

**EXTREMEREIGNISSE AN NORD- UND OSTSEEKÜSTEN -
ERMITTLUNG VON BEMESSUNGSEREIGNISSEN**

***EXTREME EVENTS AT NORTH SEA AND BALTIC SEA COASTS –
ESTIMATION OF DESIGN CRITERIA***

von
Jürgen JENSEN

INHALT

1	EINFÜHRUNG	41
2	ENTWICKLUNG DER NORD- UND OSTSEEKÜSTEN	41
3	EXTREMEREIGNISSE AN DEN NORD- UND OSTSEEKÜSTEN IN DER VERGANGENHEIT	41
3.1	Extreme Sturmfluten an den Nordseeküsten	45
3.2	Extreme Sturmhochwasser an den Ostseeküsten	50
4	ERMITTLUNG VON BEMESSUNGSEREIGNISSEN	50
4.1	Bemessungswasserstände an der Nord- und Ostseeküste	51
4.2	Zur Problematik der Extrapolation von maßgebenden Extremereignissen	52
4.3	Ermittlung von Bemessungsereignissen mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten	53
5	ZUSAMMENFASSUNG	55
6	SCHRIFTTUM	56

1 Einführung

Der älteste Hinweis auf Sturmfluten an der Nordseeküste ist datiert auf das Jahr 340 bzw. 120 v. Chr., danach soll das Volk der Cimbern durch Sturmfluten aus Holstein und Jütland vertrieben worden sein. Die früheste sichere Nachricht über eine Ostseesturmflut ist für das Jahr 1044 überliefert.

Die Häufigkeit und das Auftreten von extremen Sturmflutereignissen muss in Verbindung zum jeweiligen Klima bzw. vorherrschenden Wetter gesehen werden. Nachdem um das Jahr 1000, begünstigt durch das milde Klima, die Besiedelung Grönlands begann (Grönland eisfrei, lange warme Sommer, Route nach Amerika ist frei), wird es um das Jahr 1300 wieder kälter (das Eis kommt zurück) und um 1400 wird die letzte Wikinger-Siedlung auf Grönland aufgegeben. In dieser Zeit sind viele katastrophale Sturmfluten an der Nordseeküste zu beklagen (s. auch Tabelle 2). Grundsätzlich sollte bedacht werden, dass die Chronisten bei der Beschreibung katastrophaler Ereignisse die Auswirkungen und verursachten Schäden überliefern wollten. In schlechten Zeiten (Armut, Seuchen, Kriege) können auch niedrigere Sturmfluten katastrophale Folgen gehabt haben (z.B. aufgrund schlechtem Zustand der Deiche).

Im Folgenden sollen diese Entwicklungen und Ereignisse von der Vergangenheit bis zur Gegenwart dargestellt werden und daran anschließend im zweiten Teil auf die Problematik der Ermittlung von aktuellen und zukünftigen Bemessungsereignissen eingegangen werden. Dabei sind zur Überprüfung bestehender und der Planung neuer Küstenschutzmaßnahmen Aussagen zur Entwicklung der Tidewasserstände, insbesondere der zu erwartenden Extremwasserstände, sowie zur Tidedynamik (Nordsee) erforderlich. Ein durch Klimaänderungen verursachter Meeresspiegelanstieg würde dabei insbesondere im Bereich der flachen Küsten und in den Tideästuaren zu tiefgreifenden Veränderungen führen.

2 Entwicklung der Nord- und Ostseeküsten

Die Wasserstandsentwicklung der Nordsee ist seit dem Ende der letzten Eiszeit durch Transgressions- (Wasserspiegelanstieg) und Regressionsphasen (Wasserspiegelrückgang) gekennzeichnet. Die Entwicklung des Meeresspiegels steht dabei im unmittelbaren Zusammenhang mit der gesamten Morphologie des Küstenvorfeldes und dem Abbruchgeschehen an den Küsten.

Abbildung 1 zeigt die vermuteten nacheiszeitlichen Meeresspiegelveränderungen für die deutsche Nordseeküste am Beispiel der nordfriesischen Küste mit der Entwicklung der Küstenlinie (UMWELTATLAS WATTENMEER - BAND 1 - 1998). Insgesamt verläuft der Transgressionsvorgang nicht

kontinuierlich und ist zeitweise durch kürzere Regressionsphasen unterbrochen.

Zur Einordnung der historischen Sturmfluten, d.h. der Sturmfluten bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts, ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der mittleren (Tide-) Wasserstände erforderlich, weil die Höhenangaben auf das Mittelwasser (Ostsee) oder mittlere Tidehochwasser bzw. den mittleren Meeresspiegel (Nordsee) bezogen werden. Da neben den Folgeerscheinungen der Eiszeiten auch die Küstenbewegungen (Tektonik) zu berücksichtigen sind, ist der Verlauf der zeitlichen Entwicklung des mittleren Meeresspiegels nicht exakt nachvollziehbar. Detaillierte Kenntnisse zur Wasserstandsentwicklung liegen erst ab etwa 1850 für die Nord- und Ostseeküste vor.

Die Entwicklung der Ostseeküste ist wie die der Nordseeküste seit dem Ende der letzten Eiszeit durch das Abschmelzen der Eismassen geprägt; der Höhepunkt der Weichseleiszeit wird auf 25.000 bis 18.000 Jahre vor heute datiert. Nach einem anfänglich raschen Meeresspiegelanstieg verlangsamte sich der Anstieg vor etwa 5000 Jahren vor Chr. und beträgt für das letzte Jahrtausend nur wenige Dezimeter. Neben den eustatischen, d. h. den weltweiten Wasserhaushalt betreffenden Vorgängen, beeinflussen auch Erdkrustenbewegungen sowie Entlastungsvorgänge durch das Abschmelzen der Inlandeismassen die Relativbewegung zwischen dem Land- und Meeresspiegelniveau im Ostseeraum. Für die südwestliche Ostsee kann davon ausgegangen werden, dass der Meeresspiegel vor 4000 Jahren bei rund 1 m unter dem heutigen NN lag und um Christi Geburt, wie an der Nordseeküste auch, etwa einen halben Meter höher lag als im Mittelalter (JENSEN UND TÖPPE 1990).

3 Extremereignisse an den Nord- und Ostseeküsten in der Vergangenheit

Untersuchungen zu Sturmfluten (Sturmhochwasser) bzw. extremen Wasserständen an der Nord- und Ostseeküste wurden für einzelne Extremereignisse, z.B. die katastrophale Ostseesturmflut vom November 1872 (BAENSCH 1875) oder auf der Basis von Extremwerten wie z.B. Jahreshöchstwerten (z.B. BRAHMS 1754, WOEBCKEN 1924, SCHELLING 1952, HUNDT 1955, LIESE 1963, LÜDERS 1971, FÜHRBÖTER 1976 u. 1979, SIEFERT 1978, JENSEN 1985, BAERENS et al. 1995) durchgeführt; darüber hinaus liegen aktuelle Untersuchungen zum Windstauanteil von Sturmfluten (GÖNNERT 1999) an der Nordseeküste und zu Sturmhochwasserereignissen an der Ostseeküste vor.

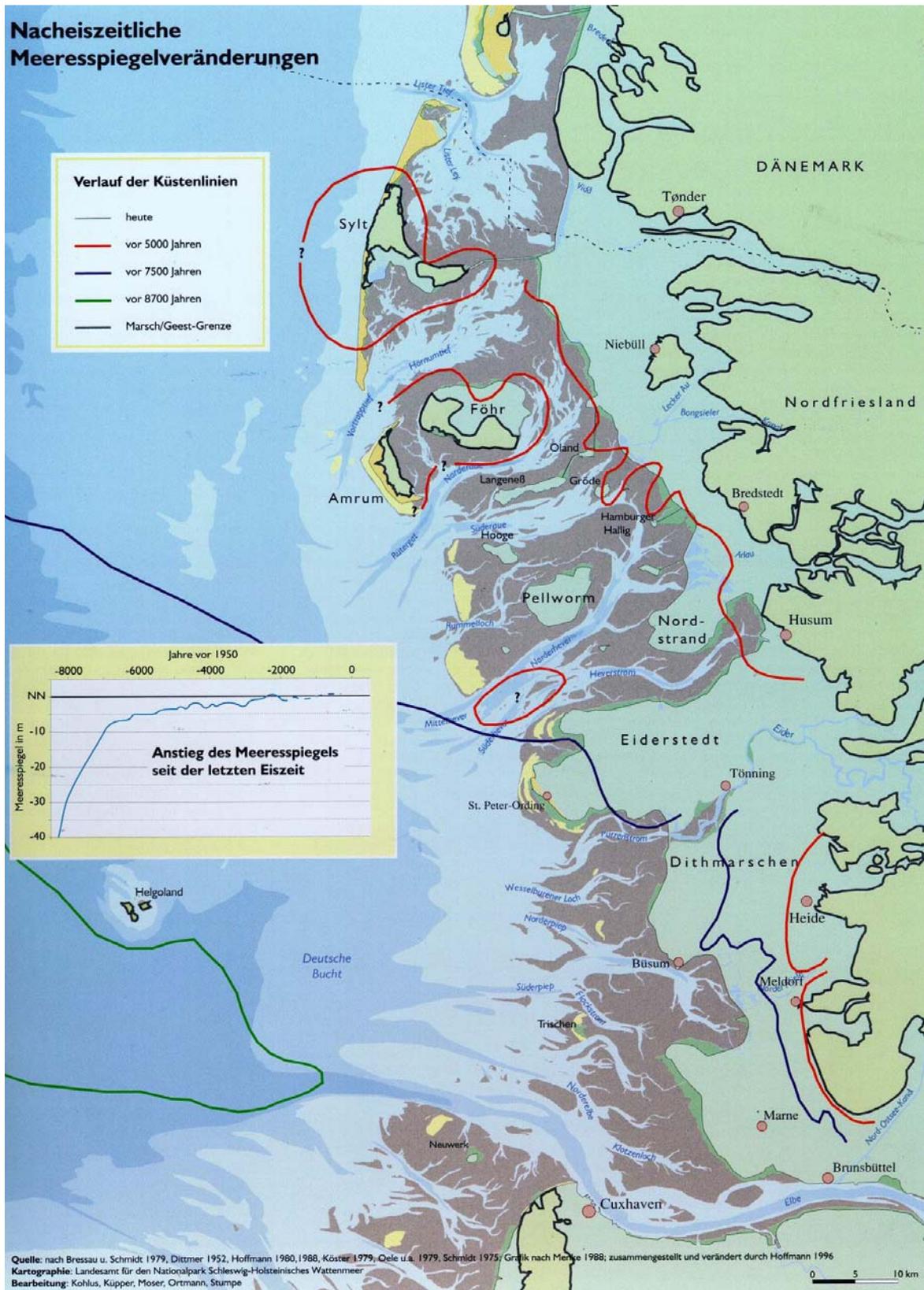


Abb. 1: Nacheiszeitliche Meeresspiegelveränderungen für die Nordfriesische Küste nach Umweltatlas Wattenmeer (1998)

In Tabelle 1 ist ein hydrographischer bzw. hydrologischer Vergleich der Nord- und Ostsee aufgeführt.

	Nordsee	Ostsee
Fläche	580.000 km ²	422.000 km ²
mittlere Tiefe (größte Tiefe)	93 m (bis 725 m norw. Rinne)	55 m (bis 459 m nördl. Gotland)
mittlerer Salzgehalt	35 ‰	7 ‰
Gezeiten	mittlerer Tidehub = 3,5 m	fast tidefrei
hydrographische Einordnung	flaches Randmeer des Atlantiks	Binnenmeer, Verbindung zur Nordsee (Kattegat)
Höhenbezugssystem	NN = „Normal Null“ (etwa MSL Amsterdam)	HN = „Höhen Null“ (MW Kronstadt) HN = NN + 14 cm
Küstenform	Wattküste, lange Küstenlinie, z.B. durch Tideflüsse, Sand- und Dünenküsten (Inseln)	Ausgleichsküste, Bodden- und Steilküste
Küstenschutzbauwerke	fast geschlossene Seedeiche, Sturmflutsperrwerke	z.T. Deiche, Dämme
Extremereignis	„Sturmflut“	„Sturmhochwasser“
Historische Extremereignisse	Sturmfluten 1953, 1962 und 1976	1872
Sturmfluthöhen/Sturmhochwasser	NN+ 5,1 m (Cuxhaven 1976)	HN + 3,3 m (Travemünde 1872)
Entstehung von Sturmfluten	„Windstau“ - meteorologische Einflüsse: Starkwind aus N bis NW; relativ häufige Wetterlage (Stärke, Richtung und Dauer des Windes) - Gezeitenbeeinflussung (Spring- tide) - Fernwellen aus dem Atlantik	„Schwappereffekt“ - meteorologische Einflüsse, Starkwind aus O bis NO; Vorfül- lung der Ostsee, sehr seltene Wetterlage (Stärke, Richtung, Richtungswechsel von W nach O und Dauer des Windes)

Tabelle 1: Hydrographischer und hydrologischer Vergleich der Nord- und Ostsee

Grundsätzlich werden Sturmfluten (Nordsee) und Sturmhochwasser (Ostsee) in leichte, schwere und sehr schwere Sturmfluten/Sturmhochwasser eingeteilt:

- leichte Sturmflut/Sturmhochwasser (Windflut): mittlere Eintrittshäufigkeit n des Scheitelwasserstandes: 10 bis 0,5 im Jahr (Nordsee), 2 bis 0,2 im Jahr (Ostsee)
- schwere Sturmflut/Sturmhochwasser (Sturmflut): $n = 0,5$ bis 0,05 im Jahr (Nordsee), 0,2 bis 0,05 im Jahr (Ostsee)
- sehr schwere Sturmflut/Sturmhochwasser (Orkanflut): $n < 0,05$ im Jahr (Nord- und Ostsee); mit einer Sol-

chen ist sowohl an der Nordsee als auch an der Ostseeküste seltener als alle zwanzig Jahre einmal zu rechnen.

In Tabelle 2 ist eine Chronik der Sturmfluten und Sturmhochwasser an der deutschen Nord- und Ostseeküste (südwestliche Ostseeküste) zusammengestellt. Die Anzahl der Sturmfluten bzw. Sturmhochwasser mit extremen Wasserständen ist an der Nordseeküste im Vergleich zur Ostseeküste deutlich größer. Der wesentliche Grund ist das auslösende meteorologische Ereignis; Wetterlagen, die an der Ostseeküste zu extremen Wasserständen führen, sind relativ selten.

Nordsee		Ostsee	
Datum	Bemerkungen/Höhen	Datum	Bemerkungen/Höhen
340 v. Chr.	sog. „Cimbrische Flut“ (ggf. auch 120 v. Chr.)	1044	?
17.02.1164	Erste Julianenflut, gesamte Nordseeküste		
16.01.1219	Erste Marcellusflut (Niederlande)		
14.12.1287	Luciaflut, gesamte Nordseeküste	1304 (1307, 1309)	neues Tief zwischen Rügen und Ruden
		30.11.1320	Lübeck: MW + 3,10 bis 3,20 m
23.11.1334	Clemensflut, Flandern bis Ostfriesland		
16.01.1362	Zweite Marcellusflut, Ostfriesland bis Nordfriesland		
09.10.1374	Erste Dionysiusflut, Ostfriesland	1374	?
09.10.1377	Zweite Dionysiusflut, Flandern, Seeland, Holland, Ostfriesland	1396	
1400	Friesenflut	1412	?
18.11.1421	Elisabethflut, Ostengland und Niederlande		
1434-1501	Sechs „Gallische Fluten“		
11.01.1436	Allerheiligenflut, Deutsche Nordseeküste	1449, 1467	?
06.01.1470	Dreikönigsflut, Deutsche Nordseeküste	30.11.1497	?
26.09.1509	Kosmas- und Damianflut, Niederlande, Ostfriesland		
16.01.1511	Antoniusflut, Deutsche Nordseeküste	1519	?
31.10.1532	Dritte Allerheiligenflut, Nordseeküste vom Kanal bis Eiderstedt	1552, 1558	
01.11.1570	Vierte Allerheiligenflut, Flandern bis Eiderstedt	Sommer 1570	Lebamünde zerstört?
1572	Kornflut	1573, 1596, 1609	?
26.02.1625	Fastnachtsflut, Südholland bis Jütland	10.02.1625	Lübeck: bis MW + 2,84 m
11.10.1634	Zweite Mandränke, Schleswig-Holstein	1645	?
22.02.1651	Petriflut, Friesland	1663, 1690	?
12.11.1686	Martinsflut, Groningen bis Land Wursten	10./11.01.1694	Lübeck: MW + 2,86 m Travemünde: MW + 2,65 m
24.12.1717	Weihnachtsflut, Nordseeküste	1709	
31.12.1720 01.01.1721	Neujahrsflut, Seeland bis Nordfriesland	1736, 1741, 1784	
03./04.02.1825	Februarflut, Ostfriesland bis Nordfriesland (HHThw)	19.12.1835	Flensburg: MW + 2,54 m
		26.12.1836	Lübeck: bis MW + 2,20 m Schleswig: bis MW + 2,75 m

Tab. 2: Chronik der Sturmfluten/Sturmhochwasser an der deutschen Nord- und Ostseeküste nach KRAMER1989, JENSEN UND TÖPPE 1990, PETERSEN UND ROHDE 1991

Fortsetzung Tabelle 2

01./02./04. 1.1855	Januarflut, Ostfriesland	30.12.1867	Lübeck: MW + 2,04 m
		12./13.11.1872	Bisher höchstes Sturmhochwasser Lübeck: bis MW + 3,40 m Travemünde: bis MW + 3,40 m
		25.11.1890	Travemünde: MW + 2,10 m
		30./31.12. 1904	Travemünde: bis MW + 2,22 m Flensburg: MW + 2,33 m
13.03.1906	Märzflut, Ostfriesland (HHThw)	29./31.12. 1913	Travemünde: MW + 2,00 m
31.01./01. 02.1953	Hollandflut, Niederlande und England	04.01.1954	Travemünde: MW + 2,07 m
16./17.02. 1962	Katastrophensturmflut, Ostfriesland bis Nordfriesland (HHThw)	14.01.1960	
23.02.1967	Adolph-Bermpohl-Orkan mit den höchsten bisher gemessenen Windgeschwindigkeiten auf der Nordsee		
19./20.11 1973	Novemberflut, Niedersachsen und Schleswig-Holstein		
03./04.01. 1976	Januarflut, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (HHThw nördlich der Elbe)	31.12.1978 15.02.1979	
24.11.1981	Novemberflut, Schleswig-Holstein (HHThw in Nordfriesland)	13.01.1987 27./28.08.1989	Sommerhochwasser mit erheblichen Schäden
Jan./Feb. 1990	In 3 Tagen 5 Orkanstürme, Schleswig-Holstein		
21./22.01. 1993	Mehrere Sturmfluten, erhebliche Sandverluste auf Sylt, Schleswig-Holstein		
28.01.1994	Hamburg, Schleswig-Holstein	06.11.1995	Ostsee bis Mittelmeer
06.02.1999	Gesamte Nordseeküste		
03./04.12. 1999	Elbe (Hamburg), Schleswig-Holstein bis Dänemark		
29./30.01. 2000	Dänemark, erhebliche Sandverluste auf Sylt (Kliff)		

3.1 Extreme Sturmfluten an den Nordseeküsten

Extreme Sturmflutereignisse mit erheblichen Landverlusten haben die Entwicklung der Nordseeküste geprägt; aus historischer Zeit sind viele Sturmfluten mit verheerenden Folgen für die Bewohner der Küstenregionen bekannt. Erste Untersuchungen über die Häufigkeit von Sturmfluten werden von BRAHMS (1754) und WOEBCKEN (1924) durchgeführt (vgl. z.B. SCHELLING 1952). Obwohl Sturmfluten in den vergangenen Jahrhunderten die Nordseeküsten immer wieder belastet haben, geben die Sturmflutereignisse der Gegenwart, eingeleitet durch die katastrophale Sturmflut in den Niederlanden im Jahre 1953, Anlass zu der Frage, ob sich eine Veränderung des Sturmflutgeschehens im Bereich der Nordsee eingestellt hat (vgl. z.B. FÜHRBÖTER, 1976 und 1979, SIEFERT 1978, FÜHRBÖTER, JENSEN, SCHULZE UND TÖPPE 1988).

In Abbildung 2 sind am Beispiel der niedersächsischen Küste maximale (Wind)Stauwerte und für die Pegel Nordenerney und Bremerhaven der Zeitreihe 1946 bis 1995 Sturmfluthäufigkeiten angegeben (UMWELTATLAS WATTENMEER BAND 2 - 1999). Der Vergleich der Maximalwerte des Windstaus entlang der niedersächsischen Küste zeigt, dass Sturmfluten in Abhängigkeit der lokalen Windverhältnisse und des Küstenreliefs sehr unterschiedliche Ausprägungen haben können. Die Sturmflut 1906 lieferte in Ostfriesland, die von 1962 im Jade-Weser-Bereich und die von 1976 im Elbegebiet die höchsten Wasserstände.

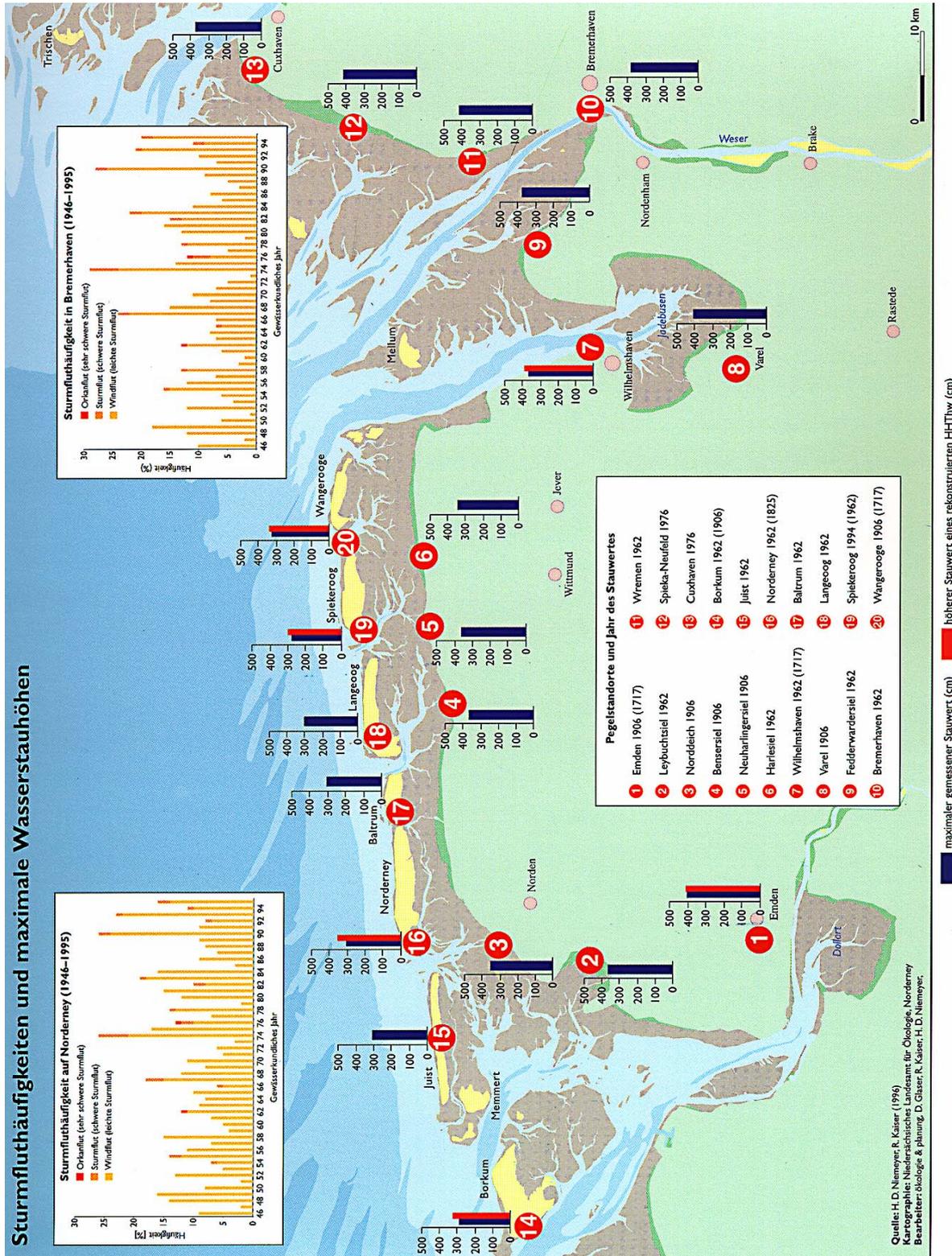


Abb. 2: Sturmfluthäufigkeiten und maximale Stauhöhen für die niedersächsische Küste nach Umweltatlas Wattenmeer, Band 2 (1999)

Die Extremsturmfluten der vergangenen 30 Jahre gehören vorwiegend zu den Sturmfluten, die vor allem in der inneren Deutschen Bucht und in Nordfriesland Höchstwerte erreichten; dies zeigt sich auch darin, dass z.B. für die Pegel Borkum und Emden auch das heute noch gültige HHThw (bisher höchster beobachteter Sturmflutscheitelwasserstand) im Jahre 1906 erreicht wurde, während in

dem Bereich zwischen der Weser- und Elbemündung das HHThw am 16.02.1962 registriert wurde; für Cuxhaven und für die schleswig-holsteinische Westküste gilt das HHThw vom 03.01.1976; am 24.11.1981 wurde dieses wiederum im äußersten Norden z.B. an den Pegeln Dagebüll und List/Sylt übertroffen.

Im Januar und Februar 1990 führten 5 Orkanstürme zu Sturmflutwasserständen an den Küsten Schleswig-Holsteins; am 21./22.01.1993 verursachten mehrere Sturmfluten insbesondere hohe Wasserstände an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins und erhebliche Sandverluste auf der Insel Sylt; auch die Sturmflut am 28.01.1994 führte im Norden von Schleswig-Holstein zu höchsten beobachteten Sturmflutwasserständen. Das Sturmflutereignis vom 06.02.1999 betraf die gesamte deutsche Nordseeküste. Die Sturmflut am 03./04.12.1999 mit wiederum sehr hohen Wasserständen an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins und Dänemarks stellt aufgrund der Zugbahn des Sturmtiefs und der Windgeschwindigkeiten ein Extremereignis dar; die Sturmflut vom 29./30.01. 2000 schließt vorerst die Liste ab.

In Abbildung 3 sind für die Pegel Borkum und Norderney, in Abbildung 4 für Wilhelmshaven und Bremerhaven, in Abbildung 5 für Cuxhaven und Büssum und in Abbildung 6 für Husum und List jeweils die MThw- und HThw-Zeitreihen dargestellt. Auf eine Analyse (Trend usw.) der einzelnen Zeitreihen wird an dieser Stelle verzichtet. Die Auswahl der Pegel (Insel- und Festlandspegel) ist dabei an der jeweils vorhandenen Beobachtungslänge orientiert und über die deutsche Nordseeküste verteilt.

Insgesamt ist festzustellen, dass in den vergangenen drei Jahrzehnten die von Norden nach Süden ausgerichtete Küste Schleswig-Holsteins und die Elbmündung häufiger durch Extreme Wasserstände belastet wurde als die von Westen nach Osten ausgerichtete niedersächsische Küste.

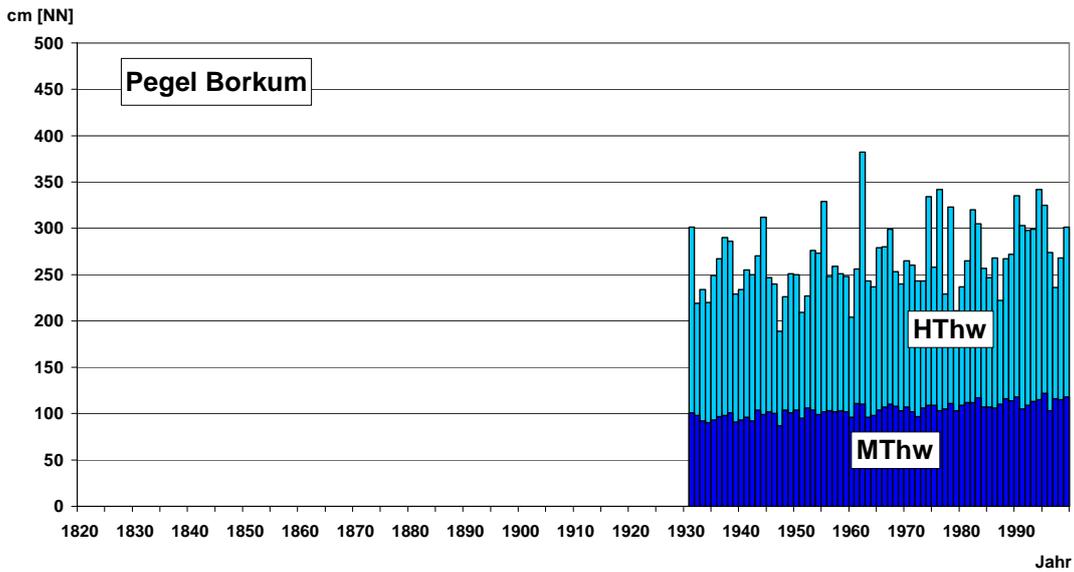


Abb. 3a: MThw- und HThw Zeitreihe für den Pegel Borkum

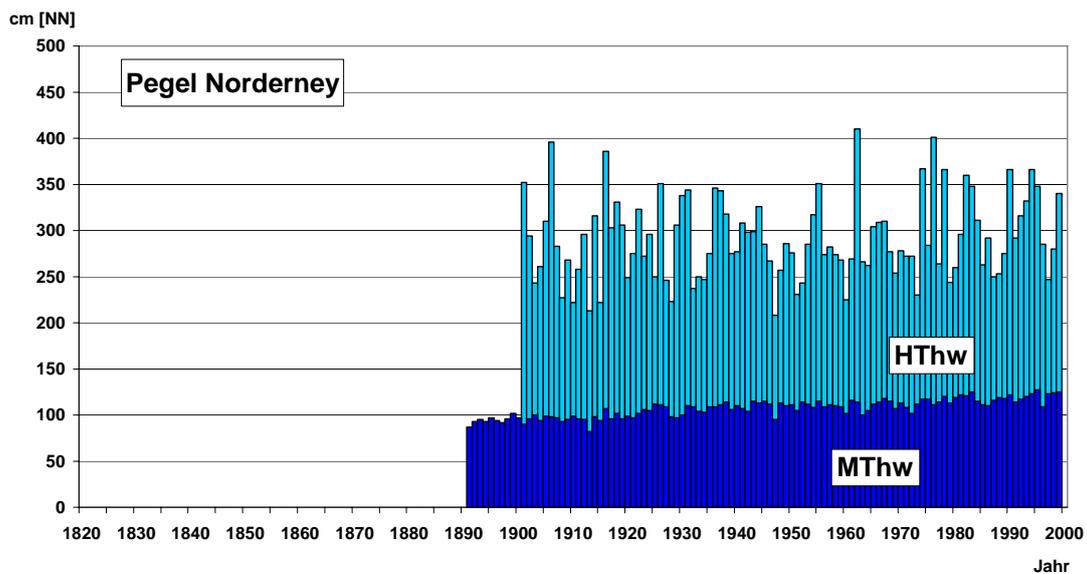


Abb. 3b: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel Norderney

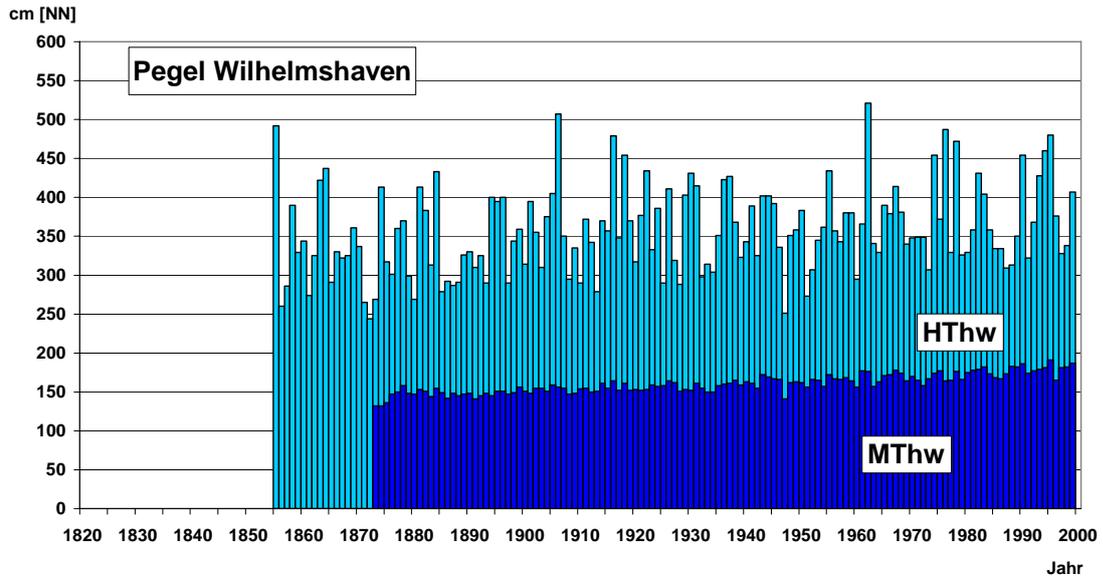


Abb. 4a: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel Wilhelmshaven

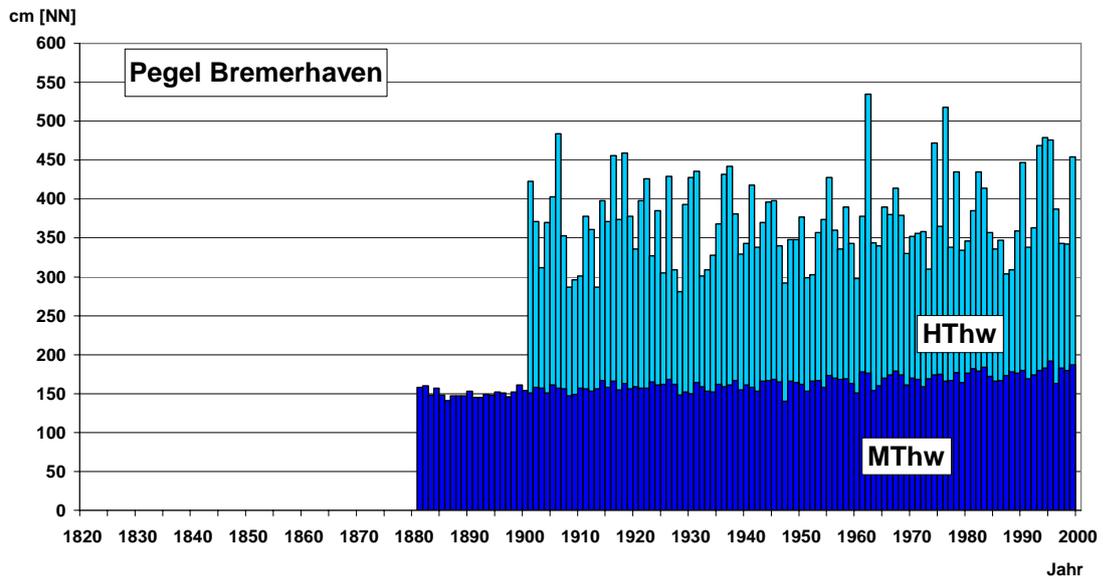


Abb. 4b: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel Bremerhaven

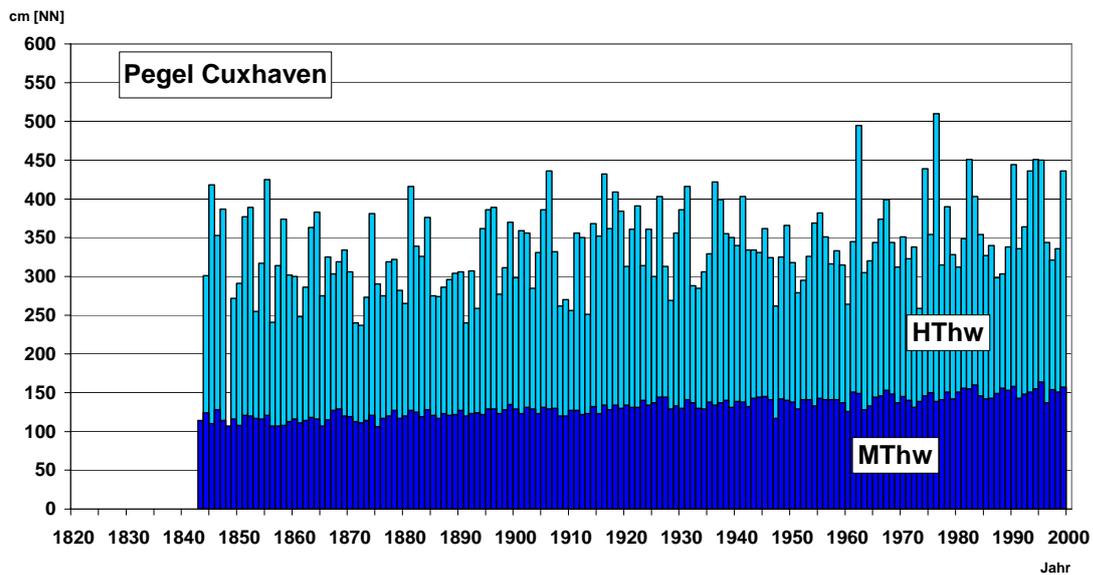


Abb. 5a: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel Cuxhaven

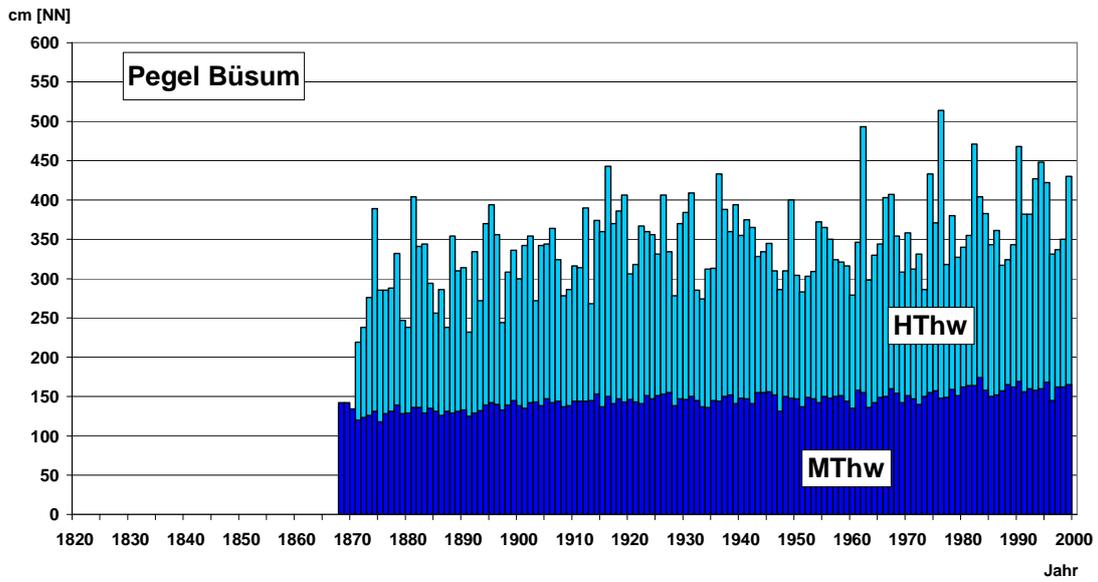


Abb. 5b: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel Büsum

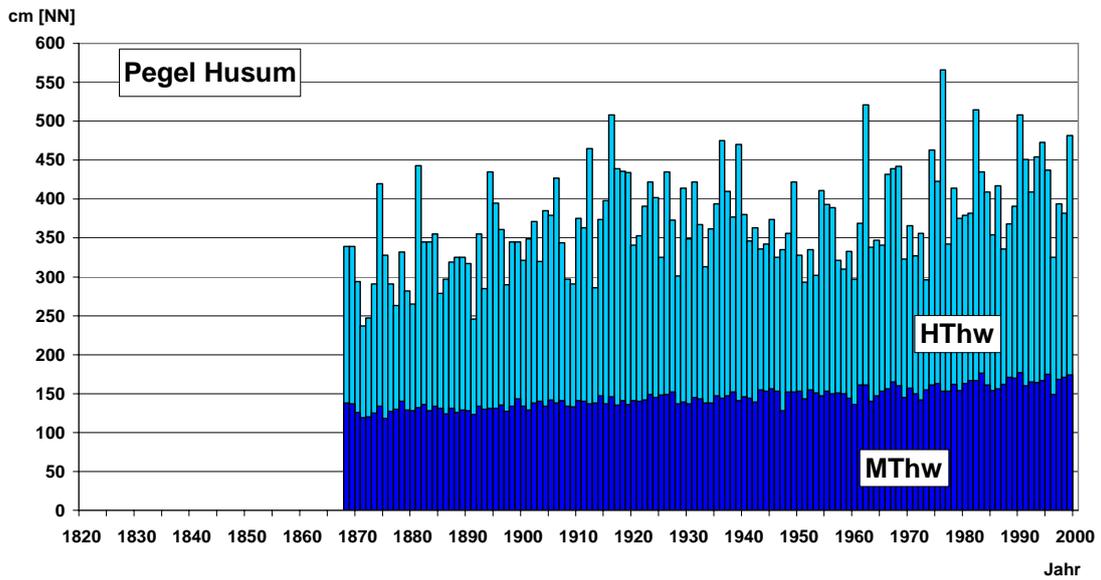


Abb. 6a: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel Husum

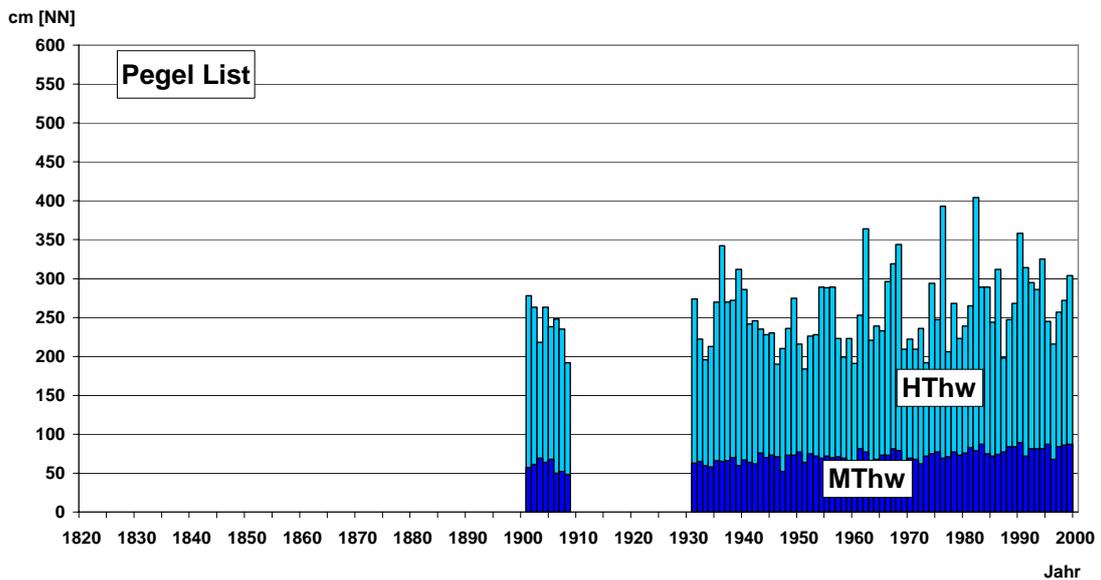


Abb. 6b: MThw- und HThw-Zeitreihe für den Pegel List

3.2 Extreme Sturmhochwasser an den Ostseeküsten

Seit dem 14. Jahrhundert sind erste Aufzeichnungen über Sturmfluten/Sturmhochwasser einschließlich der Scheitelwasserstände entlang der Ostseeküsten vorhanden. Eine erste Höhenangabe ist für die Sturmflut von 1320 für Lübeck mit 3,2 m über Mittelwasser (MW) der Ostsee vorhanden (JENSEN UND TÖPPE 1990). Im November 1872 ist mit Scheitelwasserständen bis zu 3,5 über MW die gewaltigste Sturmflut aufgetreten, die seit Menschengedenken

die Ostsee heimgesucht hat. Viele Autoren haben sich mit dieser verheerenden Sturmflutkatastrophe an der Ostsee befasst (z.B. BAENSCH 1875).

In Abbildung 7 sind für die Ostseeküste stellvertretend die vorliegenden MW- und HW-Zeitreihen für den Pegel Travemünde dargestellt; auf eine Analyse (Trend usw.) der Zeitreihen wird auch hier verzichtet (JENSEN UND BLASI 1998). Der Pegel Travemünde weist die längste kontinuierliche Beobachtungsreihe auf.

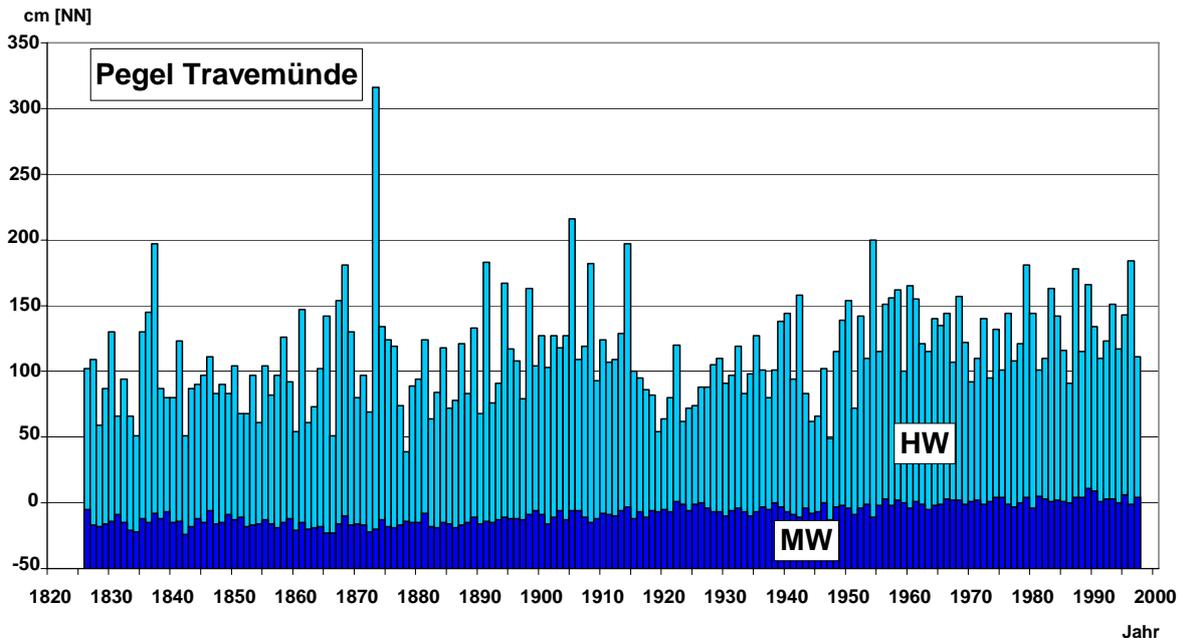


Abb. 7: MW- und HW-Zeitreihe für den Pegel Travemünde

Scheitelwasserstände von mehr als MW + 2 m wurden in dem 20. Jahrhundert von den Sturmhochwasserereignissen am 30./31.12.1904, 30./31.12.1913, 04.01.1954 und am 06.11.1995 verursacht. Die Hochwasser an der Ostseeküste ereignen sich wie an der Nordseeküste vorwiegend in den Wintermonaten Oktober bis März. Das Sturmhochwasser am 27./28.08.1989 trat unerwartet in der Sommersaison auf und verursachte erhebliche Schäden. Das Extremhochwasser am 12./13.11.1872 ist für die gesamte südwestliche Ostseeküste offensichtlich als hinsichtlich der Scheitelhöhe singuläres Naturereignis zu betrachten und stellt damit auch weiterhin die Grundlage für zukünftige Bemessungen dar.

4 Ermittlung von Bemessungsereignissen

Die notwendige Höhe eines Hochwasserschutzbauwerkes an der Küste ist vom maßgebenden Sturmflutscheitelwasserstand vor dem Bauwerk sowie von der anlaufenden maximalen Wellenhöhe und dem damit zusammenhängenden Wellenaufbau abhängig. Für die Festlegung eines Bemessungswasserstandes bzw. einer Jährlichkeit sind neben den Sicherheitsüberlegungen auch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Ein kurzzeiti-

ges Überströmen der Deiche durch einzelne Wellen (Overtopping) ist bei entsprechend konstruktiv gestalteten Seedeichen möglich, ohne dass das Bauwerk beschädigt und die Standsicherheit gefährdet wird (Abbildung 8).

Für die Beurteilung der Folgen aus einem möglichen Meeresspiegelanstieg durch anthropogene Klimaänderungen für den Küstenschutz der Nordsee sind die verschiedenen Wirkungen zu unterscheiden. Die Intensität einer Sturmflut wird im wesentlichen durch die meteorologischen Bedingungen (und damit deren zeitliche Veränderungen) geprägt; die Höhe einer Sturmflut hängt dabei von der zeitlichen Überlagerung der Windstaukurve mit der Tidekurve ab.

Die Anforderungen und Kriterien an Bemessungsereignisse haben sich über einen maßgebenden Sturmflutwasserstand (z.B. HUNDT 1955) über Bemessungswasserstände bis zum Risk Management entwickelt (VRIJLING and VAN GELDER 1999).

Die Scheitelwasserstände von Sturmfluten sind abhängig von der Entwicklung der mittleren Wasserstände. Für eine statistische Betrachtung der Extremwerte bzw. einen Vergleich der Scheitelhöhen von Sturmfluten über die Zeit, ist es erforderlich, diese Daten durch eine Berücksichtigung der mittleren Veränderung der Tidewasser-

stände (z.B. säkularer Meeresspiegelanstieg) zu homogenisieren bzw. zu beschicken. Zur Beschreibung der Wasserstandsentwicklung bzw. der Tidedynamik an der Nordseeküste ist allerdings die Entwicklung der Untersu-

chungen der Zeitreihen der MTnw, MThw und MThb sowie der Ebb- und Flutdauer ein sehr differenziertes Anstiegs- bzw. Änderungsverhalten MThw nicht ausreichend.

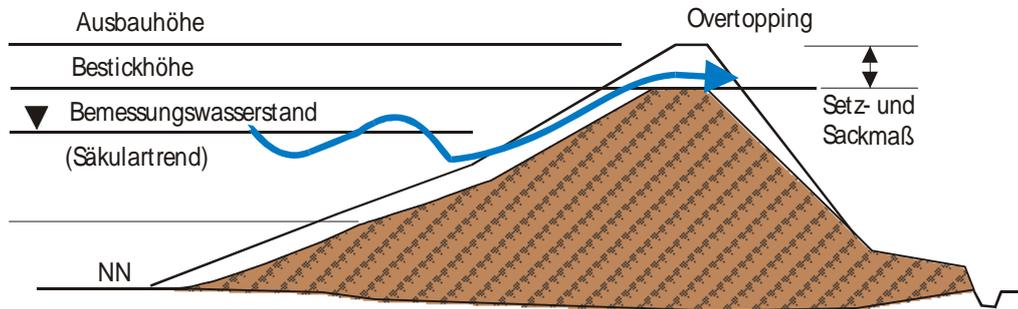


Abb. 8: Bemessungswasserstand und Bestickhöhe von Seedeichen

So zeigen Detaillierte Untersuchungen und Berechnungen zum säkularen Anstieg bzw. zur relativen Änderung innerhalb der mittleren Tidewasserstandszeitreihen (mittleres Tidehochwasser (MThw), mittleres Tideniedrigwasser (MTnw), mittlerer Tidehub (MThb) und Tidehalbwasser (MT $\frac{1}{2}$ w)) an der Nordseeküste bzw. der Mittelwasserstands (MW)-Zeitreihen an der Ostseeküste liegen vor (vgl. z.B. JENSEN 1984 und JENSEN UND TÖPPE 1986). Die Ergebnisse sind als relative Änderung zwischen Land- und Meeresspiegelniveau zu verstehen (TÖPPE 1993). In den beobachteten Wasserständen der niedersächsischen Nordseeküste ist z.B. eine mögliche Niveauverschiebung zwischen Küste und Meer enthalten. Die Analysen werden aus beobachteten Wasserstandszeitreihen abgeleitet (z.B. SCHÜTTE 1908, RIETSCHEL 1933, LÜDERS 1936, ROHDE 1975 u. 1977, KLUG 1980, SIEFERT 1982, FÜHRBÖTER UND JENSEN 1985, JENSEN UND TÖPPE 1986, JENSEN, MÜGGE UND SCHÖNFELD 1992, TÖPPE 1993 u. 1995, STIGGE 1994).

Der zeit- und ortsabhängige Säkularanstieg für die deutsche Nordseeküste wird in JENSEN, MÜGGE UND SCHÖNFELD (1992) angegeben. Der Mittelwert für die deutsche Nordseeküste (linearer Trend) beträgt für die 37 Jahre (2 Perioden der Nodaltide mit 18,6 Jahren) bis 1991 für das MThw + 38 und das MT $\frac{1}{2}$ w + 19 cm/100 Jahre und für die 100 Jahre bis 1991 für das MThw + 26 und für das MT $\frac{1}{2}$ w + 13 cm/100 Jahre. Bei einem Signifikanzniveau von 99% beträgt das Konfidenzintervall etwa +/- 2cm. Nach JENSEN UND TÖPPE (1986) wird für den Pegel Travemünde für die südwestliche Ostsee ein Säkularanstieg von + 12 cm/100 Jahre für den Zeitraum von 1826 bis 1985 bzw. + 16 cm/100 Jahre für den Zeitraum von 1886 bis 1985 errechnet.

4.1 Bemessungswasserstände an der Nord- und Ostseeküste

Die Bestimmung der Bemessungswasserstände an der deutschen Nordseeküste erfolgt bislang überwiegend deterministisch mit pragmatischen bzw. empirischen Ansätzen; probabilistische Verfahren finden kaum Anwendung.

Für die niedersächsischen Küste wird z.B. das Einzelwertverfahren (auch Überlagerungsverfahren oder a-b-c-d Verfahren genannt) angewendet (EAK 1993). Das HThw-Zuschlagsverfahren (oder Vergleichsverfahren) wurde in der Vergangenheit im ostfriesischen Küstenbereich herangezogen. In Schleswig-Holstein wird der maßgebende Sturmflutwasserstand über extrapolierte Wahrscheinlichkeitsgeraden nach WEMELSFELDER und Vergleichsbetrachtungen zu „wahrscheinlichen Höchstwasserständen“ über den größten beobachteten Windstau unter Berücksichtigung des Springtide-Hochwassers festgelegt. Die Ermittlung der Bemessungswasserstände in den Tideästuaren der Ems, Weser und Elbe erfolgt aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im Ästuar (z.B. Oberwassereinfluss, Ausbaumaßnahmen usw.) unter Berücksichtigung von hydraulischen und numerischen Modellversuchen.

Die Deichsollhöhe ergibt sich aus dem festgelegten Bemessungswasserstand und dem jeweils zugeordneten Wellenauflauf; in EAK (1993) sind die derzeit maßgebenden Bemessungswasserstände für die deutsche Nordseeküste einschließlich der Tideästuare Ems, Weser und Elbe aufgeführt. Die festgelegten Bemessungswasserstände werden regelmäßig (etwa alle 10 Jahre) überprüft und ggf. angepasst. Der säkulare Meeresspiegelanstieg wird derzeit an der Nordseeküste mit 30 cm/100 Jahre berücksichtigt. Für den Standort Cuxhaven wurde z.B. der Bemessungswasserstand 2085 gegenüber dem Bemessungswasserstand 1985 um den säkularen Anstieg des MThw von 30 cm erhöht. Für die konstruktive Gestaltung der Küstenschutzbauwerke ist die Verweildauer der Scheitelwasserstände bei Extremereignissen hinsichtlich Wellenauflauf bzw. -überlauf ein entscheidendes Kriterium; an der tidebeeinflussten Nordseeküste sind im Vergleich zur Ostseeküste, mit Belastungszeiten von mehr als 24 Stunden, Verweildauern von maximal ein bis zwei Stunden zu berücksichtigen. So kann bei Seedeichen an der Nordseeküste durchaus ein Wellenüberlauf zugelassen werden.

Die Bemessungsgrundlage für Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste ist der Scheitelwasserstand der katastrophalen Sturmflut vom 12./13.11.1872, die für die gesamte

südwestliche Ostseeküste offensichtlich als singuläres Naturereignis zu betrachten ist. Auf einen Sicherheitszuschlag wird verzichtet; es ist lediglich der Säkularanstieg von 40 cm an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste und von 30 bis 40 cm an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern für einen Bemessungszeitraum von 100 Jahren zu berücksichtigen.

Grundsätzlich ist eine weitere Harmonisierung der Methodik zur Ermittlung von Bemessungsereignissen unter Berücksichtigung des Risiko- bzw. Schadenspotentials des jeweiligen Küstenabschnitts anzustreben (MAI und v. LIEBERMAN 2000). Für die Entwicklung eines geeigneten Risikomanagements sind probabilistische Verfahren unverzichtbar. Bei der Ermittlung von maßgebenden Extremereignissen bzw. Bemessungsereignissen sind neben den rechtlichen Vorgaben, z.B. hinsichtlich der Wiederholzeitspannen der Bemessungsereignisse auch sozioökonomische Aspekte zu beachten.

4.2 Zur Problematik der Extrapolation von maßgebenden Extremereignissen

Die folgenden Ausführungen beziehen sich im wesentlichen auf die Nordseeküste, sie sind aber sinngemäß unter Vernachlässigung der Gezeiten auf die Ostseeküste zu übertragen.

Einzelne Extremereignisse werden durch stochastische, d.h. unvorhersagbare meteorologische Einflüsse auf die astronomische Tide verursacht. Die Höhe solcher Extremereignisse bestimmt unter Berücksichtigung des säkularen Meeresspiegelanstiegs und der vorgegebenen Sicherheiten die maßgebenden Sturmflutwasserstände für Küstenschutzbauwerke. Die Tatsache, dass ein exakter Bemessungswasserstand nicht angegeben werden kann, resultiert aus der Unsicherheit, aus vorausgegangenen Extremwasserständen auf das Auftreten eines noch höheren Wasserstandes zu schließen. In der Praxis wird diesen Umständen dadurch Rechnung getragen, dass bestimmte Kriterien für die laufende Kontrolle eines einmal festgesetzten maßgebenden Sturmflutwasserstandes vorgeschrieben werden.

Eine deterministische Betrachtung der auslösenden Ereignisse und Nutzung dieser als Eingangsparameter in Systemmodelle, wie sie im Binnenbereich z.B. auf der Grundlage von Gebietsniederschlägen (z.B. Starkregenereignisse, Schneeschmelze) möglich ist, kann im Bereich der Küsten und insbesondere der Tideflüsse aufgrund der komplexen Verhältnisse keine bzw. nur eingeschränkt Anwendung finden, weil der Sturmflutwasserstand hier im wesentlichen von den sehr großräumigen Wetterlagen (Tiefdruckgebiete) beeinflusst wird. Die Aufzeichnungen der verfügbaren Windstationen (Windgeschwindigkeit und -richtung) sind quantitativ und qualitativ im Vergleich zu anderen meteorologischen Zeitreihen unzureichend und darüber hinaus auch nur im Küstenbereich vorhanden. Im Bereich der Tideästuare wird der Wasserstand neben den meteorologischen Größen (z.B. Windstau) auch vom Oberwasserabfluss bestimmt.

Die stochastischen Verfahren zur Ermittlung von Bemessungswasserständen oder Bemessungsabflüssen basieren auf der Auswertung aufgezeichneter Wasserstände bzw. Abflüsse mit Hilfe statistischer Verfahren. Dabei wird versucht, mit Hilfe mathematischer Funktionen den Verlauf der Beobachtungswerte zu beschreiben und auf diesen Wege die Ereignisse einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Die Extrapolation von Sturmflutscheitelwasserständen mit bestimmten Jährlichkeiten stellt dabei keine Prognose mit einer zeitlichen Zuordnung dar, sondern die mathematische Extrapolation einer Anpassungsfunktion für das Sturmflutereignis, das innerhalb einer unendlichen Anzahl von Stichproben im statistischen Mittel einmal in der angegebenen Jährlichkeit bzw. mit der Jährlichkeit auftritt. Es ist allerdings zu beachten, dass der extrapolierte Wert bei der Betrachtung einer Stichprobe keinmal, einmal oder mehrmals auftreten kann. Selbstverständlich ist bei der abstrakten theoretischen Ermittlung von Wasserständen mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten die Beachtung der physikalischen Einflussparameter unerlässlich.

Da die in der Hydrologie üblichen statistischen Verfahren zur Abschätzung von Bemessungsereignissen einen langen Beobachtungszeitraum voraussetzen, wobei man sich in der Regel auf eine Extrapolation auf den 2,5 bis 3-fachen Beobachtungszeitraum beschränkt, sind solche Verfahren nicht bzw. nicht hinreichend zur Abschätzung von Ereignissen im Bereich sehr kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten geeignet.

Ein Mangel dieser Verfahren ist, dass die einzelnen klimatischen bzw. meteorologischen, hydrologischen und geophysikalischen Bedingungen, die zu der Entstehung von hydrologischen Extremwerten führen, weitestgehend vernachlässigt werden. Es erfolgt damit ausschließlich eine Betrachtung der beobachteten Extremereignisse. KLEMES (1988) hält daher Abschätzungen von Wahrscheinlichkeiten bzw. Wiederkehrzeiten für extreme hydrologische Ereignisse, die nur auf der Anpassung von Funktionen an beobachtete Werte beruhen, für unbrauchbar und irreführend.

Solange aber die physikalischen Prozesse, die zur Bildung eines extremen Ereignisses führen, nicht bekannt sind, bzw. über deren Anteile zu wenig Daten und Kenntnisse vorliegen, bleibt diese Methodik häufig die einzige Möglichkeit, Bemessungsereignisse festzulegen.

Eine statistische Analyse der auf das Jahr 2000 mit einem Säkularanstieg von 25 cm/100 Jahre beschickten HThw-Zeitreihe (BHThw) ist am Beispiel des Pegels Cuxhaven mit den in der Hydrologie üblichen Verteilungsfunktionen in Abbildung 9 dargestellt. Gute Anpassungen an die Beobachtungswerte können mit den üblichen Beurteilungskriterien mit der JENKINSON-VERTEILUNG, Verfahren A, bzw. mit der LOG-Pearson-III-Verteilung erzielt werden konnte (JENSEN 1985; JENSEN, FRANK UND WISSER 2000). Der Extrapolationszeitraum muss im Hinblick auf die Repräsentanz der Stichprobe für die Grundgesamtheit auf die zwei- bis dreifache Länge des Beobachtungszeitraums beschränkt werden. Bei einem Datenkollektiv von ca. 150 Jahren kön-

nen daher Ergebnisse für Wiederkehrzeiten von etwa 500 Jahre bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeiten von $P = 5 \cdot 10^{-3}$ abgeschätzt werden. Zum Vergleich ist der maßgebende Bemessungswasserstand für das 2085 (NN + 565 cm) dargestellt.

Diese wahrscheinlichkeitstheoretische Auswertung einer Zeitreihe von etwa 150 Jahren erfolgt unter der Voraussetzung, dass die Zeitreihe über diesen Zeitraum homogen und stationär ist und die Einzelwerte unabhängig voneinander sind. Diese Voraussetzungen sind nicht uneingeschränkt als erfüllt anzusehen.

Nur für wenige Küstenabschnitte liegen entsprechende langjährige homogene Zeitreihen von Extremwerten ausreichender Qualität vor, die auf Extremereignisse mit Jährlichkeiten von 500 und mehr Jahren schließen lassen. Für

die meisten Küstenabschnitte sind gesicherte Aussagen allenfalls für Extremereignisse mit Jährlichkeiten von 250 Jahren möglich. Im Binnenwasserbau sind für Bemessungsaufgaben im Bereich der Stauanlagen Jährlichkeiten von 1.000 Jahren bisher schon üblich bzw. Stand der Technik und in der Überarbeitung der DIN 19700 – Teil 12 (Stauanlagen) sind Jährlichkeiten von bis zu 10.000 Jahren vorgesehen. In den Niederlanden sind nach der katastrophalen Sturmflut im Jahr 1953 Jährlichkeiten für die Bemessungswasserstände im Bereich der besonders zu schützenden Küstenabschnitte von 10.000 Jahren gesetzlich festgelegt worden (DE RONDE, DILLINGH UND PHILIPPART 1995).

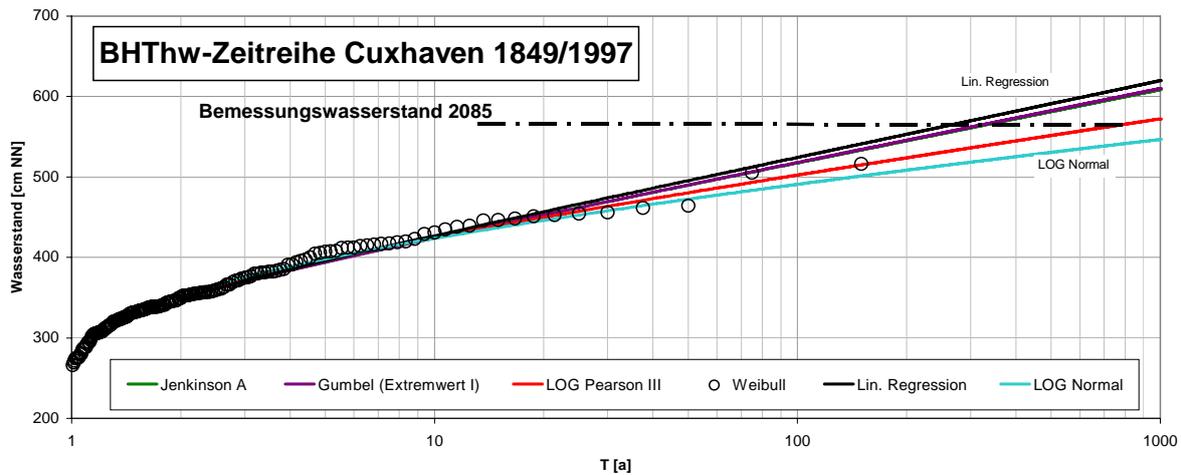


Abb. 9: Verteilungsfunktionen für BHThw-Zeitreihe 1849 bis 1997 des Pegels

Für die deutsche Nord- und Ostseeküste ist derzeit kein Verfahren verfügbar bzw. zwischen den beteiligten Behörden abgestimmt, dass die Ermittlung von Sturmflutwasserständen mit Jährlichkeiten von mehr als 500 Jahren zulässt. Im folgenden wird ein Lösungsansatz zur Ermittlung von Bemessungsereignissen mit sehr großen Jährlichkeiten bzw. sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten vorgestellt.

4.3 Ermittlung von Bemessungsereignissen mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten

Das Ereignis Sturmflut setzt sich aus deterministischen Anteilen (z.B. Tidewasserstand) und stochastischen Anteilen (z.B. Windstau) zusammen. Die wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung sollte aber auf die stochastischen Anteile beschränkt werden. Dem Bemessungswasserstand kann dann aus der Überlagerung der Einzelanteile Tidewasserstand, Windstau, Fernwellen und ggf. anderer Anteile wie Oberwassereinfluss eine bestimmte Jährlichkeit zugeordnet werden. Der Windstau umfasst die meteorologischen Wirkungen und ist im wesentlichen abhängig von der Windwirklänge und der Windrichtung- bzw. -stärke ist und umgekehrt proportional zur Wassertiefe.

Aufgrund der Tatsache, dass ein extremer Wasserstand bzw. eine Sturmflut an der Nordsee nur auftreten kann, wenn mindestens die beiden relativ unabhängigen Einzelereignisse:

- Windstau mit einer bestimmten Jährlichkeit und
- Windstau um den Tidehochwasserscheitel

gleichzeitig auftreten, werden zur Abschätzung der Überschreitungswahrscheinlichkeit des Eintretens des seltenen Ereignisses die Einzelwahrscheinlichkeiten multiplikativ verknüpft, d.h. die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Scheitelwasserstandes ergibt sich aus der Multiplikation der Wahrscheinlichkeit für Windstau einer bestimmten Höhe und der Wahrscheinlichkeit, dass der Windstau zeitgleich um den Tidehochwasserscheitelwasserstand auftritt (bedingte Wahrscheinlichkeiten).

Die Wahrscheinlichkeit für das zeitgleiche Auftreten von Windstaumaximum und Tidehochwasserscheitel wird mit P_Z und die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen eines bestimmten Windstauwertes mit P_W beschrieben; die Wahrscheinlichkeit für das Gesamtereignis „maximaler Sturmflutwasserstand“ ergibt sich damit zu:

$$P_{ges} = P_Z \cdot P_W$$

Der dieser multiplikativ verknüpften Wahrscheinlichkeit für das Gesamtereignis zugeordnete Wasserstand ergibt sich zu:

$$W(P_{ges}) = Tidescheitelwasserstand (MThw) + W(P_w)$$

Diesem Wasserstand ist für die Ermittlung des Bemessungsereignisses der für den Planungszeitraum aktualisierter Säkularanstieg hinzuzufügen.

Anders als bei anderen mehrdimensionalen Verfahren, die außer den genannten Größen noch weitere Einzelereignisse berücksichtigen, soll hier ein pragmatischer Ansatz vorgestellt werden, der auch für Pegel bzw. Küstenabschnitte anwendbar ist, für die nur eine relativ geringe Datenbasis zur Verfügung steht. Grundsätzlich können in einem solchen Modell auch andere Einzelereignisse wie erhöhter Oberwasserzufluss, Eisstau oder andere Komponenten berücksichtigt werden. In erster Näherung wird eine Überlagerung der beiden Ereignisse „max. Windstau trifft mit einem Tidehochwasserscheitelwasserstand zusammen“ und „Windstau erreicht eine bestimmte Jährlichkeit“ betrachtet. Ein solches phänomenologisches Vorgehen hat vor allem für die Abschätzung der sehr seltenen Ereignisse gegenüber einer „klassischen“ statistischen Betrachtung von Extremwerten der Wasserstandsmaxima den Vorteil, dass der Extrapolationszeitraum für beide Ereignisse noch innerhalb der statistisch akzeptabler Grenzen bleibt und die Abschätzung des Gesamtereignisses zuverlässiger erfolgen kann.

Zeitreihen von äquidistanten und homogenen Windstauwerten liegen leider nicht für die Pegel an der Nord- und Ostseeküste vor; die vorhandenen Windstauzeitreihen sind

bedingt nutzbar. Das vorgestellte Konzept wird im folgenden am Beispiel des Pegels Cuxhaven angewandt, weil die im „Sturmflutatlant“ registrierten Windstauwerte (152 Werte für den Zeitraum 1901 bis 1995) genutzt werden können (s. GÖNNERT und SIEFERT 1998). Die von der Länderarbeitsgruppe (EAK 1993) und in dem KFKI-Projekt (GÖNNERT 1999) verwendeten Daten stellen nicht den „wahren“ Windstau dar, der sich aus der Differenz zwischen beobachtetem Wasserstand und astronomisch berechneter Tide ergibt, sondern einen Gesamtstau, der aus der Differenz zwischen beobachtetem Wasserstand und einer mittleren Tide bestimmt wurde. Ein solcher Windstau (besser: Gesamtstau) enthält neben dem eigentlichen Windstau noch andere Anteile (Fernwellen, Eigenschwingungen der Nordsee, Anteile aus Luftdruckschwankungen usw.).

Windstauwerte mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten können für den Pegel Cuxhaven aus der Zeitreihe aller Windstauwerte (Windstauatlant 1901 bis 1995) mit verschiedenen Verteilungsfunktionen abgeschätzt werden. In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Anpassungsrechnungen mit geeigneten Verteilungsfunktionen für die 152 ausgewerteten Windstauwerte dargestellt; die Auswertungen wurden mit DATAN durchgeführt (JENSEN, FRANK UND WISSER 2000). Mit diesen Ergebnissen können gesicherte Aussagen zu Jährlichkeiten im Bereich bis zu 250 Jahren abgeleitet werden; die Ergebnisse für Jährlichkeiten größer 250 Jahre sind allerdings nur als formale Auswertungen der Verteilungsfunktionen zu verstehen.

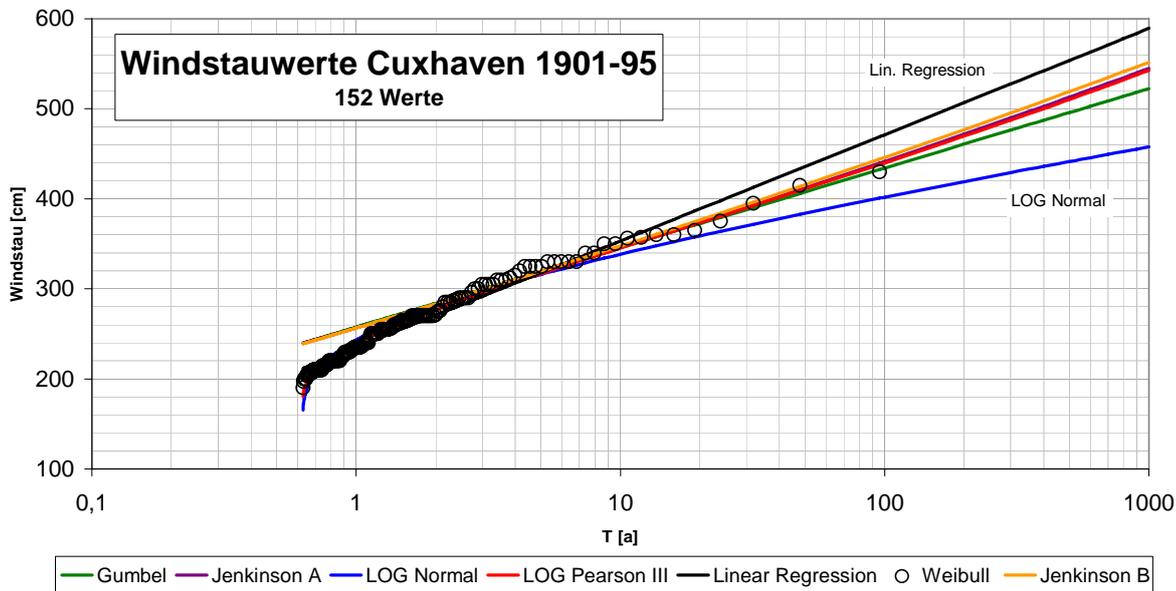


Abb. 10: Anpassungsfunktionen für Windstauwerte am Pegel Cuxhaven (unabhängig von der Lage zum Tidescheitel)

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für das etwa zeitgleiche Auftreten von Windstau und Tidescheitelwasserstand ist in der Abschätzung wesentlich komplexer als die Abschätzung eines Windstaus mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit.

Dazu muss die zeitliche Überlagerung der beobachteten Windstauereignisse und die Höhe des Windstaus in Abhängigkeit der Tidephase betrachtet werden. Nach Untersuchungen von GÖNNERT (1999) ist eine Konzentration der Windstaumaxima kurz vor bzw. bei T_{nw} festzustellen (s. Abbildung 11). Ein exaktes Zusammentreffen des maxima-

len Windstau mit dem Tidehochwasserscheitel ist in diesem Jahrhundert nur bei einer höheren Sturmflut im Jahr 1995 aufgetreten. Weiterhin ist für die Beurteilung der zeitlichen Überlagerung von maximalen Windstau und

Tidephase zu berücksichtigen, dass das Verhältnis der Windstaumaxima bei Thw zu den Windstaumaxima bei Tnw mit 0,9 angegeben wird.

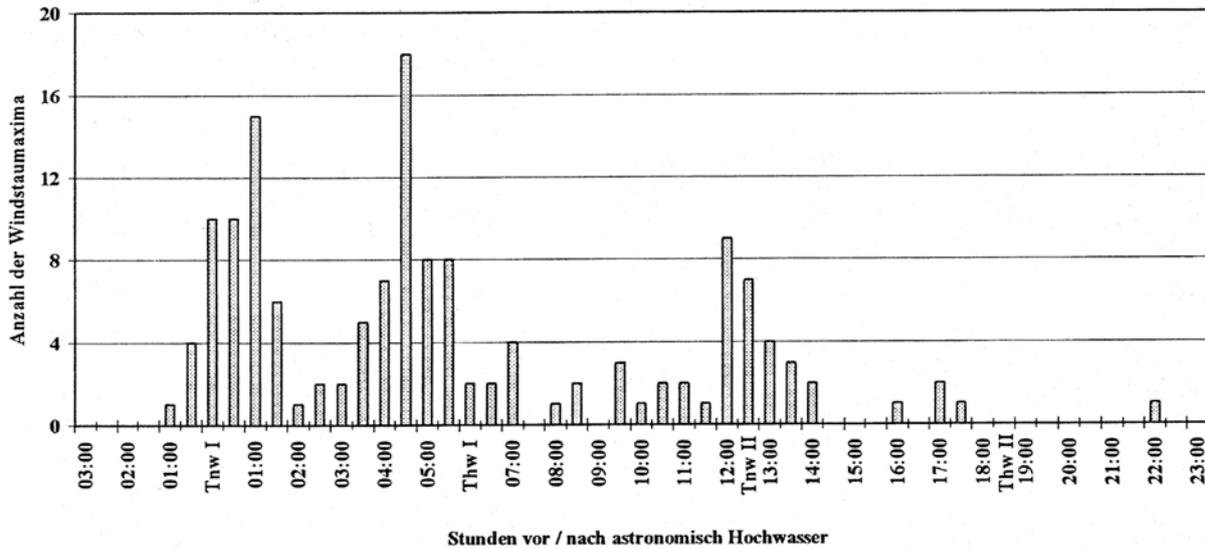


Abb. 11: Lage der Windstaumaxima zur Tidephase (GÖNNERT 1999)

Wird vereinfachend unterstellt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Windstaus einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu allen Tidephasen gleich groß ist und ein kritisches Zeitfenster von $\Delta t = 1$ bis 2 Stunden zugrunde gelegt wird, ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit für das zeitgleiche Auftreten von maximalen Windstau und Tidehochwasserstand von etwa $1/12$ bis $1/6$. Nach Auswertungen aller im Windstauatlas aufgeführten Windstauereignisse für den Pegel Cuxhaven und Berücksichtigung des Verhältnisses von 0,9 der Windstaumaxima bei Thw zu den Windstaumaxima bei Tnw wird die Wahrscheinlichkeit für eine maximale Überlagerung innerhalb der „kritischen 1 bis 2 Stunden“ um den Tidehochwasserscheitel auf $P_z = 1/10$ abgeschätzt.

Wird z.B. eine Jährlichkeit von 1000 Jahren bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_{ges} = 1/1.000$ für das Bemessungsereignis vorgegeben, ergibt sich damit eine erforderliche Wahrscheinlichkeit $P_w = 1/100$ für das zugeordnete Windstauereignis (aus dem Kollektiv aller beobachteten Windstauereignisse).

Der Windstau mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren beträgt nach Abbildung 10 $W_{100} = 440$ cm (LOG-Pearson-III, beste Anpassungsfunktion nach dem Kriterium des mittleren Fehlers); bei einem mittleren Thw der Zeitreihe 1986/95 ergibt sich der Bemessungswasserstand mit einer Jährlichkeit von 1.000 Jahren ($P = 1/1.000$) zu:

$$BW_{1.000} = NN + 150\text{cm (MThw)} + 440\text{cm} = NN + 590\text{cm}$$

Entsprechend dem Planungszeitraum ist zusätzlich der säkulare Anstieg S_T zu berücksichtigen.

Nach Abbildung 9 wird z.B. mit der LOG-Pearson-III-Verteilung für die BHTw-Zeitreihe 1849 bis 1997 der entsprechende Wasserstand mit $BW_{1.000} = NN + 572$ cm (LOG-Pearson-III-Verteilungsfunktion, beste Anpassungs-

funktion nach dem Kriterium des mittleren Fehlers) abgeschätzt.

Mit dem vorgestellten Verfahren STAUZEIT, unter Berücksichtigung von bedingten Wahrscheinlichkeiten, können auch Wasserstände, ggf. mit weiteren Simulationsrechnungen zur zeitlichen Überlagerung des Windstaus mit der Tidephase, (z.B. mit der Monte Carlo Methode), mit Jährlichkeiten 1.000 Jahre abgeschätzt werden. Weitere Untersuchungen zu Teilzeitreihen der Windstauwerte, z.B. Kollektiv der Windstauwerte um Tidehochwasser, bestätigen die vorgestellten Ergebnisse.

5 Zusammenfassung

Extreme Sturmflutereignisse mit erheblichen Landverlusten haben die Entwicklung der Nord- und der Ostseeküste geprägt; aus historischer Zeit sind viele Sturmfluten mit verheerenden Folgen für die Bewohner der Küstenregionen bekannt. In Tabelle 2 ist eine Chronik der Sturmfluten und Sturmhochwasser an der deutschen Nord- und Ostseeküste (südwestliche Ostseeküste) zusammengestellt. Die Anzahl der Sturmfluten bzw. Sturmhochwasser mit extremen Wasserständen ist an der Nordseeküste im Vergleich zur Ostseeküste deutlich größer.

Der wesentliche Grund ist das auslösende meteorologische Ereignis; Wetterlagen die an der Ostseeküste zu extremen Wasserständen führen sind relativ selten.

Zur Einordnung der historischen Sturmfluten, d.h. der Sturmfluten bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts, ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der mittleren (Tide-) Wasserstände erforderlich, weil die Höhenangaben auf das Mittelwasser (Ostsee) oder mittlere Tidehochwasser bzw. den mittleren Meeresspiegel (Nordsee) bezogen werden.

Da neben den Folgeerscheinungen der Eiszeiten auch die Küstenbewegungen (Tektonik) zu berücksichtigen sind, ist der Verlauf der zeitlichen Entwicklung des mittleren Meeresspiegels nicht exakt nachvollziehbar. Detaillierte Kenntnisse zur mittleren Wasserstandsentwicklung liegen erst ab etwa 1850 für die Nord- und Ostseeküste vor.

Untersuchungen zu Sturmfluten (Sturmhochwasser) bzw. extremen Wasserständen an der Nord- und Ostseeküste wurden für einzelne Extremereignisse, z.B. die katastrophale Ostseesturmflut vom November 1872 oder auf der Basis von Extremwerten durchgeführt; darüber hinaus liegen aktuelle Untersuchungen zum Windstauanteil von Sturmfluten an der Nordseeküste und zu Sturmhochwasserereignissen an der Ostseeküste vor.

Die Bestimmung der Bemessungswasserstände an der deutschen Nordseeküste erfolgt bislang überwiegend deterministisch mit pragmatischen bzw. empirischen Ansätzen; probabilistische Verfahren finden kaum Anwendung. Für die niedersächsischen Küste wird z.B. das Einzelwertverfahren herangezogen und in Schleswig-Holstein wird der maßgebende Sturmflutwasserstand über extrapolierte Wahrscheinlichkeitsgeraden und Vergleichsbetrachtungen festgelegt. Die Ermittlung der Bemessungswasserstände in den Tideästuaren der Ems, Weser und Elbe sollte aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im Ästuar unter Berücksichtigung von numerischen Modellen bzw. Simulationen erfolgen.

Die Bemessungsgrundlage für Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste ist die Sturmflut vom 12./13.11.1872, die für die gesamte südwestliche Ostseeküste offensichtlich als singuläres Naturereignis zu betrachten ist.

Für die Nordseeküste kann die Wahrscheinlichkeit eines extremen Sturmflutwasserstandes beschrieben werden, indem die Einzelwahrscheinlichkeiten für die beiden relativ unabhängigen Ereignisse „Windstau einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit tritt auf“ und „Windstau dieser Wahrscheinlichkeit tritt bei Tidehochwasser auf“ multiplikativ verknüpft werden. Das vorgestellte Verfahren zur Ermittlung von Bemessungsereignissen mit sehr großen Jährlichkeiten bzw. sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten (STAUZEIT) kann zur Anwendung für die Küstenpegel an der deutschen Nordseeküste grundsätzlich empfohlen werden. Dazu ist es erforderlich, geeignete Zeitreihen der Wind- bzw. Gesamtstauwerte bereitzustellen. Eine Anwendung des Verfahrens STAUZEIT für die Tideästuare der Ems, Elbe und Weser ist nicht zulässig.

6 Schrifttum

BAENSCH, J.: Die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des preußischen Staates. Zeitschrift für Bauwesen, Heft 25, 1875

BAERENS, C. HUPFER, P. NÖRTHEL, H. UND STIGGE, H.-J.: Zur Häufigkeit von Extremwasserständen an der deutschen Ostseeküste. Sturmflutniedrigwasser. In: Spezialarbeiten aus der Arbeitsgruppe Klimaforschung des Meteorologischen Institutes der Humboldt Universität zu Berlin, Nr. 9, 1995

BRAHMS, A.: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasser- Baukunst., 2. Auflage, Aurich 1754

DE RONDE, J.G., DILLINGH, D. AND PHILIPPART, M.E.: Design Criteria along the Dutch Coast, in Proceedings of the Hydrocoast Conference 1995, IHP-Project H-2-2, 1995

EAK 1993: Die Küste (div. Autoren): Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Heft 55, Boyesen&Co.Heide, 1993

FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Veränderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der Deutschen Nordseeküste, Mitt. d. Leichtweiss-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 51, 1976.

FÜHRBÖTER, A.: Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten von Extremsturmfluten, Die Küste, Heft 34, 1979

FÜHRBÖTER, A., JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht, Die Küste, Heft 42, 1985

FÜHRBÖTER, A., JENSEN, J., SCHULZE, M. UND TOPPE, A.: Sturmflutwahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste nach verschiedenen Anpassungsfunktionen und Zeitreihen. Die Küste, H. 47, 1988

GÖNNERT, G., SIEFERT, W.: Sturmflutatlant Cuxhaven, Studie 91, Strom- und Hafenbau Hamburg, 1998

GÖNNERT, G.: Windstauanalysen in Nord- und Ostsee, Abschlussbericht zum KFKI Forschungsvorhaben, März 1999

HUNDT, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbesteck der schleswig-holsteinischen Westküste, Die Küste, Jg. 3, Doppelheft 12, 1955

JENSEN, J. UND TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertungen von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen DGM, Jahrgang 30, Heft 4, 1986

JENSEN, J. UND TÖPPE, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen DGM, Jahrgang 34, H.1/2, 1990.

JENSEN, J., MÜGGE, H.-E. UND SCHONFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 53, 1992

JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. d. Leichtweiss-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 83, 1984.

JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Mitt. d. Leichtweiss-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 88, 1985.

JENSEN, J. UND BLASI, C.: Changes of Synoptic Water Data in the South-Western Baltic sea. Second Study Conference on BALTEX, Conference Proceedings No. 11, Geesthacht, 1998

- JENSEN, J., FRANK, T. UND WISSER, D.: DATAN - An MS Excel based tool for estimating design values in hydrology. In Sergey A. Yufin (Editor): Geolecology And Computers, Verlag A.A.Balkema, Rotterdam, 2000
- KLEMENS, V.: The Improbable Probabilities of Floods and Droughts, in: Hydrology of Desasters, Proceedings of the Techn Conference, Geneva, 1988, WMO, 1989
- KLUG, H.: Der Anstieg des Ostseespiegels im Deutschen Küstenraum seit dem Mittelatlantikum. Eiszeitalter und Gegenwart 30, 1980
- Kramer, J.: Kein Deich - Kein Land - Kein Leben - Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee. Verlag Gerhard Rautenberg, Leer, 1989
- LIESE, R.: Beitrag zur Ermittlung der Höhe kommender Sturmfluten, DGM, Jg. 7, 1963
- LÜDERS, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste, Zentralblatt der Bauverwaltung, Heft 50, 1936
- LÜDERS, K.: Über die Gültigkeitsdauer des Bemessungswasserstandes für Seedeiche an der niedersächsischen Nordseeküste, Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Jahresbericht 1969, Band XXI, Norderney, 1971
- MAI, ST., VON LIEBERMAN, N.: Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 83, Hannover, 1999
- PETERSEN, M. UND POHDE, H.: Sturmflut – Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Karl Wachholtz Verlag Neumünster, 1991
- RIETSCHEL, E.: Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung, Dt. Wasserwirtschaft, 5, Berlin, 1933
- ROHDE, H.: Wasserstandsbeobachtungen im Bereich der deutschen Nordseeküste vor der Mitte des 19. Jahrhunderts, Die Küste, Heft 28, 1975
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste, Die Küste, Heft 30, 1977
- SHELLING, H.: Die Sturmfluten an der Westküste Schleswig-Holsteins unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Pegel Husum, Die Küste, Heft 1, 1952
- SCHÜTTE, H.: Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste, Jb. Oldenburg, Verl. Altertumskunde, Landesgesch. 16, Oldenburg, 1908
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen, Mitt. des Leichtweiss-Instituts der TU Braunschweig, Heft 63, 1978
- STIGGE, H.-J.: Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns, Die Küste, Heft 56, 1994
- TÖPPE, A.: Zur Analyse des Meeresspiegelanstieges aus langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen an der deutschen Nordseeküste. Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, H. 120, 1993
- TÖPPE, A.: Beschleunigter Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nordseeküste? Eine Analyse langjähriger Wasserstandsaufzeichnungen unter Berücksichtigung verschiedener Einflußgrößen. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG), 1995
- Umweltatlas Wattenmeer: Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer; Umweltbundesamt: Band 1 Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer, Ulmer Verlag, Stuttgart, 1998
- Umweltatlas Wattenmeer: Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer; Umweltbundesamt: Band 2 Wattenmeer zwischen Elb- und Emsmündung, Ulmer Verlag, Stuttgart, 1999
- WOEBCKEN, C.: Deiche und Sturmfluten an der Nordseeküste, Friesenverlag Bremen, 1924
- VRIJLING, P.H.A., VAN GELDER, J.M.: Uncertainty Analysis of Water Levels on Lake IJssel in the Netherlands, Proceeding of the 28th IAHR Congress, Graz, 1999