

# Grundzüge eines neuen Sturmflutvorhersage-Verfahrens für die deutsche Nordseeküste

Von Hermann Christiansen und Winfried Siefert

## Zusammenfassung

Die Verfasser stellen ein neues Sturmflutvorhersage-Verfahren vor, mit dessen Hilfe Scheitelwasserstände an der deutschen Nordseeküste 5 bis 6 Stunden (h) im voraus mit einer mittleren Abweichung von  $\pm 25$  cm bestimmt werden können. 3 bis 4 h im voraus liegen sämtliche Werte (ohne Ausreißer) in einem Band von  $\pm 25$  cm in der Höhe und  $\pm 30$  Min. in der Zeit. Bei diesem Verfahren werden keine vorhergesagten Daten verwendet, sondern die aktuellen gemessenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen von einer Station vor der Küste sowie die Wasserstände von zwei Tidepegeln. Entwickelt wurde es durch Auswertung von Tide- und Winddaten von 50 Sturmfluten seit 1965. Zur Absicherung des Verfahrens wurden 50 weiter zurückliegende Sturmfluten aus dem Zeitraum 1930 bis 1964 berücksichtigt, von denen jedoch nur ungenaue Windangaben vorlagen. In Form von Nachhersagen wurde das Verfahren an allen Sturmfluten seit 1965 überprüft. Als aktuelles Vorhersageverfahren für die Cuxhavener Küste (SIEFERT u. CHRISTIANSEN, 1977) wird es seit Herbst 1977 mit sehr gutem Erfolg angewendet.

## Summary

*A new method of predicting storm surges is described which makes it possible to forecast high water levels on the German North Sea Coast 5 to 6 hours in advance, with a high accuracy. 3 to 4 hours ahead no prediction has a deviation of more than 25 cm in height or  $\pm 30$  min in time. The method is not based on predicted data but on exact wind velocity and direction data from a coastal station and tide data from two gauges. The method was developed by analysing the storm surge curves and wind data of the 50 storm tides that have occurred in the German Bight since 1965. Another 50 storm tides back to 1930 were taken into account though exact wind data was not available for these. The method was tested retrospectively on all storm tides since 1965. It has been used very successfully along the Cuxhaven coast since Autumn 1977 (Siefert, Christiansen, 1977).*

## Inhalt

1. Vorbemerkung	1
2. Einführung	2
3. Pegelstationen für die Vorhersage	3
4. Frühprognose	4
5. Spätvorhersage	6
6. Ausblick	9
7. Schriftenverzeichnis	9

## 1. Vorbemerkung

Die Entwicklung des vorliegenden Sturmflutvorhersage-Verfahrens wurde finanziert von der Stadt Cuxhaven und dem Land Niedersachsen. Hierfür und für die Genehmigung, die Ergebnisse zu veröffentlichen, danken die Verfasser.

## 2. Einführung

Zur Sicherung von Menschenleben und materiellen Gütern muß einer genauen Sturmflutvorhersage große Bedeutung beigemessen werden. Dies gilt insbesondere für die deutsche Nordseeküste mit ihren Tideflüssen, die sehr häufig Sturmfluten ausgesetzt ist. Das Maß dieser Bedeutung rechtfertigt die Forderung, derartige Verfahren mit der höchstmöglichen wissenschaftlichen Gründlichkeit zu erstellen. Vorhersagemethoden, die auf der Basis von fünf oder 10 nachhergesagten Sturmfluten entwickelt und in der Praxis nicht hinreichend erprobt wurden, erfüllen diese Forderung nicht. Untersuchungen für die Cuxhavener Küste haben gezeigt, daß es auf Grund unterschiedlicher Windverhältnisse und damit verschiedenartiger Überlagerungen von Windstau- und Tidewellen mindestens neun verschiedene Sturmfluttypen gibt.

Einige Sturmflutvorhersage-Verfahren sind in der praktischen Anwendung unbefriedigend, wenn sie auf *Wetterprognosen* basieren (hauptsächlich Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsentwicklungen), die häufig zu ungenau sind. Andere Gründe für nicht zufriedenstellende Ergebnisse liegen z. T. darin, daß beim Aufbau der Verfahren und in der Vorhersage selbst stets nur der Scheitelwasserstand einer Sturmflut betrachtet wird, also nur ein Punkt auf einer Kurve. Informationen, die aus den Formen der Tide- und Windstaukurven sowie ihrer gegenseitigen Überlagerung zu gewinnen wären, bleiben dabei unberücksichtigt.

Um derartige Unzulänglichkeiten auszuschließen, wurde von den Verfassern ein Vorhersageverfahren entwickelt,

1. das auf der Analyse von Windstaukurven (Differenzkurven aus Sturmfluttide- und mittleren Tidekurven) aller seit 1930 registrierten rd. 100 Sturmfluten an verschiedenen Küstenpegeln basiert;
2. in dem genaue Windregistrierungen von 50 seit 1965 aufgetretenen Sturmfluttiden berück-

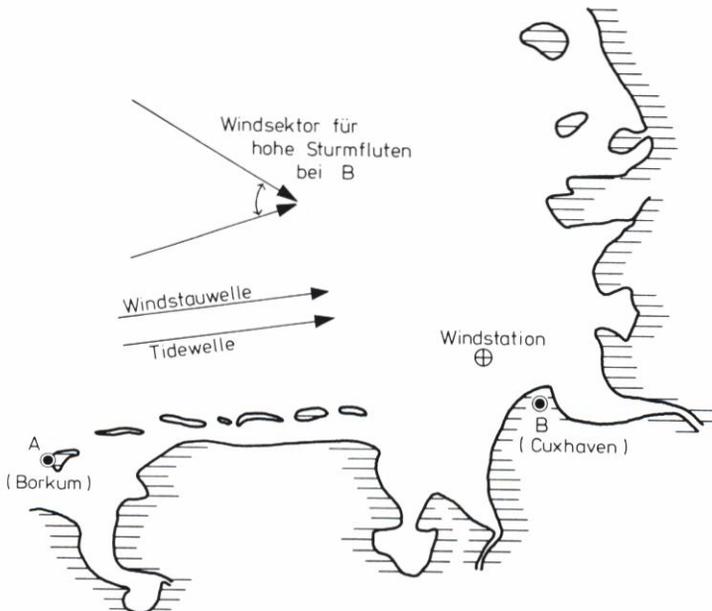


Abb. 1  
Übersichtsplan innere Deutsche Bucht

sichtigt wurden (Winddaten vor 1965 konnten wegen zu ungenauer Angaben nur qualitativ einbezogen werden);

3. bei dem für die Vorhersage nur exakt gemessene Tide- und Winddaten verwendet werden.

### 3. Pegelstationen für die Vorhersage

Zur Vorhersage von Sturmflutwasserständen an einem Küstenort B (s. Abb. 1) werden Eingangswerte von einem sog. *R e f e r e n z p e g e l* A benötigt, an dem sich bereits frühzeitig die für B zu erwartenden Ereignisse andeuten. Diese Bedingungen erfüllt der westlichste deutsche Küstenpegel bei Borkum (A). Zeitversetzt um 2,5 bis 3 h treten sowohl die astronomische Tide als auch die Windstauwelle bei den für B maßgebenden Sturmwindlagen aus West bei Station A früher auf (s. Abb. 2).

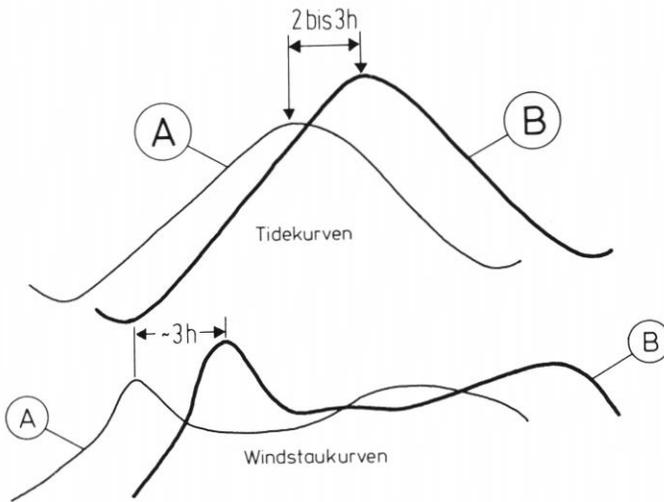


Abb. 2  
Phasenversatz der Tide- und Windstaukurven von A nach B

Ein Vergleich der Scheitelwasserstände gleicher Sturmflutereignisse an den Pegelstationen A und B (Abb. 3) zeigt bereits einen eindeutigen Trend. Gleichzeitig macht aber die Streuung der Meßwerte deutlich, daß allein die Kenntnis des Scheitelwasserstandes bei A (Borkum) für eine genauere Vorhersage bei B (Cuxhaven) nicht ausreicht.

### 4. Frühprognose

Bereits zur Tideniedrigwasserzeit, d. h. rd. 5 bis 6 h vor Eintritt des nachfolgenden Hochwassers, können über das Verfahren der sog. Frühprognose erste Abschätzungen der zu erwartenden Scheitelhöhe einer Sturmflut gemacht werden. Dazu werden aus den bekannten Teilen der Sturmfluttidekurven bei A und B die Windstaukurven konstruiert.

Die Windstaukurve an einem Pegel wird definiert als Differenzkurve zwischen der tatsächlich registrierten und der mittleren Tidekurve (Abb. 4). Sie enthält alle von den mittleren Verhältnissen abweichenden Einflüsse wie Wind, astronomische Ungleichheiten,

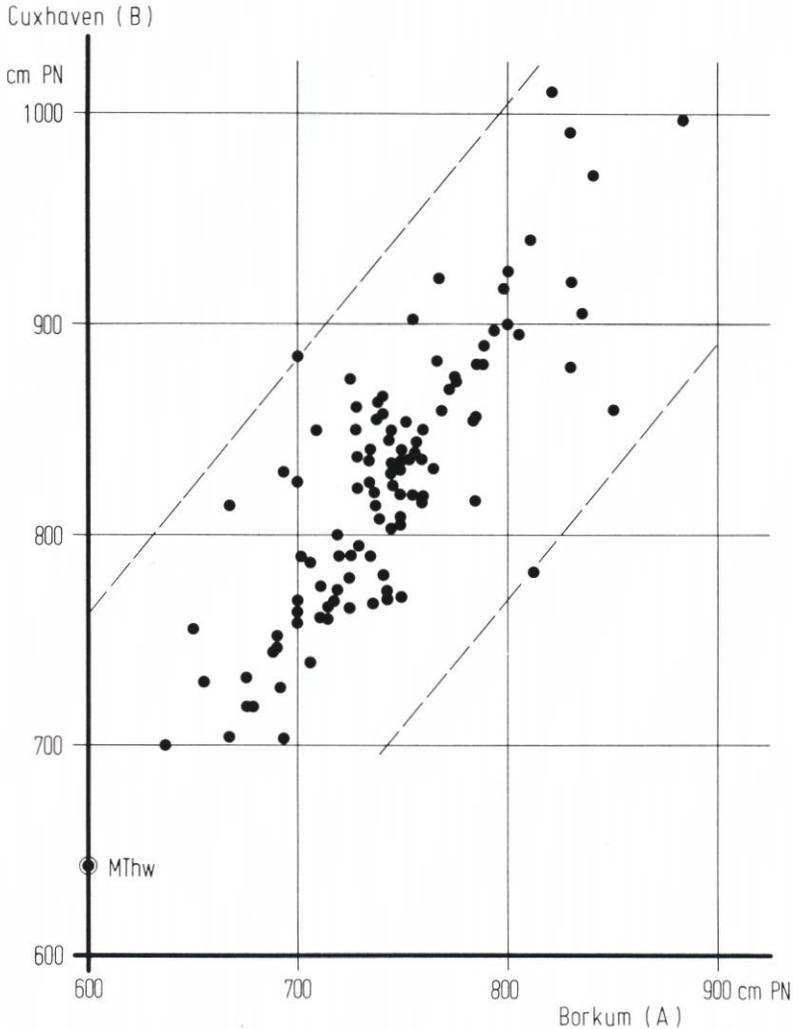


Abb. 3  
Vergleich der Sturmflut-Scheitelwasserstände bei A und B

Fernwellen, Luftdruck usw. Die Auswertung von mehr als 100 Windstaukurven der letzten Sturmfluten hat ergeben, daß ihre Analyse sehr brauchbare Aussagen über die weitere Entwicklung einer Sturmflut bis hin zum Scheitelwasserstand ermöglicht.

Nach einem statistischen Verfahren sind die Windstaukurven nach Form und Höhe in neun verschiedene Typen (s. Abb. 5) unterteilt worden. Danach kann über den Vorhersagezeitpunkt (erstmalig ab  $T_{nw}$ ) hinaus der mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit zu erwartende weitere Verlauf der Windstaukurve bis hin zum HThw prognostiziert werden. Zur Stützung dieser Extrapolation nach Statistik werden als weitere Informationsquelle der bisherige Verlauf der Windstaukurve von Pegel A sowie die bisherige Entwicklung von Windgeschwindigkeit (WV) und -richtung (WR) herangezogen. Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, ist vom Pegel A der bekannte Verlauf der Windstaukurve bereits ein guter Indikator für den

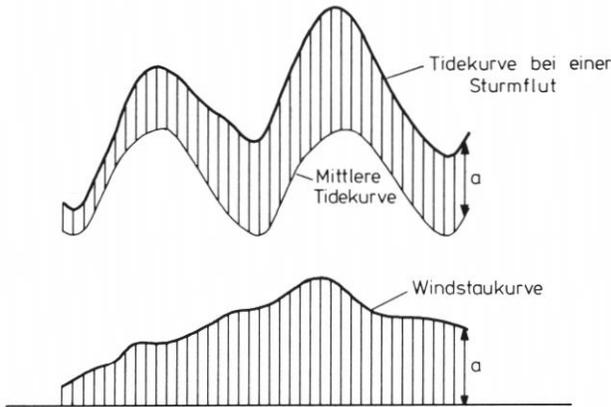


Abb. 4  
Windstaukurve (Definitionsskizze)

mit rd. 3 h Phasenversatz zu erwartenden weiteren Verlauf der Windstaukurve bei B. Da die Extrapolation der Windstaukurve B aus den bisherigen Informationen von A (s. Abb. 6) nur über einen Zeitraum von rd. 3 h als gesichert angesehen werden kann, verbleibt bei einer Prognose für rd. 5,5 h im voraus (bei Vorhersagen z. Z.  $T_{nw_B}$ ) eine unsichere Extrapolationszeitlücke von 2,5 h.

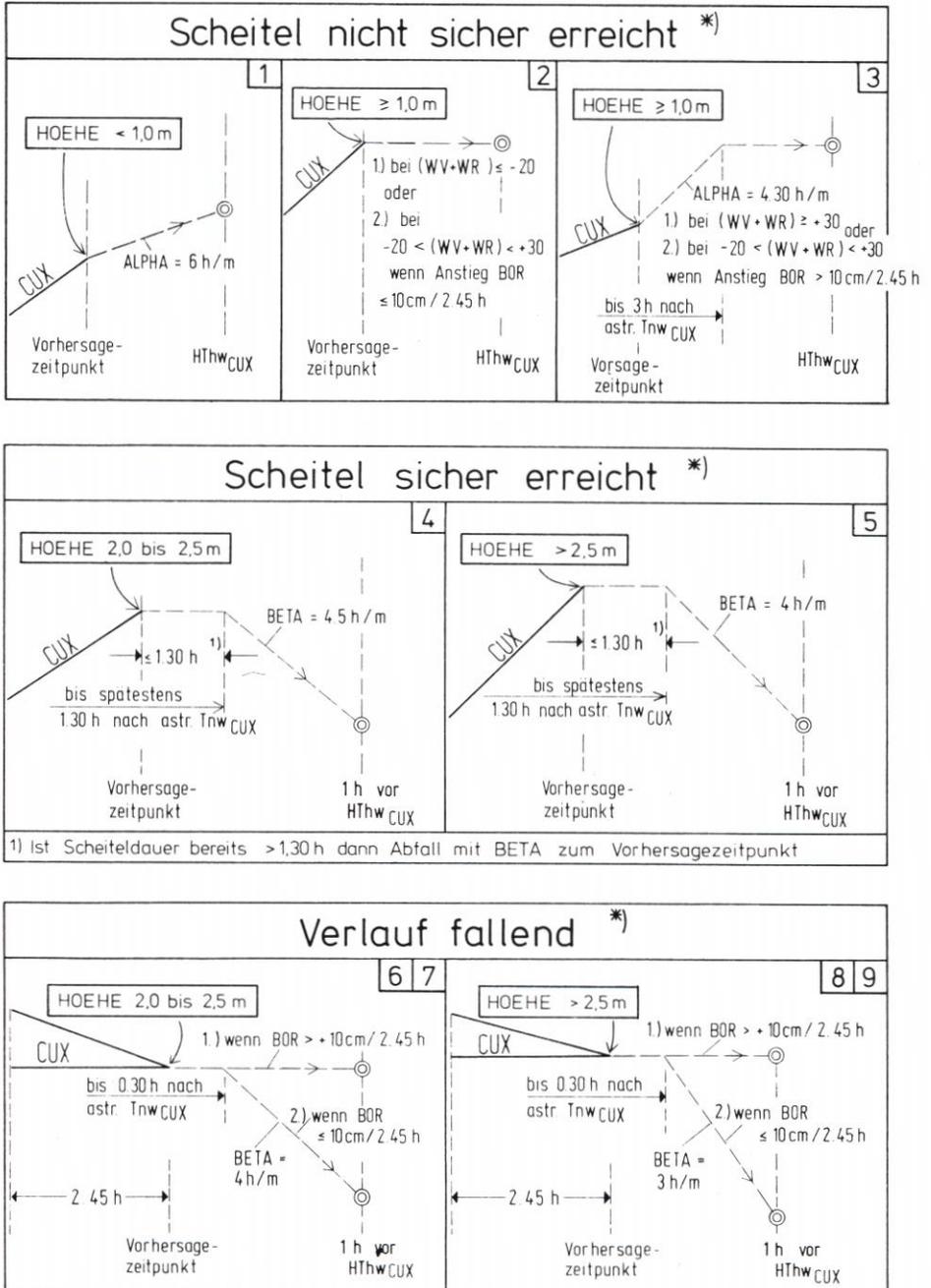
Die Genauigkeit bei der Frühprognose von Scheitelwasserständen aus dem statistischen Verfahren und der Windstaukurven-Extrapolation von Pegel A liegt daher im Mittel nur bei  $\pm 25$  cm mit einzelnen Ausreißern bis zu 80 cm, die jedoch nicht bei den höchsten Sturmfluten auftraten. Ihr Wert liegt somit in erster Linie im frühzeitigen Erkennen der zu erwartenden Größenordnung.

## 5. Spätvorhersage

**Methode I:** Zur Analyse der Ausreißer aus Abb. 3 wurden die Abweichungen der Meßwertpaare von einer mittleren Trendgeraden mit den Winddaten von der Station Scharhorn korreliert. Die Annahme, hier sinnvoll Zusammenhänge zu finden, gründete auf der Überlegung, daß Starkwindlagen bestimmter Richtungen bei der gegebenen Küstenformation (Abb. 1) nicht zwangsläufig zu vergleichbaren Sturmflutwasserständen bei A und B führen müssen. Bei normal zur Küstenlinie bei A herrschenden Winden (nördliche Richtung) wird der Windstau bei A im Verhältnis zu dem bei B relativ hoch sein, bei westlichen Winden entsprechend niedriger. Die Auswertung verschiedener Korrelationsansätze ergab folgendes:

- Die Abweichungen der Meßpunkte von der Trendgeraden  $HThw_B = 1,2 \cdot HThw_A - 80$  cm lassen sich über eine Korrelation mit den Winddaten optimal reduzieren, wenn die Entwicklung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus einem 3-h-Intervall vor dem Vorhersagezeitpunkt einbezogen werden. Diese sog. Windbeiwerte sind in Abb. 7 und 8 dargestellt.
- Die Windverhältnisse nach Erreichen des Scheitelwasserstandes bei A (das sind rd. 2,5 bis 3 h vor dem Scheitel bei B) sind für die Vorhersage nicht mehr von Bedeutung.

In allgemeiner Form ergibt sich aus diesen Zusammenhängen, daß zwischen Windeinwirkung und dadurch hervorgerufener Wasserstandsveränderung eine Phase von etwa 3 h liegt.



\*) Entscheidungshilfen liefert bisheriger Verlauf Windstau BOR

Abb. 5  
Extrapolationsanweisung für Windstautypen bei Cuxhaven

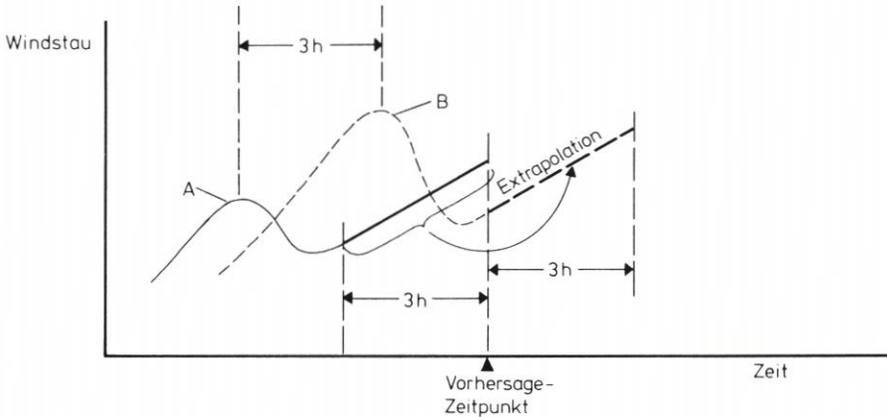


Abb. 6  
Extrapolation der Windstaukurve B nach dem Trend von A

Untersuchungen vor der niederländischen und englischen Küste stehen mit dieser Beobachtung in guter Übereinstimmung (WEENINK, 1958).

Für die Berechnung des Hochwasserscheitels bei B ergibt sich aus den o. g. Zusammenhängen folgende Gleichung:

$$HThw_B = 1,2 \cdot HThw_A + WV + WR - 80 \text{ cm} \quad \text{Gleichung ①}$$

Alle für die Berechnung von Gleichung ① erforderlichen Daten sind Meßwerte. Für das  $HThw_A$  sind Werte von 5 cm Genauigkeit ausreichend. Die zur Bestimmung von WV und WR erforderlichen Winddaten müssen mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \text{ m/s}$  bzw.  $10^\circ$  vorliegen; übliche Angaben, wie z. B. „10 Bft aus NW“, wären also in jedem Fall zu ungenau.

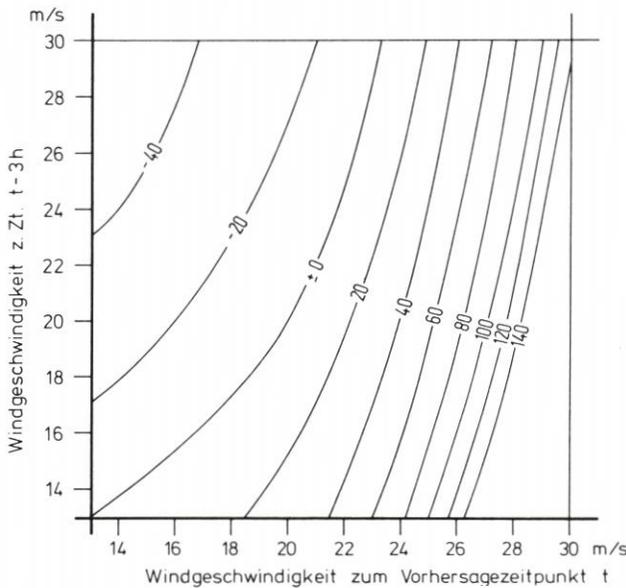


Abb. 7  
Windgeschwindigkeitsbeiwerte WV in cm

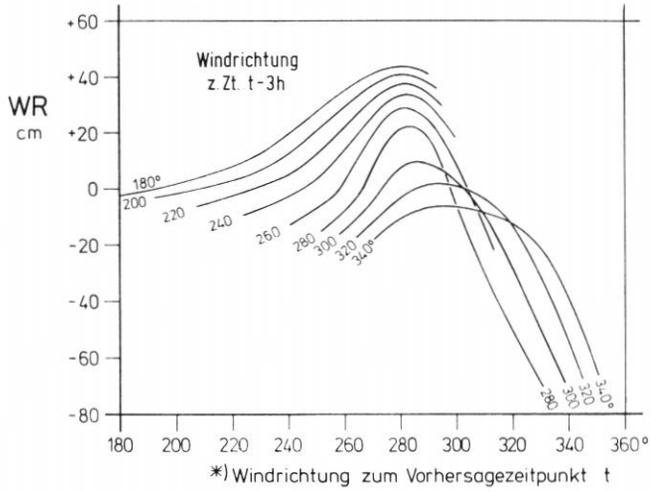


Abb. 8  
Windrichtungsbeiwerte WR in cm

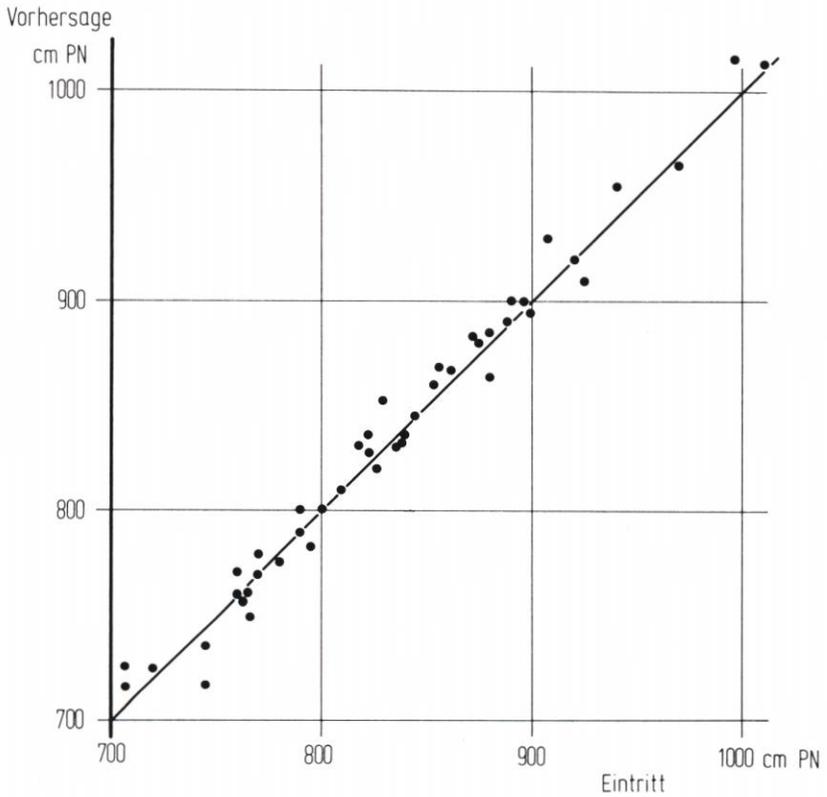


Abb. 9  
Vergleich vorhergesagter und eingetretener HThw-Werte Cuxhaven

**M e t h o d e II:** Zur Absicherung der Vorhersage nach Gleichung ① ist ein Kontrollverfahren entwickelt worden, bei dem über eine Extrapolation der Windstaukurve der Hochwasserscheitel bei B ermittelt werden kann. Diese Extrapolation ist möglich, da, wie bereits erwähnt, die Windstaukurven bei A und B ähnlich und um rd. 3 h phasenversetzt sind (s. Abb. 2 unten). Dazu wird, wie schon bei der Frühprognose, der Verlauf der Windstaukurve A aus dem Zeitraum der letzten 3 h vor dem Vorhersagezeitpunkt vom Endpunkt der Windstaukurve B als Extrapolation für die folgenden 3 h abgetragen (Abb. 6). Der Windstau z. Z. des erwarteten  $HThw_B$  (H) ergibt, addiert mit dem  $MThw$ , die erwartete Scheitelhöhe:

$$HThw_B = MThw_B + H \quad \text{Gleichung ②}$$

Die Höhenvorhersagen nach den Gleichungen ① und ② liegen meist nur wenige dm auseinander und ermöglichen so eine gute gegenseitige Kontrolle. Für die endgültige Höhenvorhersage wird der Mittelwert aus dem Ergebnis beider Gleichungen gewählt.

Ein Vergleich der so vorhergesagten Scheitelwasserstände für Cuxhaven mit den eingetretenen Werten (Abb. 9) zeigt gute Übereinstimmung.

## 6. Ausblick

Obgleich das Vorhersageverfahren auf physikalisch sinnvollen und größtenteils bekannten Zusammenhängen beruht, ist es ein empirisches Verfahren. Alle Informationen, die folgende Sturmfluten liefern, müssen daher im Sinne einer ständigen Überprüfung und ggf. Erweiterung des Verfahrens einbezogen werden. Während die Zeit- und Höhenprognosen bei den Spätvorhersagen (3 bis 4 h im voraus) ausreichend genau erscheinen, wäre eine Verbesserung der Frühprognosen wünschenswert. Dies wäre erreichbar, wenn die Entwicklung der Windverhältnisse für 2 bis 3 h im voraus mit genügender Genauigkeit vorhergesagt werden könnte. Die gegenwärtige Unsicherheits-Zeitenlücke bei der Extrapolation nach dem Verfahren der Frühprognose könnte damit geschlossen werden. Der Wunsch nach einer Wind-Kurzzeit-Prognose an die Adresse der Meteorologen sollte eigentlich erfüllbar sein, wo sogar Wetterprognosen auf Tage im voraus zukünftig befriedigt werden sollen.

## 7. Schriftenverzeichnis

- SIEFERT, W. und CHRISTIANSEN, H.: Entwicklung eines neuen Sturmflutvorhersage-Verfahrens für Cuxhaven (unveröff.). Cuxhaven, 1977.
- WEENINK, M. P. H.: A Theory and Method of Calculation of Wind Effects on Sea Levels in a Parlyenclosed Sea, with Special Application to the Southern Coast of the North Sea. Staatsdrukkerij, s'Gravenhage, 1958.