941 berechnet, so daß nicht in zwei Phasen eingeteilt werden kann. Der Verlauf der gesamten Dauer (Abb. 16-2) zeigt einen kontinuierlichen Anstieg schon seit 1941/50 (Cuxhaven 1951/60). Das Maximum wird auch hier 1981/90 erreicht, um dann wieder kontinuierlich abzufallen.

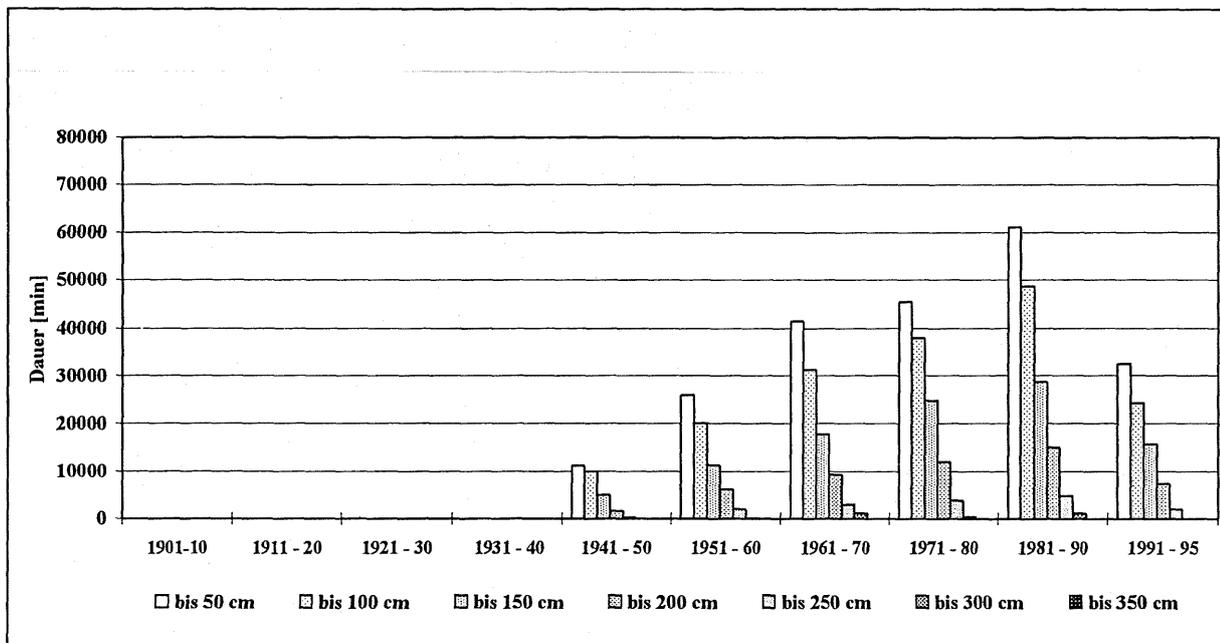


Abb. 16-2: Dauer des Windstaus in Helgoland seit 1941 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)

Die Dauer in Norderney nimmt sowohl in den Kennzahlen als auch insgesamt in Relation zur Höhe deutlich zu.

16.4 Die Dauer des Windstaus in Wittdün

In Wittdün zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der Dauer über das 20. Jahrhundert wie in Cuxhaven. Ebenso ist hier das Peak der ersten Welle 1921/30 mit gut 40 000 min zu verzeichnen. Das Minimum 1951/60 ist nicht so deutlich ausgeprägt wie in Cuxhaven, da Wittdün in dieser Phase mit 30 000 min die gleiche Dauer erreicht wie 1941/50. 1941/50 und 1951/60 werden in Wittdün größere Dauern erreicht als in Cuxhaven.

Ab 1951/60 nimmt die Dauer zu und erreicht 1981/90 ebenso wie in Cuxhaven ihr absolutes Maximum mit deutlich über 70 000 min. Auch hier ist also ein deutlicher Anstieg der Dauer zu erkennen, dessen Verlauf direkt mit Cuxhaven korreliert. Da die Anzahl der Windstaukurven in diesem Zeitraum auch ansteigt, könnte angenommen werden, daß die Zunahme der Dauer mit der größeren Anzahl im Zusammenhang steht. Während sich bei allen anderen Pegeln zeigte, daß auch bei Berechnung der Relation Dauer/Anzahl die Dauer pro Windstaukurve ansteigt, ändert sich dieses Bild in Wittdün. Hier zeigt sich nur ein minimaler, nicht signifikanter Anstieg der Dauer pro Windstaukurve seit 1910. Aufgrund der hohen relativen Dauern in den vierziger und fünfziger Jahren nimmt die relative Dauer im Trend nicht zu, obwohl absolut in Wittdün 1981/90 eine größere Gesamtdauer erreicht wird als in Cuxhaven. Die Ergebnisse zur Entwicklung der relativen Dauer entsprechen den Erkenntnissen über die Entwicklung der mittleren Windstaukurve, die in ihren Kennzahlen abnimmt und in ihrer absoluten Dauer nur minimal zunimmt.

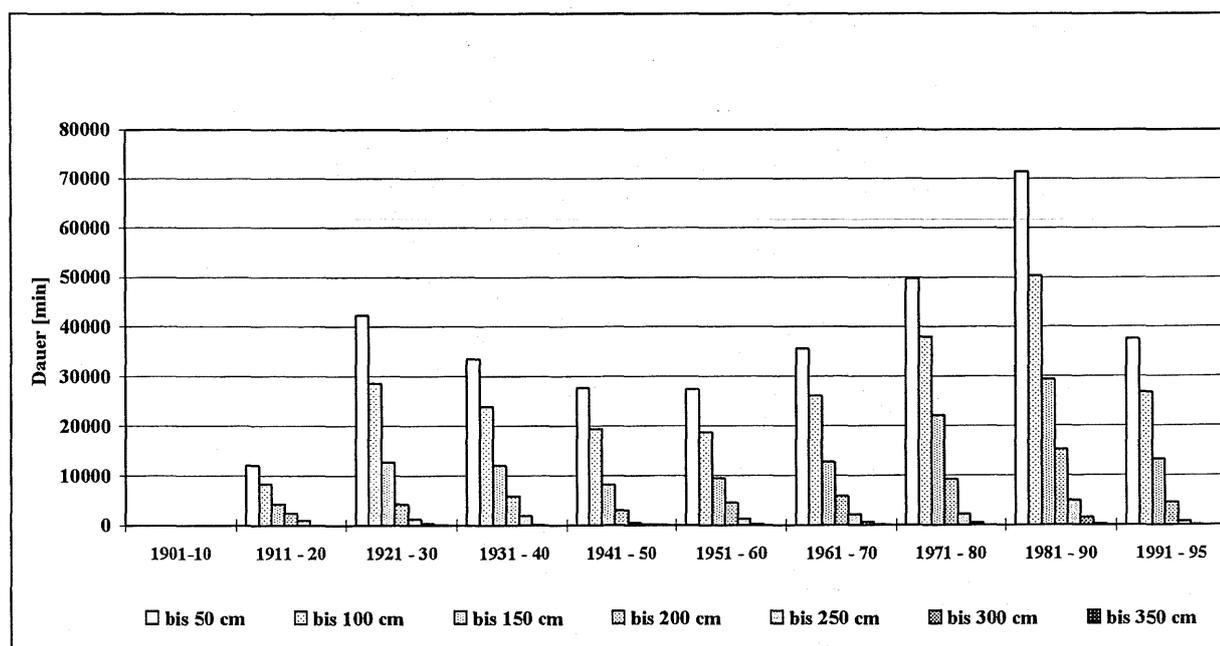


Abb. 16-4: Dauer des Windstaus in Wittdün seit 1911 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)

Die Dauer der Windstaukurven nimmt in Wittdün absolut zu, relativ jedoch ab.

16.5 Die Dauer des Windstaus in Cuxhaven, Helgoland, Norderney und Wittdün im Vergleich

An allen vier Pegeln steigt seit den fünfziger Jahren die absolute Dauer deutlich an und erreicht 1981/90 ihr Maximum. Der Anstieg der Dauer in Cuxhaven, Wittdün und Norderney kann nicht nur durch das Peak 1981/90 beschrieben werden, sondern auch durch die Niveauerhöhung insgesamt seit Beginn der fünfziger Jahre. Auch für Helgoland kann von einer grundsätzlichen Verlängerung der Dauer seit den fünfziger Jahren ausgegangen werden. Da die Datenreihe für Helgoland jedoch recht kurz ist, kann dies nicht als gesichert dargestellt werden. Es müssen die Datenreihen der anderen Pegel als Vergleich mit herangezogen werden.

Die Berechnungen des Trends erfolgten für sämtliche Pegel im Vergleich. Während Norderney und Helgoland die höchsten Anstiege zu verzeichnen haben, weisen Cuxhaven (1900) und Wittdün (1910) weitaus geringere Anstiegsraten auf. Wird dagegen auch für Cuxhaven und Wittdün der Trend ab 1940 berechnet, nimmt das Bemessungsmaß deutlich zu bis zu einer größeren Steigerung als in Norderney und Helgoland. Da 1940 bis 1950 die „Talsole“ an Häufigkeit und Dauer der Sturmfluten vorlag, muß eine solche Berechnung des Trends zu einer großen Zunahme führen. Werden die Daten ab 1900 mit herangezogen, so relativiert sich der Anstieg deutlich. Da die Ergebnisse von Norderney und Helgoland in der Größenordnung zu jenen von Cuxhaven „passen“ und gleichzeitig ein Ausgleich der mittleren Tidekurve in der absoluten Dauer zwischen allen Pegeln stattgefunden hat, der vermutlich 1900 auch zwischen allen Pegeln vorhanden war, ist davon auszugehen, daß ein Anstieg für Helgoland und Norderney seit 1900 zwar vorhanden ist aber in weitaus geringer Intensität als seit 1940.

Insgesamt weist Wittdün die größte Gesamtdauer auf, gefolgt von Cuxhaven, Helgoland und Norderney. Die Zunahme der Dauer seit 1940 ist in Helgoland am prägnantesten, gefolgt von Cuxhaven Norderney und Wittdün. Die geringe Zunahme in Wittdün erklärt sich durch die im Vergleich zu allen anderen Pegeln geringe Abnahme der Dauer in den vierziger und fünfziger Jahren. In Cuxhaven und Wittdün verringert sich die Zunahme der Dauer durch Verlängerung des Berechnungszeitraumes bis 1900. Es ist davon auszugehen, daß, bei Verlängerung des Berechnungszeitraumes, auch in Norderney und Helgoland sich der Anstieg verringern würde. Mit der Lage im Tiefen Wasser vor dem Watt ist zu erklären, daß Helgoland auf Windsituationen anders reagiert als Cuxhaven, Norderney und Wittdün. Hier wird 1971/80 das Maximum erreicht und nicht 1981/90 wie bei allen anderen Pegeln. Daß die Lage hier einen großen Einfluß hat, läßt sich auch daran erkennen, daß Helgoland zwar die geringste Windstauhöhe aber die größten Kennzahlen aufweist, d.h. auf ein Windereignis sehr viel „träger“ reagiert als alle anderen Pegel und damit eine wesentlich flachere, dafür aber längere Windstaukurve aufweist. Im Vergleich zu Cuxhaven weist Helgoland $\pm 10-20\%$ längere Dauern auf.

Für alle vier Pegel gilt, daß der Anstieg der Dauer seit 1950 in Relation zur Vergrößerung der mittleren Windstaukurve steht. Demzufolge gilt, daß die Zunahme der Dauer für alle Pegel zu erklären ist mit:

1. Zunahme der Windstaukurven, die mehr als einen Sturmflutscheitel umfassen; also Ereignisse von besonders langer Dauer.
2. Verlängerung der durchschnittlichen Dauer einer Sturmflut.
3. Leichte Zunahme der Häufigkeit der Ereignisse.

Da in Wittdün die mittlere Windstaukurve sich in ihren Kennzahlen verkürzt und damit absolut die geringste Zunahme der mittleren Windstaukurve aufweist, müssen in Wittdün Einzelereignisse besonders langer Dauer zugenommen haben.

Im Zuge einer Untersuchung der Veränderungen der Sturmfluten aufgrund einer globalen Klimaerwärmung muß der Wind und seine Entwicklung selbst betrachtet werden. Dies erfolgt, indem die Winde bei Sturmfluten hinsichtlich ihrer Gesamtdauer ≥ 14 m/s und ≥ 17 m/s analysiert werden.

Die Winddaten, wurden von Herrn SCHMIDT und Dr. BEHRENDT vom Seewetteramt Hamburg zur Verfügung gestellt. Es wurden hierzu Druckdaten des geostrophischen Windes von 6 Meßstationen zu einem Bodenwind mit Windrichtung und -geschwindigkeit umgerechnet. Dieses Verfahren, daß in Anlehnung an SCHMIDT und STORCH (1993) erfolgte, die aus einem Druckdreieck den Wind über der Nordsee ermittelten, ist mit diesen 6 Meßstationen erstmalig angewendet worden und führte zu einer relativ hohen Genauigkeit der umgerechneten Bodenwinddaten. Diese wurden mit dem Wind auf Scharhörn verglichen. Für die Zeit von 1950 bis 1995 standen Winddaten in 3 h Abständen zur Verfügung, von 1900 bis 1950 nur alle 6 h. Eine mittlere Windgeschwindigkeit und -richtung zwischen den Meßdaten wurde nicht ermittelt, da der Windverlauf zwischen den Terminen nicht linear verläuft. Mithin ist mit einem Zeitraum von nahezu 50 Jahren mit 8 Terminen pro Tag ein recht langer Beobachtungszeitraum gegeben, um genau die Windrichtung pro Sturmflutscheitel angeben zu können, für die weiteren 50 Jahre bis 1900 sind gute Näherungswerte zumindest für die stauwirksame Zeit möglich. Der Vorteil der Verwendung der Druckdaten liegt darin, daß relativ lange Meßreihen vorliegen und ihre Messungen relativ unempfindlich gegenüber Veränderungen in der Umgebung des Meßgerätes sind. „Der Luftdruck ist daher ein geeigneter näherungsweise Stellvertreter für Sturmtätigkeit, weil seine räumlichen Gradienten charakteristisch für die Windverhältnisse sind“ (STORCH/ LANGENBERG & POHLMANN, 1998:183).

Selbstverständlich gibt es auch hier weitere Vorgehensweisen. Eine der neuesten Untersuchungen hierzu sind jene von ALEXANDERSSON et al. (1998) und KAAS/ LI & SMITH (1996), die die Stürme im Nordatlantik näher analysierten. Während ALEXANDERSSON et al. (1998) die Druckdreiecke wie SCHMIDT (1993) und SCHMIDT und STORCH (1993) verwendete, rechnete KAAS/ LI & SMITH (1996) Absolutwerte von täglichen Druckmessungen. Unabhängig davon, welcher Methode die Auswertung der Druckdaten erfolgte, konnte jeweils festgestellt werden, daß für „den Raum Nordeuropas (...) sich keine systematischen Veränderungen des Sturmflutklimas in den letzten 100 Jahren [ergab]. Zwar deutete sich eine Intensivierung des Sturmklimas in den letzten drei Jahrzehnten an. Dies erscheint aber nicht ungewöhnlich im Vergleich zu den Schwankungen der Statistik in früheren Jahrzehnten“ (STORCH/ LANGENBERG & POHLMANN, 1998:183).

Eine weitere Möglichkeit, Klimaprognosen zu berechnen, ist jene über die Auswertung von Klimaexperimenten mit globalen Klimamodellen wie es z.B. BUSCH und ROTH (1998) darstellen. Auf diesen sehr großen Themenkomplex soll hier im weiteren jedoch nicht eingegangen werden.

Die projektinterne Auswertung der Daten von SCHMIDT und BEHRENDT ergaben ein ähnliches Bild. Es wurden aus den Gesamtwinddaten alle Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten ≥ 14 m/s und ≥ 17 m/s betrachtet, die aus der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$ kamen und in die Dauer von 3 h, 5 h und 10 h sowie in die Gesamtdauer unterteilt (Abb. 17-1 und 17-2).

Abb. 17-1 zeigt, daß für die Dauer der Geschwindigkeit von ≥ 14 m/s keine Tendenz zu einer längeren Dauer zu verzeichnen ist, dagegen weist die Gesamtdauer einen leichten Trend in Richtung einer geringfügig längeren Dauer auf.

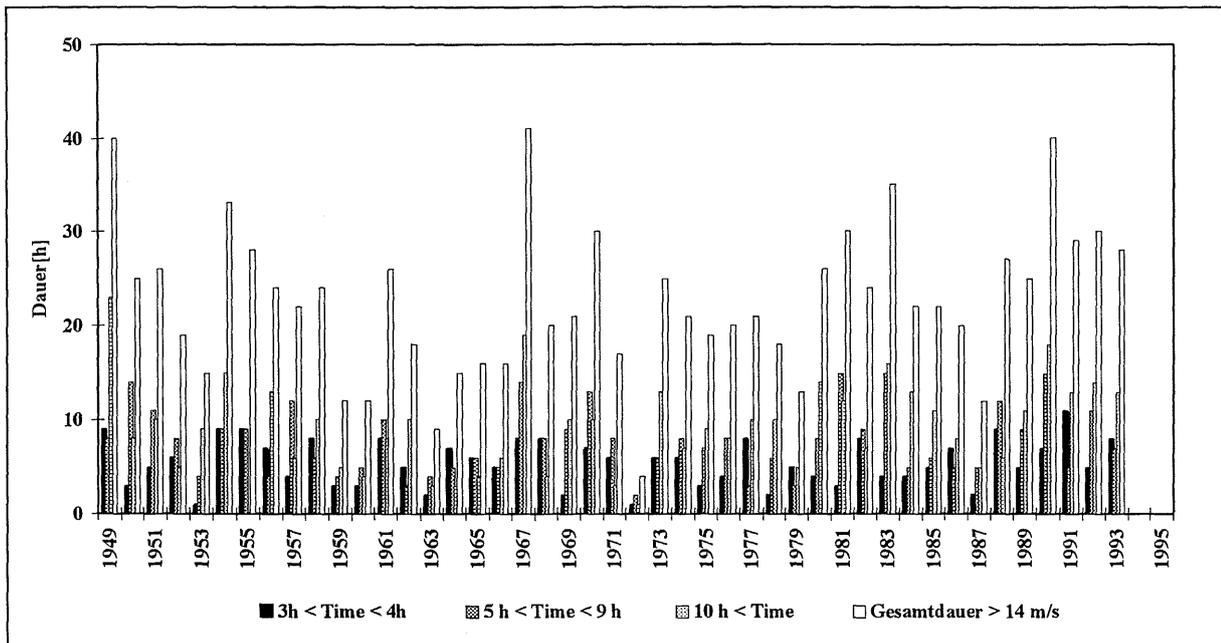


Abb. 17-1: Dauer der Windgeschwindigkeit ≥ 14 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$ in der Deutschen Bucht (1949-1993)

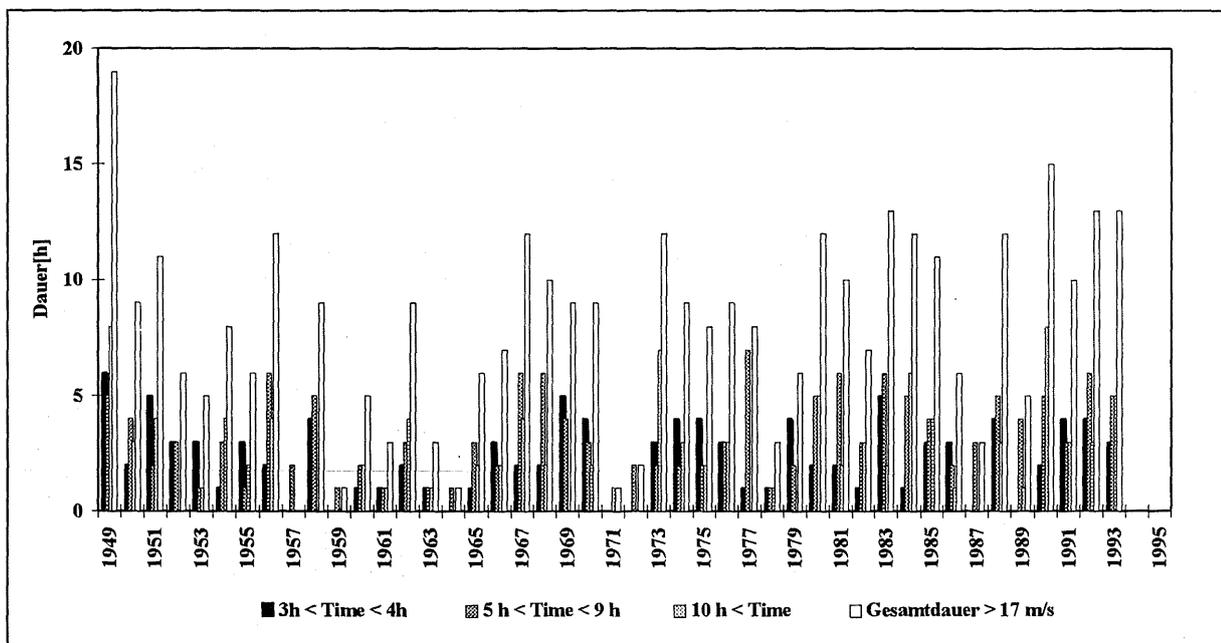


Abb. 17-2: Dauer der Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$ in der Deutschen Bucht (1949-1993)

Deutlicher wird dieser Trend bei Windgeschwindigkeiten ≥ 17 m/s. Dies korreliert eindeutig mit der allgemeinen Tendenz der Sturmfluten hin zu einer längeren Dauer. Zwar erklärt der Trend die Entwicklung bei den Sturmfluten, einer Signifikanzprüfung würde dieser leichte Trend jedoch nicht standhalten. Weiterhin liegt der Untersuchungsbeginn 1949 zum Zeitpunkt einer geringen Anzahl an Sturmfluten, so daß ein Anstieg in der Dauer nahezu zwangsläufig ist und demzufolge längere Zeiträume diese allgemeine Tendenz wieder eliminieren können. Da der Trend der Dauer bei den Sturmfluten jedoch auch über 100 Jahre eine Zunahme verzeichnet, müßte auch die Dauer der Windereignisse länger geworden sein. Die Tatsache, daß die

längere Dauer in erster Linie im langsamen Abfall begründet liegt, der durchaus unterhalb von 14 m/s fallen kann, erklärt die geringfügige Tendenz in den Abbildungen 17-1 und 17-2.

Bei der Berechnung entsteht die Problematik, daß die Dauer insgesamt größer wird, wenn die Anzahl an Einzelereignisse zunimmt. Um dies zu umgehen, wurden Ereignisse mit Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd^\circ \leq 330^\circ$ der Dauer ≥ 3 h bis ≥ 20 h eingeteilt in Dauern von 3 Stunden (synoptische Daten) (SCHMIDT und BEHRENDT, 1997, mündl. Austausch). Es zeigt sich, daß sowohl bei den Ereignissen geringer Dauer als auch bei den Ereignissen sehr langer Dauer kein Anstieg in den letzten 50 Jahren zu verzeichnen ist. Nur bei 6 h bis 9 h Dauer ist ein deutlicher Anstieg in der Häufigkeit der Ereignisse zu verzeichnen, was mit der Vergrößerung der mittleren Windstaukurve korreliert. Weiterhin steigt die Anzahl an Ereignissen mit einer Dauer von ≥ 20 h an. Dies entspricht der leichten Zunahme von Einzelereignissen besonders großer Dauer wie die der Sturmflut 187 vom 26.-28.02.1990 entspricht. Zu berücksichtigen ist aber, daß der Untersuchungszeitraum 1949 beginnt, so daß die Möglichkeit besteht, daß zu Beginn des 20. Jahrhunderts ähnliche Werte vorlagen wie zum Ende des 20. Jahrhunderts (SCHMIDT und STORCH, 1993 oder STORCH/ LANGENBERG & POHLMANN, 1998).

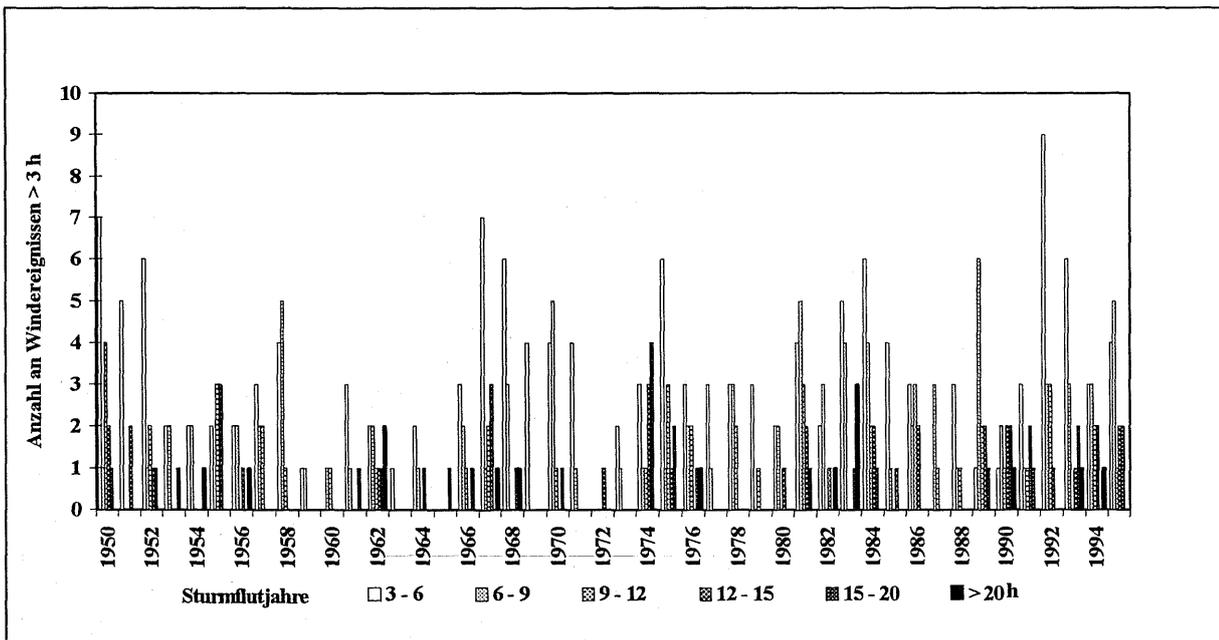


Abb. 17-3: Anzahl der Windereignisse ≥ 3 h der Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s und Windrichtung $240^\circ \leq dd^\circ \leq 330^\circ$

Auch in diesem Fall korreliert die Dauer jedoch mit den Sturmflutereignissen dieser Untersuchung, so daß ihre Entwicklung auf das gesamte Jahrhundert übertragbar ist. Trotzdem muß angemerkt werden, daß SCHMIDT (1998, Vortrag) herausgefunden hat, daß die Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte Wind- und Sturmflutereignisse nicht gleich seien und somit ein direkter Vergleich zwar erstellt, aber vorsichtig interpretiert werden muß. Weiterhin darf zu diesen Ergebnissen auch nicht unerwähnt bleiben, daß „die jährlichen Häufigkeiten geostrophischer Windrichtungen des NW-Sektors (aufländig, hochwassererhöhend, stauwirksam) und des SE-Sektors (ablandig, hochwassererniedrigend) bei gleichzeitiger geostrophischer Windgeschwindigkeit von mehr als 15 m/s noch ausgeprägtere, langperiodische Schwankungen [zeigen] und auch eine Häufung von starkem NW-Wind in den letzten Jahren (das Maximum

liegt aber früher). Wiederum ist kein Trend diagnostizierbar, weder zu- noch abnehmbar“ (SCHMIDT, 1996, Vortrag).

17.1 Entscheidende Windrichtung zum Erreichen des höchsten Sturmflutscheitels und des höchsten Windstauscheitels

Für das Entstehen einer Sturmflut ist in erster Linie der Wind verantwortlich, der über der Nordsee ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit und -dauer einen Stau produziert. Die Höhe dieses Windstaus richtet sich nach der Windgeschwindigkeit, -dauer und der Wassertiefe. Welcher Ort an der Küste durch diesen Stau von einer Sturmflut betroffen wird, richtet sich nach der Windrichtung, die den Stau an den jeweiligen Ort treibt. Demzufolge müssen die kritischen Windrichtungen für jeden Ort einzeln ermittelt werden.

Wie die vorliegenden Untersuchungen zeigen, kann der Wind für die Dauer einer Sturmflut sehr lange wehen. 24 Stunden und mehr können leicht erreicht werden. In solch langen Zeiträumen wechselt nahezu zwangsläufig die Windrichtung. Bereits HANSEN (1965) und LEPIK (1950) stellten fest, daß die stauwirksamste Windrichtung im Verlauf der ersten 14 h nach Sturmbeginn von SW auf WNW dreht und dann konstant bleibt. „Damit muß die Windrichtung, die etwa z.Zt. des Thw Scheitels auftritt, dessen Höhe zugeordnet werden“ (SIEFERT, 1972:5). Hierzu kann auch die Windrichtung in der Zeitspanne der sogenannten stauwirksamen Zeit nämlich rund 3 h vor HW berücksichtigt werden. TOMCZAK (1952) hat erstmals deshalb das Mittel der letzten 4 bis 5 h vor dem Thw als maßgebende Windrichtung definiert. Dies ist auch der Zeitraum zwischen 3 h (AUSSCHUB „KÜSTENSCHUTZWERKE“ DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU e.V. SOWIE DER HAFENBAUTECHNISCHEN GESELLSCHAFT e.V. 1981) und den von TOMCZAK (1952) oder PETERSEN (1967) genannten 4-5 h bzw. 6 h von PRÜGEL (1942).

Infolgedessen muß die Windrichtung bei Thw als die stauwirksame für einen Ort definiert werden. Hierbei sollte aber die Windrichtung der letzten 3 h mitbetrachtet werden.

17.1.1 Stauwirksame Windrichtung zum Erreichen eines Sturmflutscheitels in Cuxhaven

Erstmalige Untersuchungen der maßgebenden Windrichtung zum Erreichen eines maximalen Sturmflutscheitels in Cuxhaven erfolgten von SCHAUMANN (1857), der anhand einer recht geringen Datenbasis festhielt, daß die kritische Windrichtung für Cuxhaven WNW sei, eine weitere Untersuchung lieferte SIEFERT (1972). ANNUTSCH (1977:130) hielt fest, „daß die stauwirksamste Windrichtung bei Hochwasser für Cuxhaven bei etwa 300° liegt (...). Winde beliebiger Stärke aus NNE oder SSW haben überhaupt keine Stauwirkung.“ Die hier vorliegende Untersuchung überprüft diese Erkenntnisse und bezieht nun im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen alle Sturmfluten seit 1900 mit ein und nicht nur die schweren und sehr schweren, so daß das Spektrum der betrachteten Ereignisse größer ist und damit auch die Windrichtungen vor allem für die kleinen Sturmfluten genauer erfaßt werden können.

Abb. 17-4 zeigt die kritische Windrichtung für Cuxhaven und die maximale Sturmflutscheitelhöhe, die diese erreicht hat. Es wird deutlich, daß eine Einhüllende für Cuxhaven zu bilden ist, die unter Auslassung einiger randlicher niedriger Sturmfluten den Bereich der Windrichtungen zwischen 220° und 350° liegt. Demzufolge liegt die Windrichtung, bei der Sturmfluten in der

Nordsee entstehen bei Windrichtungen zwischen SW und N. Nördlich des einhüllenden Bogens bei 350° sind noch eine Reihe von Sturmfluten zu erkennen, so daß die nördliche Begrenzung eindeutig bei 360° festgelegt werden kann. Südliche Winde (südlicher als 230°) führten seit 1900 nur einmal zu einem Windstau von 2 m, der eine Scheitelhöhe in Cuxhaven von 800 cm PN erreichte. Dagegen führen Winde aus Nord bei knapp 360° zu Scheitelhöhen von 850 cm PN.

Für schwere und sehr schwere Sturmfluten engt sich der Bereich der kritischen Windrichtung deutlich ein. Je weiter die Winde nach Westen und Nordwesten drehen, um so höher werden die Sturmflutscheitel. Wird der Sturmflutscheitel 1825 mit einbezogen und die überlieferten Angaben zur Windrichtung, so zeigt sich, daß der Bereich der Windrichtung für sehr schwere Sturmfluten zwischen 280° und 310° liegt. Bereits bei einer Höhe von 950 cm PN erweitert sich der kritische Bereich auf 260° bis 310°, der dann systematisch mit abnehmender Höhe auf den gesamten kritischen Bereich für eine Sturmflut mit Windstau größer als 2 m auf (S) SSW bis N für Cuxhaven begrenzt wird.

Die kritische Windrichtung für sehr schwere Sturmfluten liegen für Cuxhaven bei 280° bis 310°. Sturmfluten leichter bis schwerer Art können bei 230° bis 360° auftreten. Stürme aus S führen höchstens zu kleinen Sturmfluten. Dieser Fall ist in den letzten 100 Jahren erst einmal aufgetreten.

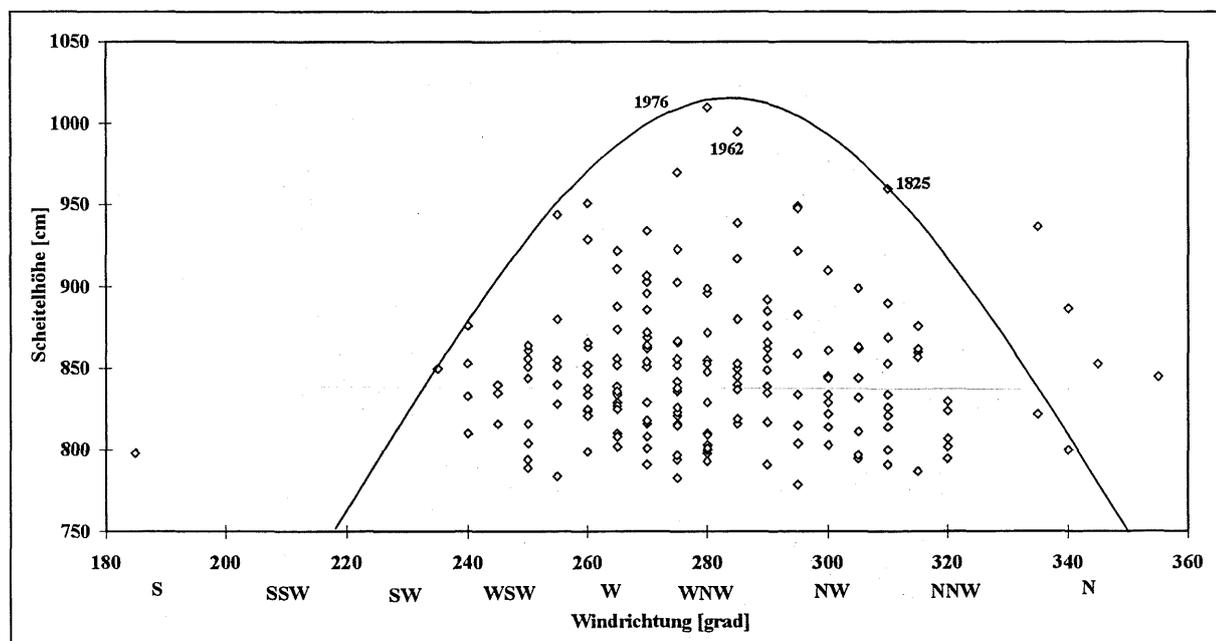


Abb. 17-4: Kritische Windrichtung bei Sturmflutscheiteln in Cuxhaven seit 1900

17.1.2 Stauwirksame Windrichtung zum Erreichen eines Sturmflutscheitels in Helgoland

Helgoland, als Cuxhaven vorgelagerte Hochseeinsel, müßte, bedingt durch seine Lage, Sturmfluten durch ähnliche Windrichtungen wie Cuxhaven erhalten. Die Einhüllende der Abb. 17-5 zeigt eine Spannbreite von 230° bis knapp 340° unter Auslassung einer niedrigen Sturmflut bei 355°. Auch hier engt sich der Bereich bei schweren und sehr schweren Sturmfluten stark ein.

Die drei höchsten Sturmfluten treten bei Windrichtungen zwischen 265° und 280° auf, zwei weitere bei 265° bis 290°. Die kritische Windrichtung liegt damit deutlich weiter westlich als bei Cuxhaven. Erst bei NN 270 cm (PN 770 cm) erweitert sich der Bereich der stauwirksamen Windrichtung deutlich.

Der Bereich der stauwirksamen Windrichtung für schwere Sturmfluten in Helgoland liegt bei 265° bis 280°. Sturmfluten leichter bis schwerer Art treten bei Windrichtungen von 230° bis 340° auf. Sturmfluten bei Windrichtungen aus weiter nördlicheren Richtungen führen nur zu sehr niedrigen Sturmfluten.

Die stauwirksame Windrichtung für schwere Sturmfluten liegt in Helgoland in einem um 20° weiter westlich liegenden Bereich als in Cuxhaven. Die stauwirksame Windrichtung insgesamt reicht nicht ganz so weit nach Norden wie in Cuxhaven.

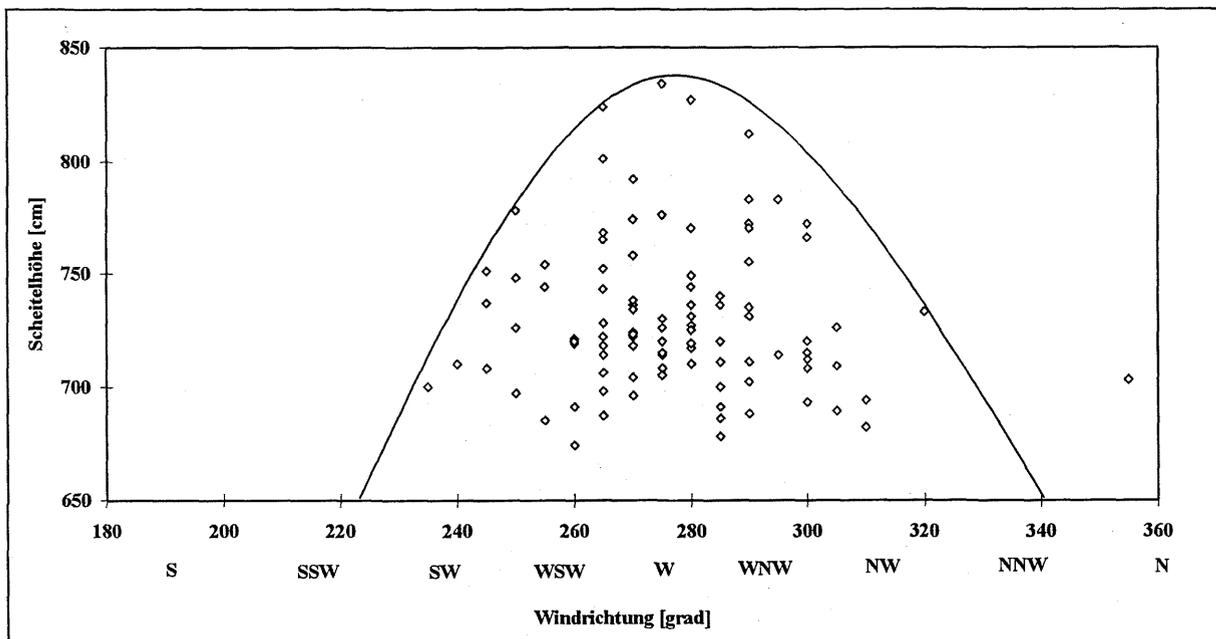


Abb. 17-5: Kritische Windrichtung bei Sturmflutscheiteln in Helgoland seit 1940

17.1.3 Stauwirksame Windrichtung zum Erreichen eines Sturmflutscheitels in Norderney

Auch für Norderney läßt sich ein kritischer, stauwirksamer Bereich definieren. Dieser liegt für die drei höchsten Sturmfluten zwischen 275° und 285° und ist damit sehr eng auf den Bereich W bis WNW begrenzt. Werden die fünf höchsten Sturmfluten betrachtet, weitet sich der Bereich jedoch bereits deutlich aus und liegt bei 255° bis 290°. Für die drei höchsten Sturmfluten liegt Norderney damit eng im stauwirksamen Bereich von Helgoland. Bei den fünf höchsten Sturmfluten liegt Norderney im Rahmen der kritischen Windrichtung von Cuxhaven.

Für die leichten bis schweren Sturmfluten liegt Norderney in einem stauwirksamen Bereich von 210° bis 330°, mit Ausnahme von zwei niedrigen Sturmfluten bei knapp 340° und knapp 360°.

Norderney liegt damit insgesamt etwas südwestlicher als die stauwirksame Windrichtung von Cuxhaven und Helgoland.

Die kritische Windrichtung für sehr schwere Sturmfluten liegt in Norderney bei 275° bis 285° , für schwere bei 255 bis 290° und für leichte bis schwere Sturmfluten bei 210° bis 290° . Der stauwirksame Bereich für sehr schwere Sturmfluten ist damit sehr eng und ist vergleichbar mit Helgoland. Die Windrichtung für die leichten Sturmfluten liegt insgesamt etwas weiter südwestlich als für Helgoland und für Cuxhaven.

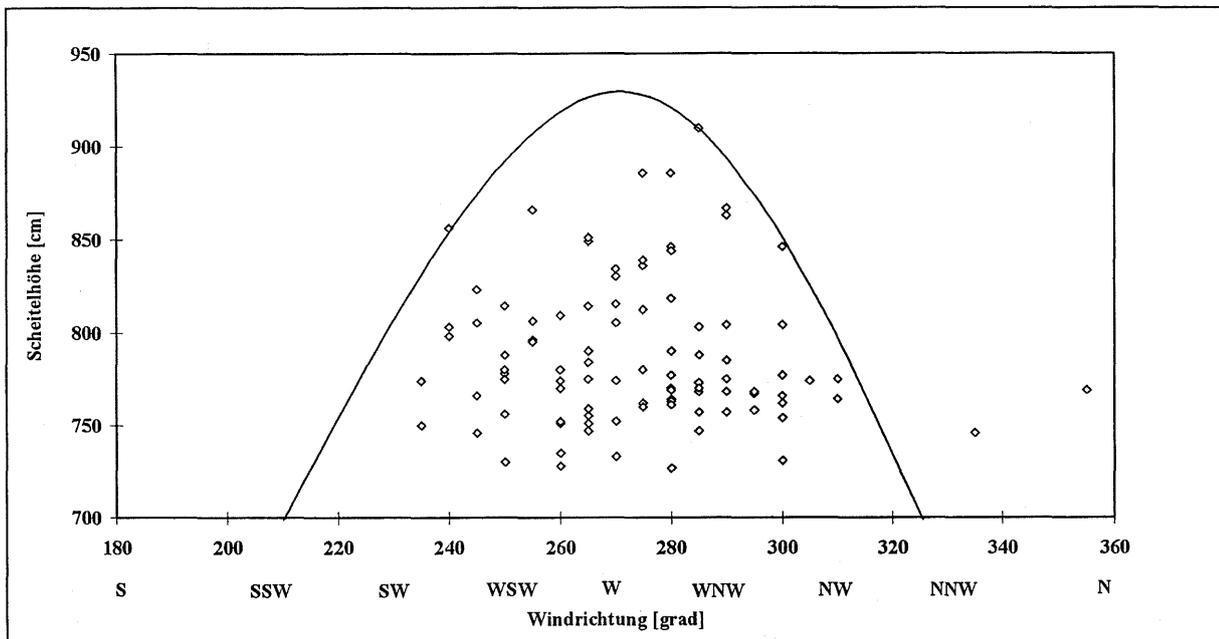


Abb. 17-6: Kritische Windrichtung bei Sturmflutscheiteln in Norderney seit 1936

Der Anstieg der globalen Mitteltemperatur der unteren Atmosphäre in den letzten 100 Jahren wird von den Klimaforschern mit $0,3^\circ$ bis $0,6^\circ\text{C}$ angegeben, in den letzten 40 Jahren mit $0,2 - 0,3^\circ\text{C}$ (IPCC, 1995:26). Dies ist die Ausgangssituation, die zu der Frage berechtigt: „Wird es aufgrund einer globalen Klimaerwärmung auch zu einer Zunahme in Höhe, Häufigkeit und Dauer von Extremereignissen wie Sturmfluten kommen?“

Es wird weiterhin erarbeitet, ob unter momentanen Klimabedingungen und den Klimäanderungen der letzten 100 Jahre die Sturmfluthöhe einem Grenzwert entgegenstrebt und ob dieser Grenzwert „eher“ eintreten kann als bisher, entsprechend der These der Beschleunigung der Ereignisse aufgrund des Klimawandels.

Das Untersuchungsgebiet ist die Deutsche Bucht, vertreten durch die Pegel Wittdün auf Amrum, Norderney, Helgoland und Cuxhaven. Der Untersuchungszeitraum beläuft sich auf die Jahre 1900 bis 1995, wobei für Wittdün, Norderney und Helgoland aufgrund fehlender Daten der Zeitraum verkürzt werden mußte.

Um das Sturmflutklima zu analysieren, ist es notwendig, eine Sturmflut so zu definieren, daß der sturmflutverursachende Faktor Wind durchgängig erfaßt wird und nicht nur der Wind, der bei Hochwasser aufgetreten ist. Demzufolge müssen alle Fluten, bei denen ein Sturmflutklima geherrscht hat, erfaßt werden. Somit wird eine Sturmflut definiert mit all jene Fluten, die einen Windstau $\geq 2\text{ m}$ zu jeder Tidephase erreichen. Weiterhin muß bei Tidehochwasser ein Windstau von 1.50 m vorliegen, da die Höhe des Windstaus umgekehrt proportional zur Wassertiefe ist.

Der Windstau ist die Differenz zwischen gelaufener Tide und mittlerer bzw. astronomischer Tide und bildet direkt den Einfluß des sturmflutverursachenden Faktors - den Wind - und dessen Änderungen ab. Der Untersuchung liegen so seit 1900 ein Kollektiv von 153 Windstaukurven mit 192 Sturmflutscheiteln vor.

Die Windstaukurve enthält neben dem Wind als einflußreichste Größe unter anderem astronomische Anteile und Fernwellen, weshalb diese Punkte im Vorfeld analysiert werden mußten. Von den 153 Sturmfluten fanden

- 95 zur Springtidezeit statt, wobei
 - 32 Sturmfluten bei Springtide und
 - 63 Sturmfluten in den Tagen unmittelbar vor und nach Springtide

stattfanden. Von den verbleibenden Sturmzeiten fanden dagegen nur

- 31 Sturmfluten bei Nipptide statt, wobei
 - 16 Sturmzeiten bei Nipptide und
 - 15 Sturmzeiten in den Tagen unmittelbar vor und nach Nipptide stattfanden.

Fernwellen (*external surges*) wurden für den Zeitraum 1971-1995 untersucht. Es traten 75 external surges auf, die in Cuxhaven eine Reststauhöhe zwischen 10 cm und 108 cm erreichten. Die Fernwelle gewinnt zwischen Aberdeen und Immingham an Höhe, um diese wieder in der Straße von Dover zu verlieren. Infolgedessen erreicht sie in Cuxhaven in der Regel niedrigere Reststauwerte als sie in Aberdeen hatte. Einen Anhaltswert für die Höhenentwicklung von Aberdeen bis Cuxhaven bildet die Höhendifferenz zwischen Aberdeen und Immingham, die von Immingham bis Cuxhaven etwa umgekehrt proportional wieder abfällt.

Die Dauer von Fernwellen in Aberdeen reicht von 8 h bis 36 h. Sie nimmt bis Cuxhaven deutlich ab. Ihre Häufigkeit liegt bei ein bis sechs mal pro Jahr. Sie verteilen sich über das Jahr in erster Linie auf die Wintermonate Oktober bis März, seltener treten sie im April, August und September auf.

Die Eintrittszeitdifferenz zwischen Aberdeen und Cuxhaven liegt zwischen 13 h und 14 h. Im Sturmflutfall entstehen größere Schwankungen um diesen Wert. Das Fernwellenpeak kann zu allen Tidephasen in Cuxhaven auftreten.

Fernwellen beeinflussen jede vierte bis fünfte Sturmflut, das heißt im Untersuchungszeitraum der Fernwellen in neun Fällen. Die Fernwellen hatten bei Sturmflut eine Höhe zwischen 25 cm und 100 cm und führten in Verbindung mit dem Windeinfluß zu niedrigen bis schweren Sturmfluten.

Interessant sind diese Ergebnisse in Hinblick auf drei Punkte:

1. Welche Auswirkungen haben diese Erkenntnisse für die Berechnung eines zukünftigen Scheitelwasserstandes und damit für den Küstenschutz?
2. Welche Auswirkungen haben diese Ergebnisse für die Vorhersage?
3. Welche Bedeutung hat dies für die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung und damit für eine Klimaänderung (climate change)?

Bei Berechnung eines zukünftigen Scheitelwasserstandes über den Windstau, ist die Berücksichtigung der bisher eingetretenen Wasserstände ausreichend, da diese den bisherigen Fernwelleneinfluß und dessen Entwicklung zu allen Tidephasen mit einbeziehen. Wird die Entwicklung der Fernwellen gar noch herausgefiltert, bei dem kein Trend berechnet werden kann, so kann sich in der weiteren Untersuchung und Darstellung auf die Ergebnisse der Sturmflut- und damit Windstauentwicklung allein konzentriert werden. Bei ausschließlicher Betrachtung von Hochwasserständen wäre dies nicht ausreichend und würde zu ungenauen Ergebnissen führen.

Für die Vorhersage muß die Fernwellenhöhe dann Berücksichtigung finden, wenn nur Windrichtung und Windgeschwindigkeit beachtet wird, da Fernwellen von diesen unbeeinflusst sind. Wird aber der Windstau für die Vorhersage genutzt, so ist die Fernwelle in selbigen enthalten. Deutlich wird, daß vor allem für die Vorhersage jene Fälle interessant sind, wenn die Windgeschwindigkeit abfällt, der Stau aber nicht entsprechend, so daß die nachfolgende Tide erhöht sein und die Routinevorhersage über Wind und Stau problematisch werden kann. In diesem Fall wäre eine Fernwellenvorhersage z.B. von Aberdeen hilfreich, um den genauen Verlauf des Abfalls der Windstaukurve und damit der Sturmflutkurve vorhersagen zu können. Fernwellen, die bisher bei Hochwasser aufgetreten sind, folgten dem Verlauf des Windes und konnten deshalb bisher trotz erheblicher Höhe bei der Kombination Windstau, Windgeschwindigkeit und -richtung der korrekten Vorhersage mit dem Verfahren bei Strom- und Hafengebäude Hamburg nicht im Wege stehen.

Die Problematik der Fernwellenhöhe bezogen auf climate change und Treibhauseffekt (greenhouse-effect) liegt eher darin, daß nicht gesichert ist, ob sich die Geschwindigkeit, mit der die Zyklonen ziehen, bei einer globalen Erwärmung ändern könnte oder nicht. Eine Erhöhung der Zuggeschwindigkeit würde auch eine Erhöhung der Fernwellen zur Folge haben. Diese Möglichkeit wird von Modellen bisher nicht berechnet und wurde auch in der Natur nicht festgestellt, so daß zur Zeit nicht davon ausgegangen werden muß, daß sich die Fernwellen signifikant erhöhen werden.

Sturmfluten können nur auftreten, wenn der Wind für einen bestimmten Ort aus der stauwirksamen Windrichtung mit einer hohen Windgeschwindigkeit von mindestens 3 h Dauer weht. Die kritische Windrichtung für Cuxhaven für sehr schwere bis schwere Sturmfluten liegt bei 280° bis 310°. Sturmfluten leichter bis schwerer Art können bei 230° bis 360° auftreten. Stürme aus S führen höchstens zu kleinen Sturmfluten. Dieser Fall ist in den letzten 100 Jahren einmal aufgetreten.

Der Bereich der stauwirksamen Windrichtung für schwere Sturmfluten in Helgoland liegt bei 265° bis 280°. Sturmfluten leichter bis schwerer Art treten bei Windrichtungen von 230° bis 340° auf. Sturmfluten bei Windrichtungen aus weiter nördlicher Richtungen führen nur zu sehr niedrigen Sturmfluten.

Die stauwirksame Windrichtung für schwere Sturmfluten liegt in Helgoland in einem enger eingrenzten um 20° weiter westlich liegenden Bereich als in Cuxhaven. Die stauwirksame Windrichtung insgesamt reicht nicht ganz so weit nach Norden wie in Cuxhaven.

Die kritische Windrichtung für sehr schwere Sturmfluten liegt in Norderney bei 275° bis 285°, für schwere bei 255 bis 290° und für leichte bis schwere Sturmfluten bei 210° bis 290°. Der stauwirksame Bereich für sehr schwere Sturmfluten ist damit sehr eng und ist vergleichbar mit Helgoland.

Die Analyse des Sturmflutklimas erfolgt methodisch über die Berechnung einer Windstaukurve, die parametrisiert und in ihrer Dauer pro Höhenstufe berechnet wurde. Über Korrelation der Parameter wird die innere Abhängigkeit der einzelnen Komponenten untereinander ermittelt, um hieraus Kenntnisse über Ursache und Wirkung des Windverlaufs auf den Sturmflutverlauf herauszuarbeiten. Hierdurch wird es möglich einen Grenzwert der Höhe bei momentanen Klimabedingungen zu ermitteln und den zum Erreichen dieses Wertes notwendigen Wind- bzw. Sturmflutverlauf darzustellen. Über die Entwicklung der einzelnen Parameter im 20. Jahrhundert kann festgestellt werden, ob das Sturmflutklima eine Tendenz zu einem beschleunigten Eintreten aufweist.

Seit 1901 weisen die Sturmfluten in der Nordsee keinen Anstieg der Scheitelhöhe auf der größer ist als der Anstieg des MThw im gleichen Zeitraum. Dagegen steigt die Häufigkeit der Sturmflutscheitel seit 1950, die Anzahl der Windstaukurven hingegen wird deutlich weniger. Das bedeutet, daß Windstaukurven, die mehr als einen Sturmflutscheitel umfassen, in den letzten 50 Jahren leicht zugenommen haben. In der vorliegenden Untersuchung werden diese Ereignisse als Kettentiden bezeichnet und gesondert seit 1850 betrachtet. Bemerkenswert ist hierbei, daß diese Einzelereignisse besonders langer Dauer keineswegs niedrige Sturmflutereignisse sind, sondern vielmehr in den Bereich der schweren und sehr schweren Sturmfluten gehören.

Erwartungsgemäß liegen die Windstaumaxima der Pegel Norderney, Cuxhaven und Wittdün gehäuft um Tideniedrigwasser, mit Schwerpunkt auf 1 h nach Tideniedrigwasser. Am ausgeprägtesten ist dieses Phänomen in Wittdün, wo von den 114 Windstaukurven 53 also 47% ihr Windstaumaximum im Zeitraum von Tideniedrigwasser bis 1 h danach aufweisen.

Die Verteilung der Windstaumaxima zur Periode ist in Norderney größer als in Cuxhaven mit bereits deutlicher Konzentration auf Tnw I und dem Flutast bis Thw I. Diese Konzentration um Tnw I nimmt bis Wittdün zu. Dieser Ablauf ist, aufgrund der räumlichen Lage der Insel, für Helgoland nicht nachzuweisen.

Helgoland weist die größte Häufigkeit der Windstaumaxima 1.5 h bis 3 h nach Tnw I mit knapp 30% (29 von 98 Windstaukurven) auf. Das ist der Zeitraum, in dem für Norderney, Cuxhaven und Wittdün eine sehr geringe Häufigkeit zu verzeichnen ist. Diese liegt für Helgoland um Tnw I vor, einem Zeitraum, in dem die größte Häufigkeit bei den anderen Pegeln festgestellt werden kann. Erklärt werden können diese Unterschiede nur durch die differierende Topographie, bei der Helgoland als Hochseepiegel deutlich herausfällt.

Die Trennung der Windstaumaxima in Peaks um Niedrigwasser und um Hochwasser und Berechnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit bildet eine Grundlage für die Deichbemessung bei den Pegeln Norderney, Wittdün und Helgoland und dient als Anhaltswert bei der Berechnung eines Grenzwertes der Windstauhöhe.

Zur Charakterisierung der Sturmfluten werden die Parameter Anstieg, Scheitel und Abfall in *kurz* und *lang* unterschieden. Die Grenze zwischen *kurz* und *lang* liegt bei der Kennzahl 6 h/m für Anstieg und Abfall und 6 h für den Scheitelbereich. Indirekt wird auf diese Weise in füllige und nicht füllige Sturmfluten differenziert. Es entstehen auf diese Weise neun Sturmflutcharakteristika, deren Ergebnisse sich wie folgt zusammenfassen lassen:

1. Es fallen nicht zwangsläufig die gleichen Sturmfluten an allen vier Pegeln in eine Kategorie, weil die spezifische Exposition und Topographie vor Ort die gleiche Windsituation zu differierenden Charakteren führen kann!
2. An allen vier Pegeln gibt es die größte Häufigkeit an Windstaukurven in der Kategorie *lang-kurz-lang*, gefolgt von *lang-lang-lang* und dann *kurz-kurz-lang*. Nur in Cuxhaven enthalten die Kategorien *lang-lang-lang* und *kurz-kurz-lang* etwa die gleiche Häufigkeit.
3. Die deutliche Zunahme der Kategorie *lang-lang-lang* und die Zunahme der Windstaukurven mit zwei Scheiteln korreliert mit der Zunahme von langen Windstaukurven.
4. Die Windstaukurven mit zwei Windstaumaxima zeigen einen Anstieg in der Sturmflutscheitelhöhe in Cuxhaven und in St. Pauli.
5. Kurze Anstiege führen in Cuxhaven und Wittdün zu sehr hohen Windstaumaxima. Die Kombination aus kurzen Anstiegen in Verbindung mit einer langen Komponente führt häufig zu schweren bis sehr schweren Sturmfluten, in Helgoland und Norderney nur zu schweren Sturmfluten.
6. Diese Aussage kehrt sich in der Kategorie *kurz-lang-lang* um. Während in Wittdün und Cuxhaven schwere Sturmfluten in dieser Kategorie auftreten, treten in Norderney und Helgoland sehr schwere auf.
7. In Norderney und Helgoland sind insgesamt flachere Windstaukurven nötig sind, um eine hohe Sturmflut zu erreichen als in Wittdün und Cuxhaven.
8. Lange Abfälle führen an allen Pegeln zu Kettentiden!
9. An allen vier Pegeln können Kettentiden auch zu schweren Sturmflutscheiteln führen. Die Kombination aus langer Dauer und hohen Hochwasserscheiteln birgt eine deutliche Gefahr.
10. An allen vier Pegeln nehmen Kettentiden zu.
11. An allen Pegeln liegt eine Zunahme in jenen Kategorien vor, in denen auch schwere und sehr schwere Sturmfluten auftreten.
12. Die Differenz der Scheitelhöhen zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli steigt nahezu in allen Kategorien an. Nur in der Kategorie *kurz-kurz-kurz* läßt sich kein Trend erkennen.

Die Dauer der Windstaukurven hat an allen vier Pegeln zugenommen, wobei 1981-90 das vorläufige Maximum erreicht wurde. Über die Parametrisierung der Windstaukurve stellte sich heraus, daß die mittleren Windstaukurven in Helgoland, Norderney und Cuxhaven länger geworden sind. Nur in Wittdün verkürzt sie sich. Interessant ist hierbei, daß die mittleren Windstaukurven sich in ihren Gesamtdauer angeglichen haben. Die Zunahme der Dauer ist somit nicht nur mit der Zunahme von Einzelereignissen besonders großer Dauer zu erklären, sondern auch in der Verlängerung der mittleren Sturmflut.

Diesen Ergebnissen entspricht die Auswertung der Winddaten, die vom Deutschen Wetterdienst, Seewetteramt Hamburg zur Verfügung gestellt wurden. Es zeigt sich ein leichter Anstieg der Gesamtdauer der Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$. Dieser Trend ist zwar deutlich vorhanden, fällt aber unter die natürliche Variabilität der Änderung der Dauer der Windrichtung in der Deutschen Bucht. Die Analyse der Häufigkeit der Ereignisse zeigt, daß eine Zunahme der Häufigkeit in der Dauer von 6 h bis 9 h vorliegt bei Ereignisse mit Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$. Dies korreliert mit der Vergrößerung der mittleren Windstaukurve. Weiterhin liegt eine Zunahme der Häufigkeit der Windereignisse mit einer Dauer ≥ 20 h vor, was der Zunahme an einzelnen Sturmflutereignissen besonders langer Dauer korreliert.

Über die Korrelation der Parameter läßt sich feststellen, wie eine maximale Windstaukurve aus den bisher eingetretenen Sturmfluten, d.h. unter den Klimaänderungen seit 1900 aussieht. So läßt sich für Cuxhaven ein Grenzwert von 450 cm, für Helgoland von 330 cm, für Wittdün von 390 cm und für Norderney von 340 cm - 350 cm berechnen. Während für Cuxhaven aufgrund der langen Datenreihe sich der Grenzwert eindeutig bestimmen läßt, führt die verkürzte Zeitreihe für Helgoland und Norderney zu einem maximalen Wert, der durch Berechnung verschiedener Funktionen bestätigt werden kann. Ob dieser einen sicheren Grenzwert repräsentiert, kann jedoch für diese Pegel nicht eindeutig definiert werden. Die maximal mögliche Windstaukurve für Wittdün und Cuxhaven ist jeweils gekennzeichnet durch einen sehr kurzen Anstieg mit einer kurzen Scheiteldauer und einem langen Abfall, jene für Helgoland und Norderney durch einen mittleren Anstieg und Abfall. Demzufolge ist die maximal mögliche Windstaukurve für Helgoland und Norderney wesentlich symmetrischer mit längeren Anstiegen und Scheiteldauern.

Eine maximale Windstaukurve muß nicht jene sein, die den maximalen Scheitelwert bildet. Bisher eingetroffene sehr schwere Sturmfluten in Cuxhaven sind gekennzeichnet durch schnelle Anstiege und eine lange Komponente - entweder Scheiteldauer oder Abfall. Da die berechnete maximale Windstaukurve genau diesen Kriterien entspricht, ist davon auszugehen, daß diese jene ist, die in Cuxhaven den maximalen Scheitelwert bewirkt. Die lange Komponente muß allerdings deutlich vertreten sein und kann auch der in der maximalen Windstaukurve als kurz dargestellte Scheitelbereich sein.

Auch für Helgoland, Wittdün und Norderney bildet die ermittelte maximale Windstaukurve jene, die eine sehr schwere Sturmflut bilden kann. In Norderney müßte allerdings die Scheiteldauer *lang* statt *kurz* sein.

Die Entwicklung der Parameter seit 1900 zeigt an, ob der Trend der einzelnen Windkomponenten Anstieg, Dauer der maximalen Windgeschwindigkeit und Windabfall in Richtung eines „beschleunigten“ Eintretens der maximalen Windstaukurve weist. Der Trend zeigt jedoch in Richtung längerer oder gleichbleibender Kennzahlen in Cuxhaven, Norderney und Helgoland. Infolgedessen liegt die Möglichkeit eines „beschleunigten“ Eintritts der maximal möglichen

Windstaukurve zur Zeit nicht vor. Nur für Wittdün weist die Verkürzung der Windstaukurve in Richtung einer etwas größeren Gefahr des Eintritts einer maximal möglichen Windstaukurve.

Weiterhin läßt sich festhalten, daß für jeden Pegel eine eigene maximal mögliche Windstaukurve zu definieren ist, die aufgrund der Lage und Topographie zu verschiedenen Windklimaten auftreten kann.

Flußaufwärts gelegene Städte wie Hamburg sind stärker von diesen Veränderungen im Sturmflutverlauf betroffen. Schwere Sturmfluten können flußaufwärts durch langes Andauern des Windstaumaximums und langsames Abfallen der Windgeschwindigkeit höher auflaufen. Demzufolge können die Veränderungen der Sturmfluten an der Küste zu höheren Scheitelwerten in flußaufwärts gelegenen Orten führen. Für schwere Sturmfluten muß der Windstauwert bereits an der Küste hoch sein. Dies erfolgt durch schnellen Anstieg der Windgeschwindigkeit. Demzufolge ist es nicht möglich, eine sehr frühe Vorhersage (d.h. mehr als 12 h im voraus) für sehr hohe Sturmfluten zu erstellen.

Die Diskussion um einen globalen Klimawandel zieht auch jene um die Änderung des Sturmflutklimas nach sich. Am Beispiel der Pegel Cuxhaven, Norderney, Wittdün und Helgoland wird das Sturmflutklima in der Nordsee seit 1900 analysiert. Hierbei wird der gesamte Sturmflutverlauf über die Windstaukurve hinsichtlich Höhe, Häufigkeit, Dauer, Anstieg, Scheitel und Abfall analysiert.

Die Windstaukurve ist die Differenzkurve zwischen der eingetretenen und der für dieselbe Zeit vorausgerechneten astronomischen bzw. mittleren Tide. Sie bildet in ihrem Verlauf direkt den Wind und dessen Änderungen ab. Eine Sturmflut muß hier einen Windstau von ≥ 2 m zu jeder Tidephase erreichen und 1.50 m über MThw liegen. Im Windstau sind neben dem Wind auch der Einfluß der Astronomie und Fernwellen enthalten. Diese werden detailliert untersucht. Im Zeitraum 1971-1995 traten Fernwellen bei jeder vierten bis fünften Sturmflut auf und erreichten während einer Sturmflut in Cuxhaven Höhen von 25 cm bis 100 cm.

Zur Entstehung schwerer und sehr schwerer Sturmfluten muß in Cuxhaven ein Wind hoher Geschwindigkeit aus 280° bis 310° wehen, in Helgoland aus 265° bis 280° und in Norderney aus 275° bis 285° . Für leichte bis schwere Sturmfluten liegt das Spektrum breiter. So werden in Cuxhaven leichte bis schwere Sturmfluten von Winden aus 230° bis 360° , in Helgoland aus 230° bis 340° und in Norderney aus 210° bis 290° gebildet.

Seit 1901 weisen die Sturmfluten in der Nordsee keinen Anstieg der Scheitelhöhe auf. Dagegen steigt die Häufigkeit der Sturmflutscheitel seit 1950, die Anzahl der Windstaukurven hingegen nicht. Das bedeutet, daß jene Windstaukurven, die mehr als zwei Sturmflutscheitel produzieren, in den letzten 50 Jahren leicht zugenommen haben. Erkennbar ist, daß Einzelereignisse mit mehr als zwei aufeinanderfolgenden Sturmflutscheiteln geringfügig zugenommen haben.

Die Dauer der Windstaukurven hat an allen vier Pegeln zugenommen, wobei 1981-90 das vorläufige Maximum erreicht wurde. Über die Parametrisierung der Windstaukurven stellte sich heraus, daß die mittleren Windstaukurven in Helgoland, Norderney und Cuxhaven länger geworden sind. Die Zunahme der Dauer ist somit nicht nur mit der Zunahme von Einzelereignissen besonders großer Dauer zu erklären, sondern auch mit der Verlängerung der mittleren Sturmflut. Nur in Wittdün liegt eine Verkürzung der mittleren Windstaukurve vor. Die Analyse der Winddaten bestätigt diese Ergebnisse.

Über die Korrelation der Parameter der Windstaukurve lassen sich maximale* Windstaukurven ermitteln. So läßt sich für Cuxhaven ein Grenzwert von 450 cm, für Helgoland von 330 cm, für Wittdün von 390 cm und für Norderney von 340 cm - 350 cm berechnen. Während für Cuxhaven und Wittdün dieser Wert eine Grenzhöhe der letzten 100 Jahre bildet, kann aufgrund der kürzeren Datenreihe für Norderney und Helgoland „nur“ von einem bisher sich ergebenden maximalen Wert gesprochen werden. Die maximal mögliche Windstaukurve für Wittdün und Cuxhaven ist jeweils gekennzeichnet durch einen sehr kurzen Anstieg mit einer kurzen Scheiteldauer und einem langen Abfall, jene für Helgoland und Norderney durch einen mittleren Anstieg und Abfall. Demzufolge ist die maximal mögliche Windstaukurve für Helgoland und Norderney wesentlich symmetrischer mit längeren Anstiegen und Scheiteldauern als in Cuxhaven und Wittdün.

Eine maximale Windstaukurve muß nicht jene sein, die den maximalen Scheitelwert bildet. Die Überprüfung der bisher gelaufenen höchsten Sturmfluten ergab, daß in Cuxhaven die maximale Windstaukurve auch einen maximalen Scheitelwert bilden könnte. Es muß aber ein langer Scheitelbereich oder ein langer Abfallgradient vorliegen. Auch für Helgoland, Wittdün und

Norderney ist die maximale Windstaukurve jene, die eine sehr schwere Sturmflut bilden kann. In Norderney müßte allerdings die Scheiteldauer *lang* statt *kurz* sein.

Die Entwicklung der Parameter Anstieg, Scheitel und Abfall seit 1900 weist nicht auf ein „beschleunigtes“ Eintreten bzw. eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit einer maximalen Windstaukurve und damit einer höchsten Sturmflut hin. Nur in Wittdün geht der Trend in Richtung kürzere Anstiegsgradienten; eine höher Eintrittswahrscheinlichkeit liegt aber auch hier im Moment nicht vor.

Flußaufwärts gelegene Städte wie Hamburg sind stärker von diesen Veränderungen im Sturmflutverlauf betroffen. Schwere Sturmfluten können flußaufwärts durch langes Andauern des Windstaumaximums und langsames Abfallen der Windgeschwindigkeit ansteigen. Demzufolge können die Veränderungen der Sturmfluten an der Küste zu höheren Scheitelwerten an flußaufwärts gelegenen Orten führen. Für schwere Sturmfluten muß der Windstauwert bereits an der Küste hoch sein. Dies erfolgt durch schnellen Anstieg der Windgeschwindigkeit. Demnach ist es nicht möglich, eine sehr frühe Vorhersage (d.h. mehr als 12 h im voraus) für sehr hohe Sturmfluten zu erstellen.

* Der höchste Wert, der sich aus den seit 1900 eingetretenen Sturmfluten berechnen läßt.

- ANNUTSCH, R. (1977): Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. In: Der Wetterlotse, 393/394: 122-141.
- AUSSCHUB „KÜSTENSCHUTZWERKE“ DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU e.V. SOWIE DER HAFENBAUTECHNISCHEN GESELLSCHAFT e.V. (1981): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken - EAK 1981. In: Die Küste, 36: 1-320.
- BRAHMS, A. (1754): Anfangsgründe der Deich- und Baukunst. Band 1. Aurich.
- BUSCH, U. und R. ROTH (1998): Klimaprognosen im Hinblick auf die Sturmaktivität in der Deutschen Bucht. In: Hansa, (135)6: 70-73.
- DAVIES, A. M. (1980): Application of numerical models to the computation of the wind-induced circulation of the North Sea during JONSDAP '76. In: „Meteor“ Forschungsergebnisse. Serie A, 22: 53-68.
- DAVIES, A. M. und R. A. FLATHER. (1975): The application of numerical models to storm surge prediction. Inst. of Oceanogr. Sc., Birkenhead.
- DAVIES, A. M. und R. A. FLATHER (1977): Computation of the storm surge of 1.-6. April, 1973, using numerical models of the North West European Continental Shelf and the North Sea. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift 30: 139-162.
- DEFANT, A. (1941): Die absolute Topographie des physikalischen Meeresniveaus und der Druckflächen, sowie die Wasserbewegungen im Atlantischen Ozean. In: Wissenschaftliche Ergebnisse Deutsch. Atlant. Exp. „Meteor“ 1925-27, 6, Teil 1, Lfg. 5: 145-157.
- DIETRICH, G. et al. (1975): Allgemeine Meereskunde. Stuttgart.
- DIETZE, W. (1974): Über den Begriff „Sturmflut“. In: Zwischen Ems und Jade. Mitteilungsblatt der WSD Aurich, 1.
- ERCHINGER, H. F. (1992): Sturmfluten, eine zunehmende Bedrohung der Küste als Folge von Klimaveränderungen. In: Hansa, (129)12: 1381-1382.
- FERK, U. (1993): Zur Definition einer Sturmflut. Änderungen der Hamburger Sturmflutkartei, Interner Vermerk. Hamburg, Amt Strom und Hafenbau. (unveröffentlicht.)
- FERK, U./ G. GÖNNERT & W. SIEFERT (1995): Storm Surges in the Southern North Sea and the Elbe Estuary since 1901. In: Hydrocoast 95. A contribution to the UNESCO-IHP project H-2-2: 93-103.
- FISCHER, O. (1955): . Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste. (= Hydrographie des Küstengebietes, Teil III, 7.)
- FÜHRBÖTER, A. (1976): Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremfluten an der deutschen Nordseeküste. In: Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes der TU Braunschweig, 51: 1-199.
- FÜHRBÖTER, A. (1979): Über die Verweilzeiten und Wellenenergien bei Sturmfluten. In: Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, 65: 1-29.

- FÜHRBÖTER, A. et al. (1988): Sturmflutwahrscheinlichkeit an der deutschen Nordseeküste nach verschiedenen Anpassungsfunktionen und Zeitreihen. In: Die Küste, 47: 164-186.
- FÜHRBÖTER, A. und A. TÖPPE (1991): Duration of Storm Tides at High Water Levels. In: Storm Surges, River Flow and Combined Effects. A contribution to the UNESCO-IHP project H-2-2. Hamburg: 45-54.
- GÖNNERT, G. (1998): Development of Storm Surge in the Southern North Sea since 1900 and its Practical Applications of the Results. In: KELLETAT, D. (ed.): German Geographical Coastal Res. The Last Decade. Tübingen: 95-106.
- GÖNNERT, G. (1998): Sturmfluten im Elbeästuars. In: Schriftenreihe der Niedersächsischen Akademie für Geowissenschaften, 14: 24-35.
- GÖNNERT, G. (1999): The analysis of storm surge climate change along the German coast during the 20th century. In: Journal of Quaternary International, 1999. (in Druck.)
- GÖNNERT, G. (1999): Veränderung des Charakters von Sturmfluten in der Nordsee aufgrund von Klimaänderung in den letzten 100 Jahren. In: Marburger Geographische Schriften. (in Druck.)
- GÖNNERT, G. und U. FERK (1997): Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe. In: Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, 18: 13-31.
- GÖNNERT, G. und W. SIEFERT (1998): Sturmflutatlant Cuxhaven. Hamburg, Strom- und Hafenanbau. (= Studie Nr. 92.)
- GRABL, H. (1993): Globaler Wandel. In: SCHELLNHUBER, H.-J. und H. STERR (Hg.): Klimaänderung und Küste. Einblick ins Treibhaus. Berlin: 28-37.
- GRABL, H. (1998): Nur aus Forschung zum globalen Wandel folgt Nachhaltigkeit. In: Geographische Rundschau, 5: 268-272.
- GRABL, H. und R. KLINGHOLZ (1990): Wir Klimamacher - Auswege aus dem globalen Treibhaus. Frankfurt/Main.
- HANSEN, W. 1965: Wissenschaftliches Gutachten über Grundlagen für die künftige Gestaltung des Hochwasserschutzes in Hamburg. Hamburg.
- HEGERL, G./ K. HASSELMANN & M. LATIF (1998): Natürliche Klimavariabilität und anthropogene Klimabeeinflussung. In: LOZAN, J. L./ H. GRABL & P. HUPFER (1998): Das Klima des 21. Jahrhunderts. Hamburg: 155-164.
- HENSEN, W. (1938): Ursachen der Wasserstandsanhhebung an der deutschen Nordseeküste. In: Die Bautechnik, (1)16.
- IPCC (1995): Climate Change. Radiative Forcing of Climate Change and Evaluation of the IPCC IS92 Scenario. Hg. HOUGHTON, J.T. et al. Cambridge.
- IPCC (1996): Climate Change 1995 - The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of Intergovernmental Panel of Climate Change. Hg. HOUGHTON, J.T. et al. Cambridge.
- JENSEN, J. (1987): Überlegungen zur künftigen Entwicklung der Sturmflutwasserstände an der Nordseeküste. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 60: 235-255.

- JENSEN, J. (1996): Windstauanalysen zur Änderung des Sturmflutklimas in Nord- und Ostsee. Protokoll der 3. Sitzung des KFKI-Projekts. (unveröffentlicht.)
- KAAS, E./ T. S. LI & T. SMITH (1996): Statistical hindcast of wind climatology in the North Atlantic and northwestern European region. In: *Climate Research*, 7: 97-110.
- KOOPMANN, G. (1962): Wasserstandserhöhungen in der Deutschen Bucht infolge von Schwingungen und Schwallerscheinungen und deren Bedeutung bei der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962. In: *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, (15)5.
- KRÜGER, W. (1929): Wangeroog, wie sie wurde, war und ist. Bremen.
- KURCZACK, G. (1974): Lehren aus Sturmfluten. In: *Die Weser*, (48) 2.
- LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe. In: *Die Küste*, 47: 31-50.
- LÄNDER-ARBEITSGRUPPE (1999): Bemessungswasserstände 2085A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/96). In: *Die Küste*. (in Druck.)
- LANDOLDT-BÖRNSTEIN (1952): Zahlenwerke und Funktionen aus der Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. III. Band: Astronomie und Geophysik. Berlin.
- LASSEN, H. (1989): Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. In: *Die Küste*, 50: 67-95.
- LASSEN, H. (1995): Interpretationen von Wasserstandsänderungen in der Deutschen Bucht auf der Basis der Ergebnisse eines KFKI-Projektes. In: *Die Küste*, 57: 121-134.
- LAUCHT, H. (1968): Über hohe Sturmfluten und ihre Häufigkeit in Hamburg. (= Schriftenreihe der Behörde für Wirtschaft und Verkehr der Freien und Hansestadt Hamburg, 4.)
- LAUCHT, H. (1977): Über den Wert statistischer Sturmflutanalysen und Prognosen. In: *Die Küste*, 30: 1-7.
- LEPPIK, E. (1950): Die Sturmfluten in der Elbemündung in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts. In: *Bes. Mitteilungen zum Dt. Gewässerkundl. Jahrbuch* 1.
- LIESE, R. und G. LUCK (1978): Verfahren zum Nachweis von Veränderungen der Tidehochwasserstände in der Deutschen Bucht. In: *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 5.
- LÜDERS, K. (1956): Gedanken über den Küstenschutz - Eine ernste Betrachtung seltsamer Anschauungen. In: *Wasser und Boden*, (8)1: 2-15.
- LÜDERS, K. (1974): Sturmtidenketten. In: Forschungsstelle für Insel und Küstenschutz der niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung, *Jahresbericht 1973*, XXV: 79-107.
- LÜDERS, K. (1975): „Sturmtide“. Begriffserläuterung und Einteilung in Höhenstufen. In: Forschungsstelle für Insel und Küstenschutz der niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung. Sonderdruck aus dem *Jahresbericht 1974*, XXVI: 0-27, Anhang.

- MALDE, J. van (1996): Historical extraordinary water movements in the North Sea area. In: Mededelingen Rijks Geologischer Dienst, Nr. 57: 27-40.
- NASNER, H. und H. W. PARTENSKY (1977): Sturmfluten in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste von 1901 bis zum Januar 1976. In: Mitteilungen des Franzius Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover, 45: 179-221.
- NIEDERSÄCHSISCHES HAFENAMT CUXHAVEN (Hg.) (1988): Pegeltabelle. Cuxhaven.
- NIEMEYER, H. (1987): Zur Klassifikation und Häufigkeit von Sturmfluten. In: Jahresbericht 1986. Forschungsstelle Küste, 38: 99-126.
- NIEMEYER, H./ R. KAISER & D. GLÄSER (1995): Sturmfluthäufigkeiten zwischen Ems und Weser von 1946-1994 - Pegel Emden, Borkum, Norderney, Bremerhaven. (unveröffentlicht.)
- OUMARACI, H. und A. KORTHAUS (1998): Berechnung einiger Verteilungsfunktionen für Windstaumaxima. (unveröffentlichte schriftliche Mitteilung.)
- PFIZENMAYER, A. (1997): Zusammenhang zwischen der niederfrequenten Variabilität in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation und den Extremwasserständen an der Nordseeküste. Diplomarbeit. (unveröffentlicht.)
- PETERSEN, M. (1967): Sturmflut 1962 - Wasserstände an den Küsten der Nordsee. In: Die Küste, 15.
- PETERSEN, M. und H. ROHDE (1991): Sturmflut: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Neumünster.
- PLATE, E. und J. IHRINGER (1991): Die Auswirkung von Klimaänderungen auf Sturmfluten. In: Hansa, 19/20: 1174-1181.
- PRÜGEL, H. (1942): Die Sturmflutschäden an der schleswig-holsteinischen Westküste in ihrer meteorologischen und morphologischen Abhängigkeit. In: Schriften des Geographischen Instituts der Universität Kiel, (XI)3.
- ROHDE, H. (1964): Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein. In: Die Küste, 12: 86-112.
- ROHDE, H. (1968): Wasserstandsänderungen und Sturmfluthäufigkeit an der Elbemündung. In: Die Küste, 16: 33-42.
- ROHDE, H. (1977): Sturmfluthöhen und säkularer Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, 30: 52-143.
- ROHDE, H. (1991): Die Veränderung der Scheitelhöhe hoher Sturmfluten in Hamburg. In: Die Küste, 52: 225-240.
- SCHAUMANN, P. C. (1857): Die Höhen der Hamburger Sturmfluten, vorausbestimmt nach den betreffenden Cuxhavener Wasserständen. Hamburg.
- SCHMIDT, H. (1993): 117 Years of Surface Geostrophic Wind in the German Bight (1876 through 1992): No Evidence of long-time Trends. Hamburg. (unveröffentlicht.)
- SCHMIDT, H. (1996): Klimaänderung und Schutz der Küsten. Vortrag bei der Küstenschutzkonferenz am 3. Juni 1996 in Cuxhaven.

- SCHMIDT, H. (1998): Vortrag für den HTG - Ausschuß Küstenschutzwerke zur Bearbeitung des Bemessungswasserstandes Küste. (unveröffentlicht.)
- SCHMIDT, H. und H. von STORCH (1993): German Bight storms analysed. In: Nature (365) 28.10.: 791.
- SCHMITZ, H. P. (1965): Modellrechnung zur deep-water-surge-Entwicklung - Das external surge Problem. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, (18) 2.
- SCHMITZ, H. P./ D. HABICHT & H. VOLKERT (1988): Barotropic numerical experiments on external surge generation at the edge of the north western European shelf. In: Gerlands Beitr. Geophysik 97/5: 422-437.
- SEEBER, G./ W. TORGE & H. J. GOLDAN, (1995): Präziser Höhenanschluß des Helgoländer Pegels. Schlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben. (unveröffentlicht.)
- SELIGER, J. (1983): Das Sturmflutgeschehen an der Deutschen Nordseeküste - Eine Untersuchung über die Wechselwirkung zwischen Klimatelementen und der Sturmfluthäufigkeit seit Beginn regelmäßiger Pegelmessungen (1842). Kiel.
- SIEFERT, W. (1968): Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurven in Cuxhaven. In: Mitteilungen des Franzius-Institutes für Grund- und Wasserbau der TU Hannover, 30: 1-142.
- SIEFERT, W. (1972): Windstau in Cuxhaven in Abhängigkeit von der Windrichtung. Planungsstudie Nr. 15. Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk. Cuxhaven.
- SIEFERT, W. (1978): Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. In: Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, 63.
- SIEFERT, W. (1982): Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. In: Die Küste, 37: 1-36.
- SIEFERT, W. (1985): Sturmfluten von 1901-1984 vor der südlichen Nordseeküste und in Hamburg (Ganglinien). (= Hamburger Küstenforschung, 44.)
- SIEFERT, W. (1988): Einige Anmerkungen zur Sturmflutentwicklung im Nordsee - Küstengebiet. In: Hansa, (125) 20: 1301-1306.
- SIEFERT, W. (1990): Sea Level Changes and Tidal-Flat Characteristics. In: Developements in Hydrobioloy, 57: 105-112.
- SIEFERT, W. (1997): Über die Fülligkeit von Tiden. (mündliche Auskunft.)
- SIEFERT, W. (1998): Auswertung der Ergebnisse des Projektes für den HTG-Ausschuß Küstenschutzwerke, Empfehlungen G. (unveröffentlicht.)
- SIEFERT, W. und G. GÖNNERT (1999): Storm surge climate change: Greenhouse effect on storm surges in the Southern North Sea and the Elbe river during the last century and their practical application. In: MAUSAM, 1999. (India, in Druck.)
- SIEFERT, W. und H. LASSEN (1985): Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. In: Die Küste, 42: 1-77.
- SIEFERT, W. und H. LASSEN (1986): Entwicklung und Ablauf von Sturmfluten in Ems, Weser und Elbe (Abschlußbericht eines KFKI-Projektes). In: Die Küste, 44: 133-169.

- SIEFERT, W. und T. MURTY (1991): Storm Surges, River Flow and Combined Effects. State of the Art report. Prepared for the UNESCO Workshop „Storm 91“ in Hamburg, FR Germany. IHP/OHP-Berichte, Sonderheft 4. Koblenz.
- STEINRÜCKE, J. (1998): Die Bedeutung der Allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre und der Ozeane für das Klima. In: LOZAN, J. L./ H. GRAßL & P. HUPFER (1998): Das Klima des 21. Jahrhunderts. Hamburg: 25-30.
- SÜNDERMANN, J. (1996): Auswirkungen von Klimaänderungen auf Strömungen und Wasserstände in der Nordsee. In: Klimaänderung und Wasserwirtschaft, 56a: 203-213.
- STORCH, H. von/ H. LANGENBERG. & T. POHLMANN (1998): Stürme, Seegang und Sturmfluten im Nordostatlantik. In: LOZAN, J. L./ H. GRAßL & P. HUPFER (1998): Das Klima des 21. Jahrhunderts. Hamburg: 182-189.
- TIMMERMANN, H. (1979): Forecasting meteorological effects on water levels on a Routine Basis with a numerical model. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, (1979) 5: 190-203.
- TOMCZAK, G. (1952): Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. In: Deutsche Hydrographische Zeitschrift, (5) 2/3: 114-131.

21 Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 2-1: Mittlere jährliche Änderung der radioaktiven Strahlung aufgrund anthropogener Einflüsse seit der vorindustriellen Zeit bis 1992 und von natürlichen Änderungen in der Sonnenenergie von 1850 bis heute (aus: IPCC, 1995:17)
- Abb. 2-2: Prognostizierte globale Oberflächentemperaturerwärmung von 1990 - 2100 (IPCC, 1995:40)
- Abb. 3-1: Windstaukurve (nach SIEFERT, 1978:60)
- Abb. 4-1: Differenz der mittleren Tide zur astronomisch vorausberechneten Tide für die Sturmfluten mit Windstau ≥ 2.0 m und HThw \geq MThw + 1.50 m
- Abb. 5-1: Höhendifferenz Immingham : Aberdeen
- Abb. 5-2: Abhängigkeit der Höhendifferenz Aberdeen : Immingham von der absoluten Höhe in Aberdeen
- Abb. 5-3: Maximale Fernwellenhöhen in Aberdeen, Immingham und Cuxhaven
- Abb. 5-4: Abhängigkeit der Höhendifferenz Immingham : Cuxhaven von der absoluten Höhe in Immingham
- Abb. 5-5: Korrelation der Höhendifferenz Immingham-Aberdeen zu Immingham-Cuxhaven
- Abb. 5-6: Häufigkeit der Fernwellen pro Jahr
- Abb. 5-7: Häufigkeit der Fernwellen pro Monat für den Zeitraum 1971 bis 1995
- Abb. 5-8: Häufigkeit von Fernwellen zum Zeitpunkt einer Sturmflut für den Zeitraum 1971 bis 1995
- Abb. 5-9: Häufigkeit des Peaks des Reststaus (*external surge peak*) in Cuxhaven zur Tidephase
- Abb. 5-10: Maximale Fernwellenhöhe in Cuxhaven zur Tidephase
- Abb. 6-1: Das Untersuchungsgebiet - Lage der ausgewählten Pegel (Kartengrundlage: Topographische Karte 1:100.000, 1986)
- Abb. 7-1: Parameter der Windstaukurve (am Beispiel von Cuxhaven Nr. 187-191 vom 26.-28.02.1990)
- Abb. 8-1: Häufigkeit von Sturmtiden mit HThw \geq MThw + 1.50 m und von Sturmtiden mit HThw \geq MThw + 1.50 m & Windstau $>$ 2.0 m in Cuxhaven
- Abb. 8-2: Sturmflutscheitelhäufigkeit seit 1950 an der deutschen Nordseeküste am Beispiel dreijährig übergreifender Summen in Cuxhaven
- Abb. 8-3: Jährliche Sturmflutscheitelhäufigkeit seit 1950 in Cuxhaven
- Abb. 8-4: Jährliche Sturmflutscheitelhäufigkeit seit 1850 in Cuxhaven
- Abb. 8-5: Sturmflutscheitelhäufigkeit seit 1850 an der deutschen Nordseeküste am Beispiel dreijährig übergreifender Summen in Cuxhaven
- Abb. 8-6: Häufigkeiten der Sturmfluten, schweren und sehr schweren Sturmfluten in Cuxhaven für den Zeitraum 1901-1995
- Abb. 8-7: Windstauhäufigkeiten pro Jahr in Cuxhaven seit 1901
- Abb. 8-8: Häufigkeit der Sturmfluten mit mehr als einem Scheitel pro Windstau in Cuxhaven seit 1850

- Abb. 9-1: Entwicklung der Sturmflutscheitel in Cuxhaven (5-Jahres-Mittel) 1901-1995 für Sturmfluten mit Windstau ≥ 2.0 m und HThw \geq MThw +1.50 m
- Abb. 9-2: Entwicklung der Sturmflutscheitel in Cuxhaven, Helgoland, Wittdün und Norderney (5-Jahres-Mittel) für Sturmfluten mit Windstau Cux ≥ 2.0 m und HThwCux $\geq +1.50$ m)
- Abb. 9-3: Sturmflutscheitel in Cuxhaven 1788 - 1995
- Abb. 9-4: Sturmflutscheitel über MThw (Windstau ≥ 2.0 m und HThw ≥ 1.50 m)
- Abb. 9-5: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Cuxhaven für die Jahre 1901 - 1997
- Abb. 9-6: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Norderney für die Jahre 1938 - 1997
- Abb. 9-7: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Helgoland für die Jahre 1940 - 1997 (unter Auslassung der Jahre 1945 - 1950)
- Abb. 9-8: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase in Wittdün für die Jahre 1914 - 1997 (1914 - 1938 lückenhaft)
- Abb. 9-9: Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen in Norderney für die Jahre 1938-1997
- Abb. 9-10: Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen in Wittdün für die Jahre 1935-1997
- Abb. 9-11: Überschreitungswahrscheinlichkeit der Windstauhöhen in Helgoland für die Jahre 1940-1997
- Abb. 11-1: Parameterauswertung der Windstaukurven in Cuxhaven seit 1901: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum
- Abb. 11-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Cuxhaven seit 1901: Scheiteldauer zu Windstaumaximum
- Abb. 11-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Cuxhaven seit 1901: Abfallneigung zu Windstaumaximum
- Abb. 11-4: Entwicklung der Anstiegsneigung in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)
- Abb. 11-5: Entwicklung der Scheiteldauer in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)
- Abb. 11-6: Entwicklung des Windstaumaximums in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)
- Abb. 11-7: Entwicklung der Windstaumaxima in Cuxhaven seit 1901 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 11-8: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Cuxhaven seit 1901 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 11-9: Entwicklung der Abfallneigung in Cuxhaven seit 1901 (10jährig übergreifend)
- Abb. 11-10: Mittlere Windstaukurve in Cuxhaven um 1900
- Abb. 11-11: Mittlere Windstaukurve in Cuxhaven um 2000
- Abb. 11-12: Maximale Windstaukurve für Cuxhaven
- Abb. 12-1: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Häufigkeit)
- Abb. 12-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Einhüllende)

- Abb. 12-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Scheiteldauer zu Windstaumaximum
- Abb. 12-4: Parameterauswertung der Windstaukurven in Helgoland seit 1940: Abfallneigung zu Windstaumaximum
- Abb. 12-5: Entwicklung der Anstiegsneigung in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)
- Abb. 12-6: Entwicklung der Scheiteldauer in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)
- Abb. 12-7: Entwicklung des Windstaumaximums in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)
- Abb. 12-8: Entwicklung der Windstaumaxima in Helgoland seit 1940 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 12-9: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Helgoland seit 1940 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 12-10: Entwicklung der Abfallneigung in Helgoland seit 1940 (10jährig übergreifend)
- Abb. 12-11: Mittlere Windstaukurve in Helgoland um 1940
- Abb. 12-12: Mittlere Windstaukurve in Helgoland um 2000
- Abb. 12-12: Mittlere Windstaukurve in Helgoland um 2000
- Abb. 12-13: Maximale Windstaukurve für Helgoland
- Abb. 13-1: Parameterauswertung aller Windstaukurven in Norderney seit 1936: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Häufigkeit)
- Abb. 13-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Norderney seit 1936: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum (Einhüllende)
- Abb. 13-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Norderney seit 1936: Scheiteldauer zu Windstaumaximum
- Abb. 13-4: Parameterauswertung der Windstaukurven in Norderney seit 1936: Abfallneigung zu Windstaumaximum
- Abb. 13-5: Entwicklung der Anstiegsneigung in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)
- Abb. 13-6: Entwicklung der Scheiteldauer in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)
- Abb. 13-7: Entwicklung des Windstaumaximums in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)
- Abb. 13-8: Entwicklung der Windstaumaxima in Norderney seit 1936 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 13-9: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Norderney seit 1936 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 13-10: Entwicklung der Abfallneigung in Norderney seit 1936 (10jährig übergreifend)
- Abb. 13-11: Mittlere Windstaukurve in Norderney um 1930
- Abb. 13-12: Mittlere Windstaukurve in Norderney um 2000
- Abb. 13-13: Maximale Windstaukurve für Norderney
- Abb. 14-1: Parameterauswertung der Windstaukurven in Wittdün seit 1914: Anstiegsneigung zu Windstaumaximum
- Abb. 14-2: Parameterauswertung der Windstaukurven in Wittdün seit 1914: Scheiteldauer zu Windstaumaximum

- Abb. 14-3: Parameterauswertung der Windstaukurven in Wittdün seit 1914: Abfallneigung zu Windstaumaximum
- Abb. 14-4: Entwicklung der Anstiegsneigung in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)
- Abb. 14-5: Entwicklung der Scheiteldauer in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)
- Abb. 14-6: Entwicklung des Windstaumaximums in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)
- Abb. 14-7: Entwicklung der Windstaumaxima in Wittdün seit 1914 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 14-8: Entwicklung des höchsten Windstaumaximums pro Sturmflutjahr in Wittdün seit 1914 (unabhängig von der Tidephase)
- Abb. 14-9: Entwicklung der Abfallneigung in Wittdün seit 1914 (10jährig übergreifend)
- Abb. 14-10: Mittlere Windstaukurve in Wittdün um 1910
- Abb. 14-11: Mittlere Windstaukurve in Wittdün um 2000
- Abb. 14-12: Maximale Windstaukurve für Wittdün
- Abb. 15-1: Änderung der mittleren Windstaukurven in der Deutschen Bucht
- Abb. 15-2: Maximale Windstaukurven in der Deutschen Bucht
- Abb. 16-1: Dauer des Windstaus in Cuxhaven seit 1901 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)
- Abb. 16-2: Dauer des Windstaus in Helgoland seit 1941 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)
- Abb. 16-3: Dauer des Windstaus in Norderney seit 1931 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)
- Abb. 16-4: Dauer des Windstaus in Wittdün seit 1911 (Gesamtdauer in 50-cm-Schritten)
- Abb. 17-1: Dauer der Windgeschwindigkeit ≥ 14 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$ in der Deutschen Bucht (1949-1993)
- Abb. 17-2: Dauer der Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s der Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$ in der Deutschen Bucht (1949-1993)
- Abb. 17-3: Anzahl der Windereignisse ≥ 3 h der Windgeschwindigkeit ≥ 17 m/s und Windrichtung $240^\circ \leq dd \leq 330^\circ$
- Abb. 17-4: Kritische Windrichtung bei Sturmflutscheiteln in Cuxhaven seit 1900
- Abb. 17-5: Kritische Windrichtung bei Sturmflutscheiteln in Helgoland seit 1940
- Abb. 17-6: Kritische Windrichtung bei Sturmflutscheiteln in Norderney seit 1936

- Tab. 2-1: Zusammenstellung von Treibhausgasen verstärkt durch menschliche Aktivitäten (aus: IPCC, 1995:15)
- Tab. 2-2: Mittlere radioaktive Strahlung
- Tab. 3-1: Untere Grenzwerte zur Definition von Sturmflutklassen nach LÜDERS (1956)
- Tab. 3-2: Vergleich der Scheitelwerte zur Definition einer Sturmflut zwischen dem NIEDER-SÄCHSISCHEN HAFENAMT CUXHAVEN (1988) und PETERSEN und ROHDE (1991:18)
- Tab. 3-3: Grenzwerte des BSH zur Definition einer Sturmflut
- Tab. 4-1: Stammtiden (LANDOLDT-BÖRNSTEIN, 1952)
- Tab. 5-1: Höhendifferenz Aberdeen : Cuxhaven
- Tab. 5-2: Von Fernwellen beeinflusste Sturmfluten
- Tab. 7-1: Die Windstaparameter
- Tab. 8-1: Daten und maximale Höhen der Windstaukurven mit mehr als 2 Scheiteln pro Windstau
- Tab. 10-1: Definition von *kurz* und *lang*
- Tab. 10-2: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert
- Tab. 10-3: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert
- Tab. 10-4: Kennzeichen der Charakteristika in Helgoland
- Tab. 10-5: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert
- Tab. 10-6: Kennzeichen der Charakteristika in Norderney
- Tab. 10-7: Häufigkeit der Sturmflutereignisse nach Kategorien differenziert
- Tab. 10-8: Kennzeichen der Charakteristika in Wittdün
- Tab. 15-1: Die Parameterkennzahlen der einzelnen Pegel um 1900 im Vergleich
- Tab. 15-2: Die Parameterkennzahlen der einzelnen Pegel um 2000 im Vergleich
- Tab. 15-3: Die Differenzen der Parameterkennzahlen der einzelnen Pegel 1900:2000 im Vergleich
- Tab. 15-4: Berechnung des Bestimmungsmaßes des Trends für Zeiträume ab 1900 und ab 1940