

INSTITUT FÜR GEOPHYSIK
IM INGENIEURWESEN
POSTFACH 468 - TEL. 6051
20 KIEL 1

13. 8. 84

27528

4/4

4/5

5/3

STURMFLUTVORHERSAGE

MIT VERTIKALPENDELN

Abschlußbericht

Aus dem Institut für Geophysik der Universität Kiel

Juli 1979

26454 -1

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG
IM KÜSTENINGENIEURWESEN
POSTFACH 44 48 - TEL. (0431)
23 KIEL 1

13. 9. 84

S T U R M F L U T V O R H E R S A G E

M I T V E R T I K A L P E N D E L N

Abschlußbericht

Aus dem Institut für Geophysik der Universität Kiel

Juli 1979

№ 27528

ABSCHLUSSBERICHT

des Instituts für Geophysik der Universität Kiel
über die Untersuchungen zur

STURMFLUTVORHERSAGE MIT VERTIKALPENDELN

Inhalt:	1. Zusammenfassung	1
	2. Einleitung	2
	3. Vertikalpendelmessungen 1978/79	4
	4. Datenauswertung	8
	4.1 Korrelationsuntersuchungen	8
	4.2 Betrachtung einzelner Sturmflut- ereignisse	20
	4.3 Theoretische Berechnung des Ein- flusses der Sturmflut vom 3. Januar 1976	33
	4.4 Vorhersagekurven des Pendels der Station Kiel-Rehmsberg	37
	5. Schlußfolgerungen	47
	6. Danksagung	51
	7. Literatur	52

1. ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswertung der angefallenen Daten war neben der Fortführung der Vertikalpendelmessungen an den Stationen Kiel-Rehmsberg, Heide und Medelby die wesentlichste Aufgabe des Auftragnehmers im Verlauf des Vertragsjahres 1978. Durchgeführt wurden Korrelationsberechnungen für verschiedene Zeiträume und für Pendelregistrierungen aller drei Stationen, Untersuchungen einzelner Sturmflutereignisse vom Herbst/Winter 1973 und vom Herbst/Winter 1977, sowie theoretische Berechnungen über den Einfluß der schweren Sturmflut vom 3. Januar 1976. Ausgehend von den hierbei gewonnenen Erfahrungen wurden vorläufige Vorhersagekurven erstellt, die bereits für eine aktuelle Sturmflutvorhersage wertvolle Informationen über die Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht erkennen lassen.

2. EINLEITUNG

Der folgende Abschlußbericht des Projektes "Sturmflutvorhersage mit Vertikalpendeln" wird vorgelegt aufgrund des Vertrages zwischen dem Land Schleswig-Holstein, namens und für Rechnung der Freien Hansestädte Bremen und Hamburg, sowie des Landes Niedersachsen, und dem Institut für Geophysik der Universität Kiel. Der Bericht orientiert sich an dem im Vertrag vereinbarten Hauptziel der Untersuchungen, nämlich der Aussage, ob das neue Verfahren als Ergänzung zu den herkömmlichen Verfahren und zu den hydrodynamisch-numerischen Modellen in unmittelbarer Zukunft praktikabel ist. Dazu waren folgende Untersuchungen vorgesehen:

- (a) Einbeziehung von Messungen an allen drei Vertikalpendel-Stationen in Schleswig-Holstein;
- (b) neben den Sturmfluten der Monate November/Dezember 1973, die alle von "external surges" (Fernwellen) begleitet waren, sollten weitere, möglichst unterschiedlich abgelaufene Fluten analysiert werden;
- (c) modelltheoretische Nachvollziehung der sehr schweren Sturmflut vom 3. Januar 1976;
- (d) Überprüfung des Verfahrens für Perioden mit normalen Wasserständen.

Einige Ergebnisse zu diesen Untersuchungen wurden bereits in dem Zwischenbericht zum 1.10.1978 und in dem vorläufigen Abschlußbericht vom 19.4.1979 vorgelegt. Sie sollen hier aber noch einmal im Zusammenhang dargestellt werden.

Zunächst wird eine Übersicht über die in den Jahren 1978 bis Mitte 1979 an den Stationen Kiel-Rehmsberg, Medelby und

Heide durchgeführten Vertikalpendelmessungen gegeben. Im ersten Abschnitt des Teils 4, Datenauswertung, werden dann Ergebnisse von Korrelationsberechnungen gezeigt, die erste Aufschlüsse über die Beeinflussung von Vertikalpendel-Registrierungen aller drei Stationen durch Wasserstandsänderungen der Nordsee, der Ostsee und durch den örtlichen Luftdruck geben (zu(a)). Die Berechnungen basieren auf unterschiedlichen Zeiträumen und sollen daher Rückschlüsse auf die allgemeine Gültigkeit der erhaltenen Korrelationsgrößen erlauben (zu(d)). Die Allgemeingültigkeit ist Voraussetzung für eine zuverlässige Wasserstandsvorhersage. Weitere Erkenntnisse hierzu sind einer Diplomarbeit, die am Kieler Institut für Geophysik im April 1979 abgeschlossen wurde, zu entnehmen.

Im nächsten Abschnitt 4.2 werden einzelne Sturmflutereignisse näher betrachtet. Insbesondere werden neunstündige Neigungsänderungen aller drei Pendel den entsprechenden Wasserstandsänderungen am Nordseepegel Bülsum gegenübergestellt (zu (a),(b)). Diese Gegenüberstellung dient dem Ziel herauszufinden, inwieweit die beobachtete charakteristische Beeinflussung der Vertikalpendel-Registrierung sowohl durch Wasserstandsschwankungen der Nordsee und der Ostsee, als auch durch Luftdruckänderungen nicht nur statistisch belegt ist, sondern auch bei einzelnen Sturmflutwetterlagen gilt.

Im Abschnitt 4.3 über die modelltheoretische Nachvollziehung der sehr schweren Sturmflut vom 3. Januar 1976 (zu(c)) wird die theoretisch zu erwartende Beeinflussung eines Pendels an der Station Kiel-Rehmsberg vorgestellt, wie sie sich aus der Simulation dieser Sturmflut mittels HN-Modellen für die

gesamte Nordsee ergibt. Während dieser Flut war leider kein Vertikalpendel in Schleswig-Holstein im Einsatz. Die modelltheoretischen Betrachtungen sollen daher zeigen, ob diese katastrophale Sturmflut aufgrund von Vertikalpendelmessungen rechtzeitig hätte vorhergesagt werden können.

Im letzten Abschnitt wird auf die Kernfrage eingegangen, wie nach Korrektur von Luftdruck- und Ostsee-Einfluß Vertikalpendelkurven (Neigungskurven) erhalten werden, die für eine aktuelle Sturmflutvorhersage herangezogen werden können. Darüberhinaus werden Möglichkeiten aufgezeigt, das vorgeschlagene Verfahren zur Sturmflutvorhersage in Zukunft weiter zu verbessern.

3. VERTIKALPENDELMESSUNGEN 1978/79

Seit Installation eines Vertikalpendels an der zuletzt eingerichteten Station Medelby am 14.8.1977 standen alle drei Pendelstationen in Schleswig-Holstein - Kiel-Rehmsberg, Heide und Medelby (Abbildung 1) - für Untersuchungen des Projekts "Sturmflutvorhersage mit Vertikalpendeln" zur Verfügung. Die wichtigsten Stationsdaten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Der Betrieb der Stationen Kiel-Rehmsberg und Heide lief in den Jahren 1978 bis Mitte 1979 weitgehend störungsfrei. Gelegentlich notwendige Reparaturen am Schreiber und an der Elektronik der Registriereinheit führten zu kürzeren Ausfällen.

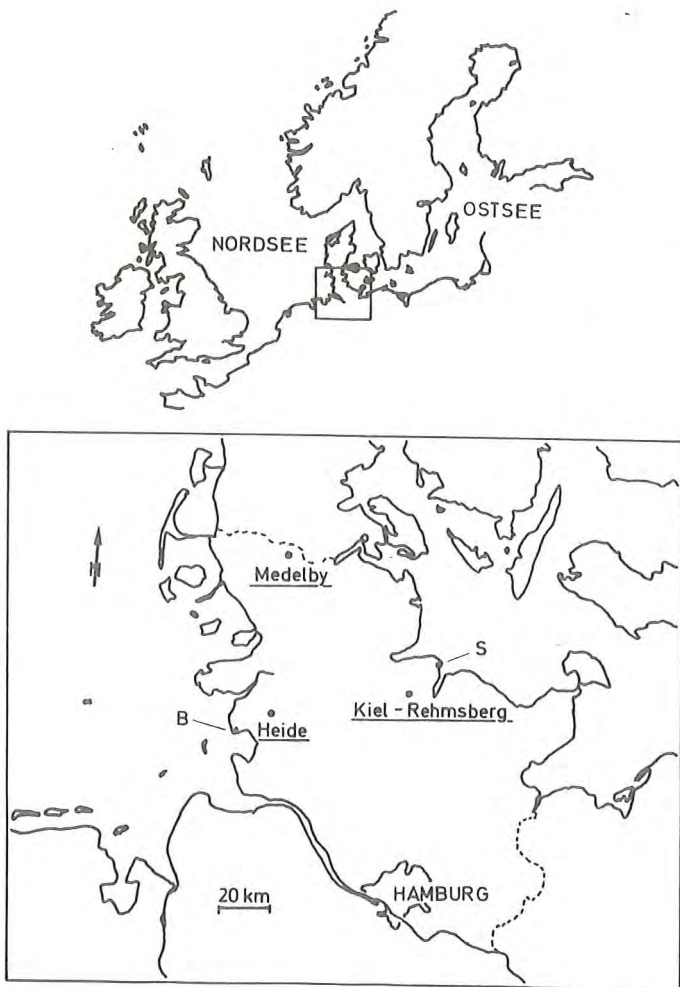


Abb.1: Lage der drei Vertikalpendelstationen in Schleswig-Holstein sowie der für die Korrelationsberechnungen benutzten Pegel der Nordsee (B: Büsum) und der Ostsee (S: Strande)

Station:	Heide	Medelby	Kiel-Rehmsberg
geogr. Länge	54°13' 5" N	54°48' 50" N	54°18' 51" N
geogr. Breite	9°6' 32" E	9° 9' 51" E	9°59' 13" E
Höhe über NN	8 m	20 m	41 m
kürzeste Entf. zur Nordsee	12 km	30 km	63 km
Entf. zum Pegel Büsum	18 km	78 km	77 km
kürzeste Entf. zur Ostsee	55 km	16 km	12 km
Entf. zum Pegel Strande	75 km	76 km	18 km
Gerät	ASKANIA-Gezeiten-Bohrlochpendel		
	GBP 13	GBP 14	GBP 3
Tiefe des Bohr- lochs	30 m	30 m	30 m
Untergrund	pleistoz. Sande versch. Korngröße	pleistoz. Sande versch. Korngröße	pleistoz. Sande und Kiese mit Geschiebemergel u. Schluffeinkl.

Tab.1: Daten zu den drei Vertikalpendelstationen

Dazu kamen einige Ausfälle durch Unterbrechungen der Stromversorgung.

Größere Schwierigkeiten traten anfangs an der Station Medelby auf. Zweimal gab es Ausfälle wegen Abteufung einer neuen Bohrung (die erste war undicht geworden), einmal mußte das Pendel in Kiel repariert werden (Ausfall eines Justiermotors). Kürzere Ausfälle gab es ebenfalls aufgrund von Defekten am Schreiber und durch Unterbrechungen der Stromversorgung. Seit dem 17.7.78 befindet sich das Pendel in einer wasserdichten,

eisenverrohrten Bohrung und läuft seitdem ohne wesentliche Störungen. Insgesamt fehlen von der Station Medelby aus den Jahren 1978 bis Mitte 1979 ca. 55 Registriertage.

Während der neun Sturmflutereignisse im Herbst/Winter 1977/78, bei denen die 8 m - Marke des Pegels Büsum überschritten wurde (entsprechend ca. 1,50 m über mittlerem Tidenhochwasser (MThw)), waren jeweils alle drei Pendelstationen in Betrieb und lieferten lückenlose Registrierungen. Damit liegen seit 1971 Vertikalpendelbeobachtungen zu den in Tabelle 2 angegebenen Sturmfluten vor. Weitere Sturmfluten ereigneten sich

Eintrittszeit am Pegel Büsum	Tidehochwasser (cm)	Pendelbeobachtung an den Stationen
13.11.1973 / 14.16	903	Kiel-Rehmsberg
16.11.1973 / 3.40	919	
19.11.1973 / 19.25	903	
6.12.1973 / 21.24	937	
14.12.1973 / 3.20	917	
17.12.1973 / 6.00	835	
1.10.1977 / 14.56	818	Kiel-Rehmsberg, Heide, Medelby
12.11.1977 / 13.03	838	
13.11.1977 / 1.41	850	
13.11.1977 / 13.49	834	
14.11.1977 / 2.13	807	
15.11.1977 / 3.08	882	
15.11.1977 / 14.55	835	
24.12.1977 / 12.24	856	
31.12.1977 / 2.12	855	

Tab.2: Vertikalpendelbeobachtungen von Sturmfluten mit mindestens 1,50 m über MThw am Pegel Büsum seit 1971 (MThw der Jahre 1961 - 1970 : 6,51 m)

im Dezember/Januar 1974/75, im September 1975 und im Januar 1976. Leider waren von Anfang 1974 bis Anfang 1976 keine Vertikalpendelstationen in Schleswig-Holstein besetzt. Die beiden Vertikalpendel des Kieler Instituts für Geophysik waren in dieser Zeit bei einem Projekt in Süddeutschland eingesetzt. Das Projekt "Sturmflutvorhersage mit Vertikalpendeln" bestand damals noch nicht.

4. DATENAUSWERTUNG

4.1 Korrelationsuntersuchungen

Um mittlere zeitliche Verschiebungen zwischen dem Eintreffen von Hochwassern an der deutschen Nordseeküste und dem Eintreten ihrer Wirkung in Pendelregistrierungen festzustellen, sind Kreuzkorrelationsrechnungen zwischen einem Nordseepiegel (hier wurde der Pegel Büsum gewählt) und Pendelbewegungen in verschiedenen Ausschlagsrichtungen ein geeignetes Verfahren. Korrelationsbetrachtungen geben ganz allgemein Aufschluß über die Ähnlichkeit von Zeitreihen. Dabei bedeuten der Korrelationskoeffizient 1 Identität der verglichenen Zeitreihen bis auf einen konstanten positiven Faktor, -1 Identität bei Vorzeichenumkehr, und 0 keinerlei Ähnlichkeit. Wird der Korrelationskoeffizient erst bei einer Verschiebung der beiden Zeitreihen gegeneinander maximal, so läßt sich eine der Zeitreihen aus der anderen vorhersagen. Die Sicherheit der Vorhersage ist dabei

umso größer, je größer der Korrelationskoeffizient ist.

Vor dem Korrelationsprozeß wurden Tiden im Periodenbereich der Gezeiten und langperiodische Änderungen aus den Zeitreihen numerisch herausgefiltert um die alleinige Beeinflussung von Neigungsmessungen durch meteorologisch bedingte Fluten mit Perioden von $1\frac{1}{2}$ bis 6 Tagen zu erhalten. Diese Trennung von meteorologisch bedingter und astronomisch bedingter Flut ist leider nicht vollständig, da sie die schnell - d.h. mit Perioden im Bereich der astronomischen Gezeiten - ablaufenden meteorologischen Fluten nicht berücksichtigt. In einem späteren Abschnitt (4.4) werden die kurzperiodischen meteorologischen Flutanteile mit in die Überlegungen einbezogen.

Da von älteren Untersuchungen (Zschau, 1977, 1979a) bekannt war, daß auch Wasserstandsschwankungen der Ostsee und der örtliche Luftdruck Neigungsmessungen an der Station Kiel-Rehmsberg beeinflussen, wurden auch für diese Einflußgrößen Kreuzkorrelationsfunktionen berechnet. Die Berechnungen konzentrierten sich zunächst auf den Zeitraum vom 18.9. bis 2.12.1977, in dessen Verlauf die 8 m - Marke des Pegels Büsum siebenmal überschritten wurde. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2, 3 und 4 zu sehen.

Zu Abbildung 2:

Die Kreuzkorrelationen mit dem Pegel Büsum liefern für die Stationen Heide und Kiel-Rehmsberg große Korrelationsmaxima in westlichen Richtungen. Die größeren Werte für Heide sind auf die kleinere Entfernung zur Nordsee zurückzuführen. Alle Maxima für Heide und einige für Kiel-Rehmsberg, um SW, fallen in den

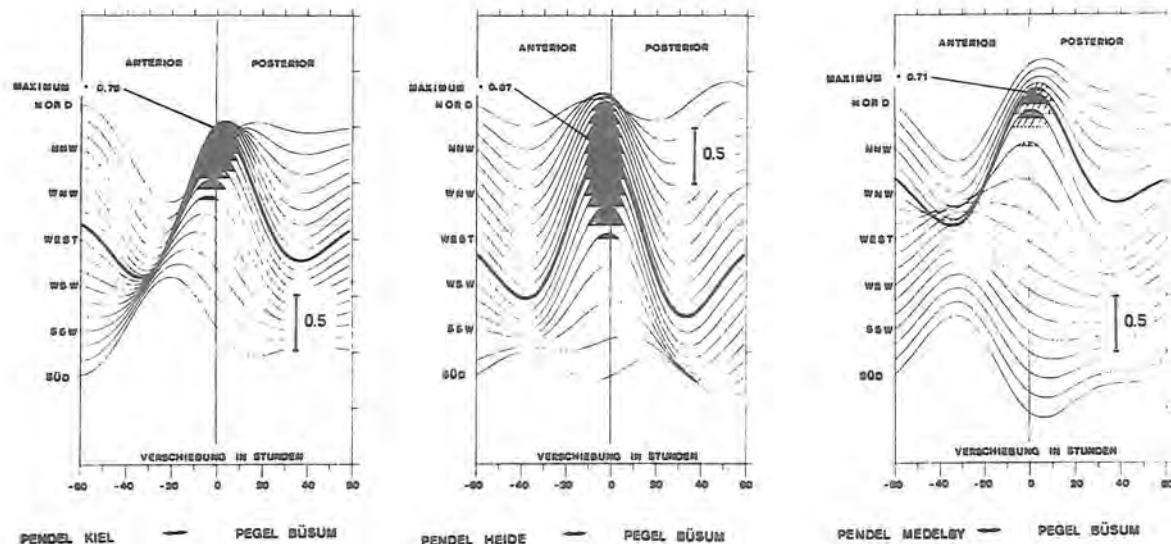


Abb.2: Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Vertikalpendel-Registrierungen und dem Nordseepegel Buisum für Verschiebungen von -60 bis +60 Stunden und für Neigungsrichtungen in 10° -Abständen von Süd über West nach Nord im Zeitraum 18.9. - 2.12.1977 .

Anterior: Bereich mit einem Vorlauf der Neigungen gegenüber dem Wasserstand in Buisum,
 Posterior: Bereich mit einem Nachlauf der Neigungen gegenüber dem Wasserstand in Buisum,
 grau: Bereich mit Korrelationskoeffizienten über 0,6,
 schwarz: Bereich mit Korrelationskoeffizienten über 0,7 .

'Anterior'-Bereich und zeigen somit eine mögliche Vorhersage des Wasserstandes bei Büsum durch Pendelmessungen an.

Auch für Medelby treten deutliche Korrelationsmaxima auf (um WNW), die jedoch, verglichen mit Kiel-Rehmsberg und Heide, etwas kleiner ausfallen. Dies ist vermutlich zum Teil auf Störungen zurückzuführen, die mit dem geringen Alter der Bohrung zusammenhängen. Ein weiterer Grund mag in der entfernteren Lage zum Pegel Büsum zu sehen sein, denn Hochwasser an der Küste vor Büsum nehmen einen etwas anderen Verlauf als 60 km nördlicher, von wo ein stärkerer Einfluß auf das Medelbyer Pendel ausgeht.

Zu Abbildung 3:

Die Kreuzkorrelationen zwischen Neigungsmessungen und dem Pegel Strande, stellvertretend für die westliche Ostsee, zeigen nur für die Station Kiel-Rehmsberg hohe Korrelationswerte. Hier treten Maxima bis 0,79 in nordöstlichen Richtungen auf (dem entsprechen Minima in südwestlichen Richtungen), die im Wesentlichen in den 'Anterior'-Bereich fallen. Auch hier werden also im Mittel des analysierten Zeitraums Wasserstandsschwankungen der Ostsee in den Pendelaufzeichnungen eher sichtbar als direkt an der Küste. Die Korrelationen mit den Neigungsdaten von Heide und Medelby fallen erwartungsgemäß schwach aus, für Medelby kann kaum von einer signifikanten Beeinflussung gesprochen werden.

Zu Abbildung 4:

Der Luftdruck korreliert mit Pendelaufzeichnungen aller drei Stationen bei einem deutlichen Nachlauf der Pendelbewegung gegenüber dem Luftdruck. Die Maxima treten jeweils etwa in

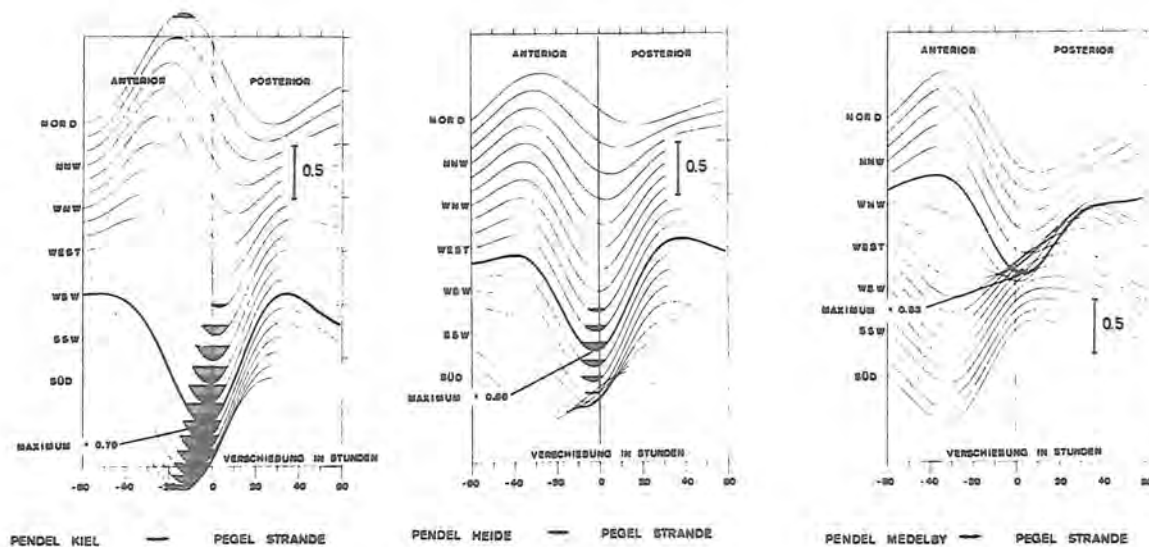


Abb.3: Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Vertikalpendel-Registrierungen und dem Ostseepegel Strande für Verschiebungen von -60 bis +60 Stunden und für Neigungsrichtungen in 10° -Abständen von Süd über West nach Nord im Zeitraum 18.9. - 2.12.1977 .

Anterior: Bereich mit einem Vorlauf der Neigungen gegenüber dem Wasserstand in Strande,
 Posterior: Bereich mit einem Nachlauf der Neigungen gegenüber dem Wasserstand in Strande,
 grau: Bereich mit Korrelationskoeffizienten über 0,6 ,
 schwarz: Bereich mit Korrelationskoeffizienten über 0,7 .

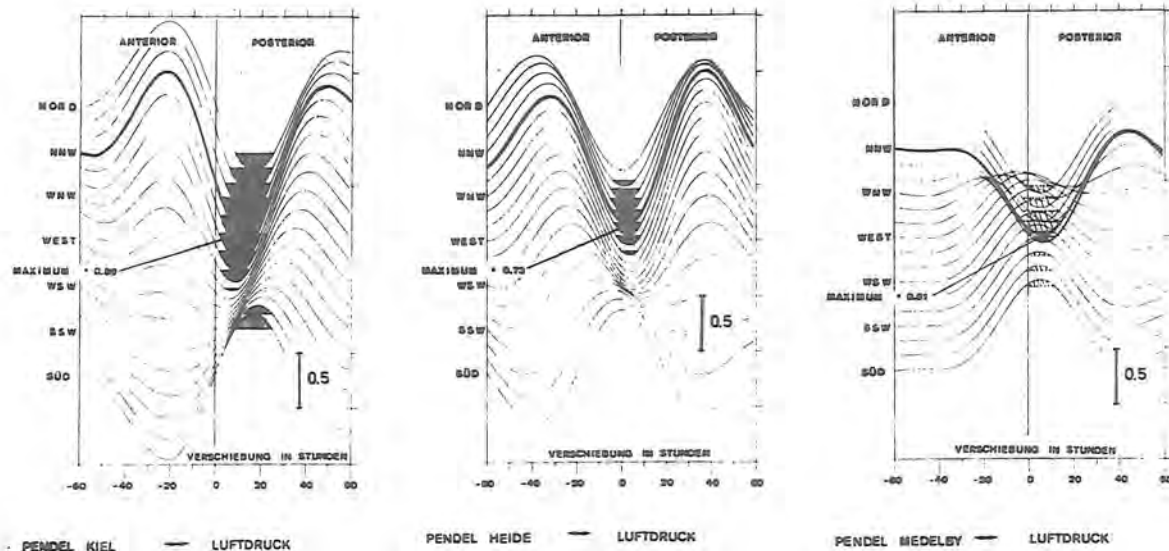


Abb.4: Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen Vertikalpendel-Registrierungen und dem örtlichen Luftdruck für Verschiebungen von -60 bis +60 Stunden und für Neigungsrichtungen in 10°-Abständen von Süd über West nach Nord im Zeitraum 18.9. - 2.12.1977 .

Anterior: Bereich mit einem Vorlauf der Neigungen gegenüber dem Luftdruck,
 Posterior: Bereich mit einem Nachlauf der Neigungen gegenüber dem Luftdruck,
 grau: Bereich mit Korrelationskoeffizienten über 0,6 ,
 schwarz: Bereich mit Korrelationskoeffizienten über 0,7 .

SSO-Richtung auf (d.h. Minima in NNW-Richtung). Die auffallend hohen Korrelationen für Kiel-Rehmsberg können durch die lokale Topographie an dieser Station erklärt werden (s.Zschau 1979b).

Die hier gefundenen Korrelationsbeziehungen - Stärke, Richtung und Phasenverschiebung des jeweils größten Maximums - gelten nur für den untersuchten Zeitraum 18.9. bis 2.12.1977 . Um die Allgemeingültigkeit dieser Beziehungen zu überprüfen wurden weitere Zeiträume analysiert (s.Tabelle 3). Die über

Zeitraum	Stationen, an denen Neigungen registriert wurden
4. 3.71 - 20. 4.71	Kiel-R.
29. 8.72 - 1.10.72	Kiel-R.
15.10.72 - 9.11.72	Kiel-R.
24. 2.73 - 12. 5.73	Kiel-R.
18. 3.77 - 17. 5.77	Kiel-R.,Heide
18. 9.77 - 2.12.77	Kiel-R.,Heide,Medelby

Tab.3: Vertikalpendel-Registrierungen, die für Korrelationsuntersuchungen verwendet wurden (Kiel-R.: 320 Tage, Heide: 135 Tage, Medelby: 75 Tage)

alle Zeiträume gemittelten Korrelationsmaxima sind in der Abbildung 5 dargestellt. Für jede Station ist eine Richtungsrose angegeben, mit Segmenten, die jeweils einen Winkel von 10° überdecken. Der Radius eines Segmentes ist ein Maß für das mittlere Korrelationsmaximum innerhalb des jeweiligen Winkelbereichs; es sind nur solche Segmente abgebildet, deren Radius

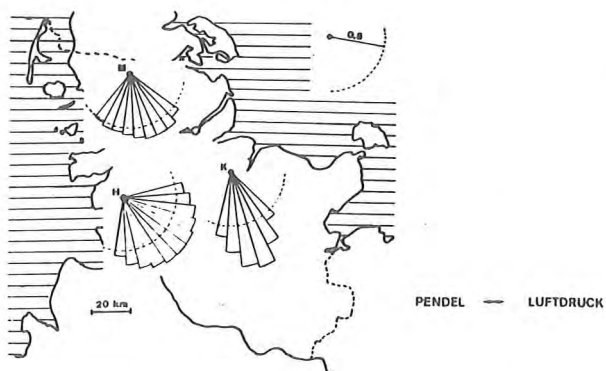
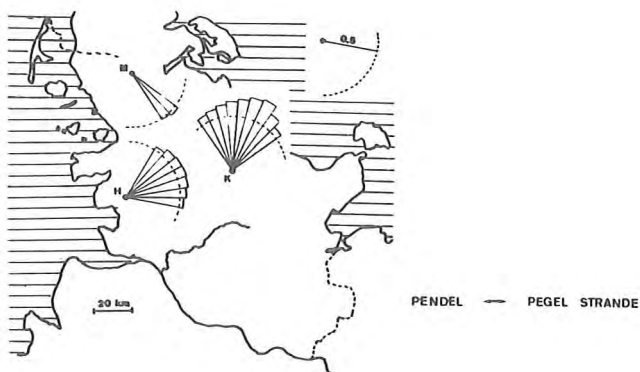
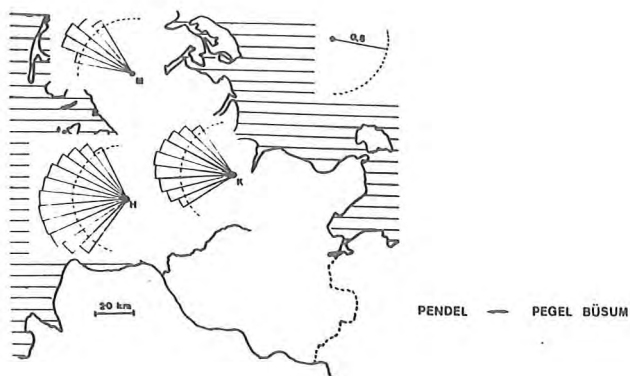


Abb.5: Richtungsabhängigkeit und Amplitude mittlerer Kreuzkorrelationsmaxima für Neigungen an den Stationen Heide (H), Medelby (M) und Kiel-Rehmsberg (K). Radius des gestrichelten Teilkreises: 0,5

größer als 0,5 ist (= gestrichelter Teilkreis). Man erkennt gut die vorherrschenden Richtungen der drei untersuchten Einflußgrößen in ihrer Wirkung auf die Vertikalpendel wie auch die unterschiedliche Größe der Winkelbereiche, in denen Korrelationen über 0,5 auftreten. Bei den Korrelationen Pendel ↔ Pegel treten erwartungsgemäß die stärksten Koeffizienten für Neigungen in Richtung auf das Meer (Nordsee bzw. Ostsee) auf.

Die Lage der Korrelationsmaxima für jeden untersuchten Zeitraum im Phasen-Richtungsdiagramm zeigt die Abbildung 6. Die Größe der Zeichen stellt ein grobes Maß für die Stärke der jeweiligen Kreuzkorrelation dar, verschiedene Konturen bedeuten verschiedene Einflußgrößen, verschiedene Schwärzungen bedeuten verschiedene Pendelstationen (wie angegeben). Für jeden Zeitraum ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nur ein - und zwar das größte - Korrelationsmaximum abgebildet. Kleinere Maxima, die für andere Pendelrichtungen z.T. im Bereich des Vorlaufs liegen und eine Vorhersagemöglichkeit anzeigen, sind nicht aufgeführt. Trotz gewisser Streuung der Werte für unterschiedliche Zeiträume zeigt sich eine klare Gruppierung der Einflußgrößen, die im Fall des Pegels Büsum (= Kreise der Abb.6) besonders eng ist.

Eine im April 1979 von R.Kirsch am Kieler Institut für Geophysik fertiggestellte Diplomarbeit mit dem Titel "Zum Einfluß von Nordsee-Sturmfluten auf Neigungsbewegungen des Festlandes an der Vertikalpendelstation Heide" behandelt im Besonderen Kreuzkorrelationen zwischen Neigungsmeßdaten von Heide und Wasserstandsschwankungen der Nordsee sowie örtlichen Luftdruck-

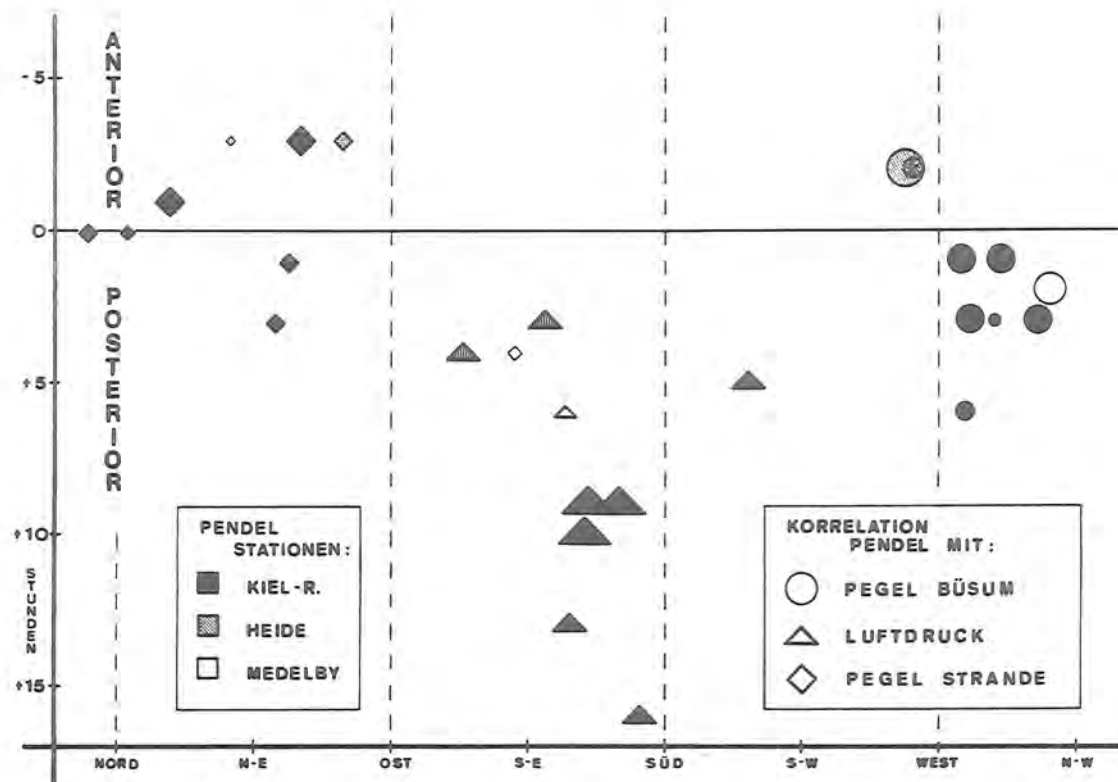


Abb.6: Richtung, Phase und Stärke maximaler Kreuzkorrelationskoeffizienten für verschiedene Zeiträume und Pendelstationen

änderungen. Das in den Abbildungen 2, 4, 5 und 6 gezeigte Korrelationsverhalten der Station Heide wird durch diese Arbeit bestätigt. Die oben dargestellten Ergebnisse unterstreichen auch die von Zschau (1979a) für Kiel-Rehmsberg erhaltenen Korrelationsergebnisse.

Bei der Bewertung dieses Teils der Untersuchungen muß berücksichtigt werden, daß die Korrelationen für 1 bis $2\frac{1}{2}$ Monate lange Zeitreihen durchgeführt wurden, Zeiträume also, in denen verschiedenste Wetterbedingungen geherrscht haben. Die Korrelationsfunktionen spiegeln daher eine mittlere Beeinflussung der Vertikalpendel durch die verschiedenen Einflußgrößen über diesen Zeitraum wieder. Gleichartige Wetterlagen, wie sie z.B. bei Sturmfluten in der Deutschen Bucht vorherrschen, führen vermutlich zu noch besseren Korrelationen. Ferner ist anzumerken, daß Einfach-Korrelationen, wie hier durchgeführt, im allgemeinen nicht dieselben Resultate liefern wie Mehrfach-Korrelationen, bei denen statt einer Einflußgröße eine geeignete Kombination mehrerer Einflußgrößen in die Berechnungen eingeht. Dies ist hier insofern von Bedeutung, als daß Luftdruck, Nordsee- und Ostseewasserstand untereinander selbst stark miteinander korrelieren. Fallender Luftdruck bei Durchzug eines Tiefdruckgebietes wird in der Regel von westlichen Winden begleitet, die zu einem Ansteigen des Wassers an der Westküste und zu einem Abflauen an der Ostküste Schleswig-Holsteins führen. Die scheinbar klare Trennung der Einflußgrößen wie sie bei Einfach-Korrelationen impliziert wird, entspricht daher nicht unbedingt der physikalischen Wirklichkeit. Aus diesem Grunde wurden in der Diplom-

arbeit von Kirsch (1979) auch Mehrfach-Korrelationen durchgeführt. Sie brachten aber gegenüber den Ergebnissen der Einfach-Korrelationen keine neuen Erkenntnisse.

Dennoch können aus den Korrelationsuntersuchungen bereits folgende Schlüsse gezogen werden:

1. An allen drei Stationen wird eine gute Korrelation zwischen Nordseewasserstand und Neigung für westliche Richtungen beobachtet.
2. Bei der Station Kiel-Rehmsberg, und abgeschwächt bei der Station Medelby, nimmt der Vorlauf der Neigungsbewegungen gegenüber dem Wasserstand für Neigungsrichtungen von W über WSW nach SSW zu. Bei der Station Heide wird der Vorlauf in allen Richtungen von NW über W bis SW sichtbar.
3. Die z.T. ausgeprägten Einflüsse durch den örtlichen Luftdruck sind für eine eventuelle Sturmflutvorhersage aus Neigungsmessungen wesentlich weniger störend als ursprünglich befürchtet, da sie um mehrere Stunden verzögert auf die Pendel wirken und somit weitgehend korrigierbar sind. Zudem treten sie vornehmlich in SSO-Richtung auf, die nicht für eine Flutvorhersage in Frage kommt, da Nordsee-Sturmfluten erfahrungsgemäß in dieser Richtung nur geringfügige Verbiegungen der Erdkruste bewirken.
4. Der störende Einfluß der Ostsee an der Station Kiel-Rehmsberg tritt bei Heide und Medelby stark abgeschwächt auf.
5. Die Korrelationen für Medelby fallen abgesehen von der Korrelation mit dem Pegel Büsum bisher relativ schwach aus, z.T. als Folge eines durch das geringe Alter der Bohrung erhöhten Störpegels in der Registrierung.

4.2 Betrachtung einzelner Sturmflutereignisse

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen ging es darum herauszufinden, ob charakteristische Neigungsbewegungen, wie etwa der zunehmende Vorlauf des Nordsee-Einflusses von W über WSW nach SSW, auch bei jeder einzelnen Sturmflut beobachtet werden kann, oder ob bei einzelnen Sturmfluten auch untypische Neigungsbewegungen auftreten und diese vielleicht mit untypischen Merkmalen im Verlauf von Sturmfluten einhergehen. Hierzu lagen Zeitreihen von den in Tabelle 2 aufgeführten Sturmflutereignissen vor (s.S.7).

Um das Phasenverhalten der Neigungsbewegungen gegenüber Wasserstandsänderungen klar herauszustellen wurden aus den Zeitreihen Wellen mit Perioden kürzer als $1\frac{1}{2}$ Tage (insbesondere die astronomische Tide) sowie sehr langwellige Anteile mit Perioden größer als 6 Tage eliminiert. Die Unterdrückung der kurzperiodischen Anteile geschah mit einem speziellen Gezeitensfilter, die der sehr langperiodischen Anteile durch Bildung 9-stündiger Differenzen. Eine so behandelte Wasserstandskurve beispielsweise stellt nach dieser Behandlung nicht mehr den Wasserstand selbst, sondern die Änderung des Wasserstandes innerhalb von 9 Stunden dar. Entsprechendes gilt für die Pendelbewegungen und den ebenfalls in Betracht gezogenen Luftdruck.

Aus den Abbildungen 7 bis 13 ist das Phasenverhalten der Vertikalpendelbewegungen bei Sturmfluten zu erkennen. Dargestellt sind jeweils die durch Bandpaßfilterung erhaltenen zeitlichen Änderungen a) des Luftdrucks, b) des Ostseepiegels Kiel bzw. Kiel-Strande, c) des Nordseepiegels Büsum und d) der Neigungen verschiedener Ausschlagsrichtungen eines oder mehrer

Vertikalpendel. Der Punktabstand beträgt jeweils 3 Stunden. Die Neigungskurven sind weder vom Luftdruckeinfluß noch vom Ostsee-Einfluß befreit.

Zu Abbildung 7:

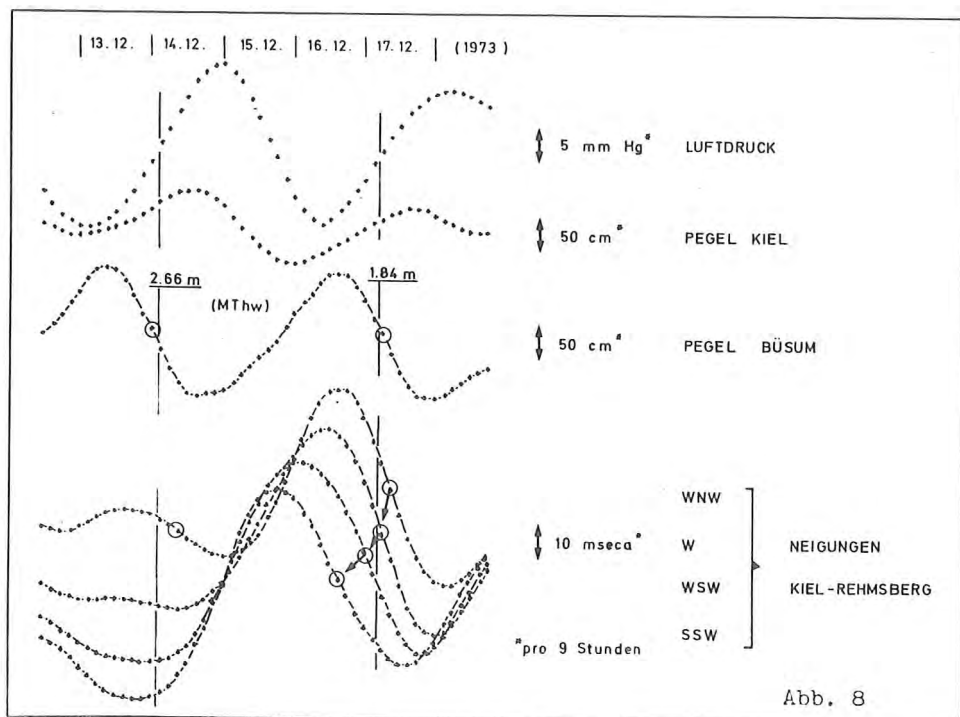
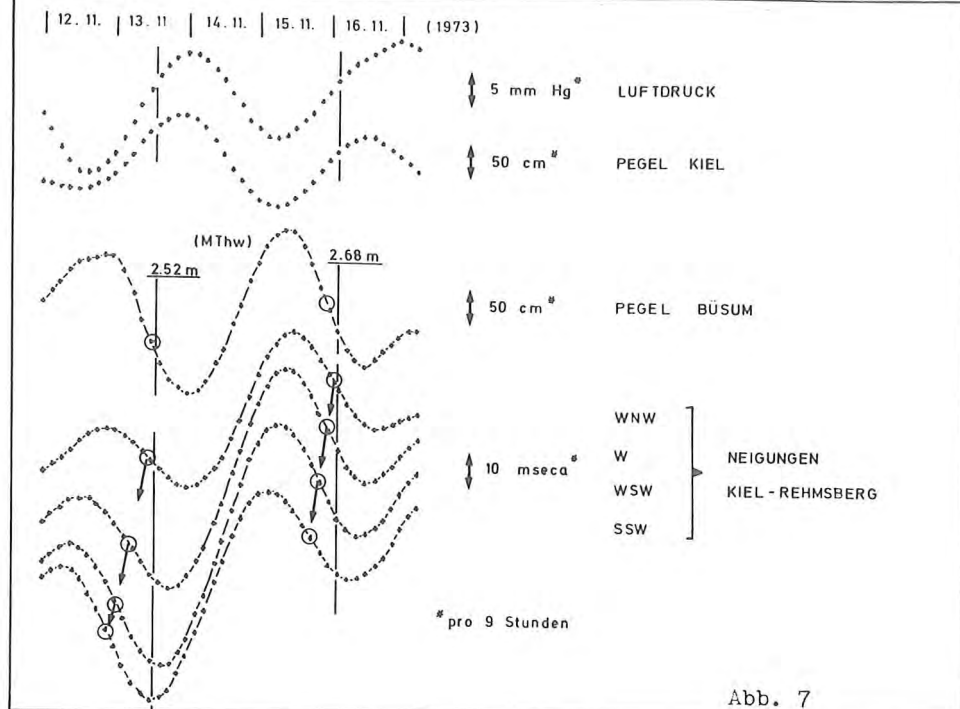
Sturmfluten vom 13.11. und 16.11.1973 mit 2,52m bzw. 2,68m über MThw, beobachtet mit dem Vertikalpendel Kiel-Rehmsberg.

Wie auch bei den folgenden Abbildungen geben Maximum und Minimum jeder Kurve den Zeitpunkt stärkster Änderung der jeweils angegebenen Größe pro 9 Stunden wieder. Der Mittelwert zwischen Maximum und nächstfolgendem Minimum, gekennzeichnet durch einen Kreis, gibt beim Pegel Büsum den Zeitpunkt an, für den der meteorologische Anteil der Flut maximal ist. Für die Neigungskurven sind die entsprechenden Mittelwerte ebenfalls gekennzeichnet. Die zeitliche Verschiebung der Neigungsmittelwerte im Vergleich zum Mittelwert des Pegels Büsum gibt Auskunft über Vor- oder Nachlauf der Pendelbewegung gegenüber dem Auflaufen der untersuchten Sturmflut an der Westküste. Die senkrechten Linien markieren jeweils die Eintrittszeit des gemessenen Sturmflutmaximums (einschließlich der astronomischen Tide).

Die Sturmfluten vom 13. und 16.11.1973 zeigen folgendes, für die meisten bisher untersuchten Sturmfluten charakteristisches Verhalten:

1. Annähernd Gleichlauf zwischen Luftdruck und Pegel Kiel,
2. annähernd Gegenlauf zwischen Luftdruck und Pegel Kiel einerseits und Pegel Büsum andererseits.

Dieses Verhalten ist mit an der Station Kiel-Rehmsberg bei Sturmfluten beobachteten typischen Neigungsbewegungen verbunden:



1. Starke Korrelation mit dem Pegel Büsum,
2. zunehmender Vorlauf der Pendelbewegungen gegenüber dem Pegel Büsum für Neigungsrichtungen von W über WSW nach SSW.

Zu Abbildung 8:

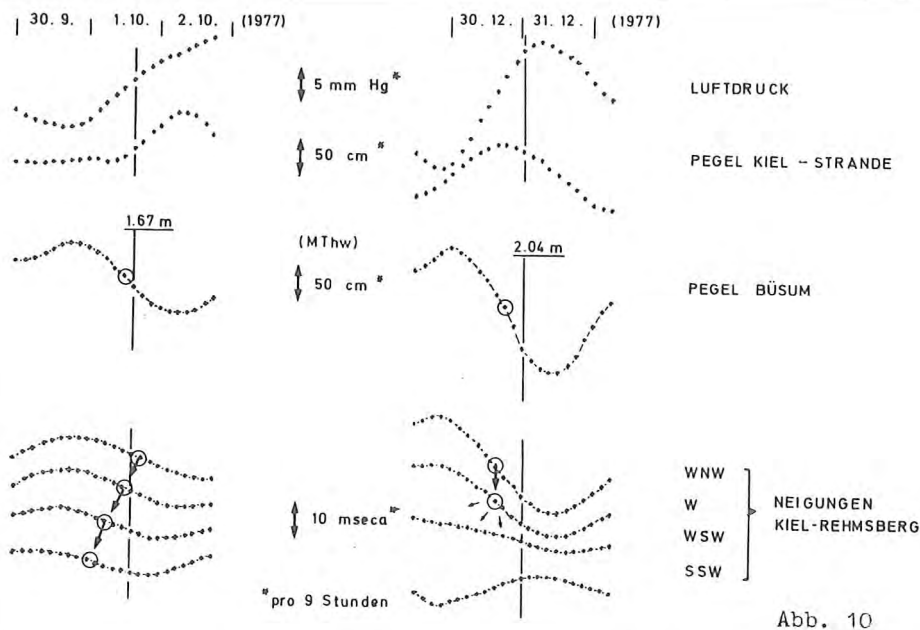
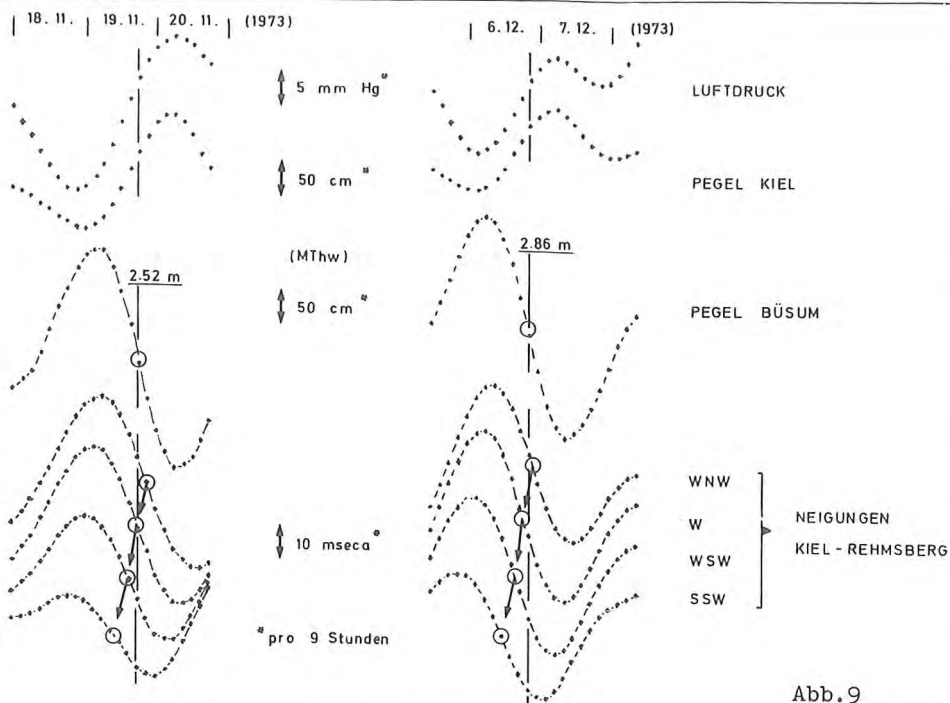
Sturmfluten vom 14.12. und 17.12.1973 mit 2,66m bzw. 1,84m über MThw, beobachtet mit dem Vertikalpendel Kiel-Rehmsberg.

Bei der ersten Flut zeigt sich kein Neigungsvorlauf. Bei der Flut vom 17.12. zeigt sich ein sehr stark entwickelter Vorlauf bei ausgeprägtem Maximum und Minimum, obwohl (auch nach Abzug der astronomischen Tide) die zweite Flut weniger hoch gestiegen ist als die erste. Das für die erste Flut gänzlich atypische Verhalten der Pendelbewegung ist höchstwahrscheinlich auf das auffallendste meteorologische Ereignis zu dieser Zeit zurückzuführen, nämlich auf die außerordentlich starken Luftdruckschwankungen (von 772 mmHg am 12.12. mittags auf 745 mmHg am 14.12. frühmorgens, dann auf 770 mmHg am 15.12. nachmittags, und wieder auf 747 mmHg am 17.12. frühmorgens). Daraus zeigt sich die Notwendigkeit Luftdruckeinflüsse in Pendelaufzeichnungen auch für südwestliche Richtungen zu korrigieren.

Zu Abbildung 9:

Sturmfluten vom 19.11. und 6.12.1973 mit 2,52m bzw. 2,86m über MThw, beobachtet mit dem Vertikalpendel Kiel-Rehmsberg.

Die Sturmflut vom 6.12. ist die bisher größte mit einem Pendel beobachtete Flut. Beide Hochwasser zeigen besonders deutlich die unter Abb.7 genannten charakteristischen Merkmale, sowohl im Verlauf der Kurven des Luftdrucks und der Pegel Kiel und Büsum, als auch im typischen Verhalten der Neigungen mit zunehmendem Vorlauf von W über WSW nach SSW.



Zu Abbildung 10:

Sturmfluten vom 1.10. und 31.12.1977 mit 1,67m bzw. 2,04m über MThw, beobachtet mit dem Vertikalpendel Kiel-Rehmsberg.

Die beiden Sturmfluten sind im Vergleich zu den in Abb.7 und in Abb.9 behandelten Sturmfluten kleiner und bewirken entsprechend eine geringere Auslenkung am Pendel. Im Falle der Flut vom 1.10. zeigen die Neigungskurven den bereits in Abb.7 genannten charakteristischen Verlauf, der eine Sturmflutvorhersage aus Pendelmessungen ermöglicht. (Entgegen den offiziell gemeldeten Befürchtungen einer schwereren Sturmflut ließ sich an Hand der Pendelregistrierung am 1.10. frühzeitig erkennen, daß die Flut nicht in der erwarteten Stärke eintreten würde. Ca. 5 Stunden vor Eintreten des Flutmaximums am Pegel Büsum wurde aus den Pendelmessungen eine Fluthöhe von 1,70m über MThw abgeschätzt.)

Im Falle der Sturmflut vom 31.12. ist die charakteristische Neigungsbewegung nicht vorhanden. Ihr Fehlen koinzidiert mit einem untypischen Verhalten der anderen Einflußgrößen:

1. Keine deutliche Korrelation zwischen dem Luftdruck und dem Pegel Strande,
2. kein Gegeneinanderlaufen des Pegels Strande und des Pegels Büsum.

Zu Abbildung 11:

Sturmfluten vom 12.11., 13.11., (14.11.) und 15.11.1977 mit 1,87m, 1,99m, 1,83m, (1,56m), 2,31m und 1,84m über MThw, beobachtet mit den Vertikalpendeln Kiel-Rehmsberg, Heide und Medelby.

Die insgesamt 6 Überschreitungen der 8 m - Marke des Pegels Büsum (s. Tabelle 2, S.7) gehören zu nur 2 meteorologischen

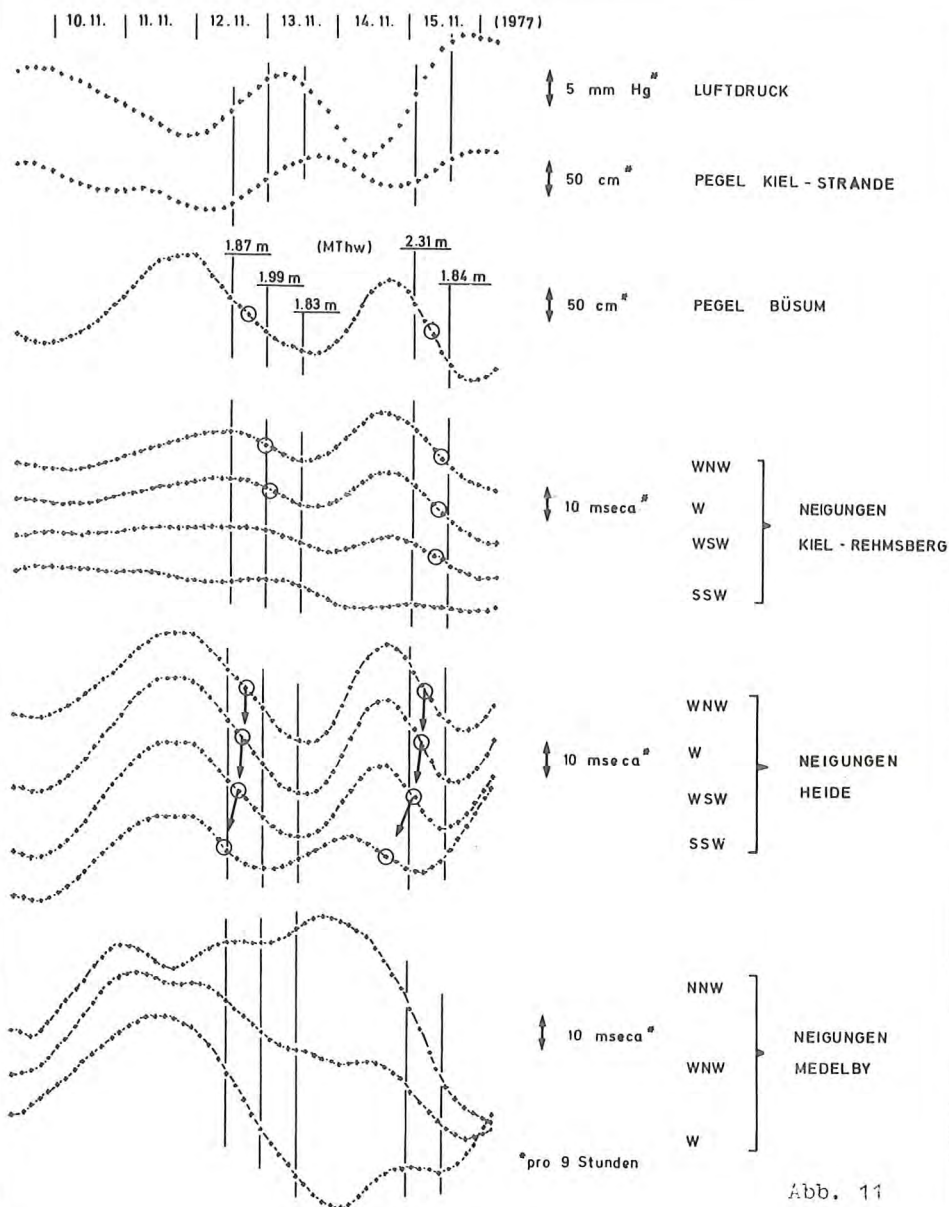


Abb. 11

Fluten mit Perioden von 2 bis 3 Tagen. Die mehrfachen Überschreitungen ergeben sich durch die Überlagerung der astronomischen Tide. Luftdruck und Pegel Kiel-Strande korrelieren in etwa miteinander, beide Einflußgrößen zeigen ein gegenläufiges Verhalten im Vergleich zum Pegel Büsum. Das Pendel der Station Kiel-Rehmsberg zeigt nur geringe Auslenkungen. Daraus konnte am 12.11. unmittelbar und frühzeitig erkannt werden, daß die offiziell befürchtete schwere Sturmflut ausbleiben würde. (Dies wurde Herrn Dr.Siefert, Cuxhaven telefonisch mitgeteilt.)

An der Station Heide zeigen die Neigungskurven bei Sturmfluten offenbar das gleiche charakteristische Verhalten wie an der Station Kiel-Rehmsberg:

1. Starke Korrelation mit dem Pegel Büsum, abnehmend von W über WSW nach SSW,
2. zunehmender Vorlauf der Neigungen gegenüber dem Pegel Büsum für Neigungsrichtungen von W über WSW nach SSW.

Wegen der geringen Distanz der Station Heide zur Nordseeküste zeichnen sich die Wasserstandsänderungen der Nordsee sehr viel deutlicher ab als bei Kiel-Rehmsberg. Auf lokale Einflüsse ist auch zurückzuführen, daß sich ein klarer Vorlauf nur in SSW-Richtung bemerkbar macht.

Die Neigungen an der Station Medelby, die nach den Korrelationsuntersuchungen in Abschnitt 4.1 nur in nordwestlichen Richtungen eine Beeinflussung durch Wasserstandsänderungen der Nordsee zeigen, sind hier für die Neigungsrichtungen NNW, WNW und W angegeben. Ein ähnlich charakteristisches Verhalten wie für Heide und Kiel-Rehmsberg ist jedoch nicht erkennbar.

Zu Abbildung 12:

Sturmflut vom 1.10.1977 mit 1,67m über MThw, beobachtet mit den Vertikalpendeln Heide und Medelby (vgl. Abb.10 für die Beobachtung mit dem Pendel Kiel-R.).

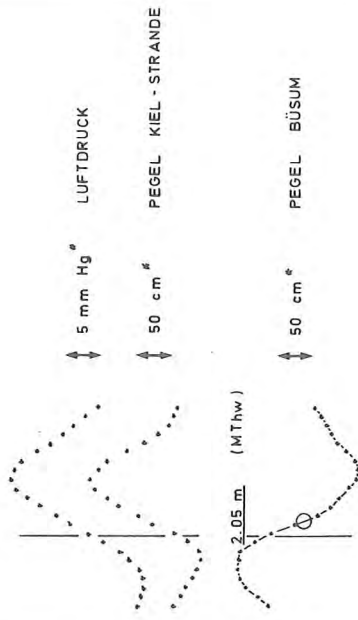
Diese Flut zeigt bei charakteristischem Verhalten von Luftdruck, Pegel Strande und Pegel Büsum typische Neigungen an der Station Heide, die eine Vorhersage der Flut ermöglicht hätten (wie auch für die Station Kiel-Rehmsberg). Der Verlauf der Neigungen bei Medelby ist wie bei Abb.11 schwer zu interpretieren.

Zu Abbildung 13:

Sturmflut vom 24.12.1977 mit 2,05m über MThw, beobachtet mit den Vertikalpendeln Kiel-Rehmsberg und Heide.

Bei der sogenannten "Weihnachtsflut 77" verliefen Luftdruck, Pegel Strande und Pegel Büsum charakteristisch. Die Neigungen an den Stationen Kiel-Rehmsberg und Heide zeigen zwar eine deutliche Korrelation mit dem Pegel Büsum für die Ausschlagsrichtungen WNW, W und WSW, sowie SSW bei Heide, ein Vorlauf ist bei beiden Stationen jedoch nicht zu erkennen. Insofern muß diese Flut als eine Ausnahme angesehen werden, die als einzige nicht in das empirisch gefundene Regelschema von typisch und atypisch verlaufenden Sturmfluten eingegliedert werden kann. Als mögliche Erklärung hierfür kommt in Frage, daß der Hauptteil der Sturmflut sehr schnell abgelaufen ist, d.h., daß zusätzliche Wassermassen, die letztendlich die Höhe der Sturmflut bestimmt haben, in weniger als einem bis eineinhalb Tagen in der Deutschen Bucht zusammengelaufen sind. Ihre Wirkung auf die Pendel erscheint dann nicht mehr in den Neigungskurven.

24. 12. | 25. 12. | (1977)



WNW
W
WSW
SSW

NEIGUNGEN
KIEL - R.

10 msec^a

WNW
W
WSW
SSW

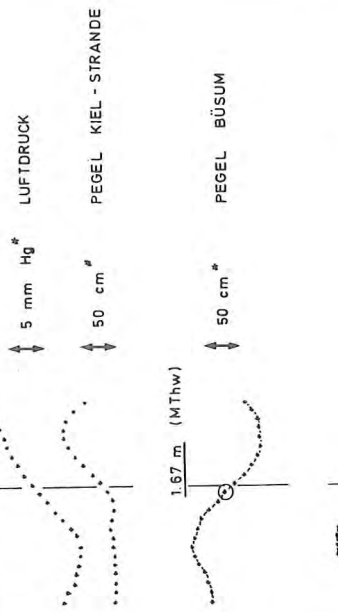
NEIGUNGEN
HEIDE

10 msec^a

^a pro 9 Stunden

Abb. 13

30. 9 | 1. 10. | 2. 10. | (1977)



WNW
W
WSW
SSW

NEIGUNGEN
HEIDE

10 msec^a

NNW
WNW
W

NEIGUNGEN
MEDELBY

10 msec^a

^a pro 9 Stunden

Abb. 12

der Abb.13 wegen der oben erwähnten Herausfilterung kurzperiodischer Wellen. Diese Vermutung wird durch die Untersuchungen in Abschnitt 4.4 bestätigt.

Für die Station Medelby ergeben sich bei der Flut vom 24. 12.77 Neigungen, die wiederum nicht in der gleichen Weise wie für Kiel-Rehmsberg und Heide gedeutet werden können (nicht abgebildet).

Im Zusammenhang mit dem zunehmenden Vorlauf der Neigungen von W über WSW nach SSW wurde bereits diskutiert (Zschau, 1977), ob als Grund hierfür eine amphidromische Welle anzusehen ist, die sich als Folge eines Sturms in der nordwestlichen Nordsee entwickelt und eventuell verstärkt durch sogenannte "external surges" (Fernwellen) aus dem Nordatlantik in ca. 24 Stunden gegen den Uhrzeigersinn entlang der Küsten von Schottland, England, Holland, der Bundesrepublik und Dänemark bis Norwegen wandert. Eine solche Flutwelle wird häufig bei Sturmfluten beobachtet. Sie erreicht die Deutsche Bucht also nicht von Nord oder Nordwesten sondern etwa von WSW. Nach Angaben des DHI trat bei allen bisher mit Pendeln beobachteten Sturmfluten (s. Tabelle 2, S.7) eine solche amphidromische Welle mit einer Wellenhöhe zwischen ca. 40 cm und 70 cm auf, außer bei der Flut vom 31.12.77. Bei dieser Flut konnte an der Station Kiel-Rehmsberg zwar kein Neigungsvorlauf für südwestliche Richtungen bemerkt werden (s. Abb.10, rechts), aber Luftdruck und Pegel Strände korrelieren schlecht miteinander, so daß diese Flut zu den atypisch verlaufenden zu rechnen ist. Aus dem Zusammenreffen der atypischen Pendelbewegung mit dem Fehlen einer amphidromischen Welle in einem Fall läßt sich kaum auf die

Allgemeingültigkeit dieser Beobachtung schließen, zumal das Fehlen des Neigungsvorlaufs, wie bereits oben erwähnt, auch mit einem relativ schnellen Auflaufen der Flut zu erklären ist. Ausschließen läßt sich andererseits ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Auftreten amphidromischer Wellen in der Nordsee und dem Neigungsvorlauf für südwestliche Richtungen auch nicht.

Zusammenfassend kann über diesen Teil der Auswertungen gesagt werden:

Die Betrachtung langwelliger, 9-stündiger Änderungen der Pendelbewegungen und der drei Einflußgrößen Nordseewasserstand, Ostseewasserstand und Luftdruck für einzelne Sturmflutereignisse legt eine Einteilung in "typisch" und "atypisch" verlaufende Sturmfluten nahe. Erstere führen zu zunehmenden Neigungsvorläufen von W nach SSW und lassen sich ohne Korrektur der Einflüsse von Luftdruck und Ostsee vorhersagen, letztere dagegen nicht. Offenbar verlaufen besonders die größeren Sturmfluten mit typischen Neigungsbewegungen, denn von den Fluten, die am Pegel Büsum höher als 2,50 m über das mittlere Tidehochwasser stiegen, verliefen vier typisch (s.Abb.7 und Abb.9) und eine atypisch (s.Abb.8). Kleinere (oder sehr schnell ablaufende ?) Sturmfluten führen in dem hier betrachteten Periodenbereich nur zu geringen Pendelauslenkungen.

Für beide Sturmflut-Typen scheint die Phasenbeziehung zwischen dem Wasserstand an der Nordseeküste und dem Wasserstand an der Ostseeküste sowie die Phasenbeziehung zum örtlichen Luftdruck eine wichtige Rolle zu spielen. Offenbar entscheidet das Zusammenwirken aller drei Einflußgrößen über die

Neigungsbewegungen in den verschiedenen Ausschlagsrichtungen der Pendel. Ein Zusammenhang der Neigungsvorläufe mit dem Auftreten amphidromischer Wellen in der Nordsee läßt sich bisher nicht erkennen.

Die hier gefundenen statistischen Ergebnisse lassen sich bereits für eine Vorhersage der "typischen" Sturmfluten direkt verwenden. Allerdings machen die hier gewonnen Erfahrungen auch deutlich, daß aus den Pendelregistrierungen die Einflüsse des örtlichen Luftdrucks und der westlichen Ostsee eliminiert werden müssen, bevor weitere Schlüsse über die Verwendbarkeit von Vertkalpendelmessungen zur Sturmflutvorhersage gezogen werden können. Weiter müssen, wie es insbesondere die Weihnachtsflut 77 gezeigt hat, auch kurzweilige, nonharmonische Anteile aus dem Frequenzbereich der Gezeiten berücksichtigt werden, die Amplituden bis zu etwa 1 m aufweisen können. Sie waren von den bisherigen Untersuchungen ausgenommen, da sie zusammen mit den astronomischen Gezeiten aus den betrachteten Zeitreihen herausgefiltert wurden. In Abschnitt 4.4 wird hierauf näher eingegangen. Vorher sollen noch die Berechnungen im Zusammenhang mit der Sturmflut vom Januar 1976 dargestellt werden.

4.3 Theoretische Berechnung des Einflusses der Sturmflut vom 3. Januar 1976

Während der sehr schweren Sturmflut vom 3. Januar 1976, mit einem Flutmaximum von $10,16 \text{ m} = 3,65 \text{ m}$ über MThw am Pegel Büsum gegen 14 Uhr, hatte leider kein Vertikalpendel in Schleswig-Holstein registriert. Um dennoch eine Vorstellung von dem Einfluß dieser katastrophalen Sturmflut auf Erdkrusten-Neigungen zu erhalten wurde dieser Einfluß theoretisch für die Station Kiel-Rehmsberg ermittelt. Den Berechnungen lag der vom Deutschen Hydrographischen Institut mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen Modells (HN-Modells) simulierte Sturmflutablauf für die gesamte Nordsee zugrunde. Die elastische Nachgiebigkeit der Erdkruste und des oberen Erdmantels gegenüber der sturmflutbedingten Wasserlast wurde bei den Berechnungen durch Verwendung eines plausiblen Erdmodells (Gutenberg-Bullen-Erdmodell) berücksichtigt. Ein gegenüber diesem Erdmodell anderes elastisches Verhalten von Erdkruste und Erdmantel kann die Berechnungsergebnisse um höchstens 25 % verändern.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 14 und 15 wiedergegeben. Aus Abb. 14 wird ersichtlich, daß der maximale Effekt in westlicher Richtung aufgetreten wäre und 17 msec ausge-macht hätte. Das ist um das $1\frac{1}{2}$ - bis 2 -fache weniger als der bei schweren Sturmfluten an der Station Kiel-Rehmsberg gemessene Effekt. Es wird vermutet, daß dies auf den hier nicht mit einbezogenen Einfluß der Ostsee zurückzuführen ist (es liegt kein HN-Modell für die Ostsee vor). Da wegen der westlichen

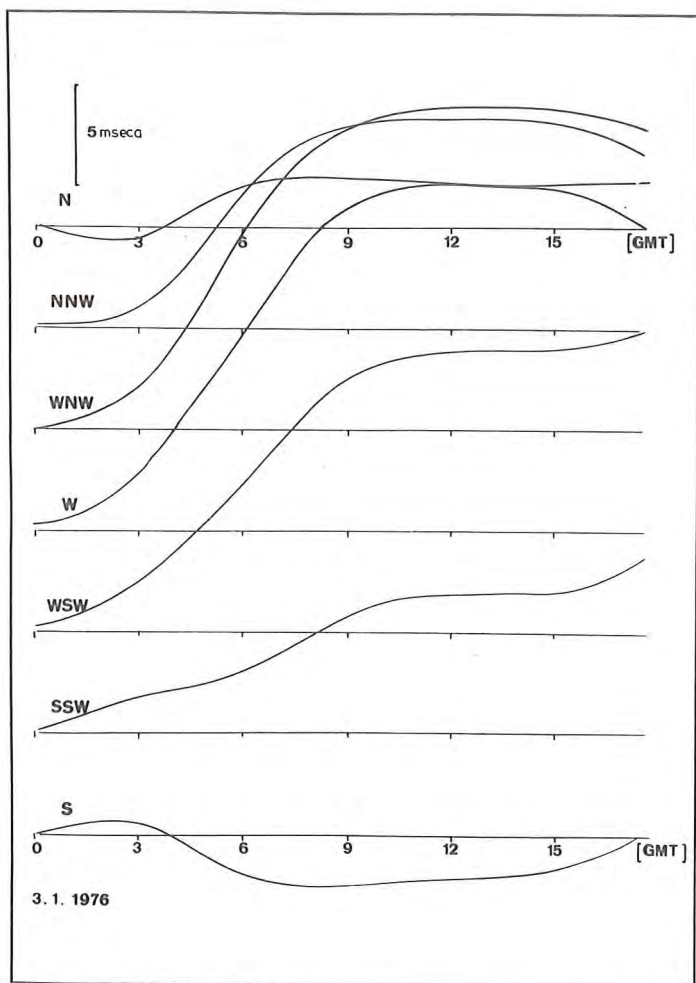


Abb.14: Sturmflut vom 3.1.1976; die Kurven sind die von den Gezeiten befreiten Neigungen an der Station Kiel-Rehmsberg, berechnet aus den vom DHI für die gesamte Nordsee angegebenen Wasserständen (ohne Ostsee- und Luftdruckeinfluß)

bis nordwestlichen Winde bei Nordsee-Sturmfluten auflaufendes Wasser in der Deutschen Bucht in der Regel mit ablaufendem Wasser an der westlichen Ostseeküste verbunden ist (s.auch Abschnitt 4.2), wird der Einfluß der Ostsee im Normalfall die Neigungsbewegungen bei Nordsee-Sturmfluten verstärken. Auch bei dieser Sturmflut fiel das Wasser am Ostseepegel Strände von 5,75 m am 2.1. mittags auf 4,50 m am 3.1. mittags, bevor es auf 6,50 m am 4.1. vormittags wieder anstieg.

In Abbildung 15 wird aus den Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen den berechneten Neigungen und den wirklich eingetretenen Wasserstandsresiduen am Pegel Büsum (gemessener Wasserstand abzüglich der aus den Gezeitentafeln ablesbaren astronomischen Tide) ein geringfügiger, über alle Richtungen von NNW nach SSW gleichmäßiger Nachlauf der Neigungsbewegungen gegenüber dem Pegel Büsum deutlich (entsprechend dem 'Posterior'-Bereich der Korrelationen in Abschnitt 4.1). Danach wäre eine Vorhersage der Sturmflut vom 3. Januar 1976 aus Pendelbeobachtungen nicht möglich gewesen. Da bisher bei keinerlei Korrelationsuntersuchungen ähnlich verlaufende Korrelationsfunktionen wie die in Abb.15 gefunden wurden, ist anzunehmen, daß die unberücksichtigt gelassenen Ostsee- und Luftdruckeinflüsse die Neigungsbewegungen bei Sturmfluten in der Deutschen Bucht wesentlich mit bestimmen.

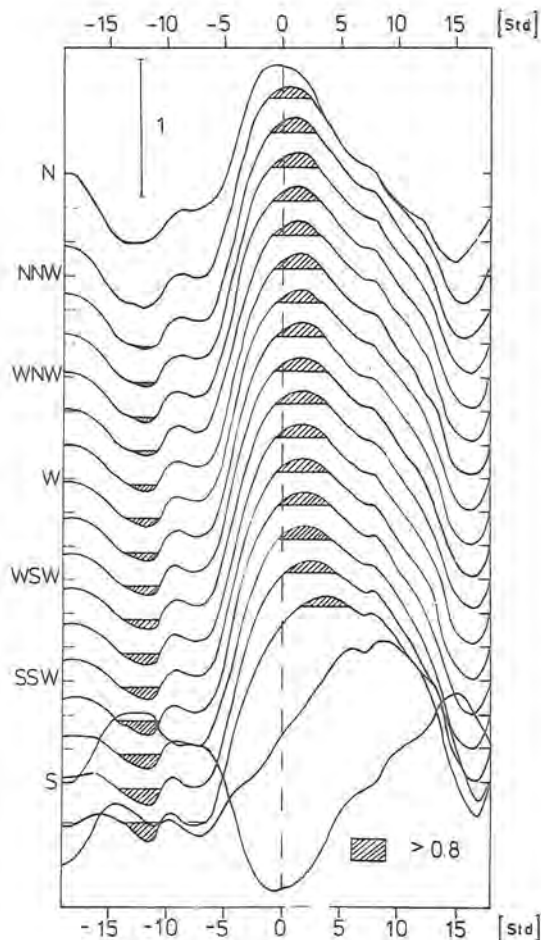
Eine endgültige Beurteilung über die Vorhersagbarkeit der Sturmflut vom 3. Januar 1976 mit Hilfe von Pendelmessungen kann daher nicht getroffen werden. Allerdings deutet die theoretische Nachvollziehung dieser Sturmflut an, daß der bei

Abb.15: Sturmflut vom 3.1.1976;

Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen den Wasserstandsresiduen am Pegel Büsum und den berechneten Neigungsbewegungen in verschiedenen Richtungen an der Station Kiel-Rehmsberg. Die gestrichelte Linie markiert den Zeitpunkt für das Maximum des meteorologisch bedingten Flutanteils am Pegel Büsum, negative Verschiebungen, links, bedeuten ein Vorlaufen ('Anterior'), positive Verschiebungen, rechts, ein Nachlaufen ('Posterior') der Neigungen gegenüber dem Wasserstand an der Küste.

Schraffiert: Flächen mit Kreuzkorrelationskoeffizienten größer als 0,8 .

Die dargestellten Kurven sind nur im Mittelteil der Abbildung signifikant (ca. -8 bis +8 Stunden).



anderen Sturmfluten vielfach beobachtete Neigungsvorlauf möglicherweise nicht allein auf die Verlagerung von Wassermassen in der Nordsee zurückzuführen ist.

4.4 Vorhersagekurven des Pendels der Station Kiel-Rehmsberg

Aus den bisher gewonnen Erfahrungen wurde nun versucht, die Neigungsregistrierungen von Einflüssen der Ostsee und des örtlichen Luftdrucks so zu befreien, daß sich Kurven ergeben, die für eine Vorhersage der meteorologischen Fluten an der Westküste Schleswig-Holsteins geeignet sind. Dabei sollen in Ergänzung zu den Betrachtungen in den Abschnitten 4.1 und 4.2, der von Zschau (1977, 1979a) durchgeführten Nachhersage der Sturmflutserie vom November/Dezember 1973 und des vorläufigen Abschlußberichts vom 19.4.79 auch kurzperiodische, meteorologisch bedingte Änderungen der Einflußgrößen und der Neigungsbewegungen berücksichtigt werden.

Vorerst wurden nur die Neigungsbewegungen des Pendels Kiel-Rehmsberg betrachtet, und zwar in SSW-Richtung. Einerseits liegen für diese Station die meisten Daten vor, andererseits zeigten die vorherigen Untersuchungen für Kiel-Rehmsberg die stärksten Vorläufe in südsüdwestlichen Richtungen. Die vorläufigen Vorhersagekurven werden nach folgenden Berechnungsschritten aus diesen Vertikalpendelbewegungen erhalten:

1. Subtraktion harmonischer Gezeitenwellen, d.h. derjenigen Wellen, die über lange Zeiträume hinweg in Amplitude und

Phase konstant sind und daher leicht vorhergesagt werden können. Berücksichtigt werden insgesamt 23 ganz-, halb-, viertel- und sechsteltägige Gezeiten. Hiermit werden die direkt auf das Pendel wirkenden Erdgezeiten und die indirekt, über Anziehungskraft und Verbiegung der Erdkruste wirkenden regelmäßigen Anteile der Meeresgezeiten erfasst.

2. Teilweise Subtraktion nichtharmonischer Gezeitenwellen, die zustande kommen aufgrund meteorologisch bedingter Modifikation der harmonischen Meeresgezeitenwellen. Das Wort "teilweise" soll verdeutlichen, daß bei diesem Verfahren lediglich der über 4 Tage konstante Anteil der Gezeitenrestwellen in Abzug gebracht werden kann. Dabei werden insgesamt 12 ganz-, halb-, viertel- und sechsteltägige Wellen berücksichtigt. Es wird angenommen, daß über 4 Tage konstante Gezeitenrestwellen auch noch über einen weiteren halben Tag konstant bleiben, und daher für diesen halben Tag vorausgesagt werden können. Die Erfahrung hat gezeigt, daß dies tatsächlich in erster Näherung der Fall ist. Denn die Extrapolation dieser nonharmonischen Anteile um einen halben Tag in den Vorhersagezeitraum hinein führte zu einer weiteren Verbesserung der Vorhersagekurve.
3. Elimination von fünf- und mehrtägigen Änderungen, sofern sie nicht in der Wasserstandskurve des Pegels Büsum enthalten sind, durch Anwendung eines numerischen Filters. Diese Prozedur ist bei einer echten Vorhersage nicht durchführbar, da sich der verwendete Filter vom Vorhersagezeitpunkt aus gesehen nicht nur über zurückliegende sondern

auch über vorausliegende Bereiche des Pendelsignals erstreckt. Es gibt jedoch bereits deutliche Anzeichen dafür, daß diese längerwelligen Änderungen, die oft auch als "Drift" bezeichnet werden, auf Niederschläge in der unmittelbaren Umgebung des Pendels zurückzuführen sind bzw. auf die damit verbundenen Grundwasserspiegeländerungen. Sie können in Zukunft wahrscheinlich weitgehend erfasst und im Sinne der Anwendbarkeit der Vorhersagemethode korrigiert werden (siehe auch unten).

4. Subtraktion einer geeigneten Linearkombination von örtlichem Luftdruck und der von den Gezeiten (wie unter 1. und 2.) befreiten Wasserstandskurve des Pegels Strande. "Geeignet" heißt in diesem Fall: Eine Linearkombination wird aus zum Zeitpunkt der Vorhersage bekannten Werten dieser beiden Einflußgrößen so gewählt, daß nach deren Abzug von der Neigungsmeßkurve der Restanteil des Pendelsignals dem Wasserstand an der Nordseeküste möglichst ähnlich wird (abgesehen von einer Zeitverschiebung und einem Skalierungsfaktor). Diese Anpassung basiert auf einer Mittelung über lange Registrierzeiträume.
5. Schließlich wird das reduzierte Pendelsignal mit einem Skalierungsfaktor von "msec" in "cm" am Pegel Büsum umgerechnet. Auch der Skalierungsfaktor basiert auf einer Mittelung über lange Registrierzeiträume und wird so gewählt, daß sich transformiertes Pendelsignal und Wasserstandskurve am Pegel Büsum (ebenfalls nach Abzug harmonischer und nichtharmonischer Gezeitenwellen) möglichst gut

decken, ungeachtet jedoch einer eventuellen Phasenverschiebung zwischen beiden Kurven.

In den Abbildungen 16 und 17 sind jeweils beide Kurven dargestellt, die von den Gezeiten befreite Wasserstandskurve am Pegel Büsum (durchgezogen) und das wie oben beschrieben transformierte Pendelsignal bzw. die vorläufige Vorhersagekurve (gestrichelt). Abbildung 16 zeigt den Zeitraum 10.11. bis 19.12.1973 mit den sechs schon erwähnten Sturmflutereignissen. Die meteorologisch bedingten Fluten erreichen Höhen zwischen 1,70 m (am 16.12.) und 2,50 m (am 13.11. und 19.11.). In Abbildung 17 ist der Zeitraum 27.9.1977 bis 5.1.1978 wiedergegeben. Hier sind sieben größere meteorologische Flutwellen zu erkennen, bei denen Spitzen von über 1,50 m erreicht wurden. Bei den Flutwellen vom 20.11.77 und 3./4.1.78 wurde die 8 m - Marke am Pegel Büsum aufgrund günstiger Überlagerung der (bekannten) astronomischen Gezeiten nicht überschritten.

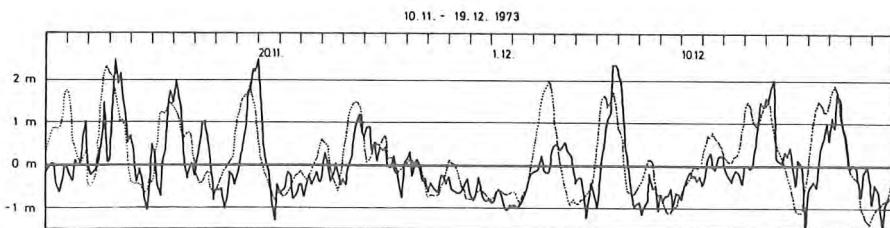


Abb.16: Die von den Gezeiten befreite Wasserstandskurve (durchgezogen) und die vorläufige Vorhersagekurve, berechnet aus den SSW-Neigungen der Station Kiel-Rehmsberg (mit Vorlauf, gestrichelt) für die Sturmflutserie im Nov./ Dez. 1973

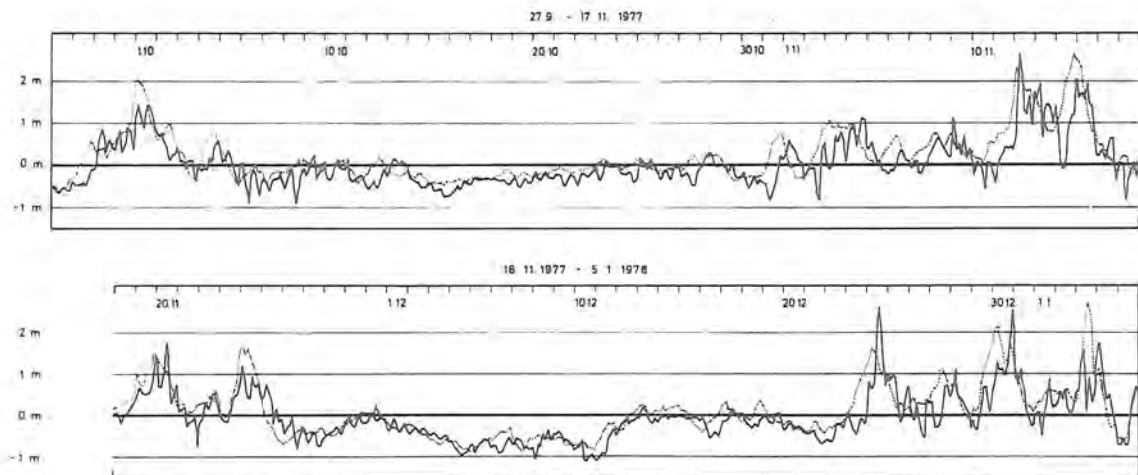


Abb.17: Die von den Gezeiten befreite Wasserstandskurve am Pegel Buisum (durchgezogen) und die vorläufige Vorhersagekurve, berechnet aus den SSW-Neigungen der Station Kiel-Rehmsberg (mit Vorlauf, gestrichelt) für den sturmflutreichen Herbst/Winter 1977/78

Aus beiden Abbildungen erkennt man folgende Sachverhalte:

- Die Wasserstandskurve zeigt hochfrequenzere Änderungen als die Vorhersagekurve. Eine Erklärung hierfür bietet sich an. Die Wasserstandskurve gibt den an einem Punkt der Nordseeküste gemessenen Pegelstand wieder, in der Vorhersagekurve dagegen spiegelt sich integral die gesamte Wasserstandsverteilung der engeren und weiteren Deutschen Bucht wieder. Man darf demnach nicht erwarten, daß sich örtlich sehr begrenzte Wasserstandsänderungen in den Pendelregistrierungen fernab der Küste abzeichnen. Es bleibt jedoch noch nachzuweisen, daß die gleichen Wasserstandsänderungen wie am Pegel Buisum nicht auch z.B. 30 km südlicher am Pegel Cuxhaven gemessen werden, oder wenn, dann zumindest mit anderer Phase.
- Abgesehen von den hochfrequenten Wasserstandsänderungen ist die Vorhersagekurve der Wasserstandskurve recht ähnlich. Bei allen Sturmfluten zeigt sich ein deutlicher Vorlauf des Flutanstiegs in der Vorhersagekurve, der in der Regel bei etwa 6 bis 12 Stunden liegt. Der Vorlauf findet sich auch bei Wasserstandsschwankungen kleineren Ausmasses, so am 22. und 24.11.73 und jeweils am 4.10., 31.10., 3.11., 19.11., 23.11., 27.12.1977 .
- Die maximale Fluthöhe von Sturmfluten wird durch die Vorhersagekurve auf etwa 50 cm genau, in manchen Fällen auch besser, angezeigt. Von den 11 in Abb.16 und 17 dargestellten Sturmfluten mit einer Höhe des meteorologischen Anteils um 2 m bildet nur die Weihnachtsflut vom 24.12.77

eine Ausnahme. Sie wird um einen Meter zu tief angezeigt. Dies war die Flut, die nach den Untersuchungen in Abschnitt 4.2 von charakteristischem Verhalten des Ostseepegels Strande und des örtlichen Luftdrucks begleitet war, die aber keinen Vorlauf der Neigungen an der Station Kiel-Rehmsberg in südwestlichen Richtungen bewirkte. In Abb.17 fällt auf, daß diese Flut sehr schnell auf- und wieder abgelaufen ist, ein Umstand, der das "atypische" Verhalten der 9-stündigen, langwelligen Änderungen der Neigungen in Abschnitt 4.2 erklärt (s.dort). Bei zwei anderen Sturmfluten mit spitzen Maxima, nämlich denen vom 12.11. und 31.12.1977, gibt die Vorhersagekurve die tatsächliche Fluthöhe recht gut wieder. Allerdings wird die Flut vom 31.12.1977 erheblich zu früh angezeigt (Vorlauf ca. 18 Stunden). Es liegt nahe zu vermuten, daß diese schnellen Flutanstiege und Flutabfälle relativ lokal vor sich gehen können und die Neigungsmessungen daher nur begrenzt von ihnen beeinflusst werden.

Am 10.11. und am 3.12. 1973 werden in beiden Fällen durch die Vorhersagekurve starke Sturmfluten angezeigt, ohne daß am Pegel BÜsum nennenswerte Fluten registriert wurden. Eine Untersuchung der Wetterlage vom 3.12.73 ergab zunächst, daß an diesem Tag nach mehrtägigem Dauerfrost und einigen Schneefällen plötzlich Tauwetter mit Niederschlägen einsetzte. Vom 3. auf den 4.12. mußte der Boden an der Station Kiel-Rehmsberg eine Niederschlagsmenge von ca. 20 mm aufnehmen.

Starke Niederschläge gab es auch 3 Wochen vorher am 9. und 10.11. Dies zeigt die Abbildung 18. Hierin ist für den Zeitraum 8.11. bis 5.12.1973 von oben nach unten dargestellt:

1. Die von den Gezeiten befreite Wasserstandskurve am Pegel Büsum;
2. die SSW-Neigungen an der Station Kiel-Rehmsberg nach Abzug der Gezeiten und nach Herausfilterung langwelliger Anteile (siehe Berechnungsschritte 1, 2 und 3, oben);
3. wie 2., jedoch nach Korrektur des Luftdruckeinflusses;
4. wie 3., jedoch nach Korrektur des Einflusses der westlichen Ostsee; dies ist die Vorhersagekurve zu 1., jedoch in "msec";
5. die in den Boden eindringende Niederschlagsmenge an der Station Kiel-Rehmsberg, gemessen jeweils um 7 Uhr morgens für die vergangenen 24 Stunden.

Man erkennt gut die zunehmende Ähnlichkeit zwischen den Neigungskurven und der Wasserstandskurve mit fortschreitender Subtraktion der Einflußgrößen. Man sieht auch die klare Korrelation des Neigungsmaximums am 3.12. mit der hohen Niederschlagsmenge am gleichen Tag. Da Sturmfluten in der Deutschen Bucht fast regelmäßig an vorbeiziehende Sturmtiefzyklonen gekoppelt sind, ist es nicht verwunderlich, wenn gleichzeitig starke Niederschläge niedergehen, wie es bei den Sturmfluten vom 13.11. und 16.11. zu erkennen ist. Besonders auffällig ist aber die Niederschlagshäufung am 9. und 10.11. in Zusam-

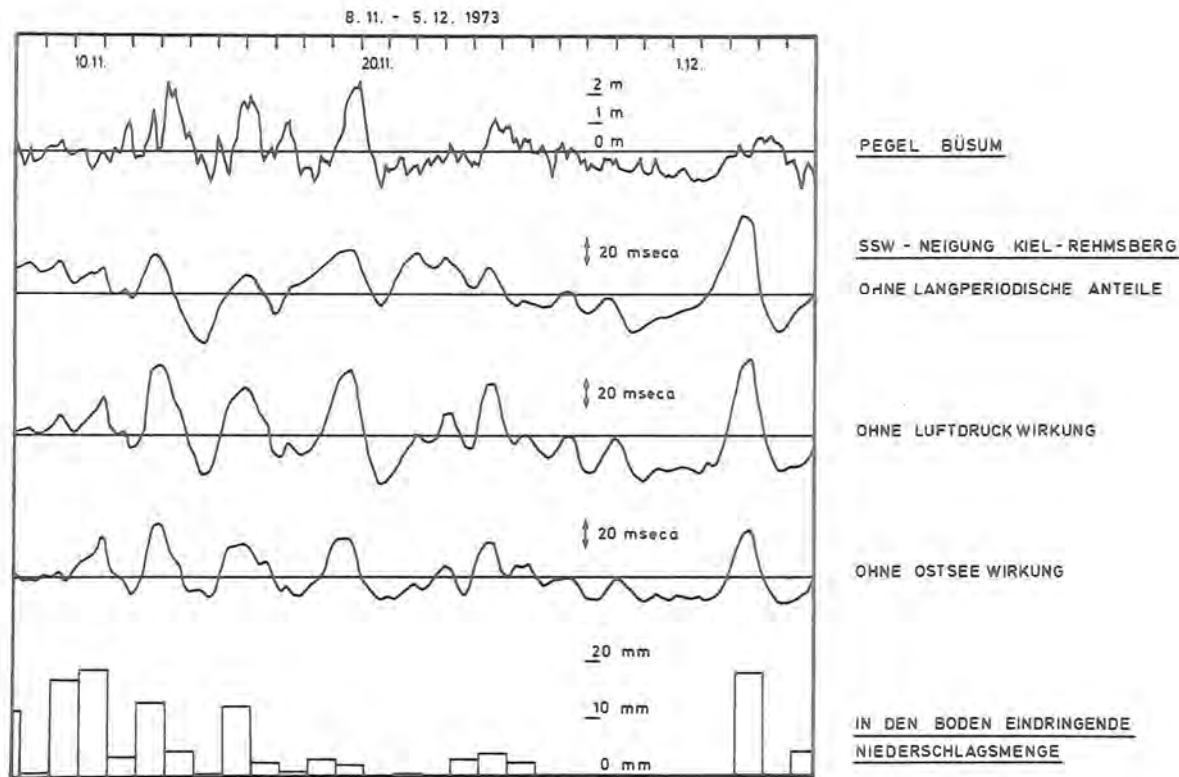


Abb.18: Korrektur der SSW-Neigungen von Kiel-Rehmsberg um Luftdruck- und Ostseewirkung, und Resteinfluß durch örtliche Niederschlagsmenge

menhang mit dem Maximum in der Vorhersagekurve am 10.11. Erhöhte Niederschlagsmengen gab es auch zu den Sturmfluten am 1.10.77, 14./15.11.77 und 3./4.78, immer dann also, wenn die Vorhersagekurve in den Abbildungen 16 und 17 deutlich zu hohe Flutabschätzungen liefert.

Mit großer Sicherheit ist daher eine Beeinflussung zumindest der Station Kiel-Rehmsberg durch die in unmittelbarer Umgebung niedergehenden Niederschläge anzunehmen. Auch die im 3. Berechnungsschritt (s.o.) eliminierten langwelligen Anteile in den Neigungsregistrierungen gehen wahrscheinlich weitgehend auf Niederschlagseffekte zurück. Der vorläufige Charakter der Vorhersagekurve versteht sich nun insofern, als daß die numerische Filterung des 3. Berechnungsschrittes durch eine geeignete Korrektur des Einflusses des örtlichen Niederschlags auf die Pendelbewegungen ersetzt werden muß. Diese Korrektur soll auch die "überflüssigen" oder zu hohen Maxima der Vorhersagekurve eliminieren und so zu ihrer Verbesserung beitragen.

In diesem Abschnitt wurde der Weg aufgezeigt, wie aus der Registrierung eines Vertikalpendels eine Kurve für die Vorhersage des Wasserstandes an der deutschen Nordseeküste berechnet und in Zukunft noch verbessert werden kann. Die in den Abbildungen 16 und 17 gezeigten Vorhersagekurven machen deutlich, daß beim gegenwärtigen Stand der Untersuchungen jeweils aufschlußreiche Trendmeldungen über größere drohende Sturmfluten mit einer Genauigkeit von etwa 50 cm und einer - durch die Anzahl der untersuchten Sturmfluten gegebenen -

statistischen Sicherheit von 10 : 11 erstellt werden können. Eine über diese Trendmeldung hinausgehende Vorhersage mit genauerer Angabe von Vorhersagezeit und Vorhersagefehler, wie sie von einer aktuellen Sturmflutvorhersage erwartet werden muß, wird allerdings erst dann sinnvoll, wenn der Einfluß des Niederschlags auf die Neigungsmessungen untersucht ist. Bis dahin sind die Vorhersagekurven als vorläufig zu betrachten.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aufgrund der hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse zum Projekt "Sturmflutvorhersage mit Vertikalpendeln" kommen die Autoren zu folgenden Schlüssen:

1. Korrelationsberechnungen über längere Zeiträume hinweg zeigen eine deutliche Beeinflussung aller drei Vertikalpendelstationen in Schleswig-Holstein durch Wasserstandsänderungen der Nordsee sowie durch örtliche Luftdruckschwankungen. Von Wasserstandsschwankungen der westlichen Ostsee wird eindeutig erkennbar nur die Station Kiel-Rehmsberg beeinflußt.
2. Die Untersuchung von Phasenbeziehungen zwischen dem Pegel Büsum und Neigungen an den verschiedenen Stationen bei einzelnen Sturmflutereignissen - anhand von langwelligen, 9-stündigen Änderungen der betrachteten Zeitreihen - legt eine Unterscheidung von "typisch" und "atypisch"

verlaufenden Sturmfluten nahe. Erstere werde von Luftdruckänderungen und von Ostsee-Wasserstandsänderungen (Pegel Kiel bzw. Pegel Strande) begleitet, die gegenläufig zu den Wasserstandsänderungen am Pegel Bismarck und den Neigungen in westlicher Richtung auftreten. Ohne Korrektur von äußeren Einflußgrößen nimmt der Neigungsvorlauf für Richtungen von W über WSW nach SSW zu. Dies wurde bei den als atypisch eingestuften Sturmfluten nicht beobachtet. Neigungen an der Station Medelby lassen sich bisher nicht in der gleichen Weise einordnen.

Sollen auch atypisch verlaufende Sturmfluten aus Pendelmessungen vorhergesagt werden können, so muß zumindest die Luftdruckwirkung und für Kiel-Rehmsberg zusätzlich die Wirkung der westliche Ostsee aus den Pendelaufzeichnungen eliminiert werden. Zu einer realistischen Abschätzung der Fluthöhe an der Westküste sind außerdem kurzweilige Änderungen in den untersuchten Zeitreihen zu berücksichtigen.

3. Die rechnerische Nachvollziehung der Sturmflut vom 3.1.76 hat gezeigt, daß die bei anderen Sturmfluten beobachteten Neigungsvorläufe zumindest an der Station Kiel-Rehmsberg wahrscheinlich nicht unabhängig gesehen werden dürfen von Wasserstandsänderungen in der westlichen Ostsee.
4. Die Berücksichtigung der Einflüsse von Ostsee und Luftdruck für die in SSW-Richtung beobachteten Neigungen an der Station Kiel-Rehmsberg hat gezeigt: Beide Einflüsse können in einer Weise aus der Pendelregistrierung eliminiert werden, daß eine Vorhersagekurve entsteht, die erlaubt,

meteorologisch bedingte Wasserstandsänderungen an der Westküste Schleswig-Holsteins frühzeitig zu erkennen. Dies schließt auch die unter 2. als atypisch eingestuften Sturmfluten ein, ebenso wie relativ kurzperiodische Wasserstandsschwankungen, sofern sie nicht örtlich sehr begrenzt auftreten. Trendmeldungen über drohende größere Sturmfluten könnten mit einer Genauigkeit von etwa 50 cm und einer durch die Anzahl der untersuchten Sturmfluten bedingten statistischen Sicherheit von 10 : 11 gegeben werden.

Die bisher vorläufige Vorhersagekurve zeigt eine deutliche Korrelation mit der am Stationsort niedergehenden Niederschlagsmenge, und zwar insbesondere an denjenigen Stellen, an denen eine weniger gute Übereinstimmung zwischen Vorhersagekurve und Wasserstandskurve des Pegels Büsum besteht. Es ist zu erwarten, daß durch Berücksichtigung des Niederschlageffektes in Zukunft eine noch wesentlich verbesserte Vorhersagekurve erstellt werden kann.

Aufgrund der vorgelegten Ergebnisse sind die Autoren der Meinung, daß die vorgeschlagene Vorhersagemethode zwar als eigenständiges Verfahren gegenwärtig nicht praktikabel ist; als Ergänzung zu den herkömmlichen Vorhersagemethoden und zu der Information aus den HN-Modellen dürfte es aber auch in diesem Stadium schon von Bedeutung sein, da es wichtige Trendangaben liefert, die zusammen mit der Information aus den beiden anderen Verfahren zu einer Verbesserung der Vorhersage insbesondere größerer Sturmfluten führen sollte.

Weitere Untersuchungen über den Einfluß des Niederschlags auf die Neigungsmessungen könnten die Vorhersagen schon in unmittelbarer Zukunft über die Trendmeldung hinaus bedeutend verbessern, so daß das Verfahren auch im Sinne einer wesentlich exakteren langfristigen Sturmflutvorhersage praktikabel zu werden verspricht. Neben einer Reihe von weiteren Auswertearbeiten (ca. $\frac{1}{2}$ bis 1 Jahr) verlangt dies allerdings auch einige zusätzliche instrumentelle und technische Einrichtungen. Das Minimum solcher für die aktuelle Sturmflutvorhersage notwendigen Einrichtungen wäre bei ausschließlicher Verwendung der Station Kiel-Rehmsberg:

- ein Notstromaggregat an der Station, daß bei Ausfall der zentralen Stromversorgung automatisch die Stromversorgung des Vertikalpendels und der zugehörigen elektronischen Einrichtungen übernimmt;
- eine automatische Datenübertragung von der Station zum Institut für Geophysik der Universität Kiel oder zu einer anderen geeigneten Stelle, an der eine rasche Datenauswertung vorgenommen werden kann;
- eine automatische Datenübertragung vom Pegel Kiel oder vom Pegel Strande zu der gleichen Stelle;
- ein Kleincomputer, der die Datenauswertung weitgehend automatisch durchführt (Gezeitenreduktion, Korrektur der Einflußgrößen, laufende Trendmeldungen etc.) .

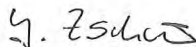
6. DANKSAGUNG

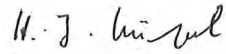
Die Autoren danken den Ländern Bremen, Hamburg und Niedersachsen für die finanzielle Unterstützung des Projektes im Laufe des Jahres 1978. Dank gebührt auch dem Land Schleswig-Holstein, das den Beginn dieser Untersuchungen schon 1977 ermöglichte und sich für eine Fortsetzung des Projekts über 1977 hinaus eingesetzt hat. Auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft möchten wir danken. Denn ohne die von ihr zur Verfügung gestellten Vertikalpendel hätte das Projekt nicht durchgeführt werden können.

Weiter sei an dieser Stelle dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein gedankt, vor allem Herrn ORBR Schulz-Kosel, für die ständige Betreuung und das besondere Interesse am Fortgang der Arbeiten.

Kiel, den 27.7.1979

Die Autoren:


Dr.habil. J.Zschau
(Die Ausführenden)


Dipl.-Geoph. H.-J.Kämpel


Prof.Dr. R.Meißner
(Der Projektleiter)

7. LITERATUR

- Kirsch,R., Zum Einfluß von Nordsee-Sturmfluten auf Neigungsbewegungen des Festlandes an der Vertikalpendel-Station Heide. Diplomarbeit, vorgelegt am Inst.f.Geoph.d.Univ. Kiel, 1979
- Zschau,J., Sturmflutvorhersage mit Vertikalpendeln. Christiana Albertina Univ.Kiel, Nr.7,S.5-17, 1977
- Zschau,J., Prediction of storm surges from marine loading tilt measured inland from the sea. Proceed.8th Int.Symp. on Earth Tides held at Bonn 1977, pp.787-804, 1979(a)
- Zschau,J., Airpressure induced tilt in porous media. Proceed. 8th Int.Symp.on Earth Tides held at Bonn 1977, pp.418-433, 1979(b)