

# Eine neue geophysikalische Methode zur Vorhersage von Sturmfluten

Von Jochen Zschau, Hans-Joachim Kämpel, Rudolf Meißner,  
Uwe Carow

## Zusammenfassung

Zusätzliche Wassermassen von Sturmfluten beeinflussen Neigungsmessungen auf dem Festland in der gleichen Weise wie es auch Meereszeiten tun; sie verursachen eine Änderung der Lotrichtung und eine Kippung der Erdoberfläche in Richtung auf die Wasserlast. Der Einfluß von nicht gezeitenbedingten Meeresspiegelschwankungen der Nordsee auf drei Vertikalpendelstationen wurde mittels Kreuzkorrelationsrechnungen bestimmt. Danach eilen die beobachteten Neigungen der Flut in der Deutschen Bucht bis zu 12 Stunden voraus. Mit Pendelregistrierungen wurde eine Vorhersage der historischen Sturmflutserie vom Nov./Dez. 1973 simuliert. Alle neun Sturmfluten während dieses Zeitraumes hätten bemerkenswert gut vorausgesagt werden können.

## Summary

*The additional water mass of a storm surge influences tilt measurements inland from the sea in the same way as marine tides influence earth tidal measurements; they cause a deflection of the local vertical as well as a tilt of the crustal surface. Cross correlations were carried out to determine the influence of non tidal sea level variations on the 3 vertical pendulums in use. The measured tilt precedes the surge in the German Bay by up to 12 hours. Tilt meter records were used to simulate a forecast of the historical storm surge series of Nov./Dec. 1973. All 9 storm surges within this period could be predicted remarkably well.*

## Inhalt

1. Einführung . . . . .	71
2. Zeitreihenuntersuchungen . . . . .	73
2.1 Kreuzkorrelationen . . . . .	73
2.2 Simulation einer Vorhersage . . . . .	77
3. Diskussion . . . . .	77
4. Schriftenverzeichnis . . . . .	78

## 1. Einführung

Seit einigen Jahren werden Erdgezeitenuntersuchungen als mögliche Methode zur Bestimmung von astronomischen Meereszeiten fernab der Küste diskutiert. Erste Versuche hierzu haben KUO et al. (1979) ausgehend von Gezeitenbeobachtungen der Schwere auf Kontinenten unternommen. Ihre Untersuchungen basieren auf dem „indirekten Effekt“, der in besonderem Maße bei Neigungsmessungen auftritt. Er ist in Abb. 1 schematisch am Beispiel von Neigungsmessungen mit dem Vertikalpendel erläutert. Danach wirken die zusätzlichen Wassermassen einer Flut in dreierlei Weise auf Neigungsmessungen:

1. Sie verändern die örtliche Lotrichtung auf Grund der gravitativen Anziehung der Wassermassen (NEWTON'sche Neigung);
2. Sie bewirken eine Kippung der Erdoberfläche als Folge der wechselnden Belastung des Meeresbodens (primäre Auflastneigung);

3. Infolge der neuen Massenverteilung resultiert eine sekundäre Lotrichtungsänderung (sekundäre Auflastneigung).

Die genannten Effekte bewirken sowohl den Ausschlag eines Vertikalpendels als auch eine Kippung des Pendelgehäuses. Theoretische Abschätzungen von ZSCHAU (1979a) haben gezeigt, daß der Gesamteffekt einer größeren Sturmflut in der Deutschen Bucht einige Zehner msec (Milli-Bogensekunden) an der Neigungs-Meßstation bei Kiel betragen kann. Die instrumentelle Genauigkeit der benutzten ASKANIA-Vertikalpendel liegt bei 0.2 msec. (Die M<sub>2</sub>-Erdzeiten-Amplitude für Kiel beträgt 6.4 bzw. 5.2 msec für die Ost-West bzw. Nord-Südrichtung; 1 msec  $\approx$  5 nanoradian.) Zur Zeit registrieren in Norddeutschland drei dieser Geräte, und zwar in Kiel-Rehmsberg, Heide und Medelby (K,H,M in Abb. 2).

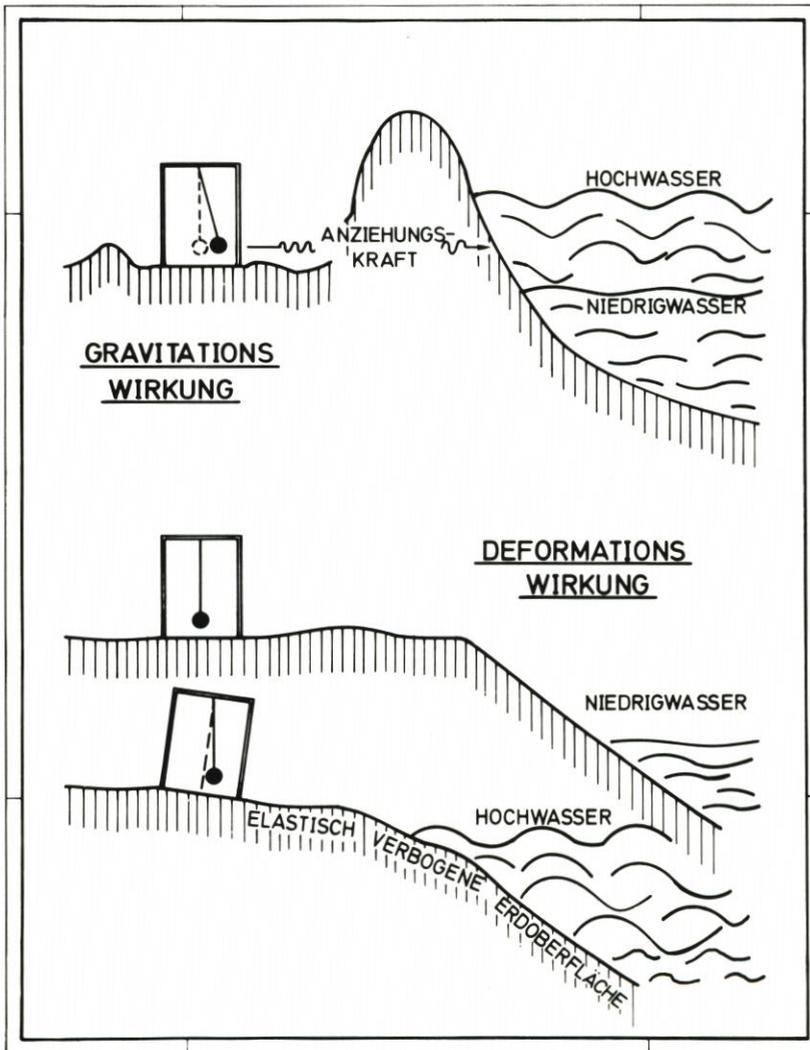


Abb. 1. Wirkung von Hochwasser auf ein Vertikalpendel: NEWTON'sche Neigung (oben), Auflasteffekt (unten)

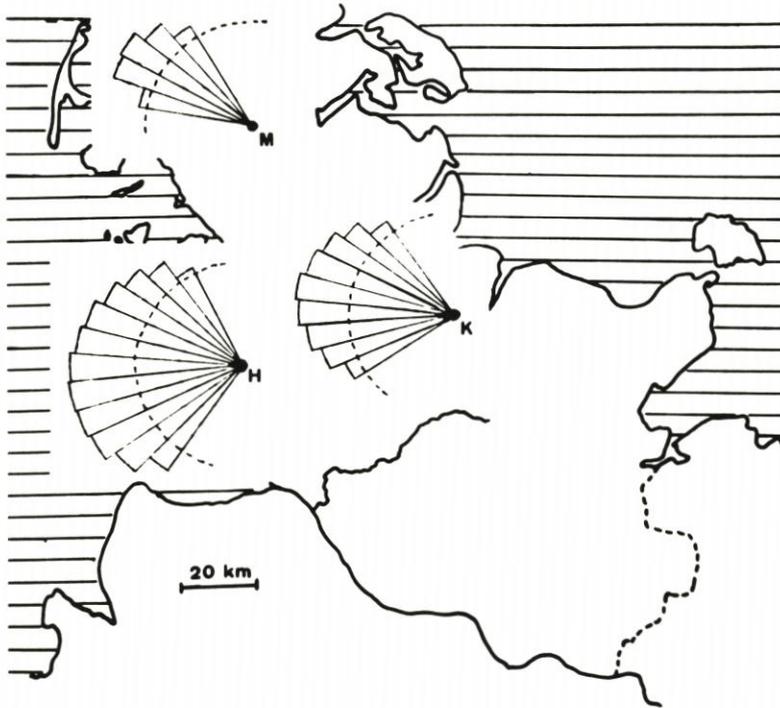


Abb. 2. Gemittelte Kreuzkorrelationsfaktoren zwischen Wasserspiegelschwankungen der Nordsee am Pegel Büsum und Neigungen der Vertikalpendel bei Kiel-Rehmsberg (K), Heide (H) und Medelby (M), sofern sie 0.5 überschreiten. Die Radien der Sektoren geben die Größe des Korrelationsfaktors für je einen 10°-Bereich an. Gestrichelte Kurve: Korrelationsfaktor = 0.5; Zeitreihenlängen für die einzelnen Stationen: Kiel-R. - 320 Tage, Heide - 135 Tage, Medelby - 74 Tage

## 2. Zeitreihenuntersuchungen

### 2.1 Kreuzkorrelationen

Korrelationsbetrachtungen geben Aufschluß über die Ähnlichkeit von Zeitreihen. Der Korrelationsfaktor 1 bedeutet vollkommene Ähnlichkeit zwischen zwei Zeitreihen,  $-1$  eine Vorzeichenumkehr. Für mehrere Monate umfassende Neigungs-Registrierungen aller drei Stationen wurde die Kreuzkorrelationsfunktion mit dem Pegel Büsum (ca. 20 km entfernt von Heide) berechnet. Hierfür wurde der Periodenbereich von 1.5 bis 6 Tagen ausgewählt, um die Korrelationsfunktionen frei von Gezeitenschwankungen und von der nicht-stationären Drift des Pendels zu erhalten. In Abb. 2 sind die mittleren Korrelationsfaktoren für verschiedene Neigungsrichtungen als Radien von Sektoren dargestellt. Sie zeigen ausgeprägte Korrelationen für einen breiten Bereich westlicher Richtungen. Dies war für die Station Kiel schon von ZSCHAU (1979a) gefunden worden. Daraus darf der Schluß gezogen werden, daß sich Wasserstandsschwankungen der Nordsee deutlich in den Pendelaufzeichnungen bemerkbar machen. Die Zeitcharakteristik der Korrelationen gibt detailliertere Informationen über diesen Effekt. In Abbildungen 3 und 4 sind die Korrelationsfunktionen für ein 2 1/2 Monate langes Zeitintervall aus dem Jahre 1977 für verschiedene Himmelsrichtungen mit Verschiebungen von  $-60$  bis  $+60$  Stunden der jeweiligen Zeitreihen gegeneinander dargestellt. Negative

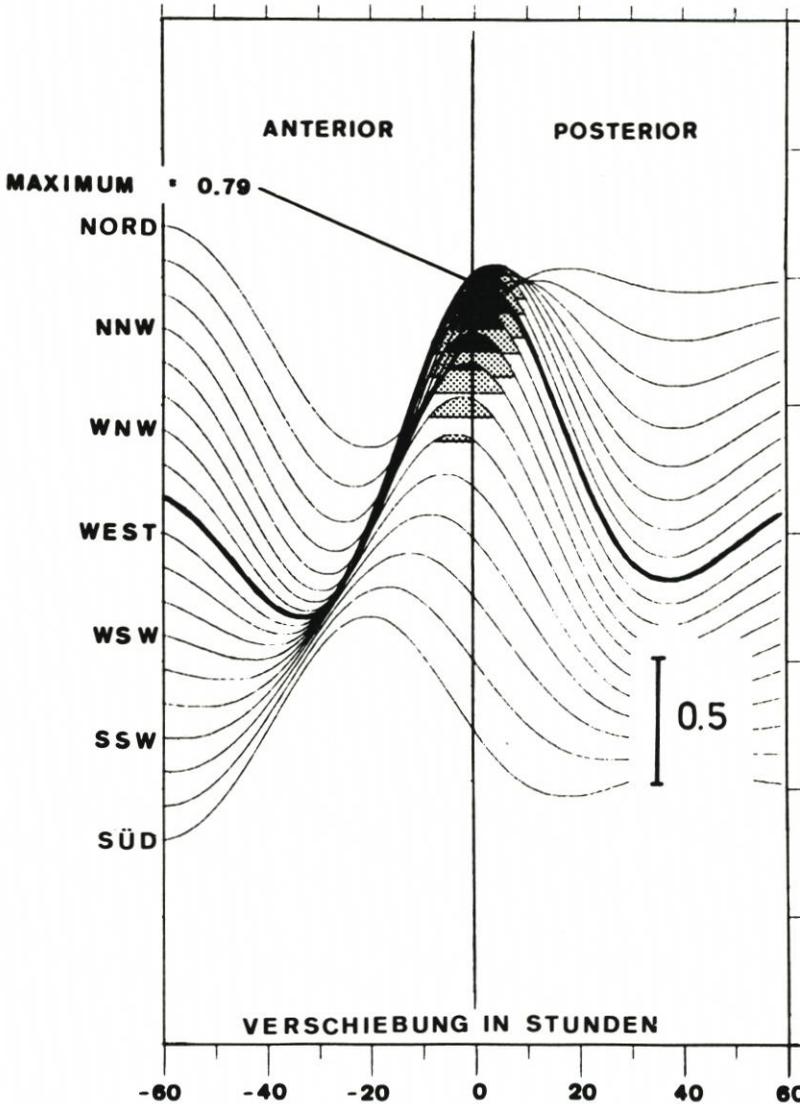


Abb. 3. Normierte Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen dem Pegel Büsum und Neigungen an der Station Kiel-R. für Neigungsrichtungen von Süd über West nach Nord in 10°-Abständen; Zeitraum: 18. 9. 77 bis 2. 12. 77; schwarz: Korrelationsfaktor über 0,7, grau: Korrelationsfaktor über 0,6 Anterior: Die Neigungen eilen dem Wasserstand voraus; Posterior: Die Neigungen treten gegenüber dem Wasserstand verzögert auf

Verschiebungen bedeuten einen voreilenden Einfluß von Wasserspiegelschwankungen in den Neigungsaufzeichnungen gegenüber dem aktuellen Pegelstand an der Küste. Für die Station bei Kiel (Abb. 3) treten Korrelationsfaktoren von über 0,7 bis -5 Stunden Verschiebung auf, Faktoren über 0,6 bis -8 Stunden. Für Heide (Abb. 4) tritt das voreilende Verhalten des Nordseewasserspiegels in den Neigungsmessungen noch ausgeprägter auf. Maxima bis 0,87 fallen in den „anterior“-Bereich (negative Verschiebungen), Faktoren von über 0,6 erscheinen

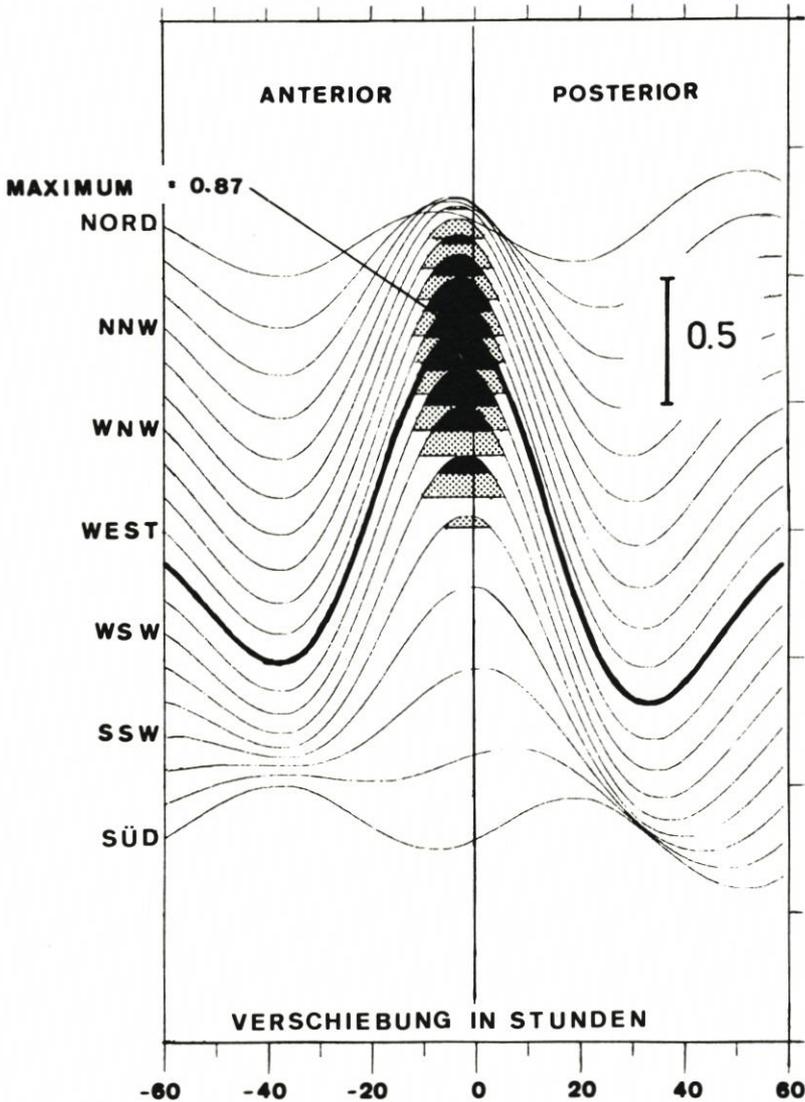


Abb. 4. Wie Abb. 3, jedoch für Neigungen der Station Heide

bis zu -12 Stunden. Die bisher vergleichsweise wenigen Daten der Station Medelby unterstreichen die Ergebnisse von Kiel und Heide. Diese Berechnungen zeigen, daß Neigungsmessungen tatsächlich Informationen von Fluten vor deren Eintreffen an der Küste liefern.

Gleichartige Kreuzkorrelationen mit Pendeldata wurden für Luftdruckänderungen und Wasserspiegelschwankungen der Ostsee durchgeführt. Dabei hat sich herausgestellt, daß der Einfluß des örtlichen Luftdrucks auf die Registrierungen von der gleichen Größenordnung ist wie derjenige der Nordseewassermassen. Für die Station Kiel ist der Luftdruckeinfluß als eine Folge der örtlichen Topographie sogar noch stärker. Der verantwortliche Mechanismus ist äußerst kompliziert und umfaßt sowohl Diffusionsvorgänge im Porenraum des Bodens als auch Druckschwankungen im Grundwasser (ZSCHAU, 1979b). Der Luftdruckeinfluß tritt

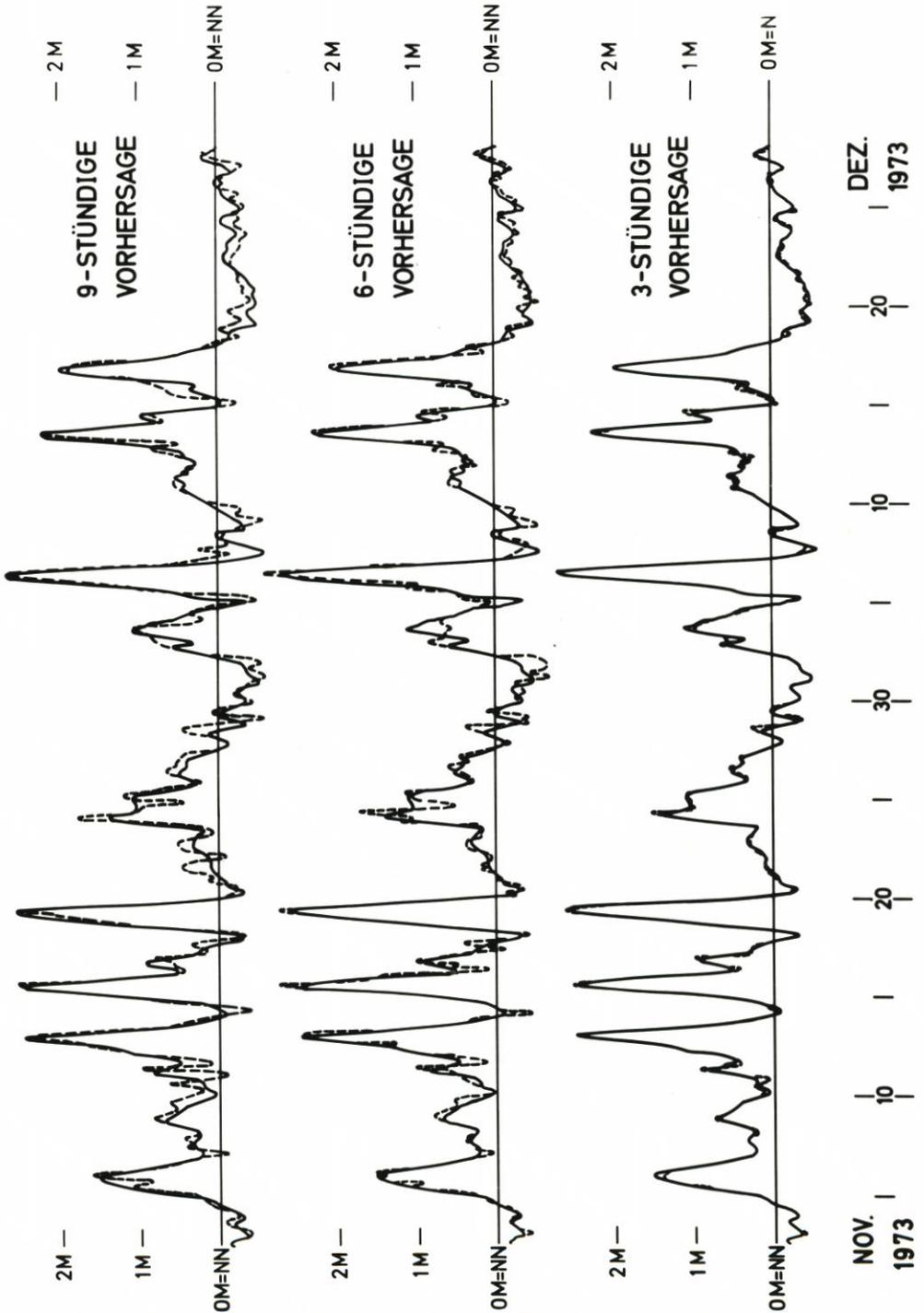


Abb. 5. Simulierte Vorhersagen für die meteorologische Tide in Büsum, ausgehend von Neigungsbeobachtungen an der Station Kiel-R. Durchgezogene Kurven: gemessener Wasserstand; gestrichelte Kurven: vorhergesagter Wasserstand

allerdings in den Pendelregistrierungen bei allen Stationen um mindestens fünf Stunden gegenüber dem Luftdruck selbst verzögert auf. Bei bekanntem Luftdruck läßt er sich daher im voraus abschätzen und kann so bei Sturmflutvorhersagen berücksichtigt werden. Außerdem liegen die größten Korrelationsfaktoren zwischen Neigung und Luftdruck einheitlich in süd-süd-östlicher Richtung und damit etwa senkrecht zu den Neigungsrichtungen, die für eine Flutvorhersage geeignet sind. Im Unterschied zum Luftdruck kann der Einfluß der Ostsee nicht ohne weiteres korrigiert werden, da er mit etwa den gleichen Phasenverschiebungen wirkt wie der Einfluß der Nordsee. Der Effekt ist recht groß für Kiel, kann für Heide und Medelby jedoch vernachlässigt werden.

## 2.2 Simulation einer Vorhersage

Zur Simulation einer Flutvorhersage für die westliche Nordseeküste wurden die Zeitreihen vom November und Dezember 1973 herangezogen, denn innerhalb dieser zwei Monate bedrohten nicht weniger als neun Sturmfluten die Westküste Schleswig-Holsteins. Mehrdimensionale Regressionen und Korrelationen zwischen der beobachteten Neigung in Kiel, dem Wasserspiegel bei Büsum und dem Luftdruck wurden ausgeführt, um die meteorologische Tide bei Büsum nach Eliminierung der astronomischen Tiden durch Filterung (ZSCHAU, 1979a) „nachherzusagen“. Hier traten zwischen dem Pegel Büsum und den Neigungen noch größere Korrelationsfaktoren auf als für den Zeitraum im Herbst 1977 (Abb. 3). Dies ist sicherlich auf die außerordentlich hohe Anzahl von schweren Sturmfluten während der Monate Nov.-Dez. 1973 zurückzuführen. Zur weiteren Verkleinerung des Vorhersagefehlers wurde WIENER's lineare Vorhersage-Filter-Methode angewendet (ROBINSON u. TREITEL, 1967). Die Ergebnisse zeigt Abb. 5. Alle meteorologischen Fluten (4 schwere, 2 mittlere, 3 kleinere) hätten mit hoher Genauigkeit vorausgesagt werden können. Die 9stündige Vorhersage hat einen mittleren Fehler von nur 29 cm, die 6stündige Vorhersage von 18 cm und die 3stündige von nur 11 cm.

## 3. Diskussion

Die statistischen Untersuchungen (siehe auch ZSCHAU, 1979a) legen nahe, daß der beobachtete Phasenvorlauf in manchen Neigungsrichtungen gegenüber der an der Küste vorbeiziehenden Flut auf eine amphidromische Welle innerhalb der Nordsee zurückzuführen ist, die sich in etwa einem Tag von Schottland entlang der britischen Ostküste, vorbei an der belgischen, holländischen, westdeutschen und dänischen Küste nach Norwegen verlagert. Derartige amphidromische Wellen können sich als Folge von sogenannten „external surges“ bilden, die unter einem Tiefdruckgebiet im Atlantik entstehen und häufig mit Sturmfluten in der Deutschen Bucht einhergehen (HENSEN, 1966). Ein anderer bedeutender Einfluß mag von der regionalen Luftdruckverteilung über Nordeuropa herrühren, die im Falle von Sturmfluten zu heftigen Winden aus Nordwest führt. Druckgradienten über der Nordsee wurden bereits zur Vorhersage der Fluthöhen an der deutschen Küste herangezogen (THIEL, 1964).

Zusammenfassend kann gefolgert werden, daß Neigungsmessungen ein geeignetes Mittel zu sein scheinen, um Ozeanographen und Küsteningenieuren bei der früheren und genaueren Vorhersage von Sturmfluten behilflich zu sein, da die Fluten der Deutschen Bucht, noch bevor sie die Küste erreichen, sich deutlich in den westlichen Richtungen der drei benutzten Pendelstationen abzeichnen. Das z. T. noch fehlende Verständnis über den Ablauf verschiede-

ner physikalischer Prozesse beeinträchtigt nicht die Genauigkeit der Vorhersage-Methode. Diese ist rein empirisch und hängt nicht vom Zutreffen gewisser Mechanismen ab. Wir hoffen, durch Analysieren von weiteren Daten bei unterschiedlichen Wetterbedingungen eine bessere Einsicht in die beteiligten physikalischen Zusammenhänge zu gewinnen.

#### 4. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- HENSEN, W.: Bericht der Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste, Jg. 14, H. 1, 1966.
- KUO, J. T., JACHENS, R. C. u. LEE, S. S.: The North Eastern Pacific O1 and the North Atlantic M2 ocean tides as derived from inversion. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Earth Tides, held at Bonn, 1979.
- ROBINSON, E. A. u. TREITEL, S.: Principles of digital Wiener filtering. Geophys. Prosp. XV, No. 3, 1967.
- THIEL, G.: Die Sturmflut der Nord- und Ostsee vom 16. und 17. Februar 1962. Deutsche Hydrogr. Zeitschrift, Bd. 17, H. 4, 1964.
- ZSCHAU, J.: Lotschwankungsanomalien in Erdzeitenregistrierungen mit dem Askania-Bohrloch-Vertikalpendel nach A. GRAF. Diss. Univ. Kiel, 1974.
- ZSCHAU, J.: Prediction of storm surges from marine loading tilt measured inland from the sea. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Earth Tides, held at Bonn, 1979(a).
- ZSCHAU, J.: Airpressure induced tilt in porous media. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Earth Tides, held at Bonn, 1979(b).