# Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen

Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieur-Kommission<sup>1</sup>)

#### Zusammenfassung

Im Januar 1976 wurden in Niedersachsen die Deiche auf dem Festland und die Schutzwerke auf den Düneninseln an der Nordseeküste von sehr schweren Sturmfluten betroffen. Der meteorologische und hydrologische Ablauf der Sturmfluten wird beschrieben. In der Elbe veranlaßte die Gleichzeitigkeit einer hohen Sturmflut und eines großen Oberwasserabflusses besondere Untersuchungen.

Die Schäden an den Deichen und Inselschutzwerken werden untersucht, um daraus Folgerungen für deren künftige Verhinderung zu ziehen. Infolge der beobachteten höheren Wasserstände als in früheren Sturmfluten müssen einige Flußdeichstrecken erhöht werden. Weiterhin werden Vorschläge für die Instandsetzung von Schäden an den Küstenschutzwerken und ein wirksames Warnsystem vor Sturmfluten erläutert.

#### Summary

In January 1976 heavy storm floods affected the dikes on the mainland and the protection works on the dune islands at the North Sea coast of Niedersachsen. The meteorological and hydrological development of the storm floods are described. In the river Elbe the simultaneousness of a high storm flood and a large upstream runoff caused special investigations.

The damages at the dikes and islands protection works are analysed to set up recommendations for their future prevention. In consequence of the observed higher water levels than in former storm floods some sections of river dikes have to be heightened. Additionally suggestions are explained for repair works of damages at coastal protection works and an effective warning system previous to storm surges.

#### Inhalt

Einführung	3
Wetterlagen, Sturmtiden und Wellenauflauf im Januar 1976	3
Sturmtidenwetterlagen im Januar 1976	
(nach Kruhl, 1977 und Duensing/Steinborn, 1977)	3
Verlauf der Sturmtiden im Januar 1976	4
Allgemeines	4
Sturmtiden an der Nordseeküste	5
Sturmtiden in der Ems	14
Sturmtiden in der Weser	15
Sturmtiden in der Elbe	15
	Wetterlagen, Sturmtiden und Wellenauflauf im Januar 1976 Sturmtidenwetterlagen im Januar 1976 (nach Kruhl, 1977 und Duensing/Steinborn, 1977) Verlauf der Sturmtiden im Januar 1976 Allgemeines Sturmtiden an der Nordseeküste Sturmtiden in der Ems Sturmtiden in der Weser

<sup>1)</sup> Mitglieder der Ingenieur-Kommission: Baudirektor Heinsohn, Stade; Ltd. Baudirektor Kramer, Aurich; Ministerialrat Krause, Hannover; Dr.-Ing. Luck, Norderney; Diplomingenieur Meyer-Toelle, Lüneburg; Ministerialrat Müller, Hannover.

2.3	Seegang und Wellenauflauf
2.3.1	Seegang
2.3.2	Wellenauflauf
3	Hydrologische Grundlagen für die Bemessungswasserstände aus dem lang-
	fristigen Vergleich der Sturmfluten
3.1	Vergleich der Scheitelwasserstände und des Tidenverlaufs
	an der Nordseeküste
3.2	Vergleich des Tidenverlaufs und der Scheitelwasserstände
	in den Stromgebieten
3.2.1	Allgemeines
3.2.2	Veränderungen der Wasserstände und des Sturmtidenverlaufs in der Ems 26
3.2.2.1	Langfristige Veränderung der mittleren Wasserstände
3.2.2.2	Vergleich der Sturmtiden 26
3.2.3	Veränderungen der Wasserstände und des Sturmtidenverlaufs in der Weser 28
3.2.3.1	Langfristige Veränderung der mittleren Wasserstände
3.2.3.2	Vergleich der Sturmtiden
3.2.4	Veränderungen der Wasserstände und des Sturmtidenverlaufs in der Elbe
3.2.4.1	Langfristige Änderung der mittleren Wasserstände
3.2.4.2	Vergleich der Sturmtiden 32
3.3	Häufigkeit von Sturmtiden
3.4	
4	
4.1	
4.2	
4.3	Art und örtliche Verteilung der Schäden an den Festlandsdeichen
4.3.1	Schäden an den Hauptdeichen und Folgerungen
4.3.2	Außenböschung 41
4.3.3	Deichkrone und Binnenböschung
4.3.4	Deichboden und Grasdecke
4.4	Anlagen im und am Deich
4.5	Deichsicherungswerke und massive Böschungsbefestigungen
	Schäden an Schutzwerken, Deichvorland und Sommerdeichen
4.6	Überschwemmungen 47
5	Überprüfung der Deichhöhen im niedersächsischen Küstengebiet
5.1	Allgemeines
5.2	Überprüfung der Besteckhöhen der Seedeiche
5.3	Überprüfung der Besteckhöhen der Stromdeiche 50
5.3.1	Besonderheiten und örtliche Einflüsse
5.3.2	Überprüfung der Besteckhöhen an der Ems
5.3.3	Überprüfung der Besteckhöhen an der Weser
5.3.4	Überprüfung der Besteckhöhen an der Elbe
5.3.5	Zusammenfassung
5.4	Bauhöhe der See- und Stromdeiche
6	Schäden an den Dünen und Schutzwerken und Folgerungen für den künstigen
	Schutz der Ostfriesischen Inseln
6.1	Schäden an den Inselschutzwerken
6.2	Folgerungen für den künftigen Inselschutz des Landes Niedersachsen 57
6.3	Grundsätze für den künftigen Inselschutz
7	Erfahrungen und Folgerungen in der Deichverteidigung
7.1	Vorbereitung, Zuständigkeiten und Ausrüstung
7.2	Sicherung von Schadensstellen
7.3	Sturmflutvorhersage und Sturmflutwarnungen
8	Schlußwort
9	Schriftenverzeichnis

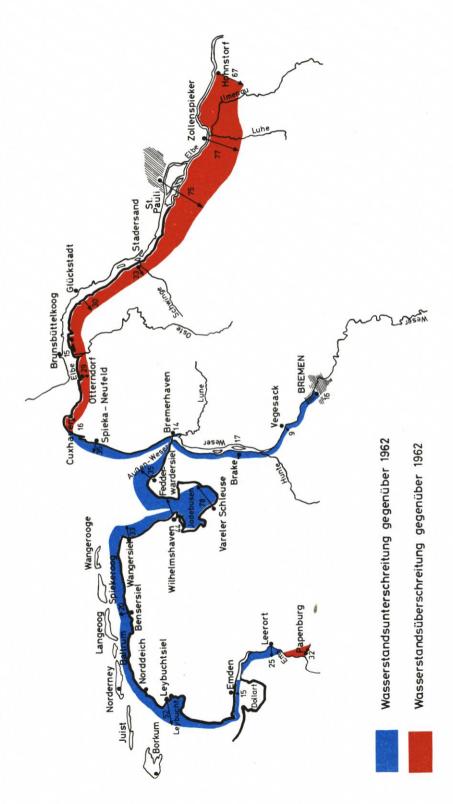


Abb. 1. Wasserstandunterschiede der sehr schweren Sturmfluten vom 3. 1. 1976 und 16./17. 2. 1962

#### 1 Einführung

Nur etwa zwei Jahre nach den Orkanfluten vom November/Dezember 1973 wurde das niedersächsische Küstengebiet am 3./4. und 20./21. Januar 1976 erneut durch sehr schwere Sturmfluten heimgesucht, deren erste im Elbegebiet die bisher bekannten Höchstwasserstände überschritten hat. Westlich der Weser sind die bisherigen Höchstwerte – mit Ausnahme des oberen Tidebereiches der Ems – nicht erreicht worden (Abb. 1).

Die Schutzwerke der niedersächsischen Küste und der vorgelagerten Inseln wurden während der beiden Sturmfluten wiederum stark beansprucht. Es traten Schäden ein, deren Behebung über 35 Mio. DM erforderten. Besonders betroffen waren die noch nicht verstärkten Deiche an der Unterelbe, die im Raum Drochtersen der Beanspruchung nicht standhielten.

Der Niedersächsische Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten hat – wie nach den Sturmfluten von 1962 und 1973 – eine "Ingenieur-Kommission" aus Fachleuten der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung beauftragt, durch Dokumentation und vergleichende Deutung des Sturmflutablaufes sowie Auswertung neuerer wissenschaftlicher Untersuchungsergebnisse die nach 1962 festgelegten Bemessungsgrundlagen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke zu überprüfen und – wenn erforderlich – Änderungen vorzuschlagen. Darüber hinaus sollten die Sturmflutschäden ursächlich bewertet und daraufhin beurteilt werden, ob die gegenwärtigen, wesentlich auf den Erfahrungen der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 beruhenden Auffassungen zur konstruktiven Gestaltung der Küstenschutzwerke auf dem Festland und auf den Inseln zu überprüfen sind, besonders im Hinblick auf die Anfälligkeit der Küstenschutzwerke gegen Sturmflutschäden. Auch waren die Erfahrungen aus der Deichverteidigung und dem Sturmflutwarndienst während der Januar-Sturmfluten 1976 auszuwerten.

# 2 Wetterlagen, Sturmtiden und Wellenauflauf im Januar 1976

# 2.1 Sturmtiden wetterlagen im Januar 1976 (nach Kruhl, 1977 und Duensing/Steinborn, 1977)

Das Orkantief, das am 3./4. 1. 76 an der deutschen Nordseeküste eine sehr schwere Sturmflut verursachte, entstand an einer energiereichen Frontalzone zwischen der um ein nach Nordwesten vorgeschobenes Azorenhoch herumgeführten Subtropikluft und der polaren Kaltluft im Raum von Island und über Nordeuropa. Aus dieser Lage entwickelte sich ein Sturmwirbel mit einem Kerndruck von unter 975 mb, der am 3. 1. 76 um 1.00 Uhr im Nordteil der mittleren Nordsee mit einem Druck von 965 mb seinen Extremwert erreichte. Das Tief, das sich vom Atlantik bis hierher nach Ostnordost bewegt hatte, wanderte dann unter Richtungswechsel über Jütland und die Swinemünder Bucht nach Südosten ab (Abb. 2).

Bis zum 3. 1. 76 um 1.00 Uhr wehte über Nordwestdeutschland ein stürmischer Südostwind, während in Westdeutschland bereits stürmische Südwestwinde mit Orkanböen herrschten und über England und Irland bereits Nordweststurm registriert wurde. Sechs Stunden später hatte sich der Orkan auch in der Deutschen Bucht voll entfaltet. Orkanartige Winde mit 10–11 Bft hielten dann bis in die Mittagsstunden des 3. 1. 76 an und beeinflußten das Mittagshochwasser an der deutschen Nordseeküste entscheidend.

Bis 21.00 Uhr flaute der Wind auf 7 Bft ab und drehte in den Abend- und Nachtstunden unter Abschwächung über Nordwest nach Nord.

Die Zugbahn des Tiefs vom 3. 1. 76 verlief im Bereich der Nordsee rd. 700 km weiter südlich als die der Orkanflut vom Februar 1962 (Abb. 2). Allerdings war die Zuggeschwindigkeit diesmal erheblich größer als damals. Im Januar 1976 registrierte das Feuerschiff "Borkum-Riff" 15 Stunden lang Nordweststurm mit einer Windstärke von mehr als 10 Bft; 1962 stieg der Sturm hier nicht über 9 Bft, dauerte jedoch erheblich länger.

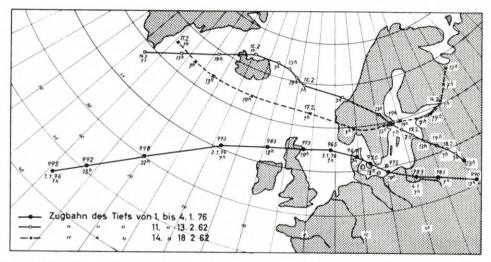


Abb. 2. Zugbahnen der Tiefdruckgebiete 1976 und 1962

Auch die Sturmtide vom 20./21. 1. 76 ist weitgehend auf ein nach Nordosten vorgeschobenes Azorenhoch, die Einbrüche polarer Kaltluft nach Nord- und Osteuropa sowie die Zufuhr subtropischer Warmluft vom Westatlantik zurückzuführen. Am 20. 1. 76 entwickelte sich im Raum Südirland ein Orkantief mit 945 mb. An der Rückseite dieses nach Skandinavien abziehenden Tiefs entstand durch Trogentwicklung über der Nordsee am 20. 1. 76 gegen 13.00 Uhr ein Druckabfallgebiet, das in der Nacht zum 21. 1. 76 über das Kattegat nach Südosten zog. Dabei wurden in der Deutschen Bucht Windstärken um 8 bis 9 Bft über mehrere Stunden erreicht. Gegen 1.00 Uhr begann der Luftdruck wieder zu steigen, so daß der Sturm bereits 2 bis 3 Stunden vor Eintritt des Morgenhochwassers an der deutschen Nordseeküste nachließ und die zunächst erwarteten Tidewasserstände nicht erreicht wurden.

# 2.2 Verlauf der Sturmtiden im Januar 1976

#### 2.2.1 Allgemeines

Die Wasserstände und die zur Bewertung der Sturmtiden vom 3./4. und 20./21. 1. 76 erforderlichen Begleitwerte sind – getrennt für die Küste sowie für Ems, Weser und Elbe – in Tabellen zusammengestellt worden. Gangliniendarstellungen enthält darüber hinaus der Anhang dieses Heftes. Die MThw- und MTnw-Werte sowie die Höchstwas-

serstände (HHThw) wurden den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen. Für die Ermittlung der Thw-Stände beider Tiden waren Wasserstandsaufzeichnungen zahlreicher Pegel verfügbar. Übernommen wurden die Mittelwerte des Scheitelbereiches und nicht die Spitzenwerte, da diese durch Böen erzeugt und nur kurzzeitig wirksam sind.

Auch die Flut- und Ebbedauer wurde aus den Pegelbögen ermittelt. Die Errechnung der der Haupttide sowie den Vor- und Nachtiden zugehörigen Geschwindigkeiten von Tidestieg und Tidefall beruht auf dem linearen Verlauf der Tidekurven zwischen Tnw und Thw oder umgekehrt.

Für die Küstenpegel Emden, Borkum, Norderney, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven ist der Windstau als Differenz zwischen den astronomisch vorhergesagten und den tatsächlich eingetretenen Wasserständen graphisch dargestellt und zu Windrichtung und -stärke in Beziehung gesetzt. Nach den heutigen Erkenntnissen sollte für diese Differenz besser der Begriff "Gesamtstau" verwendet werden, weil neben dem Windstau und der Inhomogenität des Windfeldes zusätzlich ein Reststau wirksam wird, der u. a. Fernwellen enthält. Bei den langfristigen Vergleichen wurde der Gesamtstau als Unterschied zwischen dem HThw und dem zugehörigen MThw errechnet, weil die astronomisch bedingten Wasserstände für "historische Sturmfluten" im allgemeinen nicht bekannt sind.

Die Wasserstandsaufzeichnungen der durch die Tide beeinflußten Pegel der großen Ströme wurden gleichermaßen behandelt. Für die im Zusammenhang mit dem Oberwasserzufluß zu deutenden Erscheinungen sind die Pegel Versen (Ems), Intschede (Weser) und Neu Darchau (Elbe) herangezogen worden.

Die hydrographischen Höhenangaben sind auf Pegelnull (PN = NN - 5 m), im übrigen auf Normalnull (NN) bezogen.

#### 2.2.2 Sturmtiden an der Nordseeküste

Die Sturmtiden vom 3./4. und 20./21. 1. 76 nahmen an der niedersächsischen Küste einen recht unterschiedlichen Verlauf, der wesentlich durch die Vortiden geprägt war. Die Wasserstandsganglinien (s. Anhang) der Pegel Borkum, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven lassen – ebenso wie die in den Tabellen 1–4 zusammengestellten Daten – erkennen, daß die Vortide vom 3./4. 1. 76 zunächst normal verlief und das zugehörige Thw an einigen Orten sogar unter dem astronomischen Thw – negativer Windstau – verblieb. Erst nach Eintritt des Thw und sehr kurzer Ebbedauer von zwei bis drei Stunden wurde der Sturm voll wirksam und erbrachte dann die stark erhöhten Wasserstände der Haupttide. Demgegenüber nahm die Vortide vom 20./21. 1. 76 einen für Sturmtiden normalen Verlauf.

Eine Sturmtide, die sich aus einem negativen Windstau heraus entwickelt, ist bemerkenswert, aber keinesfalls außergewöhnlich. So hat z. B. Schelling (1952) für den Pegel Husum einige Sturmtiden nachgewiesen, deren Vortiden durch negativen Windstau beeinflußt waren (z. B. 1906, 1916, 1936, 1938, 1949). Diese Erscheinung ist insofern von wesentlicher Bedeutung, als sie die rechtzeitige Sturmflutwarnung außerordentlich erschwert.

Die Flutdauer der Haupttide vom 3./4. 1. 76 war mit acht bis zehn Stunden verhältnismäßig lang, während diejenige vom 20./21. 1. 76 etwa normal verlief. Wegen der langen Flutdauer waren am 3./4. 1. 76 trotz des großen Tidehubs die Steiggeschwindigkeiten mit Werten zwischen 0,5 bis 1,0 cm/Min. nicht außergewöhnlich hoch und in

Sturmtiden vom 3./4. 1. und 20./21. 1. 1976 (Küstengebiete): MThw, MTnw, MThb, Thw, HHThw und Eintrittszeiten Tabelle 1

Küstengebiet	Pegelort	MThw [cm+ PN]	MTnw [cm+ PN]	MThb [cm]	Thw [cm+PN]	Σ	HHThw/Jahr [cm+PN]	Abweichungen der Ein- trittszeiten des Thw von den vorausberechneten	n der Ein- ss Thw von erechneten
					3./4.1.1976 20./21.1.1976	0./21.1.1976		3./4. 1. 1976 20./21. 1. 1976	0./21. 1. 1976
Ostfriesische Küste	Borkum-Südstrand	(1009	3781)	222	834/8544)	847	883/1962	-20/594)	- 7
und Inseln	Leybuchtsiel	(6261)	1	1	932	917	984/1962	+22	« 
	Norderney	610	372	238	988	988	912/1962	+17	—39
	Baltrum	620	379	241	880	888	917/1962	+20	0
	Bensersiel	(6331)	1	1	922	912	977/1906	+19	+14
	Langeoog	629	369	260	882	894	924/1962	-13	-18
	Harlesiel	635	1	1	944	930	970/1962	+22	- 3
	Wangerooge Nord	625	1	ı	668	902	939/1906³)	I	I
Jadegebiet	Wangersiel	6451)	1	1	934	934	965/1962	+22	10
pun	Wilhelmshaven	$(671^{1})$	3011)	370	826	886	1022/1962	+10	-38
Butjadingen	Dangast	$(675^{1})$	1	1	963	992	1022/1962	—51	09—
	Varel	$(675^{1})$	1	1	962	984	1061/1906	+49	43
	Schweiburg	1	I	1	1034	1020	1052/1962	—12	-31
Außenweser	Fedderwardersiel	658	1	1	886	973	1025/1962	- 2	-25
pun	Wremertief	(1099	1	1	ı	,	1045/1962	1	1
Wurster Küste	Spieka-Neufeld	$648^{1}$	1	١	1010	970	1045/1962	I	1
	Cuxhaven	6482)	3572)	291	1012	972	1012/1976	0	-22

<sup>1) 1961/70</sup> 2) 1966/70 3) Pegel Harle 4) An diesem Pegel lief die Nachtide höher auf. Zur Vergleichsfähigkeit mit den anderen Pegelorten sind beide Tiden angegeben.

Tabelle 2

Sturmtiden vom 3./4. 1. und 20./21. 1. 1976 (Stromgebiete): MThw, MTnw, MThb, Thw, HHThw und Eintrittszeiten

Stromgebiet	Pegelort	MThw [cm+ PN]	$MT_{nw}$ $[cm + PN]$	MThb	Thw [cm+PN]	• -PN]	HHThw/Jahr [cm+PN]	Abweichungen der Ein- trittszeiten des Thw von den vorausberechneten	n der Ein- s Thw von rechneten
					3./4. 1. 1976	3./4.1.1976 20./21.1.1976		(Min.) 3./4. 1. 1976 20./21. 1. 1976	.) 0./21. 1. 1970
Ems	Papenburg	6631)	4641)	199	919/9295)	006	929/1976	- 3/875)	-70
	Leerort	(9201)	3971)	253	971/9815)	962	1006/1962	$-8/-86^{5}$	—71
	Emden	6351)	3351)	300	930/9585)	938	1018/1906	$-28/-96^{5}$	-85
	Borkum-Fischerbalje	(6909)	3753)	231	824/8475)	843	906/1906	+48/-425)	+ 1
Weser	Brem., Gr. Weserbrücke	7351)	3941)	341	1033	1011	1281/1881	-24	+21
	Vegesack	7141)	3821)	332	1013	994	1022/1962	+23	- 5
	Elsfleth	(1269	1	1	1026	9924)	1026/1976	+13	+16
	Brake	$(691^{1})$	3371)	354	1012	286	1029/1962	-18	+17
	Bremerhaven	6701)	3201)	350	1018	994	1035/1962	-19	—37
Elbe	Zollenspieker	727²)	5642)	163	1135	1077	1135/1976	-70	-49
	St. Pauli	$(87^{2})$	$416^{2}$	271	1145	1058	1145/1976	67	—61
	Schulau	$(666^{2})$	4082)	258	1125	1033	1125/1976	-73	-20
	Stadersand	$(56^{2})$	$399^{2}$	257	1107	1014	1107/1976	09—	50
	Krautsand	1	1	١	1086	266	1086/1976	1	١
	Glückstadt	$(645^2)$	3902)	255	10834)	10004)	1083/1976	—51	-17
	Brunsbüttel	$(647^{2})$	3802)	267	1042	971	1042/1976	-48	—31
	Otterndorf	$(50^{2})$	3662)	284	1042	286	1042/1976	-21	-35
	Cuxhaven	6482)	3572)	291	1012	972	1012/1976	0	-22

<sup>1) 1961/70</sup> 2) 1966/70 3) 1966/75 4) Pegel ausgefallen, nach Nachbarpegeln bestimmt. 5) An diesen Pegeln lief die Nachtide höher auf. Zur Vergleichsfähigkeit mit den anderen Pegelorten sind beide Tiden angegeben.

Tabelle 3

Sturmtide vom 3./4. 1. 1976 (Küstengebiete): Wasserstände, Flut- und Ebbedauer, Steig- und Fallgeschwindigkeit

Küstengebiet	Pegelort	Wa	Wasserstär Vortide	Wasserstände vom 3./4. 1. 1976 Vortide Haupttide Nachtic	n 3./4. ttide	1. 1976 Nachtide	76 tide	Flutdau	dauer/ ide	Flutdauer/Steiggeschwindigkeit Vortide Haupttide Nachtic	eschwi ttide	ndigkeit Nachtide	it tide	Ebb	Ebbedaue: Vortide	/Fallgeschw Haupttide	Ebbedauer/Fallgeschwindigkeit Vortide Haupttide Nachtic	ndigkeit Nachtide	it
		[cm+PN]	[сш+БИ] Дум	[cm+PN]	[cm+PN]	[cm+PN]	[cm+PN]	D <sub>F</sub> [nim d]	VSteig [nim/mɔ]	D <sub>F</sub> [h min]	VSteig [nim/mɔ]	D <sub>F</sub> [nim h]	[cm/min]	D <sub>E</sub> [h min]	VFall [cm/min]	$\mathrm{D_E}$	VFall [cm/min]	D <sub>E</sub>	VFall [cm/min]
Ostfriesische Küste und Inseln Jadegebiet und Butjadingen	Borkum-Südstrand Leybuchtsiel Norderney Baltrum Bensersiel Langeoog Harlesiel Wangerooge Nord Wangersiel Wilhelmshaven Dangast Varel	357 352 337 351 342 340 340	655 612 622 612 613 620 620 630 630 640 640 650	504 538 558 536 536 529 529 534 497 500 476 481	834 886 886 887 922 882 944 899 934 978 962 963 963	629 608 622 622 608 577 614 577 570 570 570 570 570 570 570 570 570	854 902 847 842 850 850 858 858 830 907 914	6.36 6.38 6.22 6.18 6.43 6.39	0,60	8.28 9.42 9.54 9.54 9.58 8.52 8.56 8.52 8.53 8.53 8.53 8.54 7.33	0,65 0,59 0,54 0,68 0,66 0,77 0,72 0,82 0,82 1,08	4.46 4.26 4.47 4.49 5.11 4.46 5.16 4.55 4.47 4.12 4.13	0,79 0,89 0,77 0,85 0,85 0,80 0,96 1,22 1,41 1,33	3.01 2.26 2.18 2.17 2.34 2.41 3.35 3.10 3.10 3.10 3.28 3.28 3.38 4.03	0,50 0,51 0,46 0,58 0,56 0,57 0,46 0,70 0,67 0,67	6.41 6.01 6.00 6.28 6.40 6.29 6.14 6.15 6.25 6.25 6.25 6.25	0,51 0,76 0,72 0,81 0,76 0,85 0,85 0,95 1,10 0,95 1,10 1,10 1,10	7.33 8.24 8.24 7.34 7.00 7.06 6.34 6.34 6.53	0,73 0,68 0,68 0,77 0,77 0,87 1,14 1,14
Außenweser und Wurster Küste	Fedderwardersiel Wremertief Spieka-Neufeld Cuxhaven	277 328	623 — 656 635	550 1 578 1	988 6	601 8 670 8 592 8	882 ( — 868 864 (	6.36 (	0,87	8.30	0,86	4.57	0,95	2.45	0,44	6.45	96,0	8.00	1,00

Tabelle 4

Sturmtide vom 3./4. 1. 1976 (Stromgebiete): Wasserstände, Flut- und Ebbedauer, Steig- und Fallgeschwindigkeit

Stromgebiet	Pegelort	Was	Wasserstände vom 3./4. 1. 1976 Vortide Haupttide Nachtic	ide vom 3./ Haupttide	m 3./4. ttide	1. 1976 Nachtide	76 tide	Flutdau Vortide	lauer/!	Steiggeschw Haupttide	eschwi ttide	Flutdauer/Steiggeschwindigkeit Vortide Haupttide Nachtide	it tide	Ebbedaı Vortide	edauer	/Fallgeschw Haupttide	Ebbedauer/Fallgeschwindigkeit Vortide Haupttide Nachti	digkeit Nachtide	t ide
		Tnw [cm+PN]	[cш+bN] Дум	Tnw [cm+PN]	[cm+PN]	[cm+PN]	[cm+PN]	D <sub>F</sub> [nim d]	VSteig [cm/min]	D <sub>F</sub> [h min]	VSteig [cm/min]	D <sub>F</sub>	VSteig [mim/mɔ]	[h min]	VFall [cm/min]	D <sub>E</sub>	VFall [cm/min]	DE [h min]	[cm/min]
Ems	Papenburg Leerort Emden Borkum-Fischerbalje	420 368 297 350	660 663 625 598	622 620 563 502	919 971 930 824	739 660 626 625	929 981 958 847	6.18 6.28 6.41 6.55	0,63 0,76 0,82 0,61	8.16 8.08 8.18 9.23	0,60	3.22 3.36 3.50 4.51	0,94 1,49 1,44 0,76	2.26 2.24 2.51 2.50	0,26 0,30 0,36 0,56	7.22 7.14 7.10 5.48	0,41 0,72 0,71 0,57	9.33 9.24 8.49 7.23	0,46 0,74 0,85 0,74
Weser	Brem., Gr. Weserbrücke Vegesack Elsfleth Brake Bremerhaven	310 318 297 265 280	717 697 686 673 662	608 610 613 605 605	1033 1013 1026 1012 1012	603 612 609 586 593	949 927 925 912 893	5.56 6.30 6.47 6.54 7.11	1,14 0,97 0,96 0,99 0,89	8.13 8.29 8.15 8.23 7.50	0,86 0,79 0,83 0,81 0,81	4.01 4.19 4.26 4.23 4.23	1,43 1,22 1,19 1,24 1,12	3.14 2.54 2.48 2.44 2.32	0,56 0,50 0,43 0,41 0,33	7.17 6.57 6.55 6.47 7.23	0,98 0,96 1,00 1,05 0,96	7.50 7.40 7.24 7.24 7.18	0,98 0,95 1,01 1,04 0,99
Elbe	Zollenspieker St. Pauli Schulau Stadersand Krautsand Glückstadt <sup>1</sup> ) Brunsbüttel Otterndorf	483 357 362 359 355 355 352 357	775 735 704 683 663 665 644 636	757 733 703 681 658 659 628 628	11135 11145 11125 11107 1086 1083 1042	647 647 650 644 630 630 630 630	946 919 882 882 862 862 862 870	6.07 6.58 7.17 7.07 7.00 7.00 6.55 6.27	0,80 0,90 0,78 0,74 0,73 0,73	8.20 8.20 8.41 8.59 8.50 8.30 8.55	0,81 0,82 0,81 0,79 0,81 0,81 0,84	3.08 3.37 4.08 4.10 4.14 3.58 4.20	0,93	1.33 0.56 0.10 0.24 0.49 1.02 1.31 1.31	0,19 0,008 0,008 0,10 0,10 0,18 0,36	8.32 8.32 8.32 8.32 8.12 8.06 7.59 7.23	0,67 0,97 0,94 0,94 0,95 0,88 0,88	8.38 8.38 8.11 7.54 8.06 8.08 8.27 7.46	0,43 0,82 0,82 0,82 0,77 0,77 0,76 0,78
1) Haupt- und	Ouxnaven 1) Haupt- und Nachtide nach Nachbarpegeln ermittelt	Jeo In erm	ittelt	0/0	1012	7/6	100	7.0	,,		20,5	1	3	ì	2				

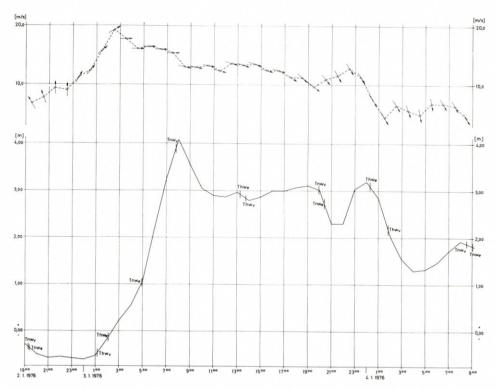


Abb. 3. Wind und Windstau am 2., 3. und 4. 1. 1976 in Emden

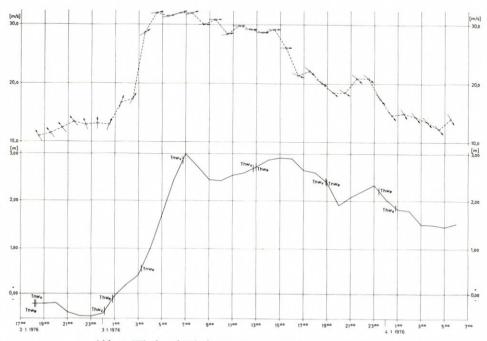


Abb. 4. Wind und Windstau am 2., 3. und 4. 1. 1976 in Borkum

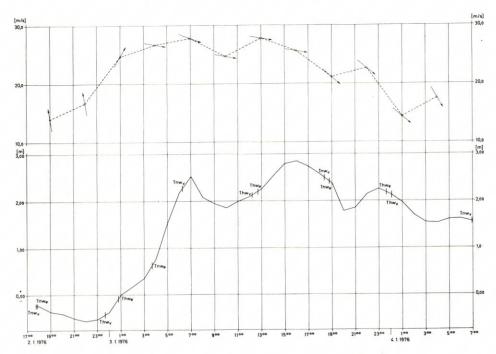


Abb. 5. Wind und Windstau am 2., 3. und 4. 1. 1976 in Norderney

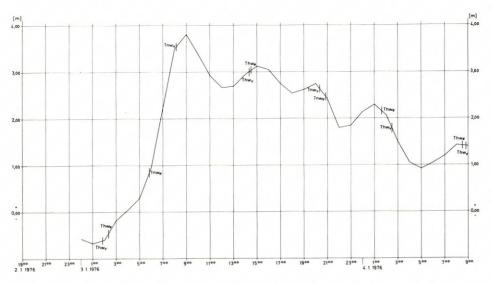


Abb. 6. Wind und Windstau am 2., 3. und 4. 1. 1976 in Wilhelmshaven

den meisten Fällen sogar wesentlich niedriger als diejenigen der Nachtide. Die Fallgeschwindigkeiten der Vortide waren trotz der kurzen Ebbedauer wegen des niedrigen Tidehubs kaum erhöht, und die entsprechenden Werte der Haupt- und Nachtide lagen in etwa gleicher Größenordnung.

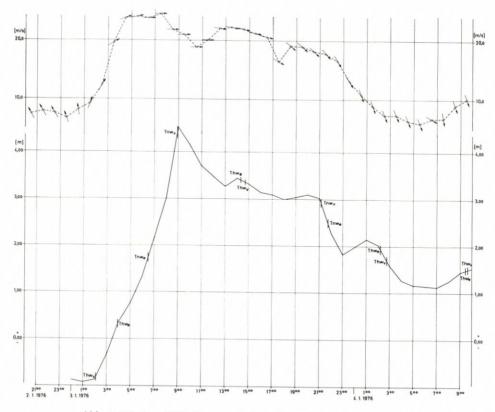


Abb. 7. Wind und Windstau am 2., 3. und 4. 1. 1976 in Bremerhaven

Die Abweichungen der Eintrittszeiten der Thw der beiden Sturmfluten von den vorausberechneten waren unterschiedlich und teilweise beträchtlich. Diese Abweichungen sind begründet in kurzfristigen Änderungen der Stärke und Richtung des Windes sowie den örtlichen Gegebenheiten der einzelnen Pegelstationen (Leelage, Streichlänge u. ä.).

Die Sturmtide vom 3./4. 1. 76 erreichte an der niedersächsischen Küste ihre höchsten Wasserstände (Abb. 1) – mit Ausnahme Borkums – am frühen Nachmittag des 3. 1. 76. Die Mittagstide in Borkum war mit PN +834 cm um 20 cm niedriger als die Nachtide. Zur Vergleichsfähigkeit sind deshalb in Tabelle 1 und 2 beide Werte eingetragen. Die erhöhte Nachtide am Pegel Borkum ist nicht das Ergebnis eines gegenüber dem Mittagshochwasser größeren Windstaus, sondern Folge des höheren mitternächtlichen astronomischen Tidehochwassers (Niemeyer, 1976a).

Im Bereich der Ostfriesischen Inseln erreichten die Sturmtiden vom 3./4. und 20./21. 1. 76 etwa gleiche Scheitelwerte. Nur in Langeoog war die vom 20./21. 1. 76 um 12 cm und in Baltrum um 8 cm höher. An der ostfriesischen Küste war die Tide vom 3./4. 1. 76 gegenüber der vom 20./21. 1. 76 um rd. 15 cm höher. Bezogen auf MThw waren die Wasserstände am 3./4. 1. 76 durchweg um 2,5 bis 3 m erhöht. Letzterer Wert wurde nur in Leybuchtsiel um 6 cm und in Harlesiel um 9 cm überschritten. Die Überschreitungen des MThw lagen am 20./21. 1. 76 in den gleichen Größenordnungen, ohne daß die 3-m-Grenze erreicht wurde.

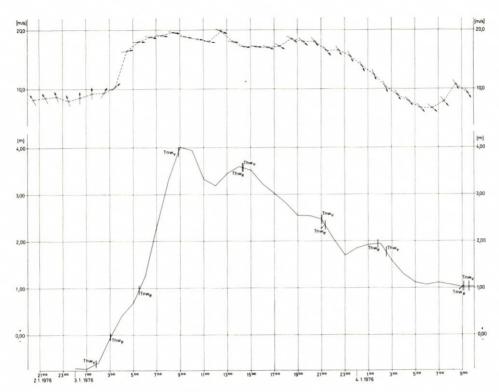


Abb. 8. Wind und Windstau am 2., 3. und 4. 1. 1976 in Cuxhaven

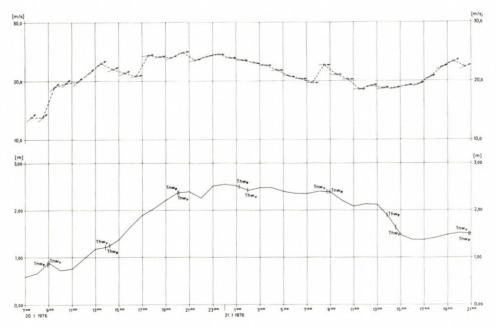


Abb. 9. Wind und Windstau am 20. und 21. 1. 1976 in Norderney

Im Jadegebiet war die Sturmtide vom 20./21. 1. 76 – mit Ausnahme Schweiburgs – die höhere der beiden. Sie überschritt das MThw in Wilhelmshaven um 3,18 m. Der größte Unterschied zwischen den Scheiteln der beiden Sturmtiden wurde in Dangast mit 29 cm gemessen.

In der Außenweser wurden am 3./4. 1. 76 die höheren Scheitelwasserstände der beiden Sturmtiden beobachtet. An der Wurster Küste waren die Überschreitungen des MThw erwartungsgemäß wegen der Westwindlagen höher als an der Ostküste Butjadingens und betrugen mit 3,62 m (Spieka) bzw. 3,64 m (Cuxhaven) rd. 30 cm mehr als z. B. bei Fedderwardersiel.

Der Verlauf der Windstaukurven vom 2. bis 4. 1. 76 für die Pegel Emden, Borkum, Norderney, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven wurde in den Abbildungen 3 bis 8 graphisch aufgetragen und auf die Richtung und Stärke des Windes bezogen. Übernommen wurden die Windwerte vom Feuerschiff "Borkum-Riff" für Borkum und von den den Pegeln nächstgelegenen Wetterstationen. Da in Wilhelmshaven eine solche fehlt, können hier Windwerte nicht angegeben werden.

Auffallend ist die außerordentliche Empfindlichkeit der Windstaukurve gegen geringfügige Änderungen von Stärke oder Richtung des Windes. Da diese Änderungen sich nicht in gleichem Ausmaß längs der gesamten Küste fortsetzen und eher durch örtliche Einflüsse hervorgerufen sind, nehmen die Windstaukurven nicht nur in ihren absoluten Werten, sondern auch in ihrer allgemeinen Entwicklung einen sehr unterschiedlichen Verlauf. Lediglich der sehr steile Anstieg der Kurven und das ausgeprägte Maximum geben ihnen eine gewisse Ähnlichkeit. Die Eintrittszeiten des maximalen Windstaus ändern sich von Westen nach Osten und wurden im Bereich Borkum/Norderney um 7.00 Uhr, in Emden um 7.30 Uhr, in Bremerhaven und Cuxhaven um 9.00 Uhr registriert. Bis zum Eintritt des Mittagshochwassers war der Windstau bereits wieder – örtlich unterschiedlich – um einige Dezimeter gefallen.

Einen erheblich ausgeglicheneren Verlauf hatte die Windstaukurve vom 20./21. 1. 76, die am Beispiel Norderney (Abb. 9) dargestellt ist.

#### 2.2.3 Sturmtiden in der Ems

Auch in der Ems entwickelte sich das Sturmtidengeschehen des 3./4. 1. 76 aus einem zunächst negativen Windstau (Abb. 3 u. 4), der dann in den frühen Morgenstunden des 3. Januar, etwa zur Zeit des vorausberechneten Tnw, ein Maximum erreichte. Die Wasserstandsganglinien stiegen - nach nur kurzer und schwach ausgebildeter Ebbezeit - im gesamten Emsgebiet stetig an und erreichten am frühen Nachmittag ihre Höchststände (s. Anhang). Nach nur schwachem Tidefall stiegen die Wasserstände wieder an und überschritten in der Nacht zum 4. Januar die am Nachmittag des Vortages eingetretenen Wasserstände geringfügig, so daß die Nachtide hier die höhere war. Die Windstaukurven (Abb. 3 u. 4) lassen erkennen, daß die in der Nacht vom 3. zum 4. Januar eingetretenen höheren Wasserstände (s. Abschn. 2.2.2) Folge des höheren astronomischen Thw und nicht eines höheren Windstaus waren. Zur großräumigen Vergleichsfähigkeit der Sturmtiden vom 3./4. 1. 76 ist in den Tabellen 3 und 4 die höhere Tide als Nachtide ausgewiesen. Die hier zusammengestellten Begleitwerte lassen ebenso wie der Verlauf der Ganglinien des Wasserstandes und des Windstaus erkennen, daß das Sturmtidegeschehen in der Ems vor allem zeitlich anders als in den übrigen Stromgebieten ablief. Die für die einzelnen Pegel bisher bekannten Höchstwasserstände (HHThw) wurden in der Ems nur im Bereich oberhalb Papenburgs überschritten. Demgegenüber ist die Sturmtide vom 20./21. 1. 76 weniger bemerkenswert (Tab. 2).

Der Oberwasserabfluß der Ems am Pegel Versen betrug 114 m³/s am 3. 1. 76 und 175 m³/s am 21. 1. 76 ( $MQ_{1941-1975}=78,6$  m³/s) und war somit gegenüber dem langfristigen mittleren Abfluß erhöht.

#### 2.2.4 Sturmtiden in der Weser

In der Weser erreichte der Windstau am 3. 1. 76 zur Zeit des vorausberechneten Tnw um 7.00 Uhr mit 4,50 m in Bremerhaven seinen höchsten Wert. Wie an der gesamten Küste waren die Wasserstände noch wenige Stunden vorher durch negativen Windstau beeinflußt (Abb. 7). In den frühen Morgenstunden stiegen sie dann sehr schnell an und erreichten – nach kurzer Unterbrechung durch die Ebbe – am frühen Nachmittag im gesamten Wesergebiet ihre Höchstwerte (s. Anhang). Die bisher bekannten HHThw wurden nur im Bereich Elsfleth geringfügig überschritten. Die Nachtide war zwar noch stark erhöht, blieb mit ihren Scheitelwerten jedoch rd. 1 m unter denjenigen der Haupttide.

Die Eintrittszeiten der Sturmtide vom 3./4. 1. 76 waren wie in Ems und Elbe auch in der Weser wenig verschoben. Die Flut- und Ebbedauer von Vor-, Haupt- und Nachtide wichen hingegen stark von den Normalwerten ab.

Gegenüber der Sturmtide vom 3. 1. 76 ist auch in der Weser diejenige vom 20./21. 1. 76 die weniger bedeutende, obwohl die Scheitelwasserstände am frühen Morgen des 21. 1. 76 immerhin Werte um 10 m PN erreichten (Tab. 2). In ihrem zeitlichen Verlauf folgt sie eher dem normalen Tidegeschehen.

Der Oberwasserabfluß betrug am Pegel Intscheide 249 m³/s am 3. 1. 76 und 683 m³/s am 21. 1. 76 ( $MQ_{1941-1975} = 324 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### 2.2.5 Sturmtiden in der Elbe

Der Verlauf der Sturmtiden vom 3./4. und 20./21. 1. 76 ist für einige Pegel in den Tabellen 2 und 4 zusammengestellt. Die Windstaukurven Cuxhavens als Eingangspegel zur Elbe sind für den 2./3. und 4. 1. 76 in Abbildung 8 aufgetragen. Die Wasserstandsganglinien vom 3./4. 1. 76 (s. Anhang) zeigen an den Pegeln Cuxhaven, Stadersand, St. Pauli und Zollenspieker einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf. Die Sturmtide entwickelte sich aus einem negativen Windstau bei Cuxhaven und stieg dann an den anderen Pegeln verhältnismäßig stetig an. Lediglich in Cuxhaven trat am Morgen des 3. 1. 76 kurzfristig Ebbe ein, während die Wasserstände in Stadersand und St. Pauli auch während der Ebbezeit – wenn auch vorübergehend langsamer – weiter anstiegen. In Zollenspieker fiel der Wasserstand – wie in Cuxhaven – während der Ebbe geringfügig.

Die Höchstwasserstände der Sturmtide vom 3./4. 1. 76 sind am Nachmittag des 3. 1. 76 zwischen Cuxhaven und Hamburg innerhalb einer Stunde eingetreten. Die Nachtiden an den einzelnen Pegeln blieben noch stark erhöht. Die Steiggeschwindigkeiten der Vor- und Haupttide waren größenordnungsmäßig etwa gleich, diejenigen der Nachtide allerdings deutlich höher. Die Fallgeschwindigkeiten waren während der Vortide trotz kurzer Zeitdauer wegen der geringen Wasserstandsermäßigung nur gering, während der Haupt- und Nachtide hingegen stark erhöht.

Der Oberwasserzufluß der Elbe am Pegel Neu Darchau lag am 3. 1. 76 mit 485 m³/s unter dem langjährigen Mittelwert ( $MQ_{1926-1970}=722$  m³/s).

Im Gegensatz zu der Sturmtide vom 3./4. 1. 76 entwickelte sich diejenige vom 20./21. 1. 76 aus einer bereits stark erhöhten Vortide. Sie nahm dann einen für die Elbe typischen Verlauf. Die Höchstwasserstände traten in den Morgenstunden des 21. 1. 76 auf, ohne daß diejenigen vom 3./4. 1. 76 erreicht wurden. Die Nachtiden waren noch stark erhöht.

Der Oberwasserzufluß der Elbe am Pegel Neu Darchau betrug am 21. 1. 76 1532 m³/s (MHQ $_{1926-1970}=1890$  m³/s). Dieser Wert wird langfristig nur an 16 Tagen im Jahr überschritten.

Obwohl zu den höchsten Sturmfluten in der Elbe gehörend, erbrachte die Sturmtide vom 20./21. 1. 76 unterhalb von Hamburg keine nennenswerten neuen Erkenntnisse. Die Tidewasserstände vom 17. 2. 62, die den Planungen des Hochwasserschutzes an der Elbe zugrunde gelegt wurden, sind nicht erreicht worden.

Bezogen auf einen festen Horizont (NN, PN) traten während der Sturmtide vom 3./4. 1. 76 im gesamten Elbegebiet die bisher höchsten Scheitelwasserstände ein. Eine nachweisbare Entlastung der Sturmflutwasserstände als Folge der Deichbrüche bei Drochtersen und in der Haseldorfer Marsch (Schleswig-Holstein) ist nicht erkennbar. Der Grund ist auch hier, daß die Deiche erst kurz vor Eintritt des Scheitelwasserstandes gebrochen sind, so daß während des anschließend schnell sinkenden Wasserstandes in der Elbe nur begrenzt Wasser durch die Bruchstellen von geringer Ausdehnung ausfließen konnte.

# 2.3 Seegang und Wellenauflauf

#### 2.3.1 Seegang

Die frühere Arbeitsgruppe "Sturmfluten" im Küstenausschuß Nord- und Ostsee (Hensen, 1966) stellte bereits nach der Orkanflut vom 16./17. 2. 62 u. a. fest: "Es wird notwendig sein, mit selbstschreibenden Geräten eine intensive Seegangsforschung in der Deutschen Bucht, im Übergangsgebiet zu den Wattgebieten und auf den Watten selbst zu betreiben. Sobald eine ausreichende Zahl von Meßergebnissen vorliegt, wären geeignete Verfahren auszuarbeiten, mit denen der jeweils maßgebende Seegang und Wellenauflauf unter verschiedenen meteorologischen, hydrographischen und morphologischen Verhältnissen ermittelt werden kann."

Im See- und Wattengebiet von Norderney war bei Eintritt der Januar-Sturmfluten 1976 ein Seegangsmeßprogramm in Vorbereitung. Ein Gerät, das in einem sommerbedeichten Außengroden östlich von Norddeich bei Hilgenriedersiel steht, war am 20./21. 1. 76 in Betrieb. Auf der Grundlage dieser Meßergebnisse war es möglich, das Seegangsgeschehen zwischen Sommer- und Hauptdeich zu erfassen (Niemeyer, 1977). Es wurden statistische Zusammenhänge der Seegangsparameter (Höhe, Periode, Wassertiefe) untersucht. Wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, daß die Zusammenhänge zwischen Wassertiefe auf dem Vorland und den örtlichen Erscheinungsformen des Seegangs quantifiziert werden konnten, sowie die Erkenntnis, daß weniger hohe, aber sehr lange Wellen einen größeren Wellenauflauf verursachen können als einzelne sehr hohe Wellen (5 % des Spektrums). Die Rückrechnung der Sekundärspektren des Außengrodens auf das erzeugende Seegangsgeschehen zeigt, daß die hydrologisch/morphologischen

Vorfeldverhältnisse wesentlichen Einfluß auf die Wellenhöhen und damit auf die Beanspruchung der Deiche haben.

Rückrechnungen, Vergleiche und Analogieschlüsse lassen es als wahrscheinlich erscheinen, daß der Seegang vom 3./4. 1. 76 entgegen anderen Vermutungen im Küstenvorfeld nicht stärker entwickelt war als derjenige vom 16./17. 2. 62 (Niemeyer, 1976b). Tatsächlich war die Seegangsbeanspruchung der Küstenschutzwerke 1962 als Folge des vergleichsweise längeren Anhaltens hoher Wasserstände erheblich größer als 1976.

#### 232 Wellenauflauf

Kontinuierlich konnte der Wellenauflauf an der niedersächsischen Küste nur an einer Stelle östlich Norddeich gemessen werden (Abb. 10). Es ist jedoch an langen Deichstrecken die Treibselgrenze eingemessen worden, um daraus Rückschlüsse auf den Wellenauflauf ziehen zu können. Jedoch läßt die Treibselgrenze nicht erkennen, welche Wellen zu welchem Zeitpunkt das Treibsel auf die eingemessene Höhe transportierten oder ob die erzeugende Welle einmal oder mehrfach auflief. Trotz dieser Einschränkungen gelang es aber, ein verhältnismäßig zutreffendes Bild über die Auflaufhöhen an der niedersächsischen Küste zu erhalten. Einige aus der Treibselgrenze ermittelte Wellenaufläufe sind in Tabelle 5 für verschiedene Punkte mit ihren örtlichen Gegebenheiten (Lee- oder Luvlage, Windrichtung und Seegangsparameter) und der Art des Deiches (Vorlanddeich, Schardeich) aufgeführt.

Tabelle 5

Ort	Treibsel- grenze [NN+m]	Wasser- stand [NN+m]	Wellen- auflauf [m]	Deichart
Knock	5,70	4,30	1,40	Schardeich
Pilsum	6,30	4,20	2,10	Vorlanddeich
Hauen	5,00	4,17	0,83	Hauptdeich hinter Sommerdeich
eybuchtpolder	4,60	4,32	0,28	Vorlanddeich
Ostermarsch	6,90	4,20	2,70	Schardeich
Oornumergrode	5,10	4,20	0,90	Hauptdeich hinter Sommerdeich
chillig	5,46	4,36	1,10	Vorlanddeich
ooksiel	5,20	4,54	0,66	Schardeich
arel	5,13	4,62	0,51	Vorlanddeich
ckwarderhörne	7,45	4,51	2,94	Schardeich
ossens	8,21	4,51	3,70	Schardeich
angwarden	8,04	4,51	3,53	Vorlanddeich
etenserhörne	8,56	5,04	3,52	Vorlanddeich
lexen	6,08	5,15	0,93	Schardeich
Vremen	6,75	5,10	1,65	Vorlanddeich
pieka-Neufeld	6,45	5,10	1,35	Vorlanddeich
Otterndorf	6,70	5,42	1,28	Vorlanddeich

Bereits nach der Sturmtide vom 16./17. 2. 62 war von verschiedenen Seiten festgestellt worden, daß die bis dahin getroffenen Annahmen zur Höhe des Wellenauflaufs stellenweise überschritten wurden. Aber schon damals wurde darauf hingewiesen, daß

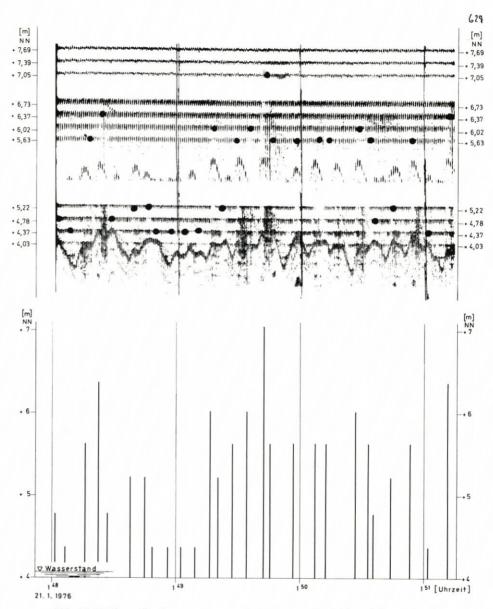


Abb. 10. Wellenauflaufmessungen vom 21. 1. 1976 am Seedeich östlich Norddeich

der Wellenauflauf auch noch größere Werte erreichen könne (INGENIEUR-KOMMISSION, 1962). Dieser Hinweis ist während der Sturmtidenkette 1973 (ERCHINGER, 1974) und dann wieder während der Sturmtiden vom Januar 1976 bestätigt worden. Da bekannt ist, daß der Wellenauflauf auch proportional zur Höhe des Wasserstandes wächst, hat NIEMEYER (1976b) den Versuch unternommen, eine dem Bemessungswasserstand zugehörige Bemessungswelle und den daraus resultierenden Wellenauflauf theoretisch zu ermitteln. Die Richtigkeit des Verfahrens kann an den jeweils vorhandenen Treibselgrenzen vergangener Sturmfluten nachgewiesen werden.

Mit diesem Verfahren ist es möglich, einen maximalen Wellenauflauf bei Eintritt des Bemessungswasserstandes, nicht aber die spektrale Verteilung des Wellenauflaufs zu ermitteln. Immerhin bestätigen die Untersuchungen das Ergebnis Erchingers (1974), daß mit höherem als bisher angenommenem Wellenauflauf gerechnet werden muß. Die gefundenen Beziehungen sollen in einem Seegangsmeßprogramm im Einzugsbereich des Norderneyer Seegatts erhärtet werden (Luck u. Niemeyer, 1976).

Für die Festlegung der Deichhöhen ist von Bedeutung, daß rd. 95 % aller Wellen eines Wellenspektrums einen Wellenauflauf erzeugen, der deutlich unter der Auflaufhöhe weniger hoher, aber langer Wellen liegt (s. Abschn. 2.3.1). Durch diese wenigen hohen Wellen können aber die nach den Erkenntnissen von 1962 gebauten Deiche, die für das Überschlagen einiger Wellen durch einen flachgeböschten Querschnitt ausgebildet sind, nicht gefährdet werden.

- 3 Hydrologische Grundlagen für die Bemessungswasserstände aus dem langfristigen Vergleich der Sturmfluten
  - 3.1 Vergleich der Scheitelwasserstände und des Tidenverlaufs an der Nordseeküste

Da die Sturmtide vom 3./4. 76 im gesamten Elbegebiet, an je einem Pegel in der Weser und in der Ems oberhalb Papenburgs die bisher bekannten Höchstwasserstände überschritten hat, ist die Frage nach den höchstmöglichen Wasserständen und damit auch die Gültigkeit der nach 1962 festgelegten Bemessungswasserstände erneut gestellt.

Für die niedersächsische Küste untersuchte LÜDERS (1971) auf der Grundlage sicher überlieferter historischer und neuerer Höchstwasserstände deren Anstieg seit 1717. Er kam zu dem Ergebnis, daß die Höchstwasserstände absolut – auf einen festen Horizont bezogen – angestiegen sind, wobei die Zunahme etwa 28 cm/Jahrhundert beträgt. Unter Berücksichtigung des säkularen Wasserstandsanstiegs, der von ihm mit 27 cm/Jahrhundert aus 19jährigen überlappenden Mitteln errechnet wurde, bleibt jedoch die Differenz zwischen den Höchstwasserständen und MThw gleich.

Die Untersuchungen von Lüders beschränken sich auf den Pegel Wilhelmshaven. Inzwischen hat Rohde (1977) in ähnlicher Weise für die gesamte deutsche Nordseeküste eine Untersuchung vorgenommen, die zu etwa den gleichen Ergebnissen führt. Danach folgt die Entwicklung der Höchstwasserstände einem langfristigen Trend, der in der Größenordnung dem säkularen Anstieg der MThw-Stände entspricht. Der von Lüders und Rohde geführte Nachweis der Parallelität der säkularen Entwicklung der MThw-Stände und der Einhüllenden der höchsten Sturmflutwasserstände ist ein wichtiges Ergebnis der bisherigen Sturmflutforschung. Daß die Höchstwasserstände einem auf MThw bezogenen Festwert zustreben, könnte dahin gedeutet werden, daß das bei Sturmtiden sich seewärts einstellende Wasserspiegelgefälle einen Grenzwert nicht überschreitet bzw. daß es in Analogie zum ausgereiften Seegang hier auch ein "ausgereiftes Windstaugefälle" gibt.

Für ausgewählte Pegel der niedersächsischen Küste sind in Tabelle 1 die HHThw zusammengestellt. Diese überwiegend 1962 gemessenen Werte wurden den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen. Tatsächlich sind an einigen Stellen aus früherer Zeit jedoch höhere Werte bekannt, die aber – wenn meßtechnisch nicht exakt nachweisbar – keinen Eingang in die Jahrbücher gefunden haben.

Im langfristigen und auf MThw bezogenen Vergleich ergibt sich, daß die Sturmtide vom 3./4. 1. 76 im niedersächsischen Küstengebiet – wenn auch zu den sehr schweren Sturmtiden gehörend – hydrographisch kein herausragendes Ereignis gewesen ist. Die in Tabelle 6 zusammengestellten Werte lassen deutlich erkennen, daß die bisher bekannten Höchstwasserstände – bezogen auf einen festen Horizont – am 3./4. 1. 76 nur in Cuxhaven überschritten wurden und daß die höchsten oder nachweisbaren Windstauwerte mit Ausnahme Cuxhavens im niedersächsischen Küstengebiet nicht erreicht worden sind. Der hydrographische Rahmen des Sturmflutgeschehens ist somit hinsichtlich der Januartiden nicht durchbrochen worden, und es gibt keinen Hinweis darauf, daß innerhalb der Gültigkeitsdauer der nach 1962 festgesetzten maßgebenden Sturmflutwasserstände andere Entwicklungen eintreten könnten.

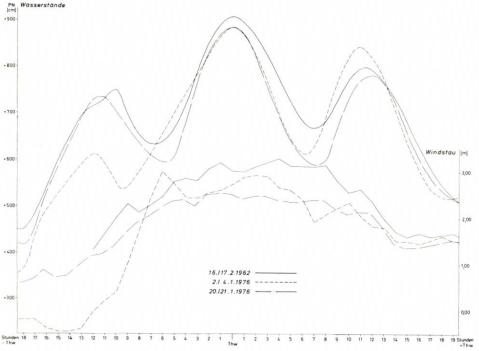


Abb. 11. Tidenverlauf und Windstaukurven von Norderney am 16./17. 2. 1962, 2. bis 4. 1. 1976 und 20./21. 1. 1976

Weniger vergleichsfähig als die Scheitelwasserstände ist der allgemeine Verlauf der einzelnen Sturmtiden. Ein Vergleich der Wasserstandsganglinien der fünf höchsten Tiden seit 1962 mit Vor- und Nachtiden für Borkum, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven läßt erkennen, daß sich in allen Fällen aus einem breiten Höhenspektrum der Vortiden ein verhältnismäßig enger Scheitelbereich der Haupttide entwickelt und hieraus wieder breit streuende Nachtiden. Entsprechend sind Ebbe- und Flutdauer sowie die Geschwindigkeiten von Tidestieg und Tidefall stark unterschiedlich, ohne einem erkennbaren Trend zu folgen. Ein Beispiel dafür sind die Sturmtiden vom 16./17. 2. 62 sowie vom 3./4. und 20./21. 1. 76 am Pegel Norderney (Abb. 11), für die auch die Windstaukurven aufgetragen sind. Die Darstellung läßt erkennen, daß weder die Tidekurven noch die Windstaukurven im Sinne kennzeichnender Entwicklungen vergleichsfähig sind.

Windstauwerte (Gesamtstau) für einige Orkanfluten an der niedersächsischen Küste Tabelle 6

Emden	ans			1. 1.1855			
	MThw Thw Windstau	0,59 m NN¹) 4,62 m NN¹) 4,03 m	1,00 m NN¹) 4,65 m NN¹) 3,65 m		1,26 m NN¹) 5,18 m NN¹) 3,92 m	1,31 m NN 1956/65 1,36 m NN 1966/75 4,76 m NN 4,58 m NN 3,45 m 3,22 m	1,36 m NN 1966/75 4,58 m NN 3,22 m
Borkum- N Südstrand T	MThw Thw Windstau				0,85 m <sup>6</sup> ) 3,82 m 2,97 m	0,95 m NN 1956/65 1,00 m NN 1961/70 3,82 m NN 3,54 m NN 2,87 m 2,54 m	1,00 m NN 1961/70 3,54 m NN 2,54 m
Norderney N	MThw Thw Windstau			0,90 m NN²) 4,26 m NN²) 3,36 m	0,98 m NN <sup>2</sup> ) 4,30 m NN <sup>3</sup> ) 3,32 m	1,10 m NN 1956/65 4,10 m NN 3,00 m	1,10 m NN 1956/65 1,12 m NN 1966/75 4,10 m NN 3,86 m NN 2,74 m
Wangerooge N T	MThw Thw Windstau	0,79 m NN <sup>4</sup> ) 4,16 m NN <sup>4</sup> ) 3,37 m	1,03 m NN <sup>4</sup> ) 4,36 m NN <sup>4</sup> ) 3,33 m	1,09 m NN <sup>4</sup> ) 4,26 m NN <sup>4</sup> ) 3,17 m	1,21 m NN <sup>4</sup> ) 4,39 m NN <sup>4</sup> ) 3,18 m	1,33 m NN <sup>4</sup> ) 4,20 m NN <sup>4</sup> ) 2,87 m	1,37 m NN <sup>4</sup> ) 4,05 m NN <sup>4</sup> ) 2,68 m
Wilhelms- N haven T	MThw Thw Windstau	1,01 m NN <sup>5</sup> ) 4,81 m NN <sup>5</sup> ) 3,80 m	1,30 m NN <sup>5</sup> ) 5,03 m NN <sup>5</sup> ) 3,73 m	1,38 m NN <sup>5</sup> ) 4,92 m NN <sup>5</sup> ) 3,54 m	1,52 m NN <sup>5</sup> ) 5,06 m NN <sup>5</sup> ) 3,54 m	1,66 m NN 1956/65 5,21 m NN 3,55 m	1,66 m NN 1956/65 1,70 m NN 1966/75 5,21 m NN 4,77 m NN 3,55 m 3,07 m
Bremerhaven MThw Thw Winds	MThw Thw Windstau	$1,18 \text{ m NN}^1$ ) $4,65 \text{ m NN}^1$ ) $3,47 \text{ m}$	1,45 m NN¹) 5,04 m NN¹) 3,59 m		1,61 m NN <sup>1</sup> ) 4,84 m NN <sup>1</sup> ) 3,23 m	1,66 m NN 1956/65 5,35 m NN 3,69 m	1,66 m NN 1956/65 1,70 m NN 1966/75 5,35 m NN 5,18 m NN 3,69 m 3,48 m
Cuxhaven N	MThw Thw Windstau	$0.81 \text{ m NN}^{1}$ ) 4.25 m NN <sup>1</sup> ) 3.44 m	1,06 m NN <sup>1</sup> ) 4,64 m NN <sup>1</sup> ) 3,58 m	$1,17 \text{ m NN}^1$ ) $4,14 \text{ m NN}^1$ ) $3,07 \text{ m}$	1,29 m NN¹) 4,37 m NN¹) 3,08 m	1,38 m NN 1956/65 4,95 m NN 3,57 m	1,38 m NN 1956/65 1,44 m NN 1966/75 4,95 m NN 5,10 m NN 3,57 m 3,66 m

Rohde, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
 Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney, 1955, unveröffentlicht.
 Korrigierter Wert.

6) Rückgerechnet.

<sup>4)</sup> Lüders, K.: "Wangerooch hett'n hooge Toren, . . .". Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1976, Bd. XXVIII, 1977. 5) Lüders, K.: Über die Gültigkeitsdauer des "Bemessungswasserstandes für Seedeiche" an der niedersächsischen Nordseeküste. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1969, Bd. XXI, 1971.

Der Vergleich des allgemeinen Verlaufs ausgewählter Tiden läßt kennzeichnende Parameter nicht erkennen. Insofern ist festzustellen, daß kurzfristige Rückschlüsse auf das örtliche Tidegeschehen oder Voraussagen von Scheitelwasserständen auf der Grundlage entfernt liegender Pegelaufzeichnungen allein nicht möglich sind. Für die Sturmflutvorhersage oder für den Sturmflutwarndienst müssen daher noch andere Parameter (z. B. Winddaten) in die Vorhersageverfahren einbezogen werden.

Als Ergebnis der Tidevergleiche ist festzuhalten, daß die bisherigen Auffassungen über die langfristige Entwicklung der Sturmflutwasserstände an der niedersächsischen Küste als Ausgangswert für die Berechnung der Bemessungswasserstände für Seedeiche bestätigt wurden und beibehalten werden können.

# 3.2 Vergleich des Tidenverlaufes und der Scheitelwasserstände in den Stromgebieten

#### 3.2.1 Allgemeines

In den Stromgebieten sind dem langfristigen Sturmtidenvergleich enge Grenzen gezogen. Die Sturmtiden können nicht wie an der Küste langfristig ohne Einschränkung zueinander in Beziehung gesetzt werden, wo der Ablauf des Geschehens etwa durch bauliche Eingriffe wie Leitdämme, Küstenschutzanlagen u. ä. nicht oder örtlich nur unwesentlich beeinflußt wird. Auch die natürlichen morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld sind für den Ablauf von Sturmtiden ohne Bedeutung.

Von Einfluß auf das Tidegeschehen in den Stromgebieten sind:

- 1. Natürliche und künstliche morphologische Änderungen des Strombettes, welche die Tidewellen verformen, bei konstanter Energiesumme das Verhältnis zwischen potentieller, kinetischer und Reibungsenergie verändern, die Tidegrenze möglicherweise stromaufwärts verlagern und die Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände beeinflussen. Als Folge dieser morphologischen Änderungen haben sich die Scheitellinien der Sturmtiden an allen drei Tideströmen Ems, Weser und Elbe langfristig gehoben, wie ein Vergleich zwischen früheren Sturmtiden (Ems 1901 und 1906, Weser 1906, Elbe 1825) mit den Sturmtiden der jüngeren Vergangenheit zeigt (Abb. 12 bis 14).
- 2. Die in der Vergangenheit an wechselnden Stellen häufigen Deichbrüche, die zu unterschiedlichen Entlastungen des Strombettes infolge Retentionswirkung der überfluteten binnendeichs gelegenen Flächen führten. Besonders große Wasserstandssenkungen im Strombett ergaben sich aus Deichbrüchen oder freiem Auslaufen von Flutwassermengen in sehr große, nicht eingedeichte Flächen besonders im oberen Bereich des Tidestromes wie an der Elbe in Hamburg 1962 und an der Ems oberhalb Papenburgs bis 1968. Falls Deichbauten und Sturmflutsperrwerke Überflutungen verhindern, steigen umgekehrt die Wasserstände im Strombett gegenüber früher an, wie in der Ems oberhalb Papenburgs nach 1968 und in der Weser nach Bau der Sperrwerke an Hunte, Lesum und Ochtum.

Dagegen wirkt sich die Absperrung von Nebenflüssen im unteren oder mittleren Bereich der Tideflüsse nur in geringem Umfang und örtlich auf die Scheitelwasserstände aus, weil die in den Nebenflüssen speicherbaren Wassermengen im Verhältnis zu der Flutwassermenge wesentlich kleiner sind als in den vorgenannten Fällen.

3. Vordeichungen, die den Sturmflutquerschnitt stark einengen, haben örtliche Wasserstandsänderungen zur Folge, die im allgemeinen jedoch stromauf schnell abklingen.

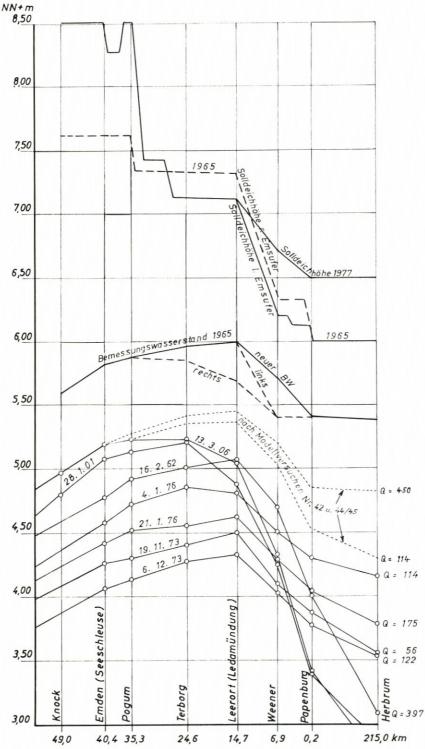


Abb. 12. Längsschnitt der Scheitelwasserstände, Bemessungswasserstände und Solldeichhöhen in der Ems

 Die aus den Einzugsgebieten zufließenden und stark wechselnden Oberwassermengen sind auf die Scheitelwasserstände in Elbe, Weser und Ems nur im oberen Tidebereich von Bedeutung.

Die Füllung eines Tidestromes von See her muß primär als ein Energie- und nicht als ein Mengenproblem angesehen werden: An der Mündung ist für seine Auffüllung eine bestimmte Energie verfügbar, die im Stromgebiet in Lageenergie umgewandelt

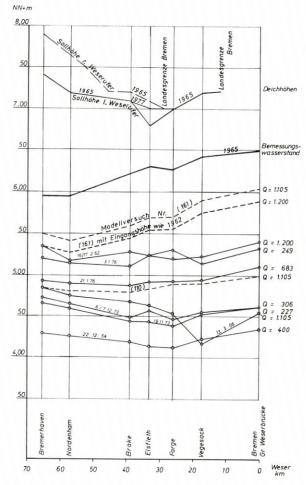


Abb. 13. Längsschnitt der Scheitelwasserstände, Bemessungswassersstände und Solldeichhöhen in der Weser

wird, wobei diese durch Reibungsverluste verringert wird. Die Energieumwandlung wirkt sich in den Tideströmen Ems, Weser und Elbe unterschiedlich aus. In der Ems (Abb. 12) ist bis etwa Leerort ein Ansteigen der Scheitellinien der Sturmtiden als Folge der Reflektionserscheinungen unterhalb zu erkennen. Weiter oberhalb überwiegen wegen des engen und kurvenreichen Strombettes die Reibungsverluste, die eine Verringerung der Scheitelwasserstände bewirken. In der Unterweser (Abb. 13) gleichen sich wegen des großräumigen Stromausbaues offenbar Reflektion und Reibungsverlust in ihrer Wirkung

auf die Scheitelwasserstände weitgehend aus. Demgegenüber überwiegt in der Elbe (Abb. 14) bis Hamburg die Reflektion, denn die Scheitellinien der Sturmtiden steigen an. Oberhalb Hamburgs dagegen wirken sich die Reibungsverluste stärker aus.

Die in den Stromgebieten nur schwer faßbaren unterschiedlichen Einflüsse wechselnder Randbedingungen auf das Tidegeschehen sind in der Vergangenheit mehrfach in hydraulischen Modellen von Ems, Weser und Elbe untersucht worden. Die Modellunter-

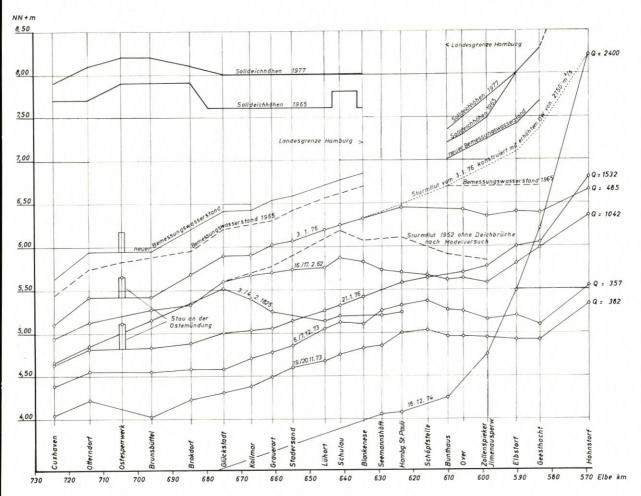


Abb. 14. Längsschnitt der Scheitelwasserstände, Bemessungswasserstände und Solldeichhöhen in der Elbe

suchungen ergaben sich aus den Forderungen des Küstenschutzes nach differenzierten Planungsunterlagen, die die Naturmeßdaten allein nicht mehr hergeben konnten. So wurden auch die geltenden Bemessungswasserstände aus dem Jahre 1965 der niedersächsischen Strom- und Flußdeiche aus Ergebnissen hydraulischer Modellversuche ermittelt. Hinzu kommen in jüngerer Zeit hydrodynamisch-numerische Berechnungen, um durch Anwendung verschiedener Verfahren zu mehrfach gesicherten Bemessungswerten zu kommen.

# 3.2.2 Veränderungen der Wasserstände und des Sturmtidenverlaufs in der Ems

### 3.2.2.1 Langfristige Veränderung der mittleren Wasserstände

Die langfristige hydrologische Entwicklung der Tide-Ems wurde von Lüders (Lüders u. Leis, 1966) eingehend untersucht. Sie ist wesentlich geprägt durch die seit 1820 betriebenen Fahrwasserausbauten und insbesondere durch den Bau des Dortmund-Ems-Kanals 1892/99 sowie die Nachregulierungen seit 1900. Die Begradigungen und die Herstellung geordneter Querschnittsverhältnisse sowie die Begrenzung der Tide-Ems durch eine Schiffahrtsschleuse und ein Wehr bei Herbrum haben zur Folge gehabt, daß sich der Tidehub auf der gesamten Strecke vergrößerte, das MThw anstieg und das MTnw fiel. Die Unterschiede der Eintrittszeiten des MThw zwischen Knock und Herbrum haben sich im Zuge der Fahrwasserausbauten ebenfalls verringert.

Im einzelnen hat sich nach den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern zwischen 1886/1910 und 1966/1975 der Tidehub bei Leerort um 32 cm, bei Papenburg um 91 cm und bei Herbrum um 133 cm erhöht. Zwischen 1946/55 und 1966/75 stieg der Tidehub in Emden um 8 cm, in Leerort um 20 cm, in Papenburg um 52 cm und in Herbrum (1951/60) um 66 cm. Das MTnw ermäßigte sich im gleichen Zeitraum in Emden um 3 cm und Leerort um 7 cm, das sind erheblich weniger als in Papenburg mit 32 cm und Herbrum (1951/60) mit 57 cm. Die Änderungen des MThw waren mit +5 cm in Emden und +13 cm in Leerort sowie +20 cm in Papenburg und +9 cm in Herbrum weniger stark. Unterhalb von Leerort sind die Auswirkungen der Baumaßnahmen auf die mittleren Wasserstände deutlich geringer als oberhalb.

# 3.2.2.2 Vergleich der Sturmtiden

Die morphologischen Änderungen im Strombett der Ems sind auch auf den Ablauf und die Scheitelwasserstände (Tab. 7) von Sturmtiden nicht ohne Einfluß geblieben. Die höchste bekannte Sturmtide in der Ems war diejenige vom 13. 3. 1906, deren Scheitellinie in Abbildung 12 eingetragen ist. Jedoch trat bereits am 27./28. 1. 1901 eine außergewöhnliche Sturmtide auf, die bis Leerort nur wenig unter der Spiegellinie von 1906 lag und im Bereich Papenburg etwa die gleichen Wasserstände erreichte. Die Wasserspiegellinien verlaufen hier gleichsinnig und sind oberhalb von Weener nahezu deckungsgleich. Der weitgehend ähnliche Verlauf beider Sturmtiden ist aus der engen zeitlichen Folge von fünf Jahren unter wenig geänderten Randbedingungen zu erklären. Die Sturmtide vom 16./17. 2. 62 lief an der Knock 49 cm niedriger auf als 1906. Bis Leerort näherte sich die Wasserspiegellage derjenigen von 1906 (Emden - 42 cm, Pogum - 31 cm, Oldersum - 28 cm, Terborg - 23 cm) und erreichte oberhalb beträchtlich höhere Wasserstände (Weener +39 cm, Papenburg +57 cm, Herbrum +81 cm). Die Erscheinung, daß oberhalb von Leerort sich die hydraulischen Verhältnisse stärker ändern als unterhalb, kommt auch in den beschriebenen Entwicklungen der MThb, MThw und MTnw zum Ausdruck.

Die Scheitellinien der Sturmfluten nach 1962 zeigen oberhalb von Weener mit einem wesentlich schwächeren Spiegelgefälle einen deutlich veränderten Verlauf gegenüber 1962 und früher (Abb. 12). Das ist aus den ab 1968 voll geschlossenen beiderseitigen Deichlinien oberhalb Papenburgs zu erklären und daraus, daß 1973 und 1976 in

 $\begin{array}{c} \text{T a bell e 7} \\ \text{Tidehochwasser Emden} \geq \text{MThw} + 200 \text{ cm} \end{array}$ 

		Tidenoch	wasse	Emde	en $\leq$ Minw +	200 CIII			
		Ober-					Ober-		
		wasser-	Lau	fzeit			wasser-		ıfzeit
	Thw	abfluß	des'	Tide-		Thw	abfluß		Tide-
Datum	am	am Pegel	sche	eitels	Datum	am	am Pegel		eitels
	Pegel	Versen-	Em	iden		Pegel	Versen-		nden
	Emden	Wehr-	Her	brum		Emden	Wehr-		brum
		durchstich					durchstich		
	cm PN	m 3/s	h	min		cm PN	m 3/s	h	min
13. 03. 06	1017	167	8	00	01. 12. 66	846	212	3	55
21. 02. 07	842	167	5	25	23. 02. 67	881	185	3	25
	835	57,0	4	08	01. 03. 67	874	184	3	43
24. 11. 08 18. 09. 14	919	54,5	5	15	04. 11. 67	831	176	1	50
12. 11. 14	839	69,5	4	20	19. 11. 69	838	59,1	2	44
	969	252	6	00	04. 11. 70	866	220	3	44
13. 01. 16	935	93,0	5	15	09. 11. 70	830	215	3	15
02. 12. 17	903	94,0	5	05	22. 11. 71	846	36,0	2	57
03. 12. 17	854	10,3	3	30	13. 11. 73	884	49,6	3	51
23. 10. 21	892	18,0	4	15	16. 11. 73	880	68,6	4	05
02. 11. 21	832	19,5	3	34	19. 11. 73	942	55,4	3	21
18. 12. 21	887	106	4	25	06. 12. 73	906	128	3	40
03. 01. 22	831	268	_	_	14. 12. 73	926	132	3	33
10. 09. 24 10. 10. 26	899	21,5	5	10	05. 12. 74	835	180	3	33
	886	189	6	20	03. 01. 76	930	114	3	47
26. 11. 28		110	_	_	04. 01. 76	958	166	3	10
12. 12. 29	916 887	172	4	50	21. 01. 76	938	175	3	50
23. 11. 30		92,0	_	_	21. 01. 76	837	175	3	11
14. 02. 35	854	25,9	4	23	22. 01. 76	889	210	3	24
18. 10. 36	885	106	2	28	22.01.70	007			
01. 12. 36	890	161	2	35					
29. 01. 38	853	81,8	2	27					
04. 04. 38	851	54,0	_	_					
24. 08. 40	830	123	_	_					
06. 12. 40	832 885	163	4	20					
18. 10. 41		80,6	3	11					
08. 04. 43 26. 01. 44	885 843	138	3	25					
	1012	124	2	02					
04. 02. 44 14. 03. 44	844	146	2	03					
	_	99,6	_	_					
19. 01. 45	855	174	2	37					
02. 03. 45	841	62,8	3	30					
21. 01. 49 27. 02. 49	850	55,2	3	35					
01. 03. 49	855	83,0	4	00					
	865	120	3	49	Bemerkun	gen: Emd	en		
04. 12. 49 01. 02. 53	864	144	3	45	PN = N				
01. 02. 53	833	144	3	20		-,50	oup.Etc		
		141	3	55	Abflußdat	en am Pe	gel Versen		
16. 01. 54 22. 12. 54	845 945	112	2	30	MQ		3,6 m <sup>3</sup> /s)	aus I	ahres-
23. 12. 54	842	148	3	25	MHQ	= 380		reihe	
	831	120	4	10	HQ (1946			1941/	
13. 01. 55 10. 01. 58	846	312	2	00	114 (1710	,			
	842	90,8	3	19	$HQ_2$	= 383	$m^3/s$ )	aus I	ahres-
21. 03. 61		397	4	45	HQ3	= 441		reihe	
16. 02. 62	972 874	441	3	12	1100	17.	/3/ )		1974
17. 02. 62	874	86,2	2	56				erred	
14. 02. 65	837	98,4	3	03				0.100	
14. 02. 65 02. 11. 65	830	37,8	2	43					
11. 12. 65	850	280	3	25					
11. 12. 03	300								

diesem Abschnitt keine Deichbrüche eingetreten sind. Deshalb werden Sturmtiden wie diejenigen von 1901, 1906 oder 1962 künftig oberhalb von Leerort/Weener wahrscheinlich die bisher bekannten Höchstwasserstände überschreiten. Aus Abbildung 12 geht weiterhin hervor, daß die Scheitelwasserstände der Sturmtide vom 16. 2. 62 durch das große Oberwasser von 441 m³/s (Tab. 7) wegen der noch nicht geschlossenen Deichlinie bei Papenburg nicht erkennbar beeinflußt wurde. Es ist indessen anzunehmen, daß größere Oberwasserabflüsse der Ems innerhalb der nunmehr geschlossenen Deichlinie künftig die Scheitellinien der Sturmtiden stärker beeinflussen werden als bisher. Hierzu wären gesonderte Untersuchungen angebracht.

Zusammenfassend ist daher festzustellen, daß die Sturmtiden vom Januar 1976 hydrologisch kein außergewöhnliches Ereignis waren. Von Emden bis Leerort wurden die Wasserstände von 1906 und 1962 nicht erreicht. Oberhalb von Leerort ist das Geschehen vor allem durch die nunmehr geschlossenen Deichlinien geprägt. Es ist deshalb zu erwarten, daß in diesem Abschnitt der Ems die Scheitellinien der bisherigen Sturmtiden noch überschritten werden können. Der säkulare Wasserstandsanstieg wird in der gesamten Tide-Ems voll wirksam. Beides ist bei den Bemessungswasserständen zu berücksichtigen.

# 3.2.3 Veränderungen der Wasserstände und des Sturmtidenverlaufs in der Weser

# 3.2.3.1 Langfristige Veränderungen der mittleren Wasserstände

Im Vergleich zu den natürlichen Abmessungen des Stromes ist die Unterweser der am stärksten regulierte Tidestrom an der deutschen Küste (WALTHER, 1954). Die seit etwa 1880 betriebenen großen Ausbauten haben das hydrologische Geschehen in der Unterweser zwischen Brake und Bremen grundlegend geändert. Die langfristigen Vergleiche von MTnw, MThw und MThb, wie WALTHER sie vorgenommen hat, zeigen, daß an den Pegeln Bremerhaven und Brake nennenswerte Änderungen nicht eingetreten sind bzw. diese sich im Rahmen säkularer und meteorologischer Erscheinungen bewegen. Die Entwicklung oberhalb von Brake aber ist gekennzeichnet durch einen starken Abfall des MTnw bei nur geringfügiger Änderung der MThw-Stände und stark wachsendem MThb. Noch um 1880 betrug der mittlere Tidehub in Bremen rd. 0,20 m gegenüber derzeit 3,41 m. Er weicht damit vom mittleren Tidehub Bremerhavens mit 3,50 m nur unerheblich ab. Diese Entwicklung klingt seit ungefähr 1940 ab, und die Ganglinien von MThw, MTnw und MThb streben einem Beharrungszustand zu, auf den sich lediglich die säkulare Meereshebung auswirkt.

Schon 1954 vermutete Walther, daß weitere Ausbauten in der Weser die hydrologischen Verhältnisse der Unterweser nur noch wenig beeinflussen würden. Diese Vermutung wurde durch Untersuchungen bestätigt, die Kurzak 1974 zur Abschätzung der hydrologischen Auswirkungen der zwischen 1962 und 1971 vorgenommenen Stromausbauten vornahm. In diesen Zeitraum fallen auch die Wiederherstellung der Grundschwelle in der Ochtummündung, die Erhöhung des Sommerdeiches an der Ochtum und der Anschluß von 82 ha neuer Hafenfläche in Bremen. Zusammenfassend kommt Kurzak zu dem Ergebnis, daß die Thw-Stände praktisch unverändert geblieben sind, die Tnw-Stände geringfügig niedriger wurden und der Tidehub unterhalb der Huntemündung etwas zunahm und oberhalb kleiner geworden ist.

 $\begin{array}{c} \text{T a b elle 8} \\ \text{Tidehochwasser Bremerhaven} \geq \text{MThw} + 200 \text{ cm} \end{array}$ 

Datum	Thw am Pegel Bremer- haven cm PN	Ober- wasser- abfluß am Pegel Jntschede m ³/s	des 'sche Bre ha Bre h	ride- eitels mer- even emen min	Datum	Thw am Pegel Bremer- haven cm PN	Ober- wasser- abfluß am Pegel Jntschede m <sup>3</sup> /s	Laufzeit des Tide- scheitels Bremer- haven Bremen h min
28. 01. 01	923	667	3	45	01. 03. 67	902	705	2 16 2 28
26. 01. 02	871	856	3	50	04. 12. 67	879	405	
22. 11. 03	870	139	3	39	13. 11. 73	917	191	2 10 2 00
06. 10. 04	860	107	3	54	16. 11. 73	949	261 230	1 48
09. 11. 04	903	112	4	14 01	19. 11. 73 06. 12. 73	966 972	239	2 24
30. 12. 04	901	219	5	34	14. 12. 73	957	211	2 02
07. 01. 05	902	377	3	57	03. 01. 76	1018	249	2 47
13. 03. 06	984	1105 335	3	27	21. 01. 76	994	683	3 09
20. 02. 11	878	350	4	15	21.01.70	//1	003	5 07
09. 04. 12 18. 09. 14	861 898	146	3	40				
12. 11. 14	871	190	5	10				
13. 01. 16	956	1062	4	50				
16. 02. 16	918	387	3	40				
25. 10. 17	874	153	_	_				
02. 12. 17	959	328	3	30				
03. 12. 17	923	223	4	50				
24. 12. 18	887	473	3	05				
23. 10. 21	898	67	1	50				
02. 11. 21	926	90	3	45				
03.01.22	882	389	3	10				
18. 12. 23	885	308	3	45				
10. 10. 26	927	187	3	20				
12. 10. 26	915	206	3	05				
26. 11. 28	893	276	2	56				
12. 12. 29	928	229	4	07				
23. 11. 30	928	752	3	15				
03. 02. 35	858	140	3	08				
18. 10. 36	927	150	3	15				
01. 12. 36	933	250	3 2	08 38				
30. 01. 38	876	400	2	38				
04. 04. 38	861 918	200 192	3	01				
19. 10. 41 06. 04. 43	863	275	3	01				
08. 04. 43	870	269	3	25				
04. 02. 44	896	498	3	02	Bemerkun	gen: Brem	erhaven	
02. 03. 45	898	284	3	10		— 5,00 m		
04. 12. 49	877	160	3	13		-,		
16. 01. 54	874	288	3	08	Abflußdat	en am Peg	gel Jntschede	e
22. 12. 54	928	399	1	51	MQ		-3/-1)	
13.01.55	870	565	2	38	MHQ	= 1182		s Jahresreihe 1941/1975
19.01.56	860	400	2	51	HQ (1949	= 3500	$m^3/s$ )	1741/17/3
10.01.58	890	1096	2	12				s Jahresreihe
21.03.61	878	474	-	_	$HQ_2$	= 1470	m³/s) )	1861/1975
16.02.62	1035	1191	3	50	$HQ_3$	= 1760	m <sup>3</sup> /s)	errechnet
17. 02. 62	888	1210	2	58				cricamet
13. 02. 65	890	319	2	42				
11. 12. 65	880	1033	2	00				
01. 12. 66	888	556	2	32				
24. 02. 67	914	691	2	04				

# 3.2.3.2 Vergleich der Sturmtiden

Die bisher höchsten bekannten Wasserstände (Tab. 8) sind in der Unterweser am 16./17. 2. 62 eingetreten; nur im Bereich des Pegels Farge sind am 3. 1. 76 noch höhere registriert worden (Abb. 13). Die vor 1962 bekannten HHThw-Werte sind zeitlich unterschiedlich eingetreten, in Bremerhaven 1825 mit NN +5,04 m, in Brake 1855 mit NN +4,87 m, in Vegesack 1855 mit NN +5,17 m und in Bremen 1881 mit NN +7,81 m. Das Bremer HHThw 1881 ist durch große Binnenabflüsse entstanden und kann somit nicht als Sturmflut-Thw gewertet werden. Das nächsthöhere HThw war das von 1855 mit NN +6,05 m. Werden diesen Werten diejenigen von 1962 gegenübergestellt (Bremerhaven NN +5,35 m, Brake NN +5,29 m, Vegesack NN +5,22 m, Bremen NN +5,41 m), so fällt auf, daß das Scheitelgefälle 1962 erheblich ausgeglichener war als etwa 1855 und die Wasserstandsdifferenz zwischen Brake und Bremen mit 12 cm (1962) gegenüber 1,18 m (1855) wesentlich geringer geworden ist.

Auch aus dieser Gegenüberstellung ist der Einfluß der Stromausbauten auf den Tideverlauf erkennbar. Der Energieverbrauch der einschwingenden Tide ist so gering geworden, daß die Scheitelwerte hoher Sturmtiden in Bremerhaven und Bremen nur noch unwesentlich voneinander abweichen. Es ist auch zu vermuten, daß unter den derzeitigen morphologischen Verhältnissen in der Unterweser ein dem HQ von 1881 vergleichbarer Binnenabfluß nicht mehr die damals registrierten Wasserstände in Bremen erreichen würde, da der Energiebedarf zur Überwindung der Unterweser auch flußabwärts erheblich abgenommen hat.

Der Vergleich älterer Sturmtiden zur Beurteilung des Sturmflutgeschehens kann daher im Unterweserbereich nur noch für Bremerhaven und allenfalls für Brake sinnvoll sein. Oberhalb von Brake sind zur Zeit die Thw-Stände von 1962 allein richtungweisend. Da der MThb in der Unterweser ziemlich einheitlich ist und die Wasserstandsdifferenzen der Sturmtiden zwischen Bremen und Bremerhaven wie 1962 unter den derzeitigen morphologischen Randbedingungen auch künftig nur geringfügig voneinander abweichen werden, kann angenommen werden, daß durch den maximalen Windstau bei Bremerhaven für die gesamte Unterweser eine höchste Lage des Wasserspiegels vorgegeben ist, die langfristig nur noch durch die säkulare Meereshebung beeinflußt sein wird. Jedoch ist der Einfluß der bisher noch nicht betriebenen Sturmflutsperrwerke an Hunte, Ochtum und Lesum auf die Sturmflutwasserstände, der bisher nur aus Modellversuchen bekannt ist, zu berücksichtigen.

Unklar sind die Scheitelwasserstände im Raum Elssleth/Farge, die nach den Pegelaufzeichnungen am 3. 1. 76 die von 1962 um rd. 10 cm überschritten haben (Abb 13). Der Verlauf des Wasserspiegels am 3. 1. 76 ist vergleichsweise ungewöhnlich. Bei der geringen Breite der Weser kann die Hebung des Wasserstandes nicht durch örtlichen Windstau erzeugt worden sein. Dagegen spricht auch, daß die Tidekurve von Farge einen ziemlich langen Scheitel hatte. Es ist nicht auszuschließen, daß die Pegelkurve in Farge unzuverlässig geschrieben wird, denn seit ungefähr 1970 zeigt der Pegel im Mittelwasserbereich ein ungewöhnliches Verhalten, das bisher nicht aufgeklärt werden konnte. Der Verlauf der Scheitellinie zwischen Brake und Vegesack (Abb. 13) erscheint daher zweifelhaft. Auf die Berechnung der Bemessungswasserstände ist das jedoch nicht von Einfluß, wie später nachgewiesen wird.

Die in Abbildung 13 aufgetragenen Scheitellinien verschiedener Sturmtiden der jüngeren Vergangenheit lassen einen Einfluß des Oberwassers (Tab. 8) auf deren Verlauf nicht erkennen. Zwischen Vegesack und Bremen laufen die Spiegellinien der Sturmtiden von 1962 und 1976 nahezu parallel, obwohl die Oberwasserzuflüsse mit 1200 m³/s (1962), 249 m³/s und 683 m³/s (1976) stark wechselten.

Zusammenfassend kann daher für die Weser festgestellt werden, daß die Sturmtiden vom Januar 1976 hydrologisch kein außergewöhnliches Ereignis gewesen sind. Die zukünstige Entwicklung der Sturmtidenwasserstände wird vor allem durch den säkularen Wasserstandsanstieg sowie die Absperrungen an Hunte, Lesum und Ochtum beeinflußt sein. Weitere Stromausbauten in der Weser können keine einschneidenden Änderungen des hydrologischen Geschehens mehr hervorrusen.

# 3.2.4 Veränderungen der Wasserstände und des Sturmtidenverlaufs in der Elbe

# 3.2.4.1 Langfristige Änderung der mittleren Wasserstände

Die hydrologischen Verhältnisse der Unterelbe sind schon in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen, die insbesondere durch den Verlauf der Sturmtiden von 1962 und 1973 angeregt waren. Schwerpunktmäßig befaßten sich diese Untersuchungen vor allem mit der Herstellung von Beziehungen zwischen den Pegeln Cuxhaven und Hamburg zum Zwecke der Sturmflutvorhersage (Siefert, 1968) und zur Abschätzung langfristiger Wasserstandsentwicklungen.

Das hydrologische Geschehen in der Unterelbe verläuft in überschaubaren Zeiträumen recht unterschiedlich. Siefert (1970) hat den Verlauf der MThw und MTnw für Hamburg und Cuxhaven in 19jährigen überlappenden Mitteln seit etwa 1800 untersucht. Die Kurven zeigen einen verhältnismäßig stetigen Anstieg des MThw in Cuxhaven mit rd. 25 cm/Jahrhundert. Das auf morphologische Veränderungen empfindlicher reagierende MTnw streut entsprechend stärker, zeigt aber auch eine insgesamt steigende Tendenz mit 16 cm/Jahrhundert. Einen schnelleren Anstieg mit 13 cm in den letzten 50 Jahren führt Siefert wohl zutreffend auf die Stromausbauten in der Elbe zurück.

Weniger eindeutig ist der langjährige Anstieg des MThw in Hamburg. Hier zeichnen sich drei Zeiträume mit unterschiedlichen Steigungsbeträgen ab: bis 1885 rd. 12 cm/Jahrhundert, von 1885 bis 1937 konstantes MThw und nach 1937 6 cm/Jahrhundert. Zu ähnlichen Ergebnissen führten Untersuchungen, die von Nasner und Partenscky (1975) vorgenommen wurden. Dem Anstieg des MThw steht hier ein Abfall des MTnw gegenüber, der seit ungefähr 1850 rd. 50 cm beträgt. Der MThb wuchs in Hamburg von 1850 mit 1,83 m bis 1960 auf 2,48 m um 0,65 m an.

Die gegenüber Cuxhaven stärkere Streuung der Einzelwerte des MThw und MTnw sowie der unregelmäßige Verlauf der langfristigen Entwicklung der Wasserstände in Hamburg ist auf die Zunahme der Wasserfläche im Hamburger Hafengebiet und die Strombauten in der Unterelbe (Hensen, 1955; Laucht, 1956) zurückzuführen. Die Untersuchungen von Siefert schließen 1970 ab. Ob die beschriebenen Entwicklungen – insbesondere der starke Anstieg des MThw mit 6 cm/Jahrhundert in Hamburg – weiterhin anhalten werden, ist wegen der kurzen seither verstrichenen Zeit nur schwer zu übersehen. Es hat jedoch den Anschein, daß das MThw nicht im gleichen Maße wie seit 1937 weiterhin ansteigen wird.

Die zwischen Cuxhaven und Hamburg liegenden Pegel – mit Ausnahme von Glückstadt – können wegen zu kurzer Beobachtungszeiten nicht in 19jährigen überlappenden Mitteln bearbeitet werden, so daß der Beurteilung der langfristigen Wasserstandsentwicklung hier vergleichsweise enge Grenzen gezogen sind.

# 3.2.4.2 Vergleich der Sturmtiden

Die Sturmtide vom 3./4. 1. 76 übertraf die bis dahin höchsten bekannten Wasserstände (Tab. 9) in der Unterelbe. Ihr Scheitelverlauf ist dargestellt (Abb. 14) und zu den Sturmtiden von 1962, 1973 und vom 21. 1. 76 in Beziehung gesetzt. Soweit bekannt ist, sind auch die Scheitelwerte der sehr schweren Sturmflut von 1825 eingetragen.

Bis zur Sturmtide vom 16./17. 2. 62 galt diejenige von 1825 als höchste in historischer Zeit in der Unterelbe. Schon 1962, nachdem die Wasserstände von 1825 überschritten waren, äußerte Hensen (1962), daß die Scheitelwerte von 1962 absolut – auf einen festen Horizont bezogen – zwar die höchsten waren, daß in Beziehung zum MThw jedoch die Werte von 1825 nicht ganz erreicht worden seien. Siefert (1969) hat die Sturmtide von 1825 näher untersucht und sie mit derjenigen von 1962 verglichen. Auch er kommt zu dem Ergebnis, daß die Sturmtide von 1825 bis in den Raum von Glückstadt, bezogen auf das MThw von 1962, höher war. Oberhalb von Glückstadt ist die Differenz zwischen dem HThw und dem zeitgenössischen MThw für 1962 größer als 1825. Diese Aussagen werden durch Rohde (1977) bestätigt. Beschickt auf 1976 (mit 25 cm/Jahrhundert), hätte die Sturmtide von 1825 (HThw = 9,66 m) in Cuxhaven einen Scheitelwert von NN +5,04 m erreicht. Am 3. 1. 76 trat hier ein Wasserstand von NN +5,12 m ein. Dieselbe Tendenz zeichnet sich in Otterndorf ab. Bei Brunsbüttel hingegen wurden die auf 1976 beschickten Wasserstände von 1825 nicht ganz erreicht.

Ein Vergleich der Sturmtide vom 16. 2. 62 mit der vom 3. 1. 76 ergibt, daß der Gesamtstau (Thwe – Thwv) in Cuxhaven 1962 um einige Zentimeter größer als der vom 3. 1. 76 war. Daß die absoluten Scheitelwasserstände in Cuxhaven am 3. 1. 76 um 16 cm über denen vom Februar 1962 lagen, ist u. a. darauf zurückzuführen, daß am 3. 1. 76 Springtide und am 16. 2. 62 Nipptide herrschte (Abb. 15).

Die Sturmtide von 1962 ist in Modellversuchen (Franzius-Institut, 1964) unter der Annahme unterschiedlicher Randbedingungen (z. B. mit und ohne Deichbrüche) eingehend untersucht worden. Diese Untersuchungen erlauben es, die Größenordnung verschieden gearteter Einflüsse auf den Sturmtidenverlauf, insbesondere in Hamburg, abzuschätzen. Am 3. 1. 76 wurde der Scheitelwert von 1962 um 75 cm überschritten, wofür als Einflüsse angesetzt werden können:

Ausbauten der Elbe seit 1962	rd.	10 cm
Sturmflutfreie Eindeichung Wilhelmsburgs, der Alten Süderelbe		
und anderer Gebiete in Hamburg,		
weder Deichbrüche noch Überlauf	rd.	40 cm
Höherer Sturmtidenscheitel in Cuxhaven	rd.	15 cm
Unterschiedliche Überlagerungen von		
Windstau- und Tidewellen	rd.	10 cm
	Summe: rd.	75 cm

Ein Vergleich des Verlaufs der Scheitelwasserstände der Sturmtiden von 1973, 1974 und 1976 (Abb. 14) zwischen Glückstadt und Hamburg läßt den ungefähr parallelen Anstieg der Scheitelwerte erkennen. Die Schlußfolgerung, daß der Windstau von Glückstadt sich bis zum Pegel St. Pauli voll durchsetzt und hierdurch – ähnlich wie in der Weser – die maximale Höhe der sturmfluterzeugten Scheitelwerte vorgegeben ist, wird

 $\begin{array}{c} \text{T a b ell e } 9 \\ \text{Tidehochwasser Cuxhaven} \geqq \text{MThw} + 200 \text{ cm} \end{array}$ 

		Ober-					Ober-		
		wasser-		ufzeit		test.	wasser-		ufzeit
	Thw	abfluß am		Tide-	_	Thw	abfluß		Tide-
Datum	am	Pegel		eitels	Datum	am	am Pegel		eitels
	Pegel	Darchau		haven		Pegel	Darchau		haven
	Cuxhaver		St.	Pauli		Cuxhaven			Pauli
		Darchau					Darchau		
	cm PN	$m^3/s$	h	min		cm PN	m 3/s	h	min
28. 01. 01	861	742	4	22	17. 02. 62	996	1042	4	28
26.01.02	857	1255	4	32	17.02.62	843	1042	4	04
06. 10. 04	832	167	4	27	13.02.65	846	721	4	36
09.11.04	887	275	4	28	02.11.65	876	581	4	17
07.01.05	853	370	4	17	11. 12. 65	857	788	4	25
12.03.06	851	1370	5	07	01. 12. 66	881	763	4	12
13.03.06	937	1375	4	26	23. 02. 67	901	1450	4	00
04. 12. 06	833	533	4	35	01.03.67	890	1470	4	01 .
20. 02. 11	857	668	4	53	04. 12. 67	846	564	4	24
06. 11. 11	851	198	4	17	03.10.70	853	434	4	10
06. 11. 11	839	198	4	42	13.11.73	899	357	4	11
09. 04. 12	850	623	4	42	16.11.73	924	366	4	19
18.09.14	869	278	5	11	19.11.73	908	382	4	09
12. 11. 14	853	435	4	21	06. 12. 73	941	357	3	34
13.01.16	933	1786	5	23	14. 12. 73	924	480	4	37
16. 02. 16	911	1086	4	45	05.12.74	856	1006	3	37
25. 10. 17	863	290	4	58	29. 12. 74	840	2148	3	08
02. 12. 17	909	380	5	03	25.01.75	853	1438	3	40
03. 12. 17	875	403	4	22	03.01.76	1012	485	2	50
24. 12. 18	885	747	5	18	04.01.76	864	512	3	31
23. 10. 21	862	203	4	51	22.01.76	972	1532	3	19
02. 11. 21	892	220	4	55	22.01.76	882	1702	3	53
18. 12. 21	850	298	4	20					
21. 12. 21	855	270	4	05					
31. 12. 21	853	433	4	53					
03. 01. 22	856	455	4	51					
18. 12. 23	862	553	4	59					
06. 02. 24	845	818	4	48	Bemerkun	ngen: Cuxha	aven		
10. 10. 26	904	578	3	52		N — 5,00 r		0. 54	
12. 10. 26	897	594	4	16		N - 5,02  n			
26. 11. 28	857	531	4	22		N — 5,01 n			
12. 12. 29	887	371	4	46		laufende V			MThy
13.01.30	885	613	4	57		Cuxhaven			
23. 11. 30	917	1050	4	52		0 cm auf N			
18. 10. 36	922	328	4	24		Wassersta			
27. 10. 36	861	403	4	59	rücksichtig		•	37	
01. 12. 36	859	556	4	30					
01. 12. 36	897	556	4	47	Abflußda	ten am Peg	el Darchai	u	
29. 01. 38	855	1970	4	23	Neu Darc				
24. 11. 38	850	610	4	24	NQ		m³/s)	T 1	.,
27. 11. 39	840	1310	4	49	MHQ	= 1890			esreihe
19. 10. 41	903	1180	4	23		3620 = 3620		1926/	1970
02. 03. 45	862	1390	4	36	(1)	, 5020	- 6		
24. 10. 49	866	230	4	26	$HQ_2$	= 1980	m <sup>3</sup> /s) ) a		esreihe
16. 01. 54	869	280	4	30	$HQ_3$	= 2210		1926/	
22. 12. 54	883	525	4	42	1140	2210	/3/ )	errec	nnet
13. 01. 55	855	1500	4	31					
19. 01. 56	852	933	4	50					
21. 03. 61	846	1100	4	04					
12. 02. 62	859	953	4	01					
12. 02. 02	337	755	-	01					

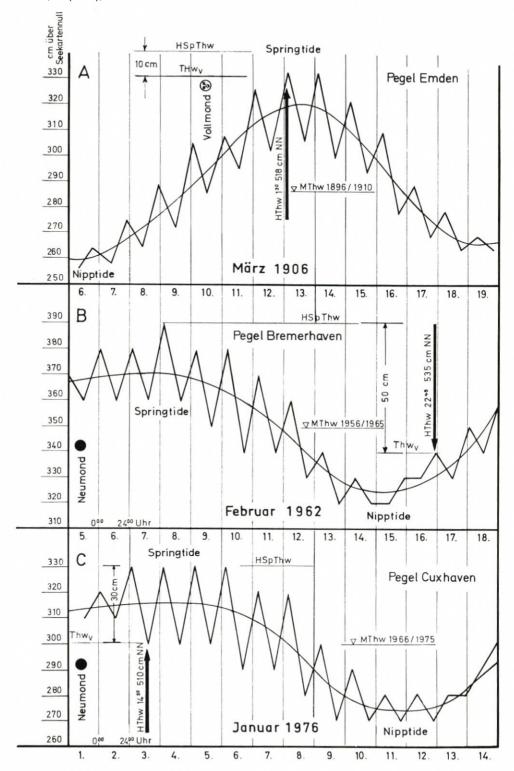


Abb. 15. Astronomische Tidehochwasser und HThw der Sturmtiden 1906 am Pegel Emden, 1962 am Pegel Bremerhaven und 1976 am Pegel Cuxhaven

bestätigt (Abb. 16). Die Streuung der Werte in der Abbildung ist auf die Veränderlichkeit des Oberwassers, Stromausbauten usw. zurückzuführen.

Die während der Sturmtiden jeweils zusließenden Oberwassermengen (Tab. 9) wirken sich deutlich auf die Scheitelwasserstände in der Elbe, vornehmlich im oberen Tidebereich und im Stromspaltungsgebiet von Hamburg, aus. Am 3. 1. 76 flossen der Tideelbe 485 m³/s zu (MQ<sub>1926/70</sub> am Pegel Neu Darchau = 722 m³/s). Dieser niedrige Oberwasserabsluß hat offensichtlich bewirkt, daß die Scheitellinie zwischen St. Pauli und

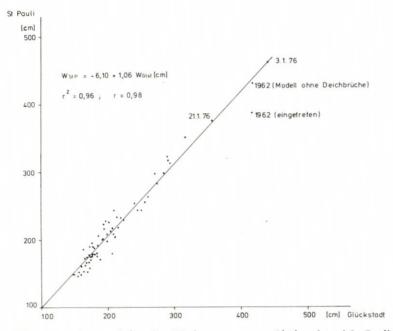


Abb. 16. Beziehung zwischen den Windstauwerten von Glückstadt und St. Pauli

Geesthacht fast horizontal verläuft (Abb. 14). Einen ähnlichen Verlauf zeigen die Sturmtiden vom 6./7. 12. 73 und 19./20. 11. 73, die bei einem Oberwasserabfluß von 357 m³/s bzw. 382 m³/s eintraten. Am 21. 1. 76 führte die Elbe am Pegel Neu Darchau 1532 m³/s. Gegenüber den anderen Sturmfluten mit geringerem Oberwasser ist die Scheitellinie oberhalb Hamburgs erheblich steiler, während zwischen Glückstadt und Hamburg derartige Unterschiede nicht feststellbar sind, was darauf hindeutet, daß das Oberwasser die Scheitelwasserstände der Sturmtiden unterhalb von Hamburg nur noch geringfügig beeinflußt. Die Ausführungen von Siefert (1968) über einen bis Glückstadt reichenden Oberwassereinfluß müssen deshalb in den 1977 vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen veranlaßten Modellversuchen für die Unterelbe überprüft werden.

Das Zusammentreffen einer Sturmtide mit hohem Oberwasser, wie es z. B. am 21. 1. 76 eintrat, hat die Diskussion um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses neu belebt. Bereits 1966 hat Walden Untersuchungen veröffentlicht, in denen er die zeitlichen Zusammenhänge zwischen Sturmtiden und Oberwasser der Elbe behandelt. Er kam zu dem Ergebnis, daß die bekannten Sturmtiden der Vergangenheit mit großräumigen Wettereinbrüchen verbunden waren bzw. an deren Beginn standen und

daß sich hierdurch der Abfluß der Elbe z. B. infolge von Schneeschmelze und Niederschlägen auf gefrorenem Boden sehr schnell verstärkt. Durch die Abflußverzögerung im Einzugsgebiet der Elbe sind in der Vergangenheit die Abflußspitzen somit erst nach Abklingen der Sturmtiden in Hamburg eingetroffen. Das gleichzeitige Auftreten von hohen Sturmtiden und Spitzenabflüssen in der Elbe ist nach den Untersuchungen von Walden wenig wahrscheinlich. Die gleiche Auffassung vertrat auch Hensen (1964). Cimpa (1970) errechnet für die Gleichzeitigkeit des Eintritts von HHThw und HHQ Wahrscheinlichkeitswerte bis in den Bereich von 1:10 000 und sprengt damit den Rahmen sinnvoller zeitlicher Vergleiche, worauf auch Siefert (1969) in anderem Zusammenhang hingewiesen hat.

Das Zusammentreffen einer Sturmtide mit erhöhtem Oberwasser am 21. 1. 76 reicht allein nicht aus, um die bisherigen Auffassungen über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses zu ändern. Doch sollte der Empfehlung von Hensen (1964) gefolgt und eine eingehende Untersuchung dieser Zusammenhänge vorgenommen werden. Eine solche Untersuchung ist auch deshalb dringend erforderlich, weil durch den Ausbau der Deiche an der Unterelbe und im Hamburger Hafen künftige Sturmtiden nicht mehr durch Deichbrüche entlastet werden und dementsprechend höhere Scheitelwerte erreichen. Hierdurch wird die Elbe oberhalb Hamburgs stärker als bisher eingestaut und die seitlichen Deiche werden höheren Beanspruchungen ausgesetzt.

Zusammenfassend kann das Sturmflutgeschehen vom Januar 1976 in der Elbe dahingehend beurteilt werden, daß trotz der höchsten bisher erreichten Wasserstände das Sturmtidengeschehen innerhalb der langfristigen hydrographischen Entwicklung verblieb. Für die Zukunft ist davon auszugehen, daß sich bei extremen Sturmtiden der Windstau von Glückstadt bis nach St. Pauli voll durchsetzen wird. Zusätzlich ist hierbei der säkulare Wasserstandsanstieg zu berücksichtigen. Entscheidend für den Ablauf der Sturmtide vom 3. 1. 76 war, daß oberhalb von Glückstadt trotz der Deichbrüche in Nord- und Süd-Kehdingen und in der Haseldorfer Marsch (Schleswig-Holstein) eine wesentliche Entlastung der Elbewasserstände erstmals ausgeblieben ist. Insofern ist eine Überprüfung der Modellversuchsergebnisse des Franzius-Institutes aus dem Jahre 1964 in dem vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen in Auftrag gegebenen Elbemodell erforderlich. Problematisch jedoch ist die Abschätzung des hydrologischen Geschehens oberhalb Hamburgs, wo gesonderte Untersuchungen erforderlich sind.

## 3.3 Häufigkeit von Sturmtiden

Die Sturmtidenkette vom Herbst 1973 (INGENIEUR-KOMMISSION, 1976) sowie die in dichter Folge auftretenden Orkanfluten vom Januar 1976 haben den Eindruck hervorgerufen, daß die Häufigkeit von Sturmtiden in jüngerer Zeit zugenommen hat. Vielfach wurde angenommen, daß diese Häufung das Ergebnis großräumiger und langfristiger Klimaänderungen sei.

Im Zusammenhang mit der Häufung extremer Witterungsereignisse (Trockenjahre, Naßjahre, Eiswinter u. ä.) sind immer wieder Versuche unternommen worden, in direkter oder indirekter Beweisführung (z. B. Anzahl guter Weinjahre, Dicke der Baumringe, Hochwasserführung der Flüsse usw.) den Nachweis von Klimaschwankungen zu erbringen. FLOHN (1967) hat diese Bemühungen zu objektivieren versucht und kommt letztlich zu dem Ergebnis: "Die sich jüngst häufenden extremen Situationen zeigen uns, daß 100 Jahre meteorologische Statistik niemals ausreichen, um Klimaschwankungen gerecht

zu beurteilen." Wenn somit der Nachweis klimatischer Änderungen aus den heute vorliegenden Klimadaten nicht möglich ist, kann die Beweisführung der Häufigkeitszunahme von Sturmtiden eigentlich nur über die Sturmflutwasserstände selbst vorgenommen werden.

Nun sind außergewöhnliche Sturmtiden seit dem frühen Mittelalter für derartige Häufigkeitsuntersuchungen genügend bekannt. Dem steht jedoch entgegen, daß die Mitteilungen über historische Sturmtiden vor allem an den eingetretenen Schäden und Menschenverlusten orientiert und daher als stark subjektiv zu bewerten sind. Außergewöhnliche Witterungsereignisse wirken sich nämlich auf niedriger Kulturstufe viel stärker aus als heute (FLOHN, 1967). Übertragen auf die historischen Mitteilungen über Sturmtiden und Sturmwetterlagen bedeutet das, daß infolge der Schadensanfälligkeit mittelalterlicher Küstenschutzwerke und Wohnstätten manche Sturmflut besonders herausgestellt worden ist, die unter heutigen Verhältnissen kaum zur Kenntnis genommen würde.

Tabelle 10

Datum	Thw	MThw 19jährig. überlapp. Mittel	Thw			
	cm + PN	cm + PN	cm + MThw			
7. 1.05	810	598	212			
13. 3.06	896	598	298			
18. 9.14	815	601	214			
13. 1.16	886	602	284			
16. 2.16	811	602	209			
25. 10. 17	805	602	203			
2. 12. 17	831	603	228			
3. 12. 17	825	603	222			
24. 12. 18	805	603	202			
1. 11. 21	823	604	219			
18. 12. 21	809	604	205			
31. 12. 21	805	604	201			
10. 10. 26	851	606	245			
12. 10. 26	816	606	210			
12. 12. 29	838	609	229			
23. 11. 30	844	609	235			
18. 10. 36	846	610	236			
1. 12. 36	843	610	233			
29. 1.38	818	610	208			
4. 2.44	826	612	214			
16. 1.54	817	612	205			
22. 12. 54	854	612	242			
16. 2.62	912	613	299			
1. 12. 66	817	(613)	204			
13. 11. 73	834	(613)	221			
16. 11. 73	839	(613)	226			
19. 11. 73	863	(613)	250			
6. 12. 73	849	(613)	236			
13. 12. 73	843	(613)	230			
3. 1.76	886	(613)	273			
3. 1.76	847	(613)	234			
21. 1.76	886	(613)	273			

Pegel Norderney 1905 bis 1976 Thw ≥ MThw +200 cm

Für Häufigkeitsuntersuchungen verbleiben somit nur diejenigen Sturmtiden, die auch höhenmäßig bekannt bzw. abgesichert sind. Abgesehen von einzelnen Tiden des späten Mittelalters und der frühen Neuzeit sind das etwa diejenigen der letzten 100 Jahre. Schelling (1952) zählt von 1874 bis 1949 für den Pegel Husum 34 Sturmtiden, deren Thw mehr als 2,0 m über MThw auflief. Häufungen solcher Wasserstände traten ein 1916, 1917, 1926, 1936 je dreimal und 1894, 1906, 1921, 1923, 1928, 1949 je zweimal. Lüders (1974) stellte für Wilhelmshaven zwischen 1854 und 1973 insgesamt 28 Sturmtiden-Ketten, also langanhaltende Sturmwetterlagen, fest. Die bekannten Höchstwasserstände von 1854/55, 1906 und 1962 waren mit solchen Ketten verbunden.

In der Tabelle 10 sind für den Pegel Norderney die Thw von 1905 bis 1976 zusammengestellt, die das jeweilige MThw um mehr als 2,0 überschritten haben. Die Zusammenstellung zeigt eine Häufung hoher Tiden in den Jahren 1973 (fünfmal), 1917, 1921, 1976 (dreimal) und 1916, 1926, 1936, 1954 (zweimal). Das mehrmalige Auftreten hoher Tiden innerhalb eines Jahres oder sogar weniger Wochen ist somit - bezogen auf die Betrachtungszeiträume - statistisch kein herausragendes Ereignis und läßt Rückschlüsse auf großklimatische Änderungen nicht zu. Auch der zeitliche Abstand von Sturmtiden, die höher als 2,0 m über MThw aufliefen, gibt keinen Hinweis auf eine zunehmende Häufung solcher Ereignisse. Der Abstand betrug von 1944 bis 1954 maximal in Norderney zehn und durchschnittlich rd. vier Jahre. In Husum wurde die größte Zeitspanne zwischen zwei Sturmtiden, die höher als 2,0 m über MThw aufliefen, von Schelling mit 13 Jahren von 1881 bis 1894 angegeben. Der durchschnittliche zeitliche Abstand ist auch hier rd. vier Jahre. Ohne grundsätzlich verneinen zu wollen, daß sich das Klima mit der Folge der Zunahme von Sturmwetterlagen verändern und eine solche Änderung bereits eingesetzt haben kann, ist jedoch aus dem verfügbaren und gesicherten Datenmaterial eine solche Entwicklung nicht festzustellen.

FÜHRBÖTER (1976) hat nach den Januarsturmtiden 1976 die Änderungen der Eintrittshäufigkeit von hohen Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste durch Wahrscheinlichkeitsberechnungen untersucht. Hierzu benutzte er die durch äußere Einflüsse langfristig am wenigsten gestörten Pegel Wilhelmshaven, Cuxhaven und Husum. An diesen Pegeln liegen auch die wohl längsten Beobachtungsreihen der Wasserstände vor. Die Arbeit führt auch zu der Erkenntnis, daß die statistische Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Sturmtiden sehr stark von den gewählten Jahresreihen abhängig ist, aus welchen sie ermittelt wurde. Jedoch ist das Ergebnis, daß das berechnete 100jährige Hochwasser an den Pegeln Wilhelmshaven, Cuxhaven und Husum auch bei ungünstiger Jahresreihe nur im Dezimeterbereich von dem angegebenen HHThw abweicht, für die Überprüfung der Bemessungswasserstände (s. Abschn. 4) von großer Bedeutung.

## 3.4 Zusammenfassung

Der Vergleich früherer Sturmtiden mit denen vom Januar 1976 führt zu folgenden Ergebnissen:

- An der offenen niedersächsischen Küste sind am 3./4. 1. 76 die bisher bekannten höchsten Wasserstände und Windstauwerte – mit Ausnahme Cuxhavens – nicht erreicht worden.
- In der Ems wurden zwischen Emden und Leerort die Wasserstände von 1906 nicht erreicht. Die oberhalb von Leerort eingetretenen Wasserstände, die die bisher bekannten überschritten, sind wesentlich durch morphologische Entwicklungen und die

seit 1968 geschlossenen Deichlinien geprägt. Bei Sturmtiden wie diejenigen von 1962 und 1906 muß in diesem Abschnitt mit noch höheren Wasserständen als 1976 gerechnet werden.

- 3. Der Ablauf der Sturmtiden in der Weser ist vor allem durch Strombauten bestimmt, die die hydrologisch-morphologische Entwicklung einem Ruhezustand zugeführt haben. Die bisher bekannten höchsten Wasserstände und Windstauwerte wurden nicht erreicht. Die Windstauwerte zwischen Bremerhaven und Bremen weichen nur geringfügig voneinander ab, wodurch eine Höchstlage künstiger Sturmtidenscheitel in Bremen in Abhängigkeit vom Scheitelwasserstand in Bremerhaven vorgegeben ist. Die Absperrungen von Hunte, Lesum und Ochtum sind gesondert zu betrachten.
- 4. Im Elbmündungsgebiet wurden die größten im Jahre 1962 aufgetretenen Windstauwerte nahezu erreicht; die auf 1976 beschickte Scheitellinie der Sturmtide von 1825 ist bis Glückstadt teilweise höher als die von 1976. Das Geschehen oberhalb von Glückstadt ist wesentlich durch die Strombauten der vergangenen 100 Jahre und die 1976 erstmals ausgebliebene fühlbare Entlastung durch Deichbrüche bestimmt. Der unter den künstigen Bedingungen wachsende Rückstau durch Oberwasser in der Elbe oberhalb Hamburgs bedarf einer gesonderten Untersuchung.
- In allen Tideströmen wirken sich die Stromausbauten auf die zeitlichen Unterschiede des Eintritts der Scheitelwasserstände unter sonst gleichen Bedingungen verkürzend aus.
- 6. Gegenüber der Sturmtide vom 3./4. erbrachte die vom 20./21. 1. 76 keine neuen Einsichten.

Insgesamt ist somit festzustellen, daß die aus den bisherigen Erkenntnissen und insbesondere aus dem Verlauf der Sturmtide von 1962 entwickelten hydrographischen Rahmenvorstellungen zum Sturmflutgeschehen an der südlichen deutschen Nordseeküste und an den in sie mündenden Tideströmen durch die Ereignisse vom Januar 1976 nicht durchbrochen wurden.

## 4 Sturmflutschäden und Folgerungen für den künftigen Deichbau

#### 4.1 Stand des Küstenschutzes

Die sehr schweren Sturmfluten vom Januar 1976 trafen das niedersächsische Küstengebiet nicht unvorbereitet. Eine Katastrophe unvorstellbaren Ausmaßes wäre eingetreten, wenn nicht in den vergangenen Jahrzehnten aufgrund der Erfahrungen aus den sehr schweren Sturmfluten nach 1953 – insbesondere von 1962 – die Küstenschutzwerke mit großem Kostenaufwand (Abb. 17) verstärkt worden wären, wobei vorrangig die gefährdetsten Deichstrecken ausgebaut wurden. Der hierdurch erreichte Sicherheitsgrad kommt auch darin zum Ausdruck, daß die Schäden 1976 sehr viel geringer als 1962 waren. Die im Abschnitt 5.2 enthaltene Darstellung der Schäden aus den Januar-Sturmfluten 1976 muß daher im Zusammenhang mit dem inzwischen erreichten Ausbauzustand des Küstenschutzes bewertet werden.

Nach der katastrophalen Sturmflut in den Niederlanden 1953 wurde zum Schutze des niedersächsischen Küstengebietes das "Niedersächsische Küstenprogramm 1955–1964" entwickelt (Lüders, 1955). Es sah eine wesentliche Erhöhung und Verstärkung der Deiche an der Nordsee und den Tideströmen vor.

Die sehr schwere Sturmflut vom 16./17. 2. 62, die insbesondere im Gebiet ostwärts der Weser bis dahin nicht beobachtete Tidehochwasserstände hervorrief, führte gegenüber 1953 zu neuen Erkenntnissen, die eine Fortschreibung des Küstenprogramms erforderlich machten. Das folgende "Zweite Niedersächsische Küstenprogramm – Deichbau und Küstenschutz ab 1963" sah eine weitere Erhöhung der Hauptdeiche, die Verstärkung ihres Profils durch Abflachung der Außen- und Binnenböschung sowie den Ausbau der Deichverteidigungswege und als besonderen Schwerpunkt die Errichtung von Sturmflutsperrwerken in den tideoffenen Nebenflüssen der Unterweser und Unterelbe vor. Als weitere Fortschreibung wurde im Jahre 1973 der "Generalplan Küstenschutz Niedersachsen" vorgelegt, der seitdem die Grundlage für den Fortgang des Küstenschutzes ist (Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1973).

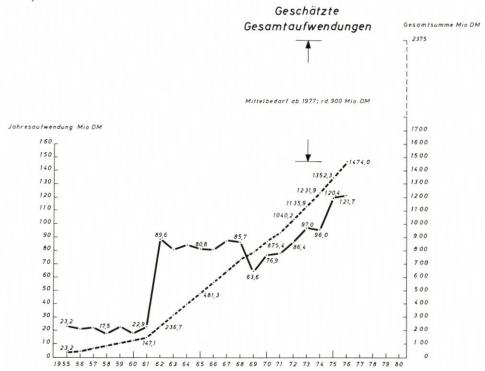


Abb. 17. Aufwendungen für den Küstenschutz in Niedersachsen von 1955 bis 1976

Von der ehemals rd. 1000 km langen Hauptdeichstrecke (Abb. 18) bleiben nach Fertigstellung von insgesamt 14 Sperrwerken in den Nebenflüssen von Ems, Weser und Elbe noch 602 km Hauptdeiche unmittelbar dem Angriff der Sturmfluten ausgesetzt. Bis Ende 1975 waren 11 Sperrwerke bereits errichtet und rd. 345 km der unterhalb liegenden Hauptdeichlinie erhöht und verstärkt. Auszubauen sind ab 1976 noch 257 km Hauptdeiche. Die zeitliche Entwicklung der für den Küstenschutz erforderlichen Aufwendungen (Abb. 17) ergibt, daß ab 1977 noch rd. 900 Mio. DM erforderlich sind. Nach Abschluß der Erhöhung und Verstärkung der Küstenschutzwerke an der niedersächsischen Küste wird eine Summe von voraussichtlich 2,4 Milliarden DM verausgabt worden sein.

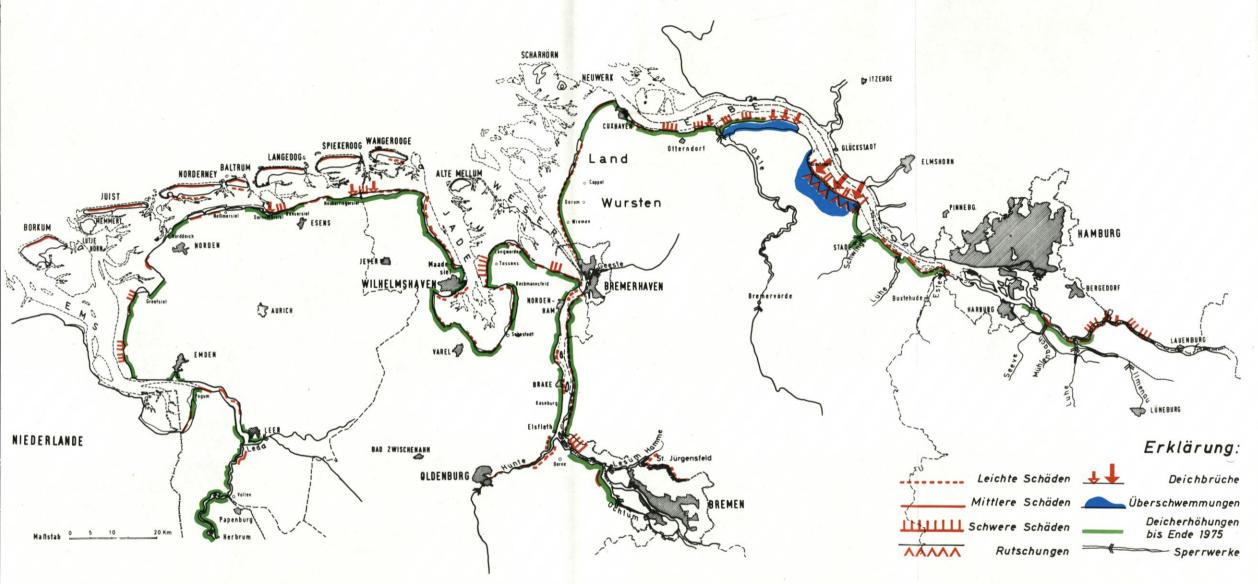


Abb. 18. Ausbauzustand der Küstenschutzwerke am 1. 1. 1976 und Schäden durch die Sturmfluten vom Januar 1976

# 4.2 Art und örtliche Verteilung der Schäden an den Festlandsdeichen

Die Sturmflut vom 3./4. 1. 76 brachte um die Zeit des Scheitelwasserstandes eine weniger lang anhaltende Brandung an den Deichen als 1962 (s. Abschn. 2.3), besonders westlich der Weser. Wenn die Schäden an den Festlandsdeichen 1976 deutlich geringer als 1962 blieben, so wegen der kurzzeitigeren Wellenwirkung, aber vor allem aufgrund des fortgeschrittenen Ausbauzustandes der Deiche.

In Abbildung 18 sind die an den Festlandsdeichen infolge der Sturmtiden vom 3./4.1. und 20./21.1.1976 hervorgerufenen Schäden dargestellt. Letztere konnte die in der vorhergehenden Sturmtide verursachten – wenn auch an den größten Schadensstellen gesicherten – Schäden erweitern oder brachte auch neue an denjenigen Küstenschutzanlagen, die am 3./4.1.76 ohne nennenswerte Schäden geblieben waren.

Das Ausmaß der Schäden läßt sich entsprechend den 1962 aufgestellten und 1973 wieder verwandten Kriterien (Ingenieur-Kommission, 1962 u. 1976) beschreiben und damit auch vergleichen.

Es entstanden:

- a) Zerstörungen von massiven Deichsicherungswerken durch Druckschlag und Hinterspülung,
- b) Brandungsausschläge an den Außenböschungen und
- c) Deichbrüche nach Rutschungen an den Binnenböschungen durch Wellenüberschlag oder Überströmungen an noch nicht erhöhten Deichen, wie an der Elbe nördlich Stade.

Für eine Übersicht des Schadensumfanges an der gesamten niedersächsischen Hauptdeichlinie (Abb. 18) werden die Schäden wie folgt unterteilt:

- a) leichte Schäden an der Außenböschung mit Löchern bis 1/4 m³/m Deich
- b) mittlere Schäden an der Außenböschung mit Löchern bis 1 m³/m Deich
- c) schwere Schäden an der Außenböschung mit Ausschlägen oder Rutschungen mit mehr als 1 m³/m Deich oder Schäden an den massiven Deichsicherungswerken
- d) Deichbrüche

Unterschieden werden muß zwischen den Schäden an den nach 1962 noch nicht ausgebauten Hauptdeichen und den an bereits fertigen (Abb. 18). Wenn an den schon erhöhten und verstärkten Deichen Schäden eintraten, dann nur an dem noch nicht genügend verfestigten Erdkörper oder an zu leichten massiven Deckwerken und Böschungsbefestigungen. Das Ausmaß der Schäden an der niedersächsischen Küste nahm von der Ems zur Elbe hin zu, worin sich auch die von West nach Ost wachsende Höhe der Sturmflutwasserstände (s. Abschn. 2.2) widerspiegelt.

## 4.3 Schäden an den Hauptdeichen und Folgerungen

#### 4.3.1 Außenböschung

Erfahrungen: Die Schäden entstanden vor allem an ungenügend unterhaltenen Deichstrecken, die auch an bereits fertigen Hauptdeichen anzutreffen waren. Ihre Ursache waren starker Unkrautbewuchs, Löcher und Gänge von Wühltieren, Viehtritte und Trampelpfade an Querzäunen, der Übergang von der befestigten Außenberme oder -böschung zur nach oben angrenzenden Kleidecke sowie abgestorbene Grasnarbe bei

nicht oder zu spät geräumtem Treibgut. An noch auszubauenden Deichen litten die zu steilen Böschungen bei schwerer Brandungsbeanspruchung. Verstärktem Wellenangriff waren auch zu steile Böschungen infolge nicht eingetretener Setzungen des Deichkörpers ausgesetzt. Erst ein oder zwei Jahre vor den Januar-Sturmfluten 1976 fertiggestellte Deiche mit unzureichend konsolidiertem Deichboden und noch ungenügend begrünter Oberfläche wurden stellenweise ausgewaschen. Weitere Schadensursachen waren Anlagen am Deich wie Treppen, Rampen, Zäune und ähnliches. Die leichten Schäden waren über die gesamte Außenböschung verteilt, während mittlere und schwere Schäden in Höhe der Brandungswirkung lagen.

Seedeiche mit einer Außenböschungsneigung von 1:6 und flacher sowie gesunder Grasnarbe haben die Brandungswirkung ohne Schäden überstanden. Auch die Außenböschungen von Strom- und Flußdeichen mit Neigungen von 1:4 an Ems, Weser und Elbe blieben infolge fester Grasnarbe unbeschädigt. War jedoch nach Deichverstärkungen der Boden noch nicht genügend konsolidiert, so traten – wie beispielsweise in Nordkehdingen – mittlere und schwere Schäden besonders unterhalb des Scheitelwasserstandes auf.

Folgerungen: Die Neigungen der Außenböschungen von Seedeichen sind nicht steiler als 1:6 anzulegen. Eine steilere Neigung oberhalb des Bemessungswasserstandes, die 1962 noch vertretbar erschien (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1962) wurde bereits 1970 als nachteilig erkannt (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1970) und ist deshalb nicht mehr vorzusehen, da besonders der Übergangsbereich des Neigungswechsels schadenanfällig ist. Wenn die Kleidecke aus sehr sandigem Material besteht, sind die Böschungen flacher – bis zu 1:10 geneigt – zu gestalten. Das erforderliche Neigungsmaß ist auch von der Bodenart abhängig zu machen (Ragutzki, 1969).

Die Außenböschungen von Strom- und Flußdeichen sind möglichst 1:4 – bei gutem Deichboden und geringem Wellenangriff 1:3 – anzulegen. Falls aus baulichen Gründen die Böschungsneigung steiler als 1:3 werden muß, ist sie bis zur Höhe des Bemessungswasserstandes massiv zu befestigen, um die Unterhaltung zu mindern und sie – besonders an der Elbe oberhalb Hamburgs – gegen Schäden durch Eisgang zu schützen. Sind die Deichstrecken infolge ihrer Lage zur Hauptwindrichtung stärkerem Wellenangriff ausgesetzt, erscheinen entweder flachere Neigungen von 1:5 oder massive Befestigung angebracht.

Entscheidend für die Schadensanfälligkeit der Außenböschung ist jedoch der Unterhaltungszustand der Grasnarbe (s. Abschn. 5.3.3). Schwimmende und der Brandung ausgesetzte Gegenstände im Deichvorland wirken zerstörend auf die Grasnarbe. Es können dann tiefe Löcher im Deich entstehen. Deshalb sollte das Deichvorland vor allem von aufschwimmenden Materialien geräumt werden (Ingenieur-Kommission, 1962).

# 4.3.2 Deichkrone und Binnenböschung

Erfahrungen: Deichkrone und Binnenböschung werden während sehr schwerer Sturmtiden mit entsprechend hohen Wasserständen etwa gleich beansprucht. An noch nicht erhöhten und verstärkten Deichstrecken mit fester und dichter Grasnarbe – wie z. B. westlich Norddeich und im Lande Wursten – entstanden beim Überlauf einzelner Wellen keine Schäden. Deiche mit den im Küstenprogramm festgelegten Abmessungen wurden dagegen wegen ihrer Höhe nicht von Wellen überlaufen.

Der noch nicht ausgebaute, zu niedrige Deich führte an der Unterelbe in der Ge-

meinde Drochtersen nördlich Stade zur Überströmung der Deichkrone. Die Innenböschung mit der zu steilen Neigung von etwa 1:2 hielt dabei nicht stand. Es entstanden zahlreiche Kappenstürze und Rutschungen, von denen sich elf zu Deichbrüchen ausweiteten. Das die Bruchstellen durchströmende Wasser kolkte den Deichuntergrund bis zu 8 m Tiefe aus.

Ansatzpunkt von Schäden durch Wellenüberlauf waren oft Fahrspuren oder Trampelpfade auf der Deichkrone oder Löcher von Wühltieren in der Binnenböschung, die zu Wasseransammlungen führen und die Durchweichung des Deichkörpers fördern. Einer länger anhaltenden Überströmung konnte ein Erddeich mit steilen Böschungen ohnehin nicht standhalten.

Folgerungen: Die nach 1962 erhobenen Forderungen (Ingenieur-Kommission, 1962) gelten nach wie vor. Die Deichkrone ist zu wölben oder einseitig seewärts zu neigen, um die Entwässerung zu fördern. Eine steilere Neigung der Binnenböschung als 1:3 ist auszuschließen. Der Fahrverkehr auf unbefestigten Deichkronen ist zu unterbinden, wie auch Dellen und Trampelpfade zu beseitigen sind. Deichkronen, die in Fremdenverkehrsgebieten viel begangen werden, sind zu befestigen. Wühltiere müssen ausreichend bekämpft und die Grasnarbe gepflegt werden.

#### 4.3.3 Deichboden und Grasdecke

Erfahrungen: Die Unterhaltung der Deiche ist entscheidend für ihre Widerstandsfähigkeit gegen Wellenauflauf und Brandung, was im Januar 1976 wiederum bestätigt wurde. Nicht gemähte oder nicht abgeweidete Grasdecken ziehen Wühltiere wie Mäuse, Maulwürfe u. a. an. Sie lockern die obere Bodenschicht auf, Kahlstellen entstehen und Unkrautbewuchs wird gefördert. Sehr nachteilig wirkt sich im gleichen Sinne zu späte Treibselräumung aus. Deiche mit gut gepflegter, dichter und fester Grasnarbe überstanden den Wellenangriff ohne nennenswerte Schäden.

Eine mangelhafte Grasnarbe bot den Ansatz für Auswaschungen des Deichbodens, deren Ausmaß wiederum von dessen unterschiedlicher Qualität abhing (INGENIEUR-KOMMISSION, 1962 u. 1970). Im sandigen Klei konnten Abbruchkanten bis zu 1,5 m Höhe entstehen, während im Klei mit hohem Tonanteil die Ausschläge geringer blieben.

Größere Ausspülungen in noch nicht konsolidierten Außenböschungen sind ein unvermeidbares Baurisiko, da die aus wirtschaftlichen aber auch aus landschaftsgestalterischen Gründen bevorzugten grünen Erddeiche mehrere Jahre benötigen, bis der Deichboden genügend verfestigt ist und sie eine dichte Grasnarbe aufweisen.

Folgerungen: Immer wieder muß auf die Erfahrungen in der Februar-Sturmflut 1962 und die dort getroffenen Folgerungen (Ingenieur-Kommission, 1962) hingewiesen werden. Die Widerstandsfähigkeit der Grasnarbe wird allein von deren Pflege bestimmt, wobei der in den letzten Jahren verstärkten Schafbeweidung die entscheidende Bedeutung zukommt. Sie sollte jedoch erst beginnen, nachdem die Grasnarbe geschlossen ist. Sehr wichtig ist die rechtzeitige und ordnungsgemäße Beseitigung des Treibsels. Wichtig ist auch die Düngung bei ungünstigen Bodenverhältnissen.

Auf die Qualität des Deichbodens, für dessen Eignung Kriterien entwickelt worden sind (RAGUTZKI, 1967), ist großer Wert zu legen. Wenn geeigneter Boden örtlich nicht ansteht, ist er auch über längere Strecken heranzubringen, soweit dann Deiche mit flacheren Böschungsneigungen oder massiven Decken nicht wirtschaftlicher sind. Guter Kleiboden ist insbesondere für die obere Decklage erforderlich, was vor allem für die Erd-

deiche mit Sandkern gilt. Hier ist sorgfältig darauf zu achten, daß die planmäßige Kleidecke an keiner Stelle unterschritten wird. Dazu ist außer einer lückenlosen Bauüberwachung eine gesonderte Bauabnahme des Sandkerns mit nivellitischer Prüfung der
Kernhöhe erforderlich. Auf der Außenböschung und im Bereich der Deichkrone soll eine
mindestens 1,3 m starke Kleiauflage eingebaut werden, binnen mindestens 1,0 m. Bei
sandigem Boden ist die Decke noch stärker auszubilden (Küstenausschuss Nord- und
Ostsee, 1962).

Beobachtungen und Aufgrabungen haben erkennen lassen, daß als Folge anhaltender Trockenheit Risse und Spalten in der Kleidecke entstehen, die bis zum Sandkern reichen. Diese Erscheinung ist sorgfältig zu verfolgen und ihr durch Verfüllen mit Kleiboden zu begegnen. Auch kann ihr durch eine größere Dicke der Kleidecke oder beim Deichneubau durch Verwendung von Klei mit geringem Wasseranteil begegnet werden.

#### 4.3.4 Anlagen im und am Deich

Erfahrungen: Wenn auch die Zahl der Anlagen im und am Deich seit 1962 (Ingenieur-Kommission, 1962) erheblich vermindert worden ist, so sind sie doch mancherorts noch der Ansatzpunkt von Böschungsschäden gewesen. Zwar stehen an und in erhöhten sowie verstärkten Hauptdeichen keine Gebäude mehr, jedoch verläuft an der Unterweser und Unterelbe der noch nicht ausgebaute Hauptdeich stellenweise noch in beengter Ortslage. Dazu haben die hier entstandenen zahlreichen ungeregelten Überwegungen der Deichanwohner die Deichverteidigung behindert.

Auch Rampen und Treppen über den neuen Deich sind noch nicht überall so hergerichtet worden, daß die Brandungswirkung sie und die Grasnarbe nicht beschädigt (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1962). Weidezäune, welche die Deichfläche für die Beweidung in Koppeln unterteilen, sind nicht entsprechend den Grundsätzen der Deichunterhaltung im Winter überall entfernt worden. Sie wurden zerschlagen oder begünstigten Ausschläge in der Deichoberfläche, indem sie die Brandungswirkung verstärkten. Bei fehlender seitlicher Pflasterung war durch Viehtritt die Grasnarbe zerstört, so daß die Ausspülungen besonders groß waren. Insgesamt wurden 1976 die Erfahrungen von 1962 bestätigt (Ingenieur-Kommission, 1962).

Folgerungen: Die Sturmfluten 1976 haben erneut gezeigt, daß Anlagen aller Art im Deich in unterschiedlichem Ausmaß Gefahrenpunkte sind, deren Zahl so klein wie möglich gehalten werden muß. Die Deichbehörden sollten deshalb mehr als bisher darauf achten, daß nur unabweisbar nötige Anlagen unter strengen Auflagen (vgl. auch "Richtlinien für Verlegung und Betrieb von Leitungen im Bereich von Hochwasserschutzanlagen", Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1970) zugelassen werden. Auch Bäume sind nicht im Deichkörper anzupflanzen, da sie unter Sturmwirkung den Boden lockern und auch die Deichverteidigung behindern. Die gleichen Grundsätze müssen auch für die zweite Deichlinie gelten.

### 4.4 Deichsicherungswerke und massive Böschungsbefestigungen

Erfahrungen: Die Sicherungswerke an Schardeichen liegen bei hohen Sturmfluten unterhalb der stärksten Brandungswirkung, so daß an ihnen nur geringe Schäden entstanden sind. Jedoch wurde an einigen Stellen ihr oberer Bereich betroffen, wobei das Ausmaß der Schäden von der konstruktiven Gestalt der Befestigung abhing. Die allgemeine Erfahrung ist, daß geschlossene Decken unbeschädigt blieben, wenn sie das erforderliche Flächengewicht aufwiesen und gegen Unterspülung von der Rückseite her durch einen Sporn gesichert waren. Das zeigte sich wiederum sowohl an Decken aus Zement- oder Asphaltbeton wie auch an Bauweisen aus Setz- oder Schüttsteinen mit Zementmörtel- oder Asphaltverguß.

Offene Decken aus Betonstein-Verbundpflaster wurden dagegen mehrfach beschädigt, wofür drei Ursachen einzeln oder zusammen gegeben sein können: ein nicht ausreichendes Flächengewicht, die Verlegung auf Schlacke oder Schotter oder ein ungenügend tiefer Sporn als obere Begrenzung. Wassergefüllte Hohlräume unterhalb der Decke in einer Schotterlage üben durch Druckschlag (Führböter, 1966) von oben her durch die offenen Fugen eine Sprengwirkung von unten her aus. Solche Hohlräume stellen sich auch ein, wenn infolge Setzungen des Deichkörpers ein Gewölbe zwischen dem festen Fuß und dem oberen Betonsporn entsteht. Die bei mittleren Beanspruchungen gewählten offenen Decken mit genügendem Flächengewicht, bei denen Betonverbundsteine unmittelbar auf Klei oder mit einer Zwischenlage aus Filtergewebe verlegt waren, haben sich dagegen wiederum bewährt.

Besonders empfindlich gegen Ausspülungen des Bodens ist der Übergang von der massiven zur Kleidecke. Ein massiver Sporn von 0,25 m Tiefe – wie mancherorts eingebaut – ist nicht ausreichend. Glatte Befestigungen vergrößern dazu den Wellenauflauf, wodurch die Grasnarbe häufiger beansprucht wird.

Folgerungen: Zur Verminderung der Schäden an den Außenböschungen der Erddeiche ist es vorteilhaft, an Schardeichen die Deckwerke mit anschließender massiver Böschungsbefestigung höher als bisher meistens üblich am Deich hochzuziehen, wenn der Deich starkem Wellenangriff unterliegt. Abzuwägen ist, ob es wirtschaftlicher ist, Ausschläge in Erddeichen nach sehr schweren Sturmfluten zu beseitigen oder massive Decken herzustellen. Mit dem Ziel, unterhaltungsarme Deiche für die Deichverbände zu schaffen, ist die obere Grenze für die Befestigung von 2,0 m über MThw (Ingenieur-Kommission, 1962) auf künftig 3,0 m und bei besonders exponierter Lage auf 3,5 m über MThw zu legen.

Bei der konstruktiven Gestaltung sind die vorgenannten Erkenntnisse und geltende Richtlinien (Arbeitskreis Uferbefestigungen, 1971; Zitscher, 1973) sowie sonstige Erfahrungen (Kramer/Janssen, 1976) anzuwenden. Gegen Hinterspülung der massiven Befestigung ist ein Sporn von 0,60 m bis 0,75 m Tiefe aus Betonfertigteilen, Schotter mit Asphaltverguß o. ä. anzuordnen. Der Sporn muß wasserdurchlässig sein, um die Vernässung des Bodens oberhalb und die Zerstörung der Grasnarbe durch Viehtritt zu verhindern.

Zur Verminderung des Wellenauflaufes sind auf glatten Böschungen im oberen Bereich Rauhigkeitselemente günstig, deren Höhe jedoch 25 cm bis 30 cm betragen muß, damit sie wirksam sind. Es genügt, die Rauhigkeit in einem Streifen von 1,50 m bis 2,00 m Breite mit rd. 3,00 m Abstand vom oberen Ende der Böschungsbefestigung aufzusetzen.

Bemerkt sei hier, daß Außenböschungen, die wegen der örtlichen Gegebenheiten steiler geneigt sein müssen, bis zur Deichkrone massiv geschützt sein sollten. Die Dicke und das Material der Sicherung sind dabei um so größer bzw. schwerer und widerstandsfähiger zu wählen, je steiler die Böschung angelegt und je schwerer die Brandung ist.

# 4.5 Schäden an Schutzwerken, Deichvorland und Sommerdeichen

Erfahrungen: Am Deichvorland mit seinen wasserseitigen Schutzwerken entstanden keine nennenswerten Schäden. Diese Erfahrung wurde auch in den schweren Sturmfluten der Jahre 1962 und 1973 gemacht (Ingenieur-Kommission, 1962 u. 1976). Dagegen waren die Sommerdeiche durch die Sturmfluten stark beansprucht.

Die Sommerdeiche an der ostfriesischen Nordseeküste mit flachen, im allgemeinen 1:6 geneigten Außen- und Innenböschungen, die starker Brandungswirkung ausgesetzt sind, erlitten ausgedehnte Oberflächenschäden oder tiefe Ausschläge, wenn Gänge von Wühltieren oder Trampelpfade von Großvieh ausgewaschen wurden. Unsachgemäßes Beweiden und vernachlässigte Unterhaltung begünstigten die Schadenshäufigkeit. Sommerdeiche an der Weser mit häufig zu steilen Böschungen von 1:3 bis 1:4, die vor allem durch Überströmung an der Innenseite beansprucht werden, sind streckenweise sehr stark beschädigt oder zerstört worden, insbesondere dann, wenn der Deichboden sehr sandig war. Stark beschädigt und streckenweise zerstört wurde an der Elbe vor allem der Belumer Sommerdeich.

Sommerdeichsiele und Flutauslässe waren durch mehrfache Überflutung der Polder und nachfolgendem Wasserausstrom stark beansprucht. Mehrere Holzkastensiele an der Weser erlitten dabei erhebliche Schäden. Massive Siele an der ostfriesischen und Wurster Küste wurden völlig weggerissen oder sehr stark beschädigt. Ursachen waren die unsachgemäße Bedienung der Sielverschlüsse beim Leeren der Polder, ungenügende Sicherungen der Bauwerke gegen Um- oder Unterläufigkeit sowie große Auskolkungen vor den Sielen infolge zu leichter Böschungsbefestigungen. Die Sommerpolder auf den Weserinseln werden zusätzlich durch Flutauslässe mit einer Sohle in Höhe des Geländes entleert, wobei das ausströmende Wasser stellenweise das unbefestigte Vorland ausspülte.

Folgerungen: Eine Minderung des Wellenangriffes auf den Hauptdeich durch Vorland und den Sommerdeich kann meistens beobachtet werden. Jedoch müssen die Bau- und Unterhaltungskosten eines Hauptdeiches mit derartigen zusätzlichen Schutzwerken denjenigen gegenübergestellt werden, die ein für den Küstenschutz gleich wirksamer Schardeich mit massivem Deckwerk und Böschungsbefestigung erfordert. So ist nach den bisherigen Kostenuntersuchungen die Anlage eines Deiches mit Vorland gegenüber der Anlage eines Schardeiches mit Sicherungswerken aufwendiger (Ingenieur-Kommission, 1976; Kramer, 1977).

Sommerdeiche sollen Sommerfluten kehren und in ihrer Höhe entsprechend bemessen sein. Außen- und Binnenböschungen von Sommerdeichen unter Wellenangriff sind mit Neigungen 1:6 anzulegen. Sommerdeiche, die ohne Wellenangriff nur überströmt werden, können eine steilere äußere Neigung haben, jedoch ist dabei die Güte des Deichbodens zu berücksichtigen.

Sommerdeichsiele und -flutauslässe sind mit ausreichendem Querschnitt und so zu bemessen, daß die Abflußgeschwindigkeiten beim Leeren des Polders unterhalb der Erosionsgeschwindigkeit bleiben (Ingenieur-Kommission, 1962).

Um künftig die Schäden an Sommerdeichen durch schwere Sturmfluten zu vermindern, müssen sie mehr als bisher ordnungsgemäß unterhalten werden.

#### 4.6 Überschwemmungen

Erfahrungen: Die Deichbrüche an der Unterelbe haben zur Überschwemmung von rd. 6000 ha bewohnter, landwirtschaftlich genutzter Fläche hinter den Hauptdeichen geführt (Abb. 18). Hinzu kommen weitere rd. 8000 ha in Nordkehdingen hinter dem im Bau befindlichen Hauptdeich sowie in Südkehdingen auf dem unbedeichten Krautsand und Asseler Sand. Weitere rd. 5000 ha sind in Sommerpoldern des übrigen niedersächsischen Küstenbereiches überflutet worden.

Die Überschwemmungen hinter dem Hauptdeich an der Unterelbe haben örtlich zu schweren Schäden geführt. Wenn auch glücklicherweise keine Menschenleben zu beklagen waren, so ertrank doch zahlreiches Groß- und Kleinvieh. Außerdem erlitten zahlreiche Gebäude starke Schäden, wenn sie mehrere Tage im Wasser standen. Der noch zur Zeit der Überschwemmungen einsetzende Frost verursachte zusätzliche Schäden am Mauerwerk. Die dem Wasser ausgesetzten Wohnungseinrichtungen waren meistens als Totalschaden zu bewerten.

Aus überschwemmten, tiefliegenden Niedermoorgebieten konnte das Wasser nicht allein durch die vorhandenen Meliorationsschöpfwerke abgepumpt werden, die für derartige Wassermengen nicht bemessen sind und zum Teil auch ausgefallen waren. Zusätzliche mobile Großpumpen verstärkten die Schöpfleistung. Für das Leerpumpen von Kellern und anderen baulichen Anlagen waren die Feuerwehren tätig.

Schäden erlitten auch Straßen und Wege. Landwirtschaftliche Nutzflächen versandeten und Gräben verschlammten. Obstbaumpflanzungen wurden durch große Treibselmengen, die sich in den Zweigen verfingen, in Mitleidenschaft gezogen (Ingenieur-Kommssion, 1962).

Die Überflutung von Deichvorland und Sommerpoldern im Winterhalbjahr bringt keine bemerkenswerten Schäden, da hier die Vegetation entsprechend widerstandsfähig ist. Entschieden nachteiliger waren die Überschwemmungen für die besiedelten Wurten auf Krautsand, wo Häuser im Wasser standen und Keller und Wohnungen volliefen. Rückliegende Deichlinien haben in Nordkehdingen als zweite Deichlinie gewirkt und die Ausdehnung der Überschwemmungen begrenzt.

Folgerungen: Die Erhaltung zweiter Deichlinien (INGENIEUR-KOMMSSION, 1962) wirkt sich günstig aus, auch wenn diese sehr viel geringere Querschnittsabmessungen als die neu ausgebauten Hauptdeiche haben; dafür sind sie im Falle ihrer Wirksamkeit weniger der Brandung ausgesetzt. Deshalb sollte die Aufhebung zweiter Deichlinien hinter voll ausgebauten Hauptdeichen eine Ausnahme sein. Für sie sollten die gleichen Grundsätze der Deicherhaltung wie für die Hauptdeiche gelten (KÜSTENAUSSCHUSS NORD-UND OSTSEE, 1962).

### 5 Überprüfung der Deichhöhen im niedersächsischen Küstengebiet

#### 5.1 Allgemeines

In den sehr schweren Sturmfluten vom Januar 1976 wurden im oberen Tidebereich der Ems und im gesamten Tidebereich der Elbe (Abb. 1) die bisherigen Höchstwasserstände (Tab. 1 u. 2) überschritten. Auffallend war der überraschende Anstieg der Sturmtidenwasserstände zu Höchstwerten in der Elbe, da das Thw der Vortide sogar gering-

fügig erniedrigt war (Abb. 8 u. Anhang). In der Öffentlichkeit wurde deshalb von der "Sturmflut aus dem Stand" gesprochen. Es wurden kritische Stimmen zur Höhe der Deiche laut, vor allem auch, weil nicht zwischen den Deichen, die bereits nach den 1962 entwickelten Grundsätzen (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1962) ausgebaut worden sind, und denjenigen, die bisher noch nicht verstärkt und erhöht werden konnten, unterschieden wurde.

Für alle Deichstrecken an der Nordseeküste und den Strömen Ems, Weser und Elbe sind daher die Bemessungswasserstände und die Besteckhöhen der Deiche unter Berücksichtigung der Wellenauflaufhöhe zu überprüfen. Die Grundlage für die Überprüfung der gegenwärtigen Deichhöhen sind der Abschnitt 2, in dem die Wetterlagen, Sturmtiden und der Wellenauflauf dokumentiert sind, und der Abschnitt 3, in dem die hydrologischen Grundlagen für die Bemessungswasserstände ermittelt sind. Untersucht wird darin an verschiedenen Pegelorten vor allem das Maß der Veränderung der HHThw, das durch die Sturmtiden von See her und durch den Oberwasserabfluß von binnen her unter Beeinflussung durch die örtliche morphologische Gestaltung bestimmt wird.

An einer größeren Zahl von Pegelorten als 1962 konnten 1976 die höchsten Wasserstände und der Verlauf der Sturmtiden registriert werden. Lagen 1962 nur einzelne Beobachtungen des Wellenauflaufes aufgrund von örtlichen Treibseleinmessungen vor, so sind 1976 die Treibselgrenzen an langen Deichstrecken eingemessen worden. Hinzu kommt, daß 1976 vereinzelt Wellenmesser und an Deichen Wellenauflauf-Meßgeräte im Einsatz waren (s. Abschn. 2.3.2).

## 5.2 Überprüfung der Besteckhöhen der Seedeiche

Die geltenden Sollhöhen der Deiche und die Bemessungswasserstände sind von der niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung nach den "Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962" (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1962) festgesetzt worden. Sie wurden 1973 in den "Generalplan Küstenschutz Niedersachsen" (Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1973) übernommen, der seither maßgebend für den Ausbau der Küstenschutzwerke ist.

Für die Überprüfung der Bemessungswasserstände wurde von dem am Pegel gemessenen HHThw ausgegangen. Nach dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch ist das HHThw in Ostfriesland und im Jadebusen am 13. 3. 1906, in Cuxhaven am 3. 1. 1976 und an allen anderen niedersächsischen Küstenpegeln am 16. 2. 1962 eingetreten. Zum HHThw wurde ein Sicherheitszuschlag addiert, der sich aus dem säkularen Meeresanstieg bis zum Jahre 2065 und einer noch möglichen Springerhöhung zusammensetzt. Der säkulare Meeresanstieg kann nach ROHDE (1977) mit 25 cm/Jahrhundert angesetzt werden, so daß dem HThw von 1906 noch 40 cm, dem HThw von 1962 noch 26 cm und dem HThw von 1976 noch 22 cm für den säkularen Meeresanstieg bis zum Jahre 2065 zu addieren sind. Der zweite Anteil des Sicherheitszuschlages, die noch mögliche Springerhöhung, wird als Differenz zwischen dem größten Springtidehochwasserstand mit Berücksichtigung der täglichen Ungleichheit und dem vorhergesagten astronomischen Tidehochwasser zum Eintrittszeitpunkt des HHThw verstanden. In Abbildung 15 sind die so ermittelten möglichen Springerhöhungen für die Sturmtide 1906 am Pegel Emden, für die Sturmtide 1962 am Pegel Bremerhaven und für die Sturmtide 1976 am Pegel Cuxhaven dargestellt.

Tabelle 11

			HTh	<b>w</b>		Wass	essu erstä 965	inde	1976				ing d	de		ge		
Kustenabschnitt	Pegelort bzw. (Zwischen- station)	z nach Pegel - z unterlagen	durch Vergleich	Jahr	Z HThw 1976	Z Ausgangs - Z wasserstand	Sicherheits - Zuschlag	Z Bemessungs - + wasserstand	Differenz Bemessungs - wasserstand - HThw 1976	Z Ausgangs – Z wasserstand	zugrunde gelegtes HThw im Jahre	säkulare Hebung bis 2065	mögliche Springerhöhung	Z Ergebnis der	Differenz zum Bemes sungswasserst. 1965	Z Solldeichhöhen Z nach Generalplan	Z Vorschlag für künftige Z Solldeichhöhen	Verbleibende Höhe für Wellenauflauf über
_		cm	cm		cm	cm	cm	cm	cm	cm		cm	cm	cm	cm 16	cm	cm 18	19
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15-9	17	18	18-
4	F1	£10		1001	1,50	F22	50	7+8 582	9-6	518	1906	40	10	568	-14	760	760	17
	Emden Knock	518 496		1906 1906	458 431	532 510	50	560	129	496	1906	40	10	546	-14	770	770	21
e e		476	480	1906	721	494	50	544	-	480	1906	40	10	530	-14	800	800	25
Kuste	(Pilsumer Leuchtturm) Leybuchtsiel	_	501	1906	431	490	50	540	109	484	1962	26	50	560	+20	750	750	21
	Norddeich	468	301	1906	418	488	50	538	120	468	1906	40	10	518	-20	780	780	24
esische	Accumersiel	700	486	1906	406	500	50	550	144	486	1906	40	10	536	-14	710	710	16
esi	Bensersiel	477	100	1906	422	491	50	541	119	465	1962	26	50	541	0	710	710	16
USTIF	Neuharlingersiel	481		1906	430	491	50	541	111	458	1962	26	50	534	- 7	750	750	20
S	Harlesiel	101	496	1906	444	477	50	527	83	470	1962	26	50	546	+19	650	750	22
	Wangersiel		465	1962	434	472	50	522	88	465	1962	26	50	541	+ 19	740	740	21
	Wilhelmshaven	522	1.0	1962	487	522	55	577	90	522	1962	26	50	598	+21	730	730	15
a	Dangastersiel		550	1906	492	564	55	619	127	530	1962	26	50	606	-13	750	750	13
age	Vareler Schleuse	561		1906	484	575	55	630	146	540	1962	26	50	616	-14	730	800	17
1	Schweiburger Siel	575		1906	534	589	55	644	110	557	1962	26	50	633	-11	850	850	20
	(Eckwarderhörne)		513	1906	-	527	55	582	-	522	1962	26	50	598	+16	890	890	30
er	Fedderwardersiel	525		1962	488	525	50	575	87	525	1962	26	50	601	+26	750	830	25
/es	(Burhave)		525	1962	-	525	50	575	-	525	1962	26	50	601	+26	830	830	25
P V	Bremerhaven	535		1962	518	535	60	595	77	535	1962	26	50	611	+ 16	800	800	20
Außenweser	Wremertief		545	1962	-	545	50	595	-	545	1962	26	50	621	+26.	830	830	23
_	Spieka - Neufeld	510	545	1962	510	545 494	50	595 544	85 34	545 510	1962 1976	26	30	621 562	+26	770	790	23
Elbe	Cuxhaven Otterndorf	510	-	1976	510	513	60	573	31	542	1976	22	30	594	+ 21	770	810	-
ш	Otterndort	542	-	1976	542	515	00	3/3	31	272	1770	22	30	3/1	+ 21	110	010	20
	Borkum, Fischerbalje	406	-	1906	347			497	150	383	1962	26	50	459	-38	605	605	10
e	Juist	412		1962	(376)		-	493	117	412	1962	26	50	488	- 5	660	660	110
Jus	Norderney		430	1906	386			493	107	412	1962	26	50	480	-5	750	750	25
sche Juseln	Baltrum		433	1906	396		-	492	96	417	1962	26	50	493	+1	580	700	20
6515	Langeoog		436	1906	382			505	123	424	1962	26	50	500	-5	620	620	11
frie	Spiekeroog		424	1962	(397)			514	117	424	1962	26	50	500	- 14	645	645	13
Ostfri	Wangerooge		439	1906	412			497	85	420	1962	26	50	496	-1	600	600	10

Das Ergebnis der Überprüfung der Bemessungswasserstände und Sollhöhen der Seedeiche ist in Tabelle 11 für Pegelorte an der Küste und einige wichtige Zwischenstationen zusammengestellt:

Die Spalten 3 bis 5 enthalten die HHThw, wobei zwischen den am Pegel gemessenen und den durch Vergleich ermittelten Werten unterschieden wird. In Spalte 6 sind die HThw 1976 zusammengestellt.

Die derzeit gültigen Bemessungswasserstände mit zugehörigen Ausgangswasserständen und Sicherheitszuschlägen sind in den Spalten 7 bis 9 aufgelistet. Der Vergleich in Spalte 10 zwischen den gültigen Bemessungswasserständen und den HThw 1976 zeigt, daß die Bemessungswasserstände am 3. 1. 76 an den Seedeichen nicht erreicht wurden. Das Maß der Unterschreitung nimmt von Ostfriesland bis zur Elbemündung von mehr als 1 m auf rd. 0,3 m ab.

In den Spalten 11 bis 16 ist das Ergebnis der Überprüfung der Bemessungswasserstände dargelegt. Zum Ausgangswasserstand in Spalte 11, im allgemeinen das HHThw, wird der säkulare Meeresanstieg (Spalte 13) und die mögliche Springerhöhung (Spalte 14) als Sicherheitszuschlag addiert. Für Ostfriesland und Jadebusen wurde zusätzlich geprüft, ob das HThw von 1962 plus säkularer Meeresanstieg 1962/2065 (26 cm) plus mögliche Springerhöhung (Abb. 15) am 16. 2. 62 von 50 cm oder das HHThw von 1906 plus säkularer Meeresanstieg 1906/2065 (40 cm) plus mögliche Springerhöhung am 13. 3. 1906 von 10 cm den größeren Wert ergibt. Dieser ist in Spalte 15 eingetragen. Es zeigt sich, daß der auf diese Weise ermittelte Vergleichswert nur um 10 bis 20 cm von den 1965 festgelegten Bemessungswasserständen abweicht. Es wird derzeit nicht für erforderlich gehalten, die Bemessungswasserstände um diese relativ geringen Beträge zu verändern. Ausreichende Bemessungswasserstände bestätigt auch die schon genannte Untersuchung "Über zeitliche Anderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste" (FÜHRBÖTER, 1976). Sie ergibt aufgrund der langjährigen Pegelbeobachtungen in Wilhelmshaven, Cuxhaven und Husum, daß das vorausberechnete 100jährige Hochwasser nur im Dezimeterbereich von dem eingetretenen HHThw abweicht.

Die Spalten 17 bis 19 enthalten Angaben zu den Solldeichhöhen. Eine Erhöhung der Sollhöhen der Seedeiche erscheint bei Harlesiel, Vareler Schleuse, Fedderwardersiel, Spieka-Neufeld, Cuxhaven sowie auf Baltrum erforderlich, weil hier die zwischen Bemessungswasserstand und alter Solldeichhöhe verbleibende Höhe für den Wellenauflauf nicht ausreicht. Auch an einigen anderen Seedeichen sind die für den Wellenauflauf verbleibenden Höhen (Spalte 19) scheinbar gering, wenn man sie mit den – allerdings unsicheren – Angaben über die Höhe der Treibselgrenze (Tab. 5) vergleicht. Unter Berücksichtigung der Lage des Deiches zur Hauptwindrichtung sowie von Breite und Höhe des Vorlandes vor den Deichen dürften die in Spalte 19 ausgewiesenen Höhen für den Wellenauflauf jedoch ausreichend sein. Sollte es vereinzelt zu einem Wellenüberschlag einzelner, höchster Brandungswellen kommen, die auf der Binnenböschung auslaufen, so bringt das keine Gefahr für einen beiderseits flachgeböschten Seedeich.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die im "Generalplan Niedersachsen" von 1973 angegebenen, bereits im Jahre 1965 festgelegten Besteckhöhen der Seedeiche bis auf einige Strecken beibehalten werden können. Die künftige Entwicklung von Sturmtiden-Wasserständen und Wellenauflauf ist jedoch kritisch zu beobachten.

# 5.3 Überprüfung der Besteckhöhen der Stromdeiche

#### 5.3.1. Besonderheiten und örtliche Einflüsse

Während an der Nordseeküste die langfristige Entwicklung der Sturmflutwasserstände als naturgegeben zu betrachten ist, spielen in den Tideflüssen neben den natürlichen morphologischen Gegebenheiten auch deren Veränderungen durch Eingriffe des Menschen eine bedeutende Rolle. Außerdem ist eine ungünstige Kombination von Extremsturmfluten und Oberwasserabflüssen zu berücksichtigen.

Die Einflüsse auf die einlaufenden Tide- und Windstauwellen infolge Veränderungen der Sturmflut-Durchflußquerschnitte im Zuge verschiedener Baumaßnahmen sind qualitativ in Abschnitt 3.2 beschrieben worden. Die entsprechenden quantitativen Auswirkungen und der Einfluß des Oberwassers können einzeln oder im Zusammenwirken hinreichend genau nur durch Modellversuche ermittelt werden. Die "Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962" (Küstenausschuss Nord- und Ost-

9	-
	e
	$\equiv$
•	e
	9
	a
1	-

	Bemerkungen	28		rechtes Ufer	linkes Ufer	rechtes Ufer	:	linkes Ufer	rechtes Ufer	linkes Ufer	beide Seiten		rechtes Ufer	linkes Ufer	rechtes Ufer	linkes Ufer	rechtes Ufer	linkes Ufer	: :	:	:	OW verursacht	Seedeich s. Tab.11		linkes Ufer			:		: :		: :				:		:	:			For Benearing ist Binnen-HW malfgebend
	Zne 1ettenz	27	26-25							50	50								20				20	04	30	30		20		04			_		_	40	_	20	20			
	oz künftige Soll- 3∓deichhöhen	26								670								_	200				260		820	820	-	810		800		-		800		800	_	750	770			1050
	- Apieblioza 3001 nadod 5001 nadod	25		260	850	730	_		_	620	000		290	740	_	200	_			_	720		_	_	260	700		290		260		$\overline{}$	_	_	_	760	_	730	750	-	_	
	A Vorschlag für kün f. S Ligen Bemessungs T Wasserstand	24		582	588	596	286	600	595	571	539		595	595	602	612	610	621	630	626	645		562	294	617	609	700	618		635		645	654	658	5/3	682	1	710	464	741	768	
She	Differenz Saum BW 1965	23	22-12	-14	-10	-12	-5	-5	+26	+31	9-		+16	+8	+5	0	-2	0	+1	+5	6+		+18	+21	+34	414		+23		+15		+17		_	_	+12	_	04+	454	+71	+98	
eic	å sindepr∃ặg	22	13-520-51	568	578	584	591	595	565	571	533		611	603	607	612	617	621	631	631	651		562	594	617	609	4	618		635		645	654	658	010	682	1	710	424	741	768	
μ	S Spring.	21		10	10	10	10	10	10	01	10		99	50	50	20	20	20	20	20	20		30	30	30	3.0	3	30		30		30	30	30	30	30		32	32	32	32	
2	Spkulare S Hebung B S Hebung	20		04	04	04	04	40	40	04			26	26	26				_	_	56		22		22	22	_	22		22	_	_	_	22 00	4	22						╛
S	Personner control of the control of	19	\$1-91-41	518	528	534	541	545	545	521	483		535	527	531	536	541	245	555	555	575		510	545	565	550	566	566	583	583	280	200	602	000	170	630	640	600	692	-	736	
ler		$\mathbf{-}$		0	4	2	9	0	6	17	52		0	0	0	0	0	0	0	_	0		0	0		00	_	_	0	0					_			28				
	g der Oberw ein bei	17		450	450	450	450	450	450	450	450		1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200		2150	2150	2150	0150	2450	2150	2150	2150	2150	2150	2150	2750	0017	2150	2150	2150	2150	2150	2150	
Jel	We without the manual series of the manual series o	16		0	0		_	-		_	156		0	10		13	15				53		0			0	+	_	0	0	0	0			1			0 0			0	
150	UP HH TH WENT	15		$\rightarrow$		_					1906		1962	1962	1962		1962		1962		1962			1976	9661	1076		1976	1976	1976						1976		1976			1976	╛
	20	17	_	_	524	525	522	(200)	204	431	275	_	535	517	(520)	(523)	(526)	629	525	-	522		510	545	565	145	566	(566)	583	(583)	280	(590)	209	909	027	(630)	645	640	641	049	643	╛
Š	Ditterenz Bemes- 2 Sungswasserst. – 3 Tet wATH			_	115		111	_		_	124		77	81				_	_	_	129		34	_	18							_	_	_	22	1	-	30		-	27	╛
2	Semessungs -	12	6+8	582	588	206				540	539		595	595		- 612	_	_	630	979	645		244	573	583	588	+	565		620		625	630	643	900	670	1	010	670	670	670	4
tände u	serstände 1965 gen zum Sicherheits- zuschlag	11		Das Sicherheits-	maß an den ein-	zeinen Pegein	menstellung der	Deichhöhen und	seretande von	Mai 1965	entnommen.		Doe Cicharhaite		_	wurde der Zusam	Deichhöhen und	Bemes sungswas-	Mai 1965	entnommen			Das Sicherheits-	maß an den ein-	zeinen Pegein wurde der Zusam	menstellung der	Bemessungswas	serstande von	entnommen.								Differenz zwi -	schen Spatte				
messungswasserstände und Sollhöhen der Stromdeiche	Bemessungswasserstände Erläuterungen Zuscherhe Ausgangs- Sicherhe wasserstand zuschli	10		HThw1906 +14 cm	HThw1906 + 14 cm	HThw 1906 + 14 cm	14cm			HThw 1962	** + 105		Modellyerough	Nr. 161 (Eingangs-	tide in Bremerha-	ven um b/ am ge-	hoht, 8,7m Aus-	bau, Oberwasser-	and Abschleusung	von Lesum, Och -	tum und Hunte)		,				> HThw 1962						Modellversuch	Sturmflut 1962	briiche	מכנוג						
SV	Sicherheits O	6		20	20	09	09	06	63	20	09		45	53	09	09	09	09	09	55	20	45	20	00	09	09	3	09		09	1	55	50	200	200	20	00	20	3			
l g	A setebiluh a sete	æ		532	538	536	536	510	206		479		550	545	245	552	559	561		571		909			523	528	2	535		260				573	900	620	200	200				
Su	S Oberwas - S Serabilufi	7		196	196	196	196	397	397	397	700		1105	1105				1105	1105	1105	1105	1105	1042		1042	1012	1042		1042	1042	1042	0,0	1042	1040	7401	1042	07/07	1040				
les	WATH SE	9			473	_	485	_	_		415		518	514					526			533		_	_	247	566		583		260				170			040	641	049	643	
E L	)ahr	2		1906	1906	1906	1906	100,	1962	_	1976		1962	1962					1976		1962	1881	1976		1976	1110	1976		1976		1976	_	_	1076	_	1076	1	1076	_	-	1976	1855
Be	T Oberwas-		$\overline{}$	_			196			397			1200	1200						249	522 1200				485		485		485	$\rightarrow$	485		485	485	-	485		485			485	
	Jeged b SE	m		518	524	522	522	1	206	470	415		535	517				529	526	530	522	781	510	545	565	+	566		583		280	-	602	000	170	645	54.0	634			643	686
	Pegelort bzw. (Zwischen-station)	1 2		Emden	Pogum		Terborg		Leerort	Weener	Herbrum		Bremerhaven	Nordenham	(Dedesdorf)	(Rodenkirchen)	(Sandstedt)	<b>Ve</b> Brake		Farge	Vegesack	Bremen Gr.Weserbr.	Cuxhaven	Otterndorf	Ostesperrwerk	(Faulenhofe)	Brockdorf	(Freiburg)	Glückstadt	(Wischhafen)	Kollmar		1P Grauerort	_	Lunort	(Hinterbrack)	St. Pauli	70llengrinker	Jimenausperrwerk	Elbstorf	Geesthacht	Hohnstorf

SEE, 1962) sahen deshalb vor, den Bemessungswasserstand für die Stromdeiche aus den damals vorliegenden oder geplanten Modellversuchen für die Ems, Weser und Elbe abzuleiten.

Die Januar-Sturmfluten 1976 haben gezeigt, daß die bestehenden und geplanten Deichhöhen an den Strömen einer eingehenden Überprüfung bedürfen. Im Gegensatz zu den Seedeichen ist es an Strom- und Flußdeichen nur selten möglich, durch nachträgliche Maßnahmen wie Vorlandgewinnung oder durch Sommerdeiche das in der Besteckhöhe enthaltene Maß für den Wellenauflauf zu vermindern, der im mittleren und oberen Tidebereich der Ströme ohnehin deutlich geringer angesetzt werden kann als an den Seedeichen. Die Sicherheit gegen unvorhergesehene, wasserstandshebende Effekte muß daher für die Stromdeiche von vornherein größer sein.

Als maßgebende Sturmtiden für die Überprüfung der Bemessungswasserstände an Ems, Weser und Elbe wurden die Tiden angenommen, die an den Eingangspegeln Emden, Bremerhaven und Cuxhaven die höchsten Bemessungswasserstände (s. Abschn. 4.1) ergeben haben. Das sind (Abb. 15):

für die Ems die Sturmtide vom 12./13. 3. 1906,

für die Weser die Sturmtide vom 16./17. 2. 1962 und

für die Elbe die Sturmtide vom 3. 1. 1976.

Die Frage, mit welchem Oberwasserabfluß diese Sturmtiden kombiniert werden müssen, um ausreichend überflutungssichere Besteckhöhen zu gewinnen, kann nicht exakt beantwortet werden. Es gibt zwei für die Praxis geeignete Festlegungen. Zum einen könnte der größte Oberwasserabfluß während einer mindestens 2 m über MThw erhöhten Sturmtide seit 1900 angesetzt werden. Nach diesem Verfahren wäre als Oberwasser für die Ems 450 m³/s, für die Weser 1200 m³/s und für die Elbe 2150 m³/s anzusetzen (Tab. 7, 8 und 9). Zum anderen könnte die Oberwassermenge durch eine Häufigkeitsanalyse der Hochwasserabflüsse an dem ersten tidefreien Abflußpegel bestimmt werden, wenn man das Wiederkehrintervall vorgibt. Der seit 1900 dritthöchsten Sturmtide in der Elbe am 21. 1. 76 ist das Binnenhochwasser zwischen dem 20. 1. und 30. 1. 76 bei Neu Darchau zuzuordnen, dessen Hochwasserspitze am 26. 1. 76 2117 m³/s betrug. Dieser Abfluß entspricht einem zwei- bis dreijährigen Hochwasser. In dieser Größenordnung liegt auch die Jährlichkeit der vorher angegebenen Hochwasserabflüsse an Weser und Ems.

Das Ergebnis der Überprüfung der Bemessungswasserstände und Sollhöhen der Stromdeiche ist in Tabelle 12 dargestellt:

Die Spalten 3 bis 6 enthalten die HHThw mit zugehörigem Oberwasserabfluß am oberen tidefreien Abflußpegel sowie die HThw von 1976.

Die durch Erlaß des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1965 festgelegten Bemessungswasserstände mit ihren Grundlagen sind in den Spalten 7 bis 12 aufgelistet. Der Vergleich zwischen den zur Zeit gültigen Bemessungswasserständen und den Thw-Werten vom 3./4. 1. 76 in Spalte 13 zeigt, daß die Bemessungswasserstände in der Elbe bis auf wenige Dezimeter erreicht, in Ems und Weser dagegen um 0,8 bis 1,2 m unterschritten wurden.

Für die Überprüfung der Bemessungswasserstände in den Spalten 14 bis 23 wurde von den in Tabelle 11 für die Stromeingangspegel Emden, Bremerhaven und Cuxhaven ermittelten Werten für Ausgangswasserstand, säkularen Meeresanstieg und mögliche Springerhöhung (Abb. 15) ausgegangen. Die Ausgangswasserstände oberhalb der Eingangspegel (Spalte 19) stimmen in der Regel mit den beobachteten Thw der maßgebenden Sturmtide nicht überein, da der Einfluß der seitherigen oder noch geplanten Ausbaumaßnahmen (Spalte 16) und der Einfluß des maßgebenden Oberwassers (Spalte 18) auf die Wasserstände zu berücksichtigen waren. Die Werte für den säkularen Meeresanstieg (Spalte 20) und die mögliche Springerhöhung (Spalte 21) wurde grundsätzlich bis zur Tidegrenze in gleicher

Größe wie an den Stromeingangspegeln angesetzt. Das Egebnis der Überprüfung der Bemessungswasserstände ist in der Spalte 22 dargetellt. Eine Verringerung der zur Zeit gültigen Bemessungswasserstände aufgrund der Überprüfung wird nicht erwogen; jedoch wird für einige Deichstrecken an Ems und Weser sowie an der gesamten Elbe eine Erhöhung der Bemessungswasserstände vorgeschlagen.

Auf den gleichen Strecken sind auch die Sollhöhen der Stromdeiche (Spalten 25 bis 28)

anzuheben (s. Abschnitte 4.3.2 bis 4.3.4).

## 5.3.2 Überprüfung der Besteckhöhen an der Ems

Die vorgeschlagenen künftigen Bemessungswasserstände an der Ems (Tab. 12) sind aufgrund der Sturmtide vom März 1906 bei Emden – allerdings mit einem Oberwasser von 450 m³/s – bestimmt worden. Ausgegangen wird von den für die Dollarthafenplanung in den Jahren 1976 und 1977 ausgeführten neuen Modellversuchen (Bundesanstalt für Wasserbau, 1977). Die älteren Versuchsergebnisse des Franzius-Instituts von 1954 (Hensen, 1954), die z. T. den Bemessungswasserständen von 1965 zugrunde lagen, sind hierfür nur bedingt geeignet, weil für die Modelleichung keine Sturmtidedaten bei geschlossenen Deichen vorlagen.

Das neue hydraulische Ems-Modell wurde nach der Sturmtide vom 3./4. 1. 76 geeicht. Eine Versuchsreihe wurde für den derzeitigen Ausbauzustand mit einer um 1,0 m erhöhten Sturmtide vom 4. 1. 76 bei Pogum und variablen Oberwassermengen von 43 bis 170 m³/s (wie bei der Sturmtide vom 4. 1. 76), 300 m³/s und 700 m³/s gefahren. Das HHThw in Pogum (1906) liegt um rd. 50 cm über dem Scheitelwasserstand am 4. 1. 76. Für die Überprüfung des Bemessungswasserstandes wurde deshalb eine Scheitellinie konstruiert, die in der Mitte zwischen den Modellsturmfluten 1976 Natur und 1976 + 1,0 m bei Pogum liegt (Abb. 12, untere gestrichelte Linie). Diese Linie dürfte annähernd die Scheitellinie einer Sturmtide wie am 13. 3. 1906 für den heutigen Ausbauzustand wiedergeben. Zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes der Sturmtide vom 4. 1. 76 flossen der Ems bei Herbrum 114 m³/s Oberwasser zu. Ein erhöhtes Oberwasser von 450 m3/s wird insbesondere zwischen Leerort und Herbrum eine Hebung der Sturmtiden-Wasserstände hervorrufen. Das Maß dieser zusätzlichen Hebung ist durch die neuen Modellversuchsergebnisse vorgegeben und in Abb. 12 (obere gestrichelte Linie) eingetragen. Dieser Scheitelwasserstandslinie (Ausgangswasserstand) sind der säkulare Meeresanstieg vom Zeitpunkt des HHThw im Jahre 1906 bis zum Jahre 2065 (40 cm) sowie die mögliche Springerhöhung (10 cm) hinzuzurechnen. Das Ergebnis dieser Adition ist in Abb. 12 übernommen worden. Die hier vorgeschlagenen künstigen Bemessungswasserstände (Tab. 12, Sp. 22) liegen für die rechtsseitigen Emsdeiche zwischen Pogum und Papenburg und für die linksseitigen Emsdeiche zwischen Leerort und Papenburg über den durch Erlaß 1965 festgelegten Werten.

Dem Verlauf der künftigen Bemessungswasserstände folgend, sollten auch die Solldeichhöhen (Tab. 12, Sp. 26) im Bereich Weener bis Herbrum um rd. 0,5 m angehoben und an die Sollhöhen der neuen Deiche unterhalb Weener angeglichen werden.

## 5.3.3 Überprüfung der Besteckhöhen an der Weser

Wie bereits in Abschnitt 3 erläutert wurde, haben die Sturmfluten vom Januar 1976 für die Weser keine neuen Erkenntnisse erbracht. Insofern kann bei der Überprüfung der Bemessungswasserstände auf den gleichen Modellversuch Nr. 161 des Franzius-Instituts der TU Hannover aus dem Jahre 1959 (Hensen, 1959) zurückgegriffen werden, wie das bereits 1965 geschehen ist. Allerdings ist aus systematischen Gründen die Eingangstide bei Bremerhaven nicht mit NN +5,50 m wie im Modellversuch Nr. 161, sondern mit NN +5,35 m, wie am 16. 2. 62 eingetreten, anzusetzen (Abb. 13, mittlere gestrichelte Linie). Für alle Weserpegel wird mit einer säkularen Hebung von 26 cm und einer möglichen Springerhöhung von 50 cm, wie für den Pegel Bremerhaven in Tabelle 11 angesetzt, gerechnet. Die Addition der um 15 cm verringerten Wasserstände aus dem Modellversuch Nr. 161 und des Sicherheitszuschlages von 76 cm für Meeresanstieg und Springerhöhung ergibt Wasserstände, die maximal 16 cm über den mit Erlaß 1965 festgelegten Bemessungswasserständen liegen (Tab. 12, Sp. 23). Die geringfügigen Unterschiede rechtfertigen keine Änderung der zur Zeit gültigen Bemessungswasserstände.

Eine Erhöhung der niedersächsischen Weserdeiche um 20 cm erscheint nur im Bereich Elsfleth wegen der geringen verbleibenden Höhe für den Wellenauflauf zwischen Bemessungswasserstand und Solldeichhöhe 1965 angebracht (Tab. 12, Sp. 27).

#### 5.3.4 Überprüfung der Besteckhöhen an der Elbe

In Abschnitt 3.1 ist für Cuxhaven nachgewiesen, daß am 3. 1. 76 der höchste jemals gemessene Wasserstand eingetreten ist und die größten Gesamtstauwerte der Sturmfluten von 1825 und 1962 um rd. 10 cm überschritten wurden. Den Ausführungen in Abschnitt 4.1 ist zu entnehmen, daß für die Überprüfung der 1965 festgelegten Bemessungswasserstände an der Elbe das HHThw vom 3. 1. 76 in Cuxhaven und damit für die gesamte Tide-Elbe maßgebend ist (Tab. 12).

Diese Sturmtide, die mit einem sehr geringen Oberwasserabfluß zusammengetroffen ist, ist nach Abschnitt 4.3.1 mit einem Oberwasserabfluß von 2150 m³/s zu überlagern. Den sich so ergebenden Ausgangswasserständen ist ein Sicherheitszuschlag von 22 cm (säkulare Hebung 1976 bis 2065) und 30 cm mögliche Springerhöhung hinzuzufügen (Abb. 15).

Die Sturmtiden vom Januar 1976 sowie die früheren Sturmtiden von 1973 und 1974 (Abb. 14), die alle ohne Deichbrüche – die im Verhältnis zu 1962 kleinen Deichbrüche am 3. 1. 76 haben den Wasserstand kaum beeinflußt –, aber mit sehr unterschiedlichen Oberwassermengen abgelaufen sind, weisen zwischen Glückstadt und St. Pauli ein ähnliches Steigungsmaß der Scheitellinien auf. Der Oberwassereinfluß auf die Wasserstände ist bei diesen Sturmtiden unterhalb von Hamburg offensichtlich vernachlässigbar klein gewesen. Oberhalb von Hamburg ist die Höhe des Sturmflutscheitels entscheidend von der Oberwassermenge abhängig, wie ein Vergleich zwischen den Scheitellinien der Sturmtiden von 1973 und vom 3. 1. 76 einerseits und denen der Sturmtiden vom 21. 1. 76 und 18. 12. 74 andererseits zeigt. Zwischen St. Pauli und Geesthacht könnte die Sturmtide vom 3. 1. 76 bei einem Oberwasserabfluß von 2150 m³/s einen Scheitellinienverlauf erreichen, der ein ähnliches Steigungsmaß wie die Sturmtide vom 21. 1. 76 aufweist.

Unterhalb von Hamburg wäre den so ermittelten Ausgangswasserständen der bereits erläuterte Sicherheitszuschlag von 52 cm hinzuzufügen. Die sich ergebenden Werte würden generell 20–25 cm oberhalb der 1965 festgelegten Bemessungswasserstände (Tab. 12, Sp. 23) liegen.

Oberhalb von Hamburg kann der Sicherheitszuschlag, der den in Abb. 14 gestrichelt

dargestellten Ausgangswasserständen hinzuzufügen ist, wegen der Tidewellenreflektion im Hamburger Stromspaltungsgebiet geringer als in Cuxhaven angesetzt werden. Dennoch könnten die vorgeschlagenen künftigen Bemessungswasserstände deutlich höher als die 1965 festgelegten Werte liegen. Wenn für den Wellenauflauf 0,4 m als ausreichend angesehen werden, müßten die Solldeichhöhen zwischen Bunthaus und Elbstorf um rd. 0,2 m angehoben werden. Der Hamburger Elbdeich bei Bunthaus weist eine Sollhöhe von 7,30 m auf, die mit derjenigen des niedersächsischen Anschlußdeiches ungefähr übereinstimmt. Es ist daher unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Elbe-Modellversuche, die gegenwärtig von der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste in Hamburg-Rissen – im Auftrage des Bundes und der Küstenländer ausgeführt werden, zu prüfen, ob die Bemessungswasserstände der Elbe entsprechend anzuheben sind.

#### 5.3.5 Zusammenfassung

Die Überprüfung der 1965 festgesetzten Besteckhöhen hat ergeben, daß

- 1. für die Deiche im oberen Bereich der Tide-Ems das Besteck 1977 um 0,5 m erhöht werden muß,
- 2. für die Weser nur eine neue Besteckhöhe im Bereich des Pegels Elsfleth mit +0,2 m erforderlich ist und
- 3. für die Elbe unterhalb von Hamburg eine generelle Anhebung des Bestecks um 0,2 bis 0,4 m und oberhalb von Hamburg um mindestens 0,2 m erforderlich ist, wobei letzterer Wert als Mindestwert anzusehen ist, der nach den Ergebnissen der gegenwärtigen Elbe-Modellversuche ggf. erhöht werden muß.

Bei der Überprüfung wurden die ungünstigsten astronomischen Bedingungen (Springtide), die säkulare Hebung bis zum Jahre 2065, der größte beobachtete Gesamtstau und der Einfluß des Oberwasserabflusses mit der Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in zwei bis drei Jahren berücksichtigt. Insbesondere hinsichtlich des Gesamtstaus, der sich aus dem Windstau und möglicherweise vorhandenem Fernwelleneinfluß zusammensetzt, ist jedoch nicht mit Sicherheit auszuschließen, daß höhere als bisher beobachtete Werte auftreten.

#### 5.4 Bauhöhe der See- und Stromdeiche

Das Besteck eines Deiches legt dessen Sollabmessungen, vor allem die Deichhöhe (Tab. 11 u. 12) und die Böschungsneigungen, fest, die jederzeit gewährleistet sein müssen. Beim Neubau eines Deiches oder der Erhöhung eines bestehenden reicht es jedoch nicht, die Besteckhöhe einzuhalten. Ein Überhöhungsmaß ist in jedem Falle hinzuzufügen, um Setzungen und Sackungen des Deiches und Untergrundes auszugleichen.

Eine Erfahrung, die auch die Januar-Sturmfluten 1976 bestätigten, ist, daß die Überhöhungen der in den letzten Jahrzehnten ausgebauten Deiche bereits auf langen Strecken voll infolge Setzungen und Sackungen des Deichkörpers verbraucht worden sind. Der Bodenaufbau des Untergrundes bedingt Setzungen, die anfangs schnell, aber insgesamt sehr langfristig – oft erst Jahrzehnte nach dem Bau – abklingen. In manchen Fällen ist die weiche Konsistenz des Untergrundes mit Schlick-, Moor- und Dargschichten nicht ausreichend berücksichtigt worden. Hinzu kommen Sackungen des gespülten und geschütteten Deichkörpers durch Verdichtung des Bodens infolge seines Eigenge-

wichtes, die ebenfalls längere Zeit anhalten. Aufgrund dieses langfristigen Höhenverlustes der Deiche ist auch im Niedersächsischen Deichgesetz bestimmt, daß in zeitlichen Abständen die Deichhöhen zu überprüfen sind.

Nach Erfahrungswerten oder bei schwierigen Bodenverhältnissen durch Baugrunduntersuchungen ist ein Höhenzuschlag für Setzungen und Sackungen festzulegen. Er wird häufig mit 10–15 % der Deichhöhe über Gelände angenommen. Bei Deichen bis zu Höhen von 8 m ergeben sich so Überhöhungsmaße von rd. 1 m oder auch mehr, wenn der Untergrund nur gering tragfähig ist. Die Erfahrungen zeigen auch, daß dieses Überhöhungsmaß, z. B. beim Durchbau von Prielen, noch zu vergrößern ist, um nicht schon nach wenigen Jahren aufgezehrt zu sein.

Wenn das nach gründlicher Überprüfung und Überlegung gewählte Überhöhungsmaß nicht voll durch Setzung und Sackung verbraucht werden sollte, so ist damit eine Reserve an Besteckhöhe gegeben. Ein Zuviel an Überhöhung ist Sicherheit in der Zukunft; ein Fehlbetrag und als dessen Folge späterhin ein Unterschreiten der Besteckhöhe ist dagegen nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten auszugleichen.

Die im Besteck festgelegten Böschungsneigungen der Seedeiche, meistens 1:6 außen und 1:3 innen, sind bereits am überhöhten Deich anzuhalten. Spätere Setzungen und Sackungen ergeben dann flachere Neigungen, die der Standfestigkeit und der Deichunterhaltung dienlich sind. Sie erleichtern aber auch eine nach einem Jahrhundert vielleicht erforderliche erneute Deicherhöhung, da sich dann die Verbreiterung des Deichfußes mit allen Grunderwerbsschwierigkeiten erübrigt, ohne daß ein Deich mit unzulässig steilen Böschungen entsteht. Die gegenwärtigen Mehrkosten sind im Verhältnis zu den gesamten Deichbaukosten gering.

## 6 Schäden an den Dünen und Schutzwerken und Folgerungen für den künftigen Schutz der Ostfriesischen Inseln

#### 6.1 Schäden an den Inselschutzwerken

Die dem Festland vorgelagerten Ostfriesischen Inseln mit ihren Inselschutzwerken sind dem Wellenangriff während sehr schwerer Sturmfluten besonders stark ausgesetzt (Niemeyer, 1976a). Vor mehr als einem Jahrhundert wurde mit dem Bau von massiven Dünendeckwerken und Buhnen – zunächst auf Wangerooge und dann auf Norderney – begonnen, um die aufblühenden Badeorte zu schützen, nachdem die schützenden Dünenzüge stark abgebrochen waren (Thilo, 1952). In den Jahrzehnten danach folgten zum Schutze der Siedlungen Deckwerks- und Buhnenbauten auf Baltrum, Spiekeroog und Juist (Witte, 1970). Die Ursache waren in allen Fällen Strand- und Dünenabbrüche. Die Sandverluste waren höher als die natürlichen Sandzufuhren (Luck, 1976). Lediglich die Insel Langeoog bildete eine Ausnahme, weil hier ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Sandverlust und Sandzufuhr besteht (Homeier u. Luck, 1971). Der Ausbau der Schutzwerke wurde bis in die fünfziger Jahre dieses Jahrhunderts fortgesetzt. Später folgten nur noch Erneuerungen und Umbauten, die meistens durch Sturmflutschäden veranlaßt waren.

Strandaufspülungen zum Ausgleich von Sandverlusten und zur Sicherung der Inselschutzwerke wurden auf den Ostfriesischen Inseln 1951/52 in Norderney begonnen (Kramer, 1958/59). Sehr bald erwies sich das Verfahren der künstlichen Strandauffüllung als wirtschaftlich und wurde auf Norderney 1967 wiederholt (Luck, 1969) und auf Langeoog ebenfalls angewandt, wenn auch hier unter Verwendung eines stützenden

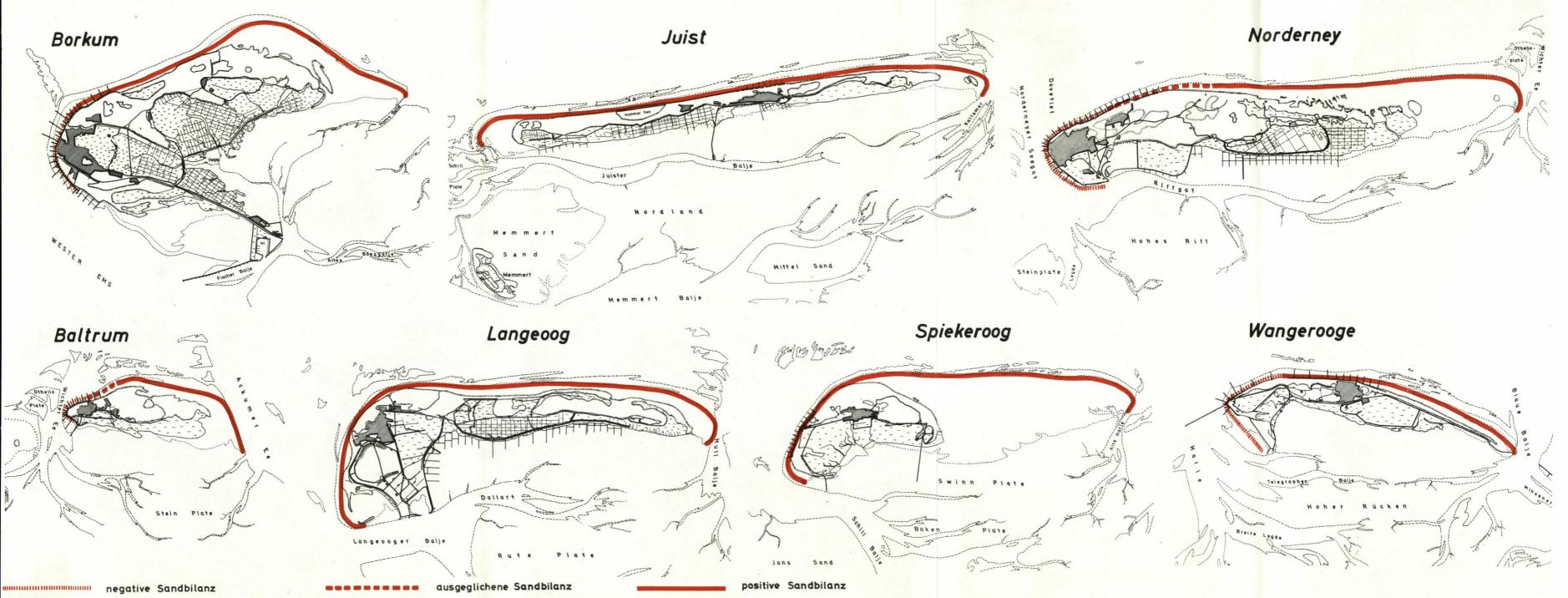


Abb. 19. Grundlagen für den Schutz der Ostfriesischen Inseln

Schlauchwerkes (Führböter et al., 1972). Inzwischen ist der Strand in Norderney 1976 wiederum aufgespült worden.

Die Januar-Sturmfluten 1976 trafen auf den Ostfriesischen Inseln auf Schutzwerke von insgesamt etwa 20 km Länge mit rd. 100 Buhnen an den Westenden und Nordseiten der Inseln, die die Strände mit negativer Sandbilanz abdecken und auch in die Bereiche mit wechselnder oder positiver Sandbilanz reichen (Abb. 19). Der Erhaltungszustand der Bauwerke ist als durchschnittlich bis gut zu bezeichnen. Außerhalb der befestigten Inselstrecken waren rd. 60 km Randdünen den Sturmfluten ausgesetzt.

An den Dünendeckwerken der Inseln und einzelnen Buhnen verursachten die Januar-Sturmfluten 1976 im allgemeinen leichte Schäden. Lediglich auf Norderney entstanden auf 70 m Länge schwere Schäden an der Deckwerksvorlage und einer nach oben an das Deckwerk angrenzenden Böschungsbefestigung aus Betonformsteinen, deren vermutliche Ursache die Druckschlagwirkung war, weil sich unterhalb wassergefüllte Hohlräume bilden konnten (RAGUTZKI, 1976). Eine Gefahr für die Inselbewohner bestand auf keiner Insel. Einige tieferliegende Ortsteile – insbesondere auf Norderney – wurden zwar durch windvertriftetes Wasser überflutet, jedoch in einer Ausdehnung, die wesentlich geringer war als während der Februar-Sturmflut 1962.

Sandumlagerungen auf den Stränden mit örtlich starker Erosion sowie Abbrüche der Randdünen auf langen Strecken bis zu 20 m Tiefe sind vor allem durch die Kliffbrandung auf der Nordseite der Inseln hervorgerufen worden. Dabei entstanden Steilkanten bis zu 10 m Höhe, die jedoch keinen Anlaß zu besonderer Sorge gaben, da derartige Sandverluste durch Sandstäubung während folgender ruhiger Wetterlagen wieder ausgeglichen werden, soweit ein ausreichend breiter, trockener Strand besteht (HOMEIER, 1976).

Die Deiche auf den Ostfriesischen Inseln erlitten ebenfalls Ausschläge, wie der 1975 gebaute Deich auf der Südseite der Insel Borkum und die Deiche auf Juist, Spiekeroog und Wangerooge. Der ebenfalls neu errichtete und noch nicht konsolidierte Deich auf Langeoog erlitt dagegen schwere Ausschläge. Im allgemeinen gelten für die Inseldeiche die gleichen Erfahrungen in der Schadensanfälligkeit wie für die Festlandsdeiche.

#### 6.2 Folgerungen für den künftigen Inselschutz des Landes Niedersachsen

Auf Borkum ist nach der 1976 ausgeführten künstlichen Sandauffüllung des Dünenzuges, der in östlicher Richtung an das Deckwerk anschließt, weiterhin die natürliche Sandstäubung zu nutzen, um die Sandvorräte dieses Dünenwalles zu vermehren. Einer vorübergehenden Erosionsphase in diesem Dünenbereich kann auf diese Weise begegnet werden (Abb. 19). Massive Deckwerke sind hier nicht erforderlich, da langfristig genügend Sand vom Strand zugeführt wird (Homeier u. Luck, 1977). Bemerkt sei, daß dieser Dünenwall in den letzten 30 Jahren erst durch Ausnutzung der Sandstäubung in vorgeschobener Lage gewonnen werden konnte, wobei sich der breite trokkene Strand infolge der Sandzufuhr vom Borkumriff her günstig auswirkte.

Die Dünenabbrüche am Westende der Insel Juist können unter Ausnutzung der Sandstäubung wieder aufgefüllt werden (Abb. 19). Das in Verkennung einer vorübergehenden Erosionsphase zwischen 1912 und 1921 erbaute Deckwerk mit Strandbuhnen, das nach wie vor völlig mit Sand bedeckt ist, bietet im Falle einer nicht zu erwartenden ungünstigen Strandentwicklung Schutz für den Ort Juist.

Auf Norderney ist auch die Ausnutzung der Sandstäubung von Bedeutung, um besonders im Bereich der wechselnden Sandbilanz (Abb. 19) Strand und Randdünen zu erhalten (Luck, 1975).

Das Buhnen- und Deckwerkssystem ist im gegenwärtigen Umfang für den Inselschutz ausreichend. Hierbei kommt den Unterwasserbuhnen die Aufgabe zu, die Lagestabilität des Inselsockels unterhalb NN –4,0 m zu gewährleisten, was seit ihrem Bau um die Jahrhundertwende gelungen ist (Kramer, 1958/59). Die Strandbuhnen sind eine Stütze für die in bestimmten Zeitabständen zu wiederholenden Sandauffüllungen, indem sie den Sandabtrag am Strand verzögern. Das gegenwärtige S-Profil-Deckwerk am Westende von Norderney sollte, wenn es künstig aufgrund eines baulichen Zustandes erneuert werden muß, durch ein flachgeneigtes Deckwerk ersetzt werden.

Auf Baltrum reicht das Buhnen- und Deckwerkssystem in seiner gegenwärtigen Ausdehnung bis in den Bereich des Strandes mit positiver Sandbilanz (Abb. 19) aus, so daß eine weitere Verlängerung nach Osten ausgeschlossen werden kann. Im Falle einer Erneuerung sollte das S-Profil und Steilprofil am Westende durch ein flachgeböschtes Deckwerk ersetzt werden. Sollten ungewöhnliche Strandverluste auftreten, so kann durch eine Sandauffüllung, die sich auf das vorhandene Buhnensystem abstützt, der Inselschutz ergänzt werden.

Auf Langeoog können nach Abbrüchen infolge schwerer Sturmfluten die Randdünen am Westende und im Bereich des Schlauchwerkes durch Sandstäubung wieder aufgefüllt werden, da sie insgesamt in einem Bereich positiver Sandbilanz (Abb. 19) liegen. Wenn an den gegenwärtig mit Sand gefüllten Feldern des Schlauchwerksystems große Sandverluste auftreten, lassen sie sich durch künstliche Sandzufuhr ersetzen (Lüders et al., 1972). Wegen der am gesamten Inselstrand positiven Sandbilanz ist der Bau von Buhnen- und Deckwerken, der schon erörtert wurde, unnötig, wie langfristige Untersuchungen ergaben (Homeier u. Luck, 1971).

Auf Spiekeroog ist an der Nordwestseite der Abbruch der Dünenkette deutlich, der durch Dünenbau wieder ausgeglichen werden muß. Insgesamt ist auch hier eine positive Sandbilanz vorhanden (Abb. 18). Das bestehende Deckwerk mit Buhnen ist in seiner Ausdehnung zu erhalten. Der am Nordende als Wellenbrecher wirkende Tetrapodenwall braucht nicht – wie schon gefordert – erhöht oder verlängert zu werden, da dieser die Ausräumung der rückwärtigen Dünen durch Sturmfluten nicht verhindert.

Auf die Erhaltung der Deckwerke, Buhnen und Randdünen auf den Inseln ist hier nur soweit eingegangen worden, wie sie der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung obliegt. Verantwortlich ist diese jedoch für die Deiche auf den Südseiten aller Ostfriesischen Inseln, für die hinsichtlich ihrer Erhaltung die gleichen Grundsätze wie für die Festlandsdeiche gelten (s. Abschn. 4.3 bis 4.5).

## 6.3 Grundsätze für den künftigen Inselschutz

Für die zweckmäßige und wirtschaftliche Gestaltung des Schutzes der Ostfriesischen Inseln können die zahlreichen Untersuchungen der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz in Norderney und die langjährigen Erfahrungen im Küsteningenieurwesen genutzt werden. Entscheidend beim Inselschutz ist, daß nicht unter dem Eindruck kurzzeitiger negativer Entwicklungen – Dünenabbrüche u. ä. –, sondern allein aufgrund der erkennbaren langfristigen Entwicklungstendenz aus langjährigen Beobachtungen entschieden wird. In den letzten Jahrzehnten ist zunehmend erkannt worden, daß dabei

eher die Nutzung des natürlichen Kräftespiels anzustreben, als darin einzugreifen ist. Das findet seinen Ausdruck auch in dem Wandel vom passiven Küstenschutz durch Massivbauwerke zum aktiven Küstenschutz durch Strandauffüllungen, den der heutige Stand der Technik fördert.

Für die funktionelle Planung und konstruktive Ausführung von Bauwerken des Inselschutzes sind die morphologischen Veränderungen im Vorfeld stärker als beim Festlandsschutz zu berücksichtigen, da hier engere morphologisch/hydrologische Wechselwirkungen bestehen. Über den künftigen Inselschutz kann nach den in diesem Beitrag wiedergegebenen Erfahrungen und Folgerungen zusammenfassend ausgesagt werden:

- 1. Die 1930 begonnenen, planmäßig wiederholten Vermessungen, Besliegungen und anderen Beobachtungen über die morphologischen Veränderungen von Vorstrand, Strand und Dünen der Inseln sind fortzusetzen. Das gilt gleichermaßen für die hydraulischen Untersuchungen der aktiven Kräste der Wellen, Tide- und Brandungsströmungen sowie des äolischen Sandtransportes.
- 2. Planungen von Inselschutzwerken, die bei gleicher Länge im Vergleich zu Schutzwerken an der Festlandsküste sehr viel höhere Kosten verursachen, sind besonders sorgfältig auf ihre funktionelle Wirkung im Spiel der Naturkräfte und auf ihre Wirtschaftlichkeit in der Bauweise zu prüfen.
- 3. Soweit für den Inselschutz Dünendeckwerke neu oder umzubauen sind, sollten diese entsprechend der technischen Entwicklung flach geböscht werden mit einer Neigung nicht steiler als 1:4, um die Wellen weich auflaufen zu lassen und die Gischtbildung zu vermindern. Die gegenwärtige Höhe der Deckwerke kann beibehalten werden. Wichtig ist, daß auf ihrer Rückseite eine Spundwand Sicherheit gegen Hinterspülung durch überschlagende Wellen bietet.
- 4. Wenn massive Bauwerke erforderlich sind, sollten sie mancherorts schwerer als bisher ausgebildet werden, um standfest gegen die Brandungskräfte zu sein. Damit wird gleichzeitig erreicht, daß sie wenig Unterhaltung erfordern, denn diese lohnintensiven Arbeiten sind sehr kostenaufwendig. Um konstruktive Mängel zu vermeiden, sind die zahlreich verfügbaren Erfahrungen zu verwerten. In Kurbereichen muß bei der Gestaltung der Dünendeckwerke und Buhnen Rücksicht auf das Erscheinungsbild genommen werden. Die stranderhaltende Wirkung ist, wie die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, mit massiven Inselschutzwerken nicht immer erreicht worden, denn sie haben manchmal nicht oder nur zum Teil ihre Aufgabe erfüllt.
- 5. Die Verlängerung bestehender Inselschutzwerke auf den Ostfriesischen Inseln in östlicher Richtung ist nicht erforderlich, weil diese sich bis in Strandbereiche erstrecken, in denen eine positive Sandbilanz vorhanden ist. Die natürliche Sandzufuhr aus dem Riffgürtel reicht aus, um dort und zum Ostende hin einen ausreichenden Strand zu erhalten. Im Einzelfall kann es sich höchstens darum handeln, eine örtliche Lee-Erosion auszugleichen.
- 6. Anstelle des passiven Inselschutzes mit dem Bau massiver Buhnen und Dünendeckwerke ist in den letzten Jahrzehnten zunehmend der aktive Inselschutz durch Ersatz von Sandverlusten am Strand durch künstliche Strandauffüllung getreten. Der damit erreichte meistens wirtschaftlich auch günstigere Inselschutz ist fortzuführen.

- 7. Durch künstliche Strandauffüllungen läßt sich die gewünschte Wirkung, einen ausreichenden Strand für die Sicherung bestehender Schutzwerke oder zur Sandstäubung für die Erhaltung der Randdünen zu haben, mit Sicherheit erzielen. Die Strandauffüllung kann nach verschiedenen Verfahren ausgeführt werden; als flächenhafte Aufspülung des Strandes, als Depotvorspülung mit Verteilung des Sandes am Strand durch das natürliche Kräftespiel oder wie in Langeoog durch Kombination einer Aufspülung mit einem stützenden Schlauchwerk. Ihre Aufgabe erfüllt eine Aufspülung in jedem Falle, auch wenn ihre Wirksamkeit zeitlich begrenzt ist. Da die Ostfriesischen Inseln gleichzeitig der Erholung dienen, bringen Strandauffüllungen auch Vorteile für den Badebetrieb, der die Existenzgrundlage für den Inselbewohner ist.
- 8. Eine künstige Aufgabe ist, zu untersuchen, ob die Buhnen auf den Inseln in ihrer gegenwärtigen Anzahl und Länge für die Stranderhaltung optimal sind. Sollte die Möglichkeit einer Minderung ihrer Zahl oder Länge bestehen, so würden sich wirtschaftliche Vorteile ergeben. Die verbleibenden Buhnen sind dann bevorzugt zu unterhalten.
- 9. Die Ausnutzung der Sandstäubung durch Setzen von Sandfangvorrichtungen ist eine bleibende Aufgabe, um vorübergehende ungünstige Dünenzustände zu überwinden. Sehr wichtig ist bei diesem Verfahren, daß die Sandfangeinrichtungen rechtzeitig und richtig gesetzt werden. Auch sollte die Bereitschaft bestehen, Dünen, die in Zeiten günstiger Strandentwicklung durch Dünenbau in vorgeschobener Lage gewonnen werden konnten (z. B. Langeoog), bei ungünstiger Entwicklung wieder aufzugeben, um einen unnötigen Aufwand für anderweitige Schutzmaßnahmen zu vermeiden. Eine Voraussetzung hierzu ist allerdings, daß die Randdünen und angrenzenden Flächen nicht bebaut werden.

# 7 Erfahrungen und Folgerungen in der Deichverteidigung

# 7.1 Vorbereitung, Zuständigkeiten und Ausrüstung

Die Januar-Sturmfluten 1976 haben wiederum gezeigt, daß eine vernachlässigte Deichunterhaltung die Ursache umfangreicher Schäden sein kann (s. Abschn. 5.3). Deshalb ist die erste Vorsorge gegen Sturmflutschäden an den Küstenschutzanlagen deren ordnungsgemäße Unterhaltung (Ingenieur-Kommission, 1962 u. 1976). Diese verantwortungsvolle Aufgabe haben die Deichverbände als Träger der Deicherhaltung wahrzunehmen. Die Aufsichts- und Fachbehörden, die an den regelmäßigen Deichschauen teilnehmen, haben mit besonderem Nachdruck die Beseitigung aller erkennbaren Mängel zu verlangen und zu überwachen. In der Frühjahrsdeichschau sind die Schäden des vorhergehenden Winters festzustellen und unbedingt bis zur Herbstdeichschau zu beseitigen.

Bereits die "Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962" (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1962) weisen auf die herausragende Bedeutung der ordnungsgemäßen Deicherhaltung für den Küstenschutz hin. Die dort und ebenso im Bericht über die Sturmfluten von 1973 (Ingenieur-Kommission, 1976) getroffenen Feststellungen zur Deichpflege, insbesondere der Grasnarbe durch Beweidung mit Schafen, sowie zur Vorlandpflege und Materialbevorratung für die Deichverteidigung müssen weiterhin nachhaltig unterstützt werden (Erchinger, 1976).

Jedoch können auch ordnungsgemäß ausgebaute und unterhaltende Deiche durch sehr schwere Sturmfluten beschädigt werden. Die Deichverteidigung, die zunächst auf die Abwehr solcher Schäden ausgerichtet sein muß, hat im Eintrittsfalle die Schadensstellen unverzüglich zu sichern (s. Abschn. 7.2).

Im allgemeinen hat sich die bestehende Organisation der Deichverteidigung auch während der Januar-Sturmfluten 1976 bewährt. Danach sind mit der Leitung der Deichverteidigung, je nach der Schwere der Sturmflutereignisse und dem Ausmaß der Schäden, zunächst die Deichverbände, sodann die Landkreise und schließlich bei kreisübergreifenden Alarmfällen die Bezirksregierungen als zuständige Behörden mit dem Katastrophenschutz betraut, die ihrerseits den Kontakt zum Katastrophenstab der Landesregierung herstellen. Als überaus nützlich hat es sich erwiesen, für die technische Beratung der Katastrophenstäbe der Landkreise die Wasserwirtschaftsämter als technische Fachbehörden heranzuziehen. Die volle Einbeziehung der Wasserwirtschaftsämter in die Alarmpläne der Landkreise sollte vorgenommen werden, da deren Ingenieure aufgrund ihrer Aufgaben im Deichbau mit den Besonderheiten des Deichaufbaus und der Widerstandsfähigkeit der Deiche gegen Sturmfluten am besten vertraut sind. Das Zusammenspiel der beteiligten Stellen und der Übergang der Verantwortlichkeiten sind in den Deichverteidigungsordnungen der Deichverbände sowie in den Katastrophenabwehrplänen der Landkreise und der Regierungsbezirke eindeutig zu regeln.

Die Erfahrungen der letzten Sturmfluten haben wiederum gezeigt, daß der Ablauf der Deichverteidigung jährlich geübt werden muß, um die organisatorische Regelung zu erproben und – soweit erforderlich – zu verbessern. Wichtig ist die Zusammenarbeit der Katastrophenstäbe mit der Polizei und den verschiedenen Hilfsorganisationen des "Erweiterten Katastrophenschutzes", wie z. B. der Feuerwehr, dem Technischen Hilfswerk und dem Roten Kreuz. Das gleiche gilt für die Zusammenarbeit mit der Bundeswehr, die auch im Januar 1976 wiederum wesentlichen Anteil an der Abwehr der Sturmflutkatastrophe an der Unterelbe hatte.

Sehr wichtig ist die regelmäßige technische Überprüfung der einzusetzenden Geräte sowie des Nachrichtenwesens und damit des Informationsflusses zwischen den Deichverbänden und den mit der Deichverteidigung befaßten Behörden, der eine unbedingte Voraussetzung einer gezielten Katastrophenabwehr ist. Eine drahtlose Nachrichtenübermittlung ist unumgänglich, da das öffentliche Fernsprechnetz in Alarm- und Katastrophenfällen erfahrungsgemäß überlastet ist. Schon die zur Erkennung erster Gefahrenstellen auf den Deichen eingesetzten Deichwachen müssen mit Funksprechgeräten ausgerüstet sein. Ebenso bedeutsam ist, daß geeignete Firmen, die kurzfristig Baugeräte und Materialvorräte stellen können, in die Deichverteidigungsordnungen aufgenommen und in die Übungen einbezogen werden.

#### 7.2 Sicherung von Schadensstellen

In den Schadensgebieten an der Unterelbe waren die Deichbruchstellen unverzüglich vorläufig zu sichern, um im raschen Einsatz mit umfangreicheren Hilfsmaßnahmen und Aufräumungsarbeiten beginnen zu können. Da im gesamten Schadensbereich wegen der Planungen zur Vorverlegung der Deichlinie keine Deichlängswege und keine oder nur unzulängliche Deichzuwegungen bestanden, konnte für die Sicherungsarbeiten zunächst kein schweres Gerät und nur einfaches, widerstandsfähiges und leicht zu handhabendes Material eingesetzt werden. In einigen Fällen mußte das Material mit Hubschraubern

an den Einsatzort gebracht werden. Bewährt haben sich für diese Sicherungsarbeiten wiederum Sandsäcke, Faschinen, Pfähle und Draht, aus denen wasser- oder landseitig von Bruchstellen bei Auskolkungen innerhalb des Deichkörpers in konventioneller Bauweise Sandsackbarrieren errichtet wurden.

Die im Januar 1976 gewonnenen Erfahrungen haben die bereits von der Ingenieur-Kommission 1962 besonders hervorgehobene und auch in den "Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962" (Küstenausschuss Nord- und Ostsee, 1962) enthaltene Forderung nach möglichst schnellem Ausbau der Deichverteidigungswege nochmals unterstrichen. Fehlende Deichlängswege und Deichzufahrten sind daher vorrangig auch an Deichstrecken auszubauen, deren Verstärkung und Erhöhung noch aussteht. Es muß dafür gesorgt werden, daß nach dem ersten Ablaufen des Hochwassers schon für die unmittelbar folgende Sicherung von Deichbruchstellen oder umfangreichen Schäden auch schwere Baugeräte, wie Bagger, Planierraupen und Transportfahrzeuge, eingesetzt werden können. Wegen der Eilbedürftigkeit der Sicherungsmaßnahmen ist bei Deichbrüchen ein massierter Einsatz an Material und Geräten angebracht. Wo möglich, sollte die Wiederherstellung der Deiche von vornherein mit Sandkern und ausreichender Kleiabdeckung vorgenommen werden, weil sich dabei ein schnellerer Arbeitsfortschritt als beim alleinigen Einbau von Klei ergibt.

In Südkehdingen kam bei der Schließung der Bruchstellen erschwerend hinzu, daß diese sowie das Land binnenseitig noch längere Zeit nach dem Rückgang des Hochwassers überflutet blieben. Daher ist wiederum zu empfehlen, die Deichverteidigungswege mindestens 50 cm über MThw anzuordnen, damit sie nach Deichbrüchen und Abklingen der Sturmflut wieder befahrbar sind (Ingenieur-Kommission, 1962). Die Deichverteidigungswege müssen für den Schwerlastverkehr bemessen sein. Ausreichend schwere Decken aus Zement- oder Asphaltbeton haben sich gegen Überlastungen widerstandsfähiger als Pflasterdecken erwiesen.

Wesentlich häufiger als Deichbrüche müssen andere Schäden, insbesondere Ausschläge in den Außenböschungen, vorläufig gesichert werden. Mit diesen Arbeiten muß begonnen werden, sobald es die Tidewasserstände zulassen, da immer mit kurzfristig nachfolgenden schweren Sturmfluten zu rechnen ist. Das war z. B. sowohl während der sehr schweren Sturmfluten im November/Dezember 1973 wie auch im Januar 1976 der Fall. Unzureichend gesicherte Schäden könnten sonst zu gefährlichen Stellen ausgeweitet werden. Für diese Sicherungsarbeiten hat sich der Einsatz von Sandsäcken, Buschwerk, Pfählen und Kunststoffiltermatten bewährt.

In den Abbildungen 20a bis 20k sind einige der häufigsten vorläufigen Sicherungsmaßnahmen auf den Deichaußenböschungen und auf der Deichkrone dargestellt (Wasserwirtschaftsamt Lüneburg, 1976). Für die Beseitigung von Ausschlägen in der Außenböschung bieten sich entsprechend dem Ausmaß verschiedene Lösungen an (Abb. 20a-f). Ausspülungen durch Drängewasser an der Binnenböschung lassen sich durch eine Sandsackpackung verhindern (Abb. 20g). Ist durch Wellenüberlauf oder Überströmung die Binnenböschung stark ausgewaschen worden, so können die Löcher mit Sandsäcken aufgefüllt werden (Abb. 20h). Erwähnt werden sollen auch Aufkadungen als behelfsmäßige Erhöhung der Deichkrone gegen Überströmung (Abb. 20i u. k). Im Tidebereich der Ströme sind diese wegen des schnellen Ansteigens der Sturmflutwasserstände nicht möglich. Oberhalb, wo eine nahende Hochwasserwelle früher erkennbar ist, können sie jedoch erwogen werden. Eine vorsorgliche Aufkadung von Deichen bis zu ihrer planmäßigen Erhöhung ist jedoch auch im Tidebereich möglich.

Als besonders dringlich hat sich während der Deichverteidigung die frühzeitige Ver-

kehrsregelung auf dem deichnahen Straßen- und Wegenetz erwiesen. Durch Absperrung des Durchgangsverkehrs und des Zutritts von Schaulustigen ist dafür zu sorgen, daß der schnelle und zügige Antransport von Hilfskräften, Gerät und Material zu den Schadens- und Gefahrenstellen gewährleistet ist.

## 7.3 Sturmflutvorhersage und Sturmflutwarnungen

Wie bereits nach früheren schweren Sturmfluten ist auch nach der sehr schweren Sturmflut am 3./4. 1. 76 das Sturmflutvorhersage- und Sturmflutwarnwesen auf Kritik der Offentlichkeit in den betroffenen Küstengebieten gestoßen. Insbesondere im Küstengebiet an der Elbe wurde darauf hingewiesen, daß die Warnungen über die vermutete Sturmfluthöhe und über den Eintrittszeitpunkt des Sturmflutscheitels zu spät bzw. nicht ausreichend genau gegeben worden sind.

Dieser Kritik ist in der Zwischenzeit nachgegangen worden. Danach laufen die Sturmflutwarnungen wie folgt ab: Das Seewetteramt Hamburg erarbeitet täglich einen Seewetterbericht für die Nord- und Ostsee und den Nordatlantik mit Vorhersagen über 12 Stunden und Aussichten für 24 Stunden. Diese Seewetterberichte werden über Rundfunk regelmäßig verbreitet. Im Falle von Sturmwetterlagen erteilt das Seewetteramt Sturmwarnungen. Das Deutsche Hydrographische Institut (DHI) Hamburg errechnet aus den angegebenen Daten die Wasserstandsvorhersagen, die ebenfalls zweimal täglich über Rundfunk bekanntgegeben werden.

Wenn aufgrund von Sturmwarnungen eine Sturmflut in der Deutschen Bucht zu erwarten ist, gibt das Deutsche Hydrographische Institut Sturmflutwarnungen mit Angabe des zu erwartenden Hochwasserstandes über dem mittleren Tidehochwasser über den Rundfunk und einen Ansagedienst heraus. Darüber hinaus können sich die zuständigen Behörden, die Deichverbände, aber auch sonstige interessierte Stellen auf Antrag durch sogenannte "WOBS"-Telegramme (WOBS = water observation service) Sturmflutwarnungen mitteilen lassen. Diese Telegramme werden, soweit möglich, unmittelbar vom Telegraphenamt Hamburg bzw. Bremen oder vom zuständigen Postamt an die Empfänger telefonisch durchgesagt. Aufgrund dieser WOBS-Telegramme wird bei den Deichverbänden sowie bei den Gemeinden, Landkreisen und Bezirksregierungen und ebenso bei den mit Fragen des Küstenschutzes befaßten technischen Fachbehörden der Wasserwirtschaftsverwaltung eine Alarmbereitschaft ausgelöst. In vielen Fällen, zumindest aber bei den Fachleuten des Küstenschutzes, ist dann bereits aufgrund längerer Erfahrungen und der Verfolgung der Wetterkarte eine intensivere Beobachtung des Tideverlaufes eingeleitet worden. Die Wasserstandsentwicklung wird an dem für die Beurteilung der Sturmflutentwicklung in der Deutschen Bucht günstig gelegenen Fernpegel Borkum verfolgt und fortlaufend mit früheren Sturmflutabläufen verglichen. Weitere Hilfswerte werden von Anrufpegeln an wichtigen Punkten der Küste erfragt. Die Rufnummern dieser Pegel können nicht allgemein bekanntgegeben werden, da sie sonst für diese Anfragen wegen Überlastung nicht zur Verfügung stehen.

Es hat sich auch am 3./4. 1. 76 gezeigt, daß im Zusammenhang mit den Sturmflutwarnungen des DHI zumindest für den Bereich der Nordseeküste und für die Ostfriesischen Inseln nach diesem Verfahren eine ausreichende und rechtzeitige Abschätzung der Sturmflutentwicklung erreicht werden konnte. Der Ablauf der Sturmflutvorhersage und der Warnungen des DHI ist aus Abbildung 21 zu ersehen. Daraus wird die obige Feststellung für die Küste bestätigt. Andererseits ist zu erkennen, daß für das Stromgebiet

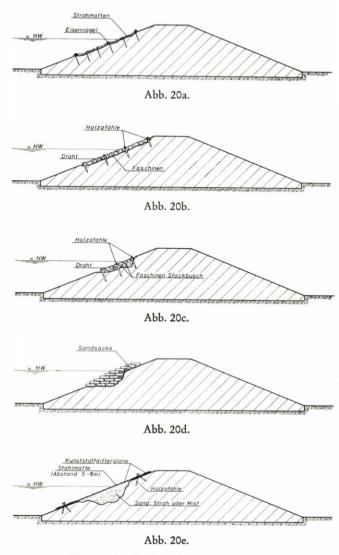
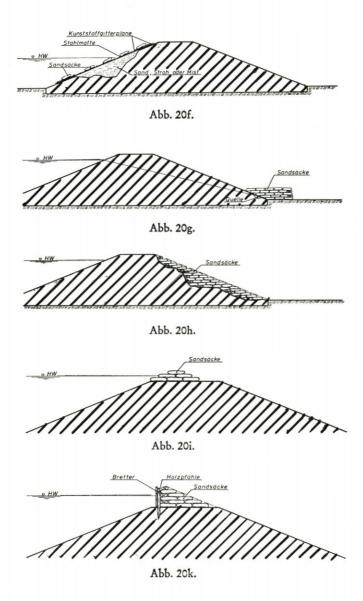


Abb. 20a-k. Schadenssicherung an Deichen

der Elbe zwischen Cuxhaven und Hamburg Unsicherheiten hinsichtlich des zeitlichen Eintritts und der Höhe des Sturmflutscheitels bestanden haben. Erst etwa 1 Stunde vor Thw konnte die eingetretene Sturmfluthöhe richtig vorausgesagt werden.

Die Deichbrüche im Raume Südkehdingen traten zur Zeit des Hochwasserscheitels oder wenig später ein, weil die noch nicht erhöhten Deiche überströmt wurden. In diesem Falle hat die Zeit von der Vorhersage des Extremereignisses bis zu seinem Eintritt nicht ausgereicht, Vorsorgemaßnahmen im gefährdeten Gebiet vorzunehmen.

Obgleich sich die Anfälligkeit des von Sturmfluten bedrohten Gebietes nach Fertigstellung der Deicherhöhungen gegen unvorhergesehene Wasserstände wesentlich verringert, ist dennoch eine weitere Verbesserung des Vorhersageverfahrens und des Warnsystems anzustreben. Vordringlich ist, daß die Schwierigkeiten technischer aber auch



organisatorischer Art ausgeräumt werden, die zu Verzögerungen in der Übermittlung der Sturmflutwarnung an die Empfänger der Warnungen führen, wie sie zuletzt bei der Sturmflut am 30./31. 12. 77 eingetreten sind.

Mit dem DHI soll deshalb folgendes vereinbart werden: Warnungen vor schweren und sehr schweren Sturmfluten, also bei erwarteten Wasserständen von mehr als 2 m über MThw, werden fernmündlich voraus durch das DHI direkt an die Lage- und Führungszentren der Polizei bei den Bezirksregierungen übermittelt. Die Lage- und Führungszentren unterrichten die Polizeiabschnitte ihres Bezirkes sowie das Lagezentrum beim Niedersächsischen Innenminister. Die Polizeiabschnitte geben die Sturmflutwarnung unmittelbar weiter an die Katastrophenschutzbehörde (Landkreis, kreisfreie Stadt) und an das Wasserwirtschaftsamt ihres Dienstbezirkes.

	Wind- vorhersage				und War m Hochw		Höchste stände ü.	eingetr. dem örtl.	Wasser - . MThw
Uhrzeit	des SWA (Richtung)	Kü. WOBS-	ste		Hamburg		Ort	Höhe	Voraus- berech- nete Ein-
	(Stärke)	Telegr.	funk	Telegr.	funk	dienst	51.0		trittszeit
h !min		m	m	m	m	m		m	h :min
~6:00		201: 25							
6:35		3,0 bis 3,5		3,0 bis 3,5	-				
7:00	i		3,0 bis 3,5		3,0 bis 3,5				
7:40	1		1			3,0 bis 3,5			
11:00 12:08 12:35 12:50 13:15 13:50 13:58 14:25 14:30 14:45 15:00	11h bis 15h W - NW 10 BFT (78 - 90 km/h )		~ 1/2 stündlich gesendet	etwa 3,5	the distribution of the second of the secon	etwo 4,0	Büsum B'haven C'haven	2,27 3,05 3,67 3,49 3,61	12:12 13:43 14:11 14:40 14:20
16:28 16:34 16:50 17:15					4,0bis 4,5	4,4 bis 4,6	Bremen Hamburg	3,04 4,65	16 : 37 18 : 17

Abb. 21. Ablauf der Sturmflutwarnungen am 3. 1. 1976

Wie bisher erhalten die zuständigen Stellen, Deichverbände und Dienststellen, die Sturmflutwarnung auch durch WOBS-Telegramme, die ihnen vom Telegraphenamt Hamburg bzw. Bremen zugesprochen werden. Es ist jedoch vorgesehen, in den Empfängerlisten eine Sortierung nach Prioritäten vorzunehmen. Danach sollen Stellen mit überörtlich wahrzunehmenden Deichverteidigungs- und Katastrophenabwehraufgaben, wie die Bezirksregierungen, die Landkreise und kreisfreien Städte sowie die Wasserwirt-

schaftsämter, zuerst gewarnt werden. Darüber hinaus sollen auch innerhalb der Deutschen Bundespost Maßnahmen ergriffen werden, um den Nachrichtenfluß im Falle einer drohenden Sturmflut zu beschleunigen.

Längerfristig sollen daneben neue Methoden der Sturmflutvorhersage entwickelt werden. Ansätze dazu sind bereits ergriffen worden, z. B. Messungen der Erdkrustenverformung durch Sturmfluten in der Nordsee mit Vertikalpendeln und Sturmflutmodellen, die aus Windfeld, Windstärke und -richtung unter Berücksichtigung der Tidephase den maßgebenden Windstau an der Nordseeküste und seinen Verlauf in den Tideflüssen angeben können.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß bereits jetzt vom grundsätzlichen Aufbau des Sturmflutwarndienstes alle Voraussetzungen gegeben sind, rechtzeitig die erforderlichen Maßnahmen der Deichverteidigung und des Bevölkerungsschutzes ergreifen zu können. So waren glücklicherweise im Gegensatz zu 1962 bei den Januar-Sturmfluten 1976 keine Menschenleben zu beklagen.

#### 8 Schlußwort

Der vorliegende Bericht enthält eine Dokumentation für das niedersächsische Küstengebiet über die sehr schweren Sturmfluten vom Januar 1976 mit den besonderen meteorologischen und hydrologischen Erscheinungen. Hervorzuheben ist einerseits, daß im oberen Tidegebiet der Ems, bei Elsfleth an der Weser sowie im gesamten Tidegebiet der Elbe die bisher bekannten höchsten Sturmflutwasserstände überschritten wurden. Am 21. 1. 1976 floß außerdem in der Elbe eine Oberwassermenge ab, die in ihrer Größe mit den sehr schweren Sturmfluten der letzten Jahrzehnte nicht zusammengetroffen war.

Aufgrund der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden die Bemessungswasserstände und Deichhöhen, die 1965 erlassen und im Generalplan Küstenschutz von 1973 festgelegt worden waren, überprüft. Das Ergebnis ist, daß die Bemessungswasserstände für die Seedeiche – mit Ausnahme an der Elbe unterhalb der Ostemündung – beibehalten werden können. Das gleiche gilt für die Sollhöhe der Seedeiche bis auf einige Kurzstrekken, für die die Zuschläge für den Wellenauflauf erhöht werden müssen.

Für die Stromdeiche an der Ems werden höhere Bemessungswasserstände und Solldeichhöhen lediglich für den oberen Tidebereich vorgeschlagen. An der Weser können die Bemessungswasserstände und Sollhöhen der Stromdeiche unverändert bleiben. Dagegen werden für die Stromdeiche an der Elbe auf ganzer Länge höhere Bemessungswasserstände und Solldeichhöhen vorgeschlagen. Bei der endgültigen Festlegung der Deichhöhen an der Elbe sind auch die Ergebnisse der gegenwärtigen Modellversuche zu berücksichtigen.

An besonderen Erkenntnissen brachte das Sturmflutgeschehen vom Januar 1976 die Möglichkeit des Zusammentreffens eines sehr hohen Sturmflutwasserstandes mit einer großen Oberwassermenge. Auch wurde wiederum deutlich, daß für eine exakte Bemessung der Küstenschutzwerke weitere Untersuchungen zur Höhe des Wellenauflaufes und der Brandungswirkung erforderlich sind.

#### 9 Schriftenverzeichnis

Arbeitskreis Uferbefestigungen: Uferschutzwerke aus Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 38, Verein deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, 1971.

Bundesanstalt für Wasserbau: Modellversuche für die untere Ems. Teil II: Hydrologie, 1977 (unveröffentlicht).

CIMPA, F.: Überlegungen zu einer Absperrung der Elbemündung. Die Bautechnik, H. 3, 1970. DETTE, H. H.: Wellenmessungen und Brandungsuntersuchungen vor Westerland/Sylt. Mitt. des Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.

Duensing, G. und Steinborn, E.: Meteorologische Messungen während der Sturmflutlagen im Januar 1976 an der deutschen Küste. Die Küste, H. 30, 1977.

Erchinger, H. F.: Wellenauflauf an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. des Leichtweiß-Inst., H. 41, 1974.

Erchinger, H. F.: Deicherhaltung, Deichverteidigung. In: Brößkamp, K. H. et al.: Seedeichbau – Theorie und Praxis. Vereinigung des Naßbaggergewerbes, Hamburg, 1976.

Flohn, H.: Klimaschwankungen in historischer Zeit. Die Wissenschaft, Bd. 122, Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1967.

Franzius-Institut: Modellversuche für die Elbe. Versuchsbericht 1964 (unveröffentlicht).

FÜHRBÖTER, A.: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Mitt. des Franzius-Inst., H. 28, 1966.

Führböter, A., Lüders, K. und Rodloff, W.: Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog. Die Küste, H. 23, 1972.

Führböter, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. des Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.

FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst., H. 51, 1976.

Hensen, W.: Modellversuche für die untere Ems. Mitt. des Franzius-Inst., H. 6 a, b, 1954.
 Hensen, W.: Stromregelungen, Hafenbauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf. Festschrift zum 30. Deutschen Geographentag, F. Hirt-Verlag, Kiel, 1955.

Hensen, W.: Modellversuche für die Unterweser und ihre Nebenflüsse. Mitt. des Franzius-Inst., H. 15 a, b, 1959.

Hensen, W.: Die Sturmflut in der Elbe vom 16./17. 2. 1962. VDI Zeitschrift, Bd. 104, 1962. Hensen, W.: Lehren für Wissenschaft und Praxis aus der Nordsee-Sturmflut am 16./17. Februar 1962. Vanderhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1964.

Hensen, W.: Bericht der Arbeitsgruppe "Sturmfluten" im Küstenausschuß Nord- und Ostsee. Die Küste, Jg. 14, H. 1, 1966.

HOMEIER, H.: Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1975, Bd. XXVII, 1976.

HOMEIER, H. und Luck, G.: Untersuchung morphologischer Gestaltungsvorgänge im Bereich der Accumer Ee als Grundlage für die Beurteilung der Strand- und Dünenentwicklung im Westen und Nordwesten Langeoogs. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1970, Bd. XXII, 1971.

HOMEIER, H. und Luck, G.: Untersuchungen zur Nordstrandentwicklung von Borkum als Grundlage für den Inselschutz. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1976, Bd. XXVIII, 1977.

Ingenieur-Kommission (Kramer, J., Liese, R. und Lüders, K.): Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. Die Küste, Jg. 10, H. 1, 1962.

Ingenieur-Kommission (Kramer, J., Krause, G. und Luck, G.): Erfahrungen aus den Sturmfluten vom November/Dezember 1973 und Folgerungen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke. Die Küste, H. 29, 1976.

Kramer, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951–52 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Doppelheft, Jg. 7, 1958/59.

KRAMER, J.: Sicherheit von Seedeichen gegen Sturmfluten. Die Küste, H. 31, 1977.

Kramer, J. und Janssen, Th.: Deichbau an der ostfriesischen Küste unter Anwendung von Asphaltbauweisen. Bitumen, H. 3, 1976.

KRUHL, H.: Die Sturmflutwetterlagen im Januar 1976. Die Küste, H. 30, 1977.

- Küstenausschuss Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe "Küstenschutzwerke" (Freistadt, Kramer, Lorenzen, Lüders, Rodloff, Traeger): Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste, J. 10, H. 1, 1962.
- Küstenausschuss Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe "Küstenschutzwerke": Nachtrag zu den Empfehlungen für den Deichschutz nach der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste. H. 20, 1970.
- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, Arbeitsgruppe "Versorgungsleitungen im Bereich von Hochwasserschutzanlagen" (KRAMER, KÜBLER, LÜDERS, METZLER, PETERSOHN, RODLOFF, TRAEGER): Empfehlung für Richtlinien für Verlegung und Betrieb von Leitungen im Bereich von Hochwasserschutzanlagen. Die Küste, H. 20, 1970.
- Kurzak, G.: Veränderungen der Wasserstände auf der Unterweser und ihrer Nebenflüsse von 1959/62 bis 1968/72. Bremen, 1974 (unveröffentlicht).
- LAUCHT, H.: Zustand und Entwicklungsmöglichkeiten des Hamburger Stromspaltungsgebietes der Elbe. Mitt. des Franzius-Inst., H. 9, 1956.
- Luck, G.: Die zweite Strandaufspülung am Westrand von Norderney. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1968, Bd. XX, 1970.
- Luck, G.: Protection of the littoral and seabed against erosion, "Fallstudie Norderney". Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1975, Bd. XXVII, 1976.
- Luck, G. und Niemeyer, H. D.: Seegangsmessungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Watten. Meerestechnik mt, Nr. 4, August 1976.
- Lüders, K.: Das niedersächsische Küstenprogramm 1955–1964. Wasser und Boden, 7, H. 2, 1955.
- LÜDERS, K. und Leis, G.: Gutachten über die Kostentragungspflicht für Uferschäden im Gebiet der Vereinigten Emsdeichachten zwischen Papenburg und Emden. Hannover, 1966 (unveröffentlicht).
- Lüders, K.: Über die Gültigkeitsdauer des "Bemessungswasserstandes für Seedeiche" an der niedersächsischen Nordseeküste. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1969, Bd. XXI, 1971.
- LÜDERS, K., FÜHRBÖTER, A. und RODLOFF, W.: Neuartige Dünen- und Strandsicherung im Nordwesten der Insel Langeoog. Die Küste, H. 23, 1972.
- LÜDERS, K.: Sturmtidenketten. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1973, Bd. XXV, 1974.
- NASNER, H. und PARTENSCKY, H. W.: Sturmfluten in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste in diesem Jahrhundert. Die Küste, H. 28, 1975.
- Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen. Hannover, 1973.
- NIEMEYER, H. D.: Der Verlauf der Sturmtiden im Januar 1976 im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1975, Bd. XXVII, 1976 (a).
- NIEMEYER, H. D.: Zur Abschätzung des maximalen Wellenauflaufs an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 29, 1976 (b).
- Niemeyer, H. D.: Seegangsmessungen auf Deichvorländern. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1976, Bd. XXVIII, 1977.
- RAGUTZKI, G.: Beurteilung von Kleiabdeckungen ostfriesischer Seedeiche mit der Grundlage bodenphysikalischer Kennwerte. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1967, Bd. XIX, 1969.
- RAGUTZKI, G.: Auswirkung der Januar-Sturmtiden 1976 auf die Inselschutzwerke von Norderney. Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht 1975, Bd. XXVII, 1976.
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
- Schelling, H.: Die Sturmfluten an der Westküste von Schleswig-Holstein unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel Husum. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- Siefert, W.: Sturmflutvorhersage für den Tidebereich der Elbe aus dem Verlauf der Windstaukurve in Cuxhaven. Mitt. des Franzius-Inst., H. 30, 1968.
- Siefert, W.: Die Sturmflut von 1825 in der Elbe. Hamburger Küstenforschung, H. 5, 1969.
- Siefert, W.: Die Tideverhältnisse der Elbe seit 1786. Deutsche Gewässerkundliche Mitt., Jg. 14, H. 5, 1970.
- Siefert, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. des Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.

THILO, R. und Kurzak, G.: Die Ursachen der Abbruchserscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.

WALDEN, H.: Zusammenhänge zwischen Sturmfluten, Elbehochwasser und Wetterlage? Deutsche Gewässerkundliche Mitt., Jg. 10, H. 1, 1966.

Walther, F.: Veränderungen der Wasserstände und Gezeiten in der Unterweser als Folge des Ausbaues. Hansa, Jg. 91, Nr. 21/22, 1954.

Wasserwirtschaftsamt Lüneburg: Praktische Anleitung zur Deichverteidigung. Eigenverlag, 1976.

WITTE, H. H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. Die Küste, H. 19, 1970.

ZITSCHER, F. F.: Empfehlungen über die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau. Die Bautechnik, Jg. 50, H. 2, 1973.