

Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

Von HANS-JOACHIM STIGGE

Zusammenfassung

Die wichtigsten hydrologischen Besonderheiten der Küste von Mecklenburg-Vorpommern werden diskutiert. Es werden Bemessungswasserstände, Scheitelwerte, Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit von Sturmfluten, Harmonische Konstanten und Langzeittrends des Meeresspiegelanstiegs angegeben.

Summary

The most important hydrological features of the Mecklenburg-Vorpommern coast are discussed. The design water levels, extreme water levels, frequency and probability of storm surges, harmonic components and long-term trends of the mean sea level are specified.

Inhalt

1. Der Einfluß regionaler klimatologischer Besonderheiten auf die Wasserstandsentwicklung	1
2. Höhenbezug der Wasserstandsdaten	3
3. Scheitelwerte bekannter Sturmfluten	4
4. Bemessungswasserstände	4
5. Anmerkung zur Boddenproblematik.	9
6. Häufigkeit von Sturmfluten	11
7. Wahrscheinlichkeit extremer Wasserstände	13
8. Überschreitungsdauer höherer Wasserstandsstufen	15
9. Dauer von Wasserstandsereignissen, die mit hohen Änderungsgeschwindigkeiten eingeleitet werden	17
10. Periodische Wasserstandsschwankungen	18
11. Säkulare Wasserstandsänderungen	19
12. Schlußbemerkungen	21
13. Schriftenverzeichnis.	21

1. Der Einfluß regionaler klimatologischer Besonderheiten auf die Wasserstandsentwicklung

Der Wasserhaushalt der Ostsee wird zwar auch von den hydrologischen Verhältnissen im Skagerrak und Kattegatt gesteuert, bezüglich exzeptioneller Wasserstandsereignisse an der deutschen Küste führt das Binnenmeer jedoch ein ausgesprochenes „Eigenleben“, denn diese Effekte werden von den Wind- bzw. Luftdruckfeldern über dem Seegebiet angeregt (SAGER, MIEHLKE, 1956). Die so determinierten Wasserstände der Beltsee bestimmen wiederum den Wasseraustausch durch die dänischen Meerengen (JACOBSEN 1986; LAZARENKO, 1986).

Klimatologisch gesehen liegt die Ostsee im nördlichen Bereich des Westwindgürtels der

nördlichen Halbkugel. Wie stark die mittlere Windrichtung wirklich dominiert, der tatsächliche Wetter- und Witterungsablauf und letztlich auch die Hydrodynamik der Ostsee in allen entsprechenden Zeitskalen, hängt von den konkreten Zugbahnen der Tiefdruckgebiete über Skandinavien und Mitteleuropa ab. Ein Zusammenhang mit dem 11jährigen bzw. quasi-säkularen Zyklus der Sonnenaktivität, wie schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts erwähnt (BREHMER, 1916; DUDEL, 1961; LABITZKE, VAN LOON, 1988-1990; STIGGE, 1990), könnte somit durchaus auch einen „Ostsee-internen“ Charakter haben. Nach HUPFER (1965) erhöht sich durch eine verstärkte Meridionalzirkulation bzw. eine abgeschwächte Zonalzirkulation die Sturmflutwahrscheinlichkeit an der südlichen Beltseeküste.

Abbildung 1 verdeutlicht die Entstehung einer Sturmflut infolge der Verlagerung eines Tiefdruckgebietes von Südschweden in das Baltikum. Zunächst sorgt Südwestwind für einen Stau in der nördlichen Ostsee. An der deutschen Küste sinkt der Wasserstand. Nachdem der

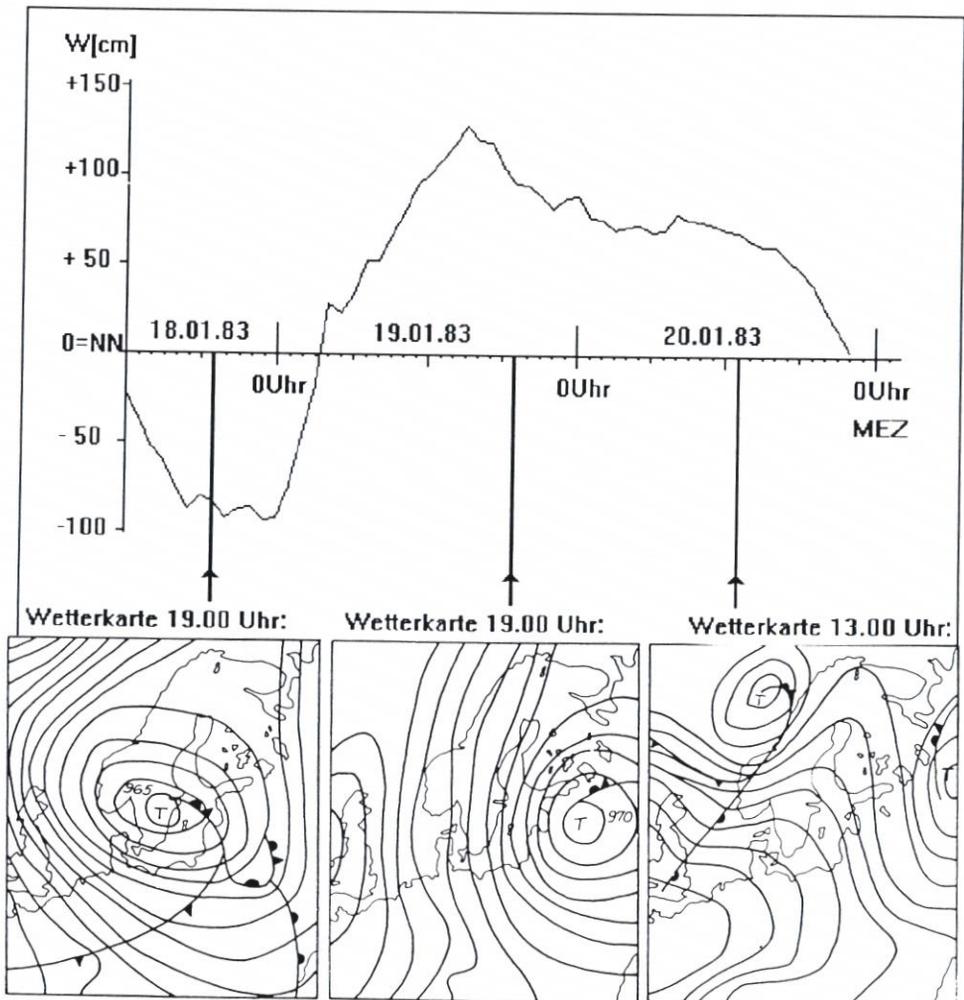


Abb. 1: Typische Entwicklung der Wasserstände am Pegel Wismar als Folge der Wetterentwicklung im Ostseeraum

Tiefdruckkern die Ostsee überquert hat, stellt sich nördlicher Wind ein und verleiht den zurückflutenden Wassermassen den entscheidenden Impuls. In Abhängigkeit vom zeitlichen Ablauf solcher Prozesse neigt die Ostsee zu einknotigen Oberflächenseiches mit einer Periode von 27,5 Stunden. Diese Eigenschwingungen der Ostsee wurden von NEUMANN (1941) untersucht und gelten als Standardbeispiele für die Dynamik relativ abgeschlossener Meeresbecken (DIETRICH/KALLE, 1975; MAGAARD/RHEINHEIMER, 1974; KRAUSS, 1966). Beschreibungen der dazugehörigen Meteorologie finden sich in zahlreichen Dokumentationen einzelner Sturmfluten, insbesondere bei KOHLMETZ (1964) und MAJEWSKI et al. (1983).

Auch die Naturerscheinung „Seebär“ – ein plötzlicher Anstieg und ebenso schneller Abfall des Wasserstandes – ist im Zusammenhang mit Wetterfronten zu interpretieren (HUPFER, 1978; MAJEWSKI, 1989).

Da Wasserstände immer relativ zu Höhenmarken auf dem Festland gemessen werden, muß die Veränderung der Lage dieser Marken im irdischen Schwerfeld beachtet werden – insbesondere, weil die postglazialen geologischen Prozesse, die die heutige Ostsee formten, noch anhalten (DIETRICH u. KÖSTER, 1974). Die seit ca. 7500 Jahren stattfindende, vermutlich ungleichförmige (HURTIG, 1954) Kippung des Fennoskandischen Schildes bewirkte im letzten Jahrhundert immerhin eine Landhebung von nahezu 1 m in Nordskandinavien sowie eine Landsenkung der südwestlichen Ostseeküste von etwa 1 dm.

Die Bestimmung des Geoids, eine Voraussetzung für die physikalische Beurteilung jeglicher Wasserstandsmessungen, kann aber infolge der erwähnten klimatologischen Bedingungen nicht mit der Bestimmung eines „mittleren Wasserstandes“ identisch sein (EKMAN, MÄKINEN 1991). Außerdem sind, im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt, globale Wasserstandsanstiege im Dezimeterbereich schon auf Grund der thermischen Ausdehnung der Weltmeere wahrscheinlich (BARTH, TITUS, 1984; PUGH, 1989; GRUBERT, 1989; CUBASCH, SANTER, SAUSEN, 1991).

2. Höhenbezug der Wasserstandsdaten

Die relative Genauigkeit der Wasserstandsmessungen liegt in der Größenordnung +/- 2 cm (BIERMANN, MELLENTIN, 1980). Bei den Mittelwerten langer Reihen geht man – eine symmetrische Verteilung der möglichen Fehler vorausgesetzt – von höheren Genauigkeiten aus. Die hydrodynamischen Bewegungsgleichungen implizieren mit der „kräftefreien Wasseroberfläche“ allerdings auch einen absoluten Höhenbezug im irdischen Schwerfeld. Da ein solcher Höhenbezug für die praktischen Fragestellungen des 19. und 20. Jahrhunderts von sekundärem Interesse war, arbeitete man in den unterschiedlichsten, z.T. unveröffentlichten Bezugssystemen (MONTAG, 1964). Von 1910 bis einschließlich Oktober 1985 wurden die Wasserstandsmessungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns auf NNalt bezogen. Der generalisierte Pegelnullpunkt lag 500 cm unter NNalt. Im Zuge eines 1976 durchgeführten Nivellements sind in der DDR Normalhöhen eingeführt worden, und es ergaben sich von West nach Ost zunehmende Systemdifferenzen zwischen HN'76 und NNalt. Die Frage: „Beibehaltung der alten Sollhöhenunterschiede (gleichbedeutend mit unterschiedlichen Pegelnullpunkten bezüglich HN) oder Einstellung auf das offensichtlich bessere Äquipotentialsystem?“ wurde für die Küstenpegel im letzteren Sinne beantwortet und die Umstellung des gemeinsamen Pegelnullpunktes am 1. November 1985, 00.00 Uhr MEZ vollzogen. Die bezüglich der mittleren Wasserstände an der deutschen Küste ungünstigere absolute Höhenlage des vom „Kronstadt-Niveau“ abgeleiteten HN-Horizontes wurde durch die Wahl des Pegelnullpunktes so kompensiert, daß die mittleren Wasserstände sich bei 500 cm am Pegel

einstellen mußten. Der Pegelnullpunkt PN an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns wurde folgendermaßen neu definiert:

$$PN = HN-514 \text{ cm (STIGGE, 1989)}$$

Das hatte nun folgende Konsequenzen:

a) Es ergab sich die Notwendigkeit einer Systemumrechnung seit dem 1. 11. 1985. Die Daten fallen seitdem – mit einer Ausnahme – höher aus und müssen zum Zwecke der Vergleichbarkeit mit den alten Daten um folgende Beträge reduziert werden:¹

Wismar:	4,2 cm	Warnemünde:	1,9 cm	Stralsund:	2,2 cm
Saßnitz:	3,0 cm	Greifswald:	2,0 cm	Koserow:	4,4 cm
Wolgast:	2,1 cm	Ueckermünde:	-0,2 cm		

b) „NNalt“ entfiel als generalisiertes Mittelwasser. Da die Beibehaltung einer solchen Größe für fast alle praktischen Belange im Zusammenhang mit Wasserständen zweckmäßig ist, und auch in späteren Zeiten zweckmäßig sein wird, wurde dem Normenausschuß der DDR 1989 die Definition eines „Normalmittelwassers“ empfohlen, das immer – auch bei eventuell notwendigen Veränderungen der Pegelnullpunkte – 500 cm am Pegel betragen sollte. Ein generalisierter mittlerer Wasserstand wäre nämlich für die Bezeichnung des „Normalen“ unumgänglich, falls NN als Bezugshorizont entfiel. De facto wurde bereits seit 1985 an der Mecklenburg-Vorpommerschen Küste so verfahren.

3. Scheitelwerte bekannter Sturmfluten

Die wichtigsten Quellen über Sturmfluten bis zur Nachkriegszeit für Mecklenburg-Vorpommern bilden KOLP (1955) und KOHLMETZ (1964) sowie die Berichte über bedeutende Sturmfluten (BAENSCH, 1875, BARNEWITZ, 1925, GEINITZ, 1914, KRÜGER, 1911, REINHARD, 1949). Ihre Aussagen sind (zum Teil ungeprüft) in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

4. Bemessungswasserstände

Der Begriff des Bemessungswasserstandes bezeichnet Hochwasserscheitelwerte, mit deren Auftreten im Rahmen der natürlichen Gegebenheiten gerechnet werden muß. Er ist keine „Naturgröße“, sondern beinhaltet Konzessionen und Spielräume menschlichen Ermessens (MIEHLKE, 1969). Im allgemeinen wurden die Bemessungswasserstände an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns von den Hochwasserscheitelwerten der bisher höchsten bekannten Sturmfluten von 1872 und 1913 abgeleitet (vgl. Tabelle 1).

Berücksichtigt man die in Pkt. 1 beschriebene Kausalität für das Zustandekommen von Ostsee-Sturmfluten, so versteht sich eine Abnahme der Bemessungswasserstände von den Enden zum Mittelpunkt der Ostseelängsachse. In dem hier hervorgehobenen Gebiet zwischen Trave und Swine spielt aber offensichtlich auch die Lage der Küstennormalen zu der „gefährlichen“ Windrichtung Nordost eine Rolle. Während für die Küstenabschnitte westlich der Darßer Schwelle die 1872er Sturmflut als das herausragende singuläre Ereignis betrachtet

¹ Die Rechnung im neuen HN-System und eine entsprechende Beaufschlagung der Altdaten ist aber u. U. vorteilhaft!

Tabelle 1. Extremwasserstände der Sturmfluten an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns größer und gleich 1 m über NNalt. Angaben in cm über NN (alt)

Datum	Wismar	Warnem.	Saßnitz	Strals.	Greifsw.	Koserow
10. 02. 1625	ca. 280	ca. 280				
10. 01. 1694	ca. 280					
26. 12. 1836	ca. 200					
05. 01. 1864				180		
30. 12. 1867	ca. 180					
13. 11. 1872	280	243		239	264	
09. 02. 1874						ca. 220
05. 12. 1883	117	122				
23. 02. 1889	132	104				
25. 11. 1890	167	148	144			
20. 11. 1893	148	111				
25. 03. 1898	118	99				
15. 12. 1901	117	108	100	120	109	
19. 04. 1903	152	125	106	137	129	
01. 12. 1903		110				
31. 12. 1904	228	188	209	216	239	
06. 12. 1906		112				
09. 01. 1908	148	142	84	111	137	
30. 12. 1909		103				
14. 10. 1910		109				
30. 12. 1913	208	189		232	210	
04. 04. 1911		95				
09. 01. 1914	157	160				
29. 09. 1914		111				
14. 01. 1916		102				
04. 12. 1917	125	115			123	
03. 01. 1918		96				
24. 10. 1921		116				
07. 11. 1921	196	150				
28. 10. 1922		97				
10. 11. 1923		103				
06. 02. 1924	128	114				
22. 12. 1926		97				
13. 12. 1928		93				
16. 01. 1929		95				
16. 12. 1931	116	104	64	83	104	
20. 02. 1932		106				
16. 10. 1934		116				
03. 03. 1935	133	116	102	117	149	
25. 10. 1935	130	115	121	125	140	
09. 02. 1936	127	111	102	80	119	
05. 10. 1936		102				
10. 12. 1937		97				
14. 02. 1939	126	101	104			
28. 10. 1939		94				
20. 01. 1940	143	120	80	70	72	
29. 09. 1940		92				
27. 12. 1941		130		70		
04. 03. 1945		102				
13. 01. 1946	149	129	50	96	140	
22. 01. 1949	121	115	112	100	118	
02. 03. 1949	174	150	144	100	180	

Datum	Wismar	Warnem.	Saßnitz	Strals.	Greifsw.	Koserow
11. 12. 1949	164	129	80	100	84	82
21. 12. 1952	112	110	98	100	138	95
04. 12. 1952	113	89				
04. 01. 1954	210	170	140	173	182	160
15. 11. 1954	101	92				
17. 01. 1955	144	117	73		110	180
25. 11. 1955	146	133	110	124	120	145
28. 10. 1956	120	100	84	105	118	100
30. 10. 1956	116	102	75	95	108	85
14. 01. 1957	127	107	75	98	108	99
29. 11. 1957	132	117	116	128	142	135
14. 12. 1957	156	135	105	138	152	140
07. 01. 1958	144	112	85	105	114	110
26. 02. 1958	105	92	75			
11. 01. 1960	120	105	79			
14. 01. 1960	155	118	77	106	113	
10. 12. 1960	144	121	78	104	110	
21. 03. 1961	113	106	82	92	103	
18. 02. 1962	112	114	107	112		
21. 02. 1962	118	110	109	117		
15. 01. 1963		108	75			
13. 12. 1963	114	98	67	86	96	
06. 02. 1964	107	92	97	100	113	
08. 02. 1965	125	113	103	121	132	
27. 02. 1965	107	82	73	84	118	
21. 11. 1965	126	99	55	83	87	
18. 10. 1967	91	76	105	69	108	
12. 01. 1968	155	150	110	144	154	
16. 02. 1969	104	88	48	62	71	
28. 02. 1971	109	94	89	116	131	
09. 09. 1971	84	75	90	93	115	
19. 11. 1971	101	97	75	82	89	
08. 12. 1971	121	112	105	115	130	
29. 12. 1971	128	121	100	113	117	
13. 11. 1972	123	115	69	46	61	
20. 11. 1973	105	104	100	104	107	
25. 11. 1973	89	66	100	80	101	
29. 11. 1973	100	95	77	83	94	
08. 12. 1973	117	99	82	91	102	
22. 10. 1974	109	87	65	77	81	
30. 12. 1974	82	80	89	91	100	93
21. 11. 1975	115	96	76	92	87	92
04. 01. 1976	136	128	75	128	144	147
06. 01. 1976	111	103	78	83	91	92
17. 01. 1976	94	88	96	83	111	132
26. 12. 1976	107	91	87	93	107	134
27. 11. 1977	89	81	84	88	99	120
04. 01. 1978	116	100	88	90	100	105
29. 11. 1978	103	94	93	107	119	127
31. 12. 1978	120	114	61	98	93	77
15. 02. 1979	159	127	80	92	98	
11. 12. 1979	123	109	80	101	110	101
29. 11. 1980	94	85	78	95	108	133
06. 11. 1981	98	86	83	88	99	110
14. 11. 1981	104	98	77	84	91	98

Datum	Wismar	Warnem.	Saßnitz	Strals.	Greifsw.	Koserow
01. 12. 1981	96	86	78	83	89	101
06. 01. 1982	112	95	85	89	103	135
19. 01. 1983	130	115	121	107	130	149
02. 02. 1983	109	106	116	103	120	138
08. 02. 1983	147	130	102	119	113	127
25. 09. 1983	96	90	98	89	105	113
28. 11. 1983	142	132	116	119	128	155
30. 11. 1983	102	90	75	86	95	94
10. 12. 1983	109	92	87	94	112	143
09. 01. 1984	111	100	99	101	114	134
04. 01. 1985	112	98	75		95	100

Umstellung des Pegelbezugshorizontes: Die folgenden Werte

sind um 4,2 1,9 3,0 2,2 2,0 4,4 cm zu reduzieren bzw. die vorherstehenden zu beaufschlagen! Extremwasserstände der Sturmfluten größer und gleich 1 m über Normalmittelwasser = HN - 14 cm = 500 cm am Pegel Angaben in cm bezogen auf Normalmittelwasser.

Datum	Wismar	Warnem.	Saßnitz	Strals.	Greifsw.	Koserow
10. 04. 1986	88	69	61	90	110	116
21. 10. 1986	119	106	55	51	65	108
19. 12. 1986	141	127	109	106	120	146
22. 12. 1986	103	92	77	77	90	87
06. 01. 1987	118	102	92	106	115	118
09. 01. 1987	111	100	105	95	124	146
12. 01. 1987	173	142	114	117	143	120
25. 11. 1987	102	84	63	83	81	67
11. 12. 1987	106	89	81	84	92	88
26. 02. 1988	107	81	55	72	81	71
02. 11. 1988	130	116	110	100	106	101
30. 11. 1988	147	128	120	124	136	152
14. 12. 1988	111	100	83	99	108	103
20. 12. 1988	120	107	94	112	128	123
05. 04. 1989	114	99	51	78	80	81
18. 07. 1989	80	77	56	67	88	114
28. 08. 1989	151	118	68	88	90	75
30. 09. 1989	80	74	70	78	89	97
03. 10. 1989	110	101	76	86	103	122
15. 11. 1989	128	112	84	89	96	103
23. 11. 1989	102	90	71	79	91	96
28. 11. 1989	122	104	103	107	119	142
07. 12. 1989	133	115	114	115	122	126
15. 12. 1989	103	83	67	85	99	86
10. 03. 1990	86	83	97	92	104	105
26. 03. 1990	102	88	74	85	87	82
30. 11. 1990	112	91	96	101	115	124
27. 12. 1991	117	99	89	96	96	95
17. 01. 1992	113	98	136	120	129	150
17. 02. 1992	124	104	85	94	104	90

werden muß, sind Ereignisse mit vergleichbaren, zum Teil schlimmeren Auswirkungen in den weiter östlich gelegenen Boddengebieten durchaus nicht selten.

Mit 2,80 m über NN liegt der Bemessungswasserstand für Wismar unter den von der schleswig-holsteinischen Küste bekannten Werten. Der von KOLP (1955) angegebene und auch am Wismarer „Baumhaus“ markierte Höchstwert vom 13. 11. 1872 „paßt“ mit „3,06 m über NN“ zwar besser zu den Werten aus Lübeck und Travemünde, beruht aber mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einem Irrtum: Der Wasserstand von 3,06 m bezog sich nämlich nicht auf NN, sondern auf den damaligen Pegelnullpunkt, der für Wismar entsprechend tiefer gelegen haben muß. Das geht aus PASCHEN (1882) eindeutig hervor.

Abbildung 2 zeigt ein Zwischenergebnis bei der Berechnung neuer Bemessungswasserstände für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns auf der Basis der bisher gebräuchlichen internen Unterlagen des Wasserstandsdienstes für 1970 (MIEHLKE, 1967).

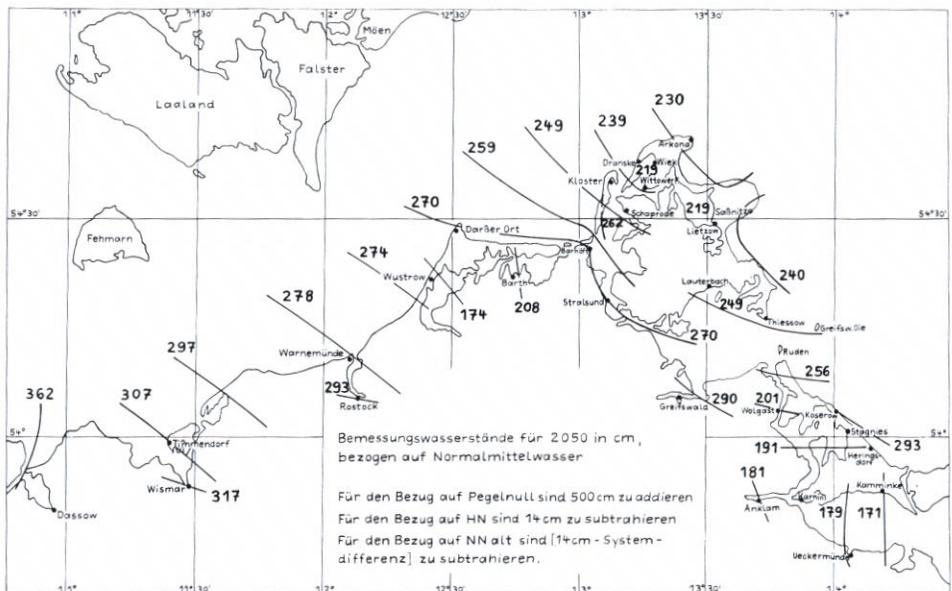


Abb. 2: Zwischenergebnis für die Festlegung von Bemessungswasserständen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

Bis zum Jahr 2000 wurden die von WEISE (1990) angegebenen Niveaushiftungen (vgl. Pkt. 11) für die verbleibenden 30 Jahre angesetzt und gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Arbeiten von STRIGGOW und TILL (1987) linear interpoliert. Vom Jahre 2000 bis zum Jahre 2050 wurde der in Punkt 11 beschriebene säkulare Anstieg von 2,4 mm/Jahr (+ 12 cm) für die gesamte Mecklenburg-Vorpommersche Küste angenommen. Die Abbildung ist aus folgendem Grunde in (an sich illusorischer) Zentimetergenauigkeit gehalten: Als MIEHLKE die Urversion dieser Übersicht verfaßte, wählte er Dezimeter-Genauigkeit. Nur einige Küstenbereiche wurden infolge Interpolation auf 5 cm genau geschätzt. Der genutzte Ermessensspielraum war groß und eine spezielle Hochwassergefährdung der flachen Usedomischen Ostküste infolge Energietransformation aus den Pegelaufzeichnungen von Swinemünde unbekannt. Die nun erforderlichen Korrekturen weisen teilweise Millimeter-Genauigkeit auf, so daß notwendige Verbesserungen im Zentimeterbereich ohne weiteres möglich sind, wenn man sich nur

über die ursprüngliche Genauigkeit im klaren ist. Wenn auch spätere Generationen von Hydrologen jeweils auf den Ergebnissen ihrer Vorgänger aufbauten, könnte andernfalls – weil man aus Sicherheitsgründen immer aufrundet – der Rundungsfehler weit über den von Miehle ursprünglich begangenen hinausgehen. Folgende auf halbe Dezimeter gerundete, auf NNalt und das Jahr 2070 bezogene Bemessungswasserstände werden z. Z. vom Staatlichen Amt für Umwelt und Natur, Rostock, mitgeteilt (auszugsweise wiedergegeben):

Tabelle 2. Einige Bemessungswasserstände

Ort	Bem.-Wass. in m NNalt	Ort	Bem.-Wass. in m NNalt
Arkona	2,30	Saßnitz	2,40
Glowe/Rügen	2,30	Göhren	2,40
Dassow	2,95	Lauterbach	2,50
Boltenhagen	3,10	Thießow	2,50
Wismar	3,20	Barhöft	2,70
Timmendorf/P.	3,05	Stralsund	2,70
Rerik	3,00	Strahlbrode	2,70
Warnemünde	2,85	Greifswald	3,00
Rostock	3,00	Ost-Usedom	3,00
Dierhagen	2,80	Barther Bodd.	2,05
Darß/Zingst	2,70	Saaler Bodd.	1,65
Neuendorf	2,50	Kl. Haff/Ost	1,65
Kloster	2,50	Kl. Haff/West	1,75

Der Unterschied zwischen den Zahlen in Abbildung 2 und Tabelle 2 ist nicht gravierend und entspricht an der Außenküste den o. e. Rundungsgepflogenheiten. Angesichts der Tatsache, daß die Konzipierung von Hochwasserschutzanlagen sowohl den Veränderungen des hydrologischen Regimes (Klimaveränderungen usw.) als auch ökonomischen Kriterien Rechnung tragen muß, interessiert als Bemessungsgröße letztlich nicht nur der mögliche Hochwasser-Scheitelwert, sondern die komplexere Größe des zeitlichen Ablaufs der Sturmfluten und der Zusammenhang mit ursächlichen Wetterentwicklungen. Seegangsbelastung, Küstenkonfiguration und Schorprofil spielen dabei als Meßgrößen nicht nur eine entscheidende Rolle zur Charakterisierung der Abrasions- bzw. Sedimentationsprozesse, sondern beeinflussen auch Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse der küstennahen Flachwasserzone.

5. Anmerkung zur Boddendeproblematik

Zu den Bemessungswasserständen der Boddengebiete sei angemerkt, daß sie eher durch die Andauer der hohen Wasserstände an der Außenküste als durch deren Scheitelwerte limitiert sind. So stammen die Extremwerte der Boddengebiete meist nicht von 1872, sondern von 1913. Eine Unterscheidung zwischen Luv- und Leeküsten gegenüber der nordöstlichen Windrichtung erweist sich in diesen flachen Gewässern als zweckmäßig. Abbildung 3, die die Wasserstandsentwicklung anlässlich eines Nordweststurms über dem Oderhaff wiedergibt, mag die mögliche Größenordnung solcher lokalen Effekte verdeutlichen. Hydrodynamische Modellierungen und spezielle Gutachten sind also nicht durch einfache geographische Richt-

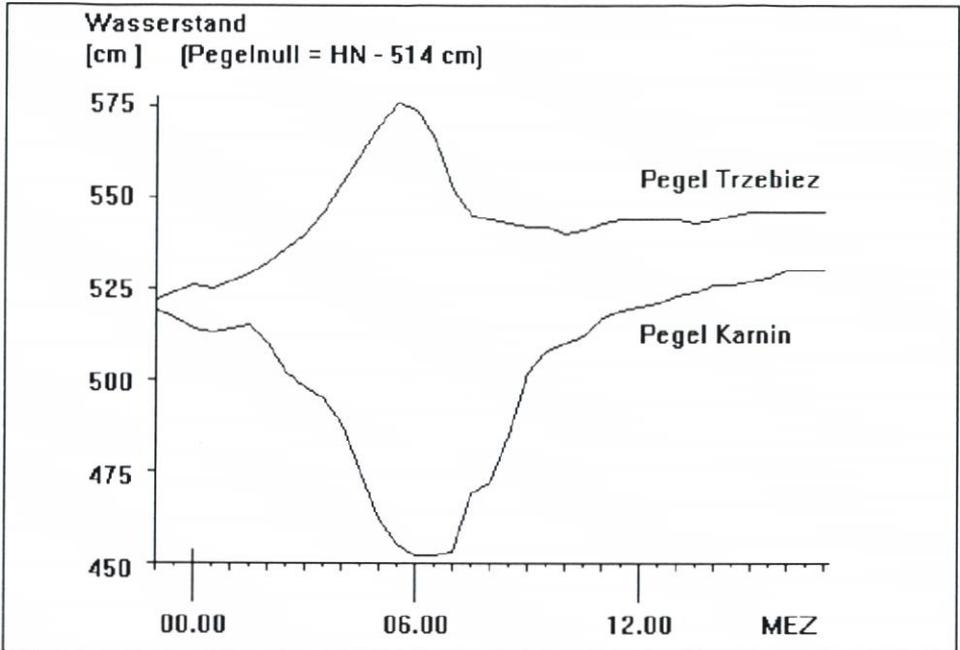


Abb. 3: Wasserstandsentwicklung anlässlich des Nordweststurmes vom 20. 01. 1986 an zwei Pegeln des Oderhaffs

werte zu ersetzen, besonders dann nicht, wenn die geplanten Maßnahmen Eingriffe in das hydrodynamische System bzw. Ökosystem darstellen. Selbstverständlich stehen für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns auch verallgemeinernde statistische Aussagen zur Verfügung. In diesem Zusammenhang sind die Wasserhaushaltsstatistik nach CORRENS (1979), weitergeführt von MERTINKAT (1992), Strömungsmessungen im Greifswalder Bodden von HACKERT (1967) sowie der Fundus hydrologischer Gutachten der ehemaligen Wasserwirtschaftsdirektion Küste erwähnenswert.

Lokale Unterschiede sind selbst mit Hilfe von Naturmessungen oft nur schwer feststellbar, und das Ergebnis hängt nicht selten von der verwendeten Methodik ab. Vergleicht man beispielsweise die den Gewässerkundlichen Jahrbüchern zu entnehmenden „Hauptzahlen“ der Pegel Wittower Fähre und Ralswiek/Gr. Jasmunder Bodden, so stellt man eine recht deutliche binnenseitige Dämpfung der Hochwasseramplituden fest. Erst mit Hilfe einer 30jährigen Reihe der Pegel Martinshafen/Ralswiek zeigte sich, daß die nach dem Gumbel-Verfahren berechneten Hochwasserwahrscheinlichkeiten für die möglichen Wiederkehrintervalle bis zu ca 60 Jahren von „Wittower Fähre“ und „Martinshafen/Ralswiek“ kaum voneinander abwichen. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß die extremen Sturmfluten immer auch von einer starken Nordkomponente des lokalen Windes begleitet werden. Der lokale Stau-effekt innerhalb des Boddengewässers scheint sich hier statistisch niederzuschlagen. Aus sporadischen Beobachtungen in der Boddenkette südlich Darß/Zingst bei Sturm aus östlicher Richtung ist ebenfalls bekannt, daß das Wasserspiegelgefälle in der Nähe der Gewässerverengung Meiningenbrücke deutlich höher ausfällt, als der mittleren Füllung der Boddengewässer entsprechend.

Tabelle 3. Auszug aus der Hochwasserstatistik 1991

Althagen (Beobachtungszeitraum: 52 Jahre)						
$Y = 0.0678048 * (X - 552.92)$	$X = 14.74822 * Y + 552.92$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	575	586	597	610	621	631
Barth (Beobachtungszeitraum: 52 Jahre)						
$Y = 0.0551589 * (X - 561.22)$	$X = 18.12944 * Y + 561.22$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	588	602	615	632	645	657
Greifswald (Beobachtungszeitraum: 56 Jahre)						
$Y = 0.0485209 * (X - 601.40)$	$X = 20.60966 * Y + 601.40$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	632	648	663	682	696	711
Sassnitz (Beobachtungszeitraum: 87 Jahre)						
$Y = 0.0535893 * (X - 583.67)$	$X = 18.66044 * Y + 583.67$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	612	626	639	656	670	682
Stralsund (Beobachtungszeitraum: 61 Jahre)						
$Y = 0.0533632 * (X - 586.65)$	$X = 18.73951 * Y + 586.65$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	615	629	642	660	673	686
Ueckermuende (Beobachtungszeitraum: 45 Jahre)						
$Y = 0.0698171 * (X - 566.45)$	$X = 14.32314 * Y + 566.45$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	588	599	609	622	632	642
Warnemuende (Beobachtungszeitraum: 88 Jahre)						
$Y = 0.451460 * (X - 593.68)$	$X = 22.15036 * Y + 593.68$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	627	644	659	680	696	711
Wismar (Beobachtungszeitraum: 79 Jahre)						
$Y = 0.0399412 * (X - 610.35)$	$X = 25.03683 * Y + 610.35$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	648	667	685	708	726	743
Wolgast (Beobachtungszeitraum: 56 Jahre)						
$Y = 0.0754170 * (X - 563.00)$	$X = 13.25961 * Y + 563.00$					
T (in Jahren):	5	10	20	50	100	200
HW-Wert (in cm):	583	593	602	615	624	633

6. Häufigkeit von Sturmfluten

Eine Auszählung der in Tabelle 1 aufgeführten Wasserstandsscheitelwerte von mindestens 1 m über NNalt (nach dem 1. 11. 85 abzüglich der Systemdifferenz von 2 cm) für Warnemünde (Abb. 4) zeigt eine deutliche Zunahme der Sturmfluthäufigkeit im 20. Jahrhun-

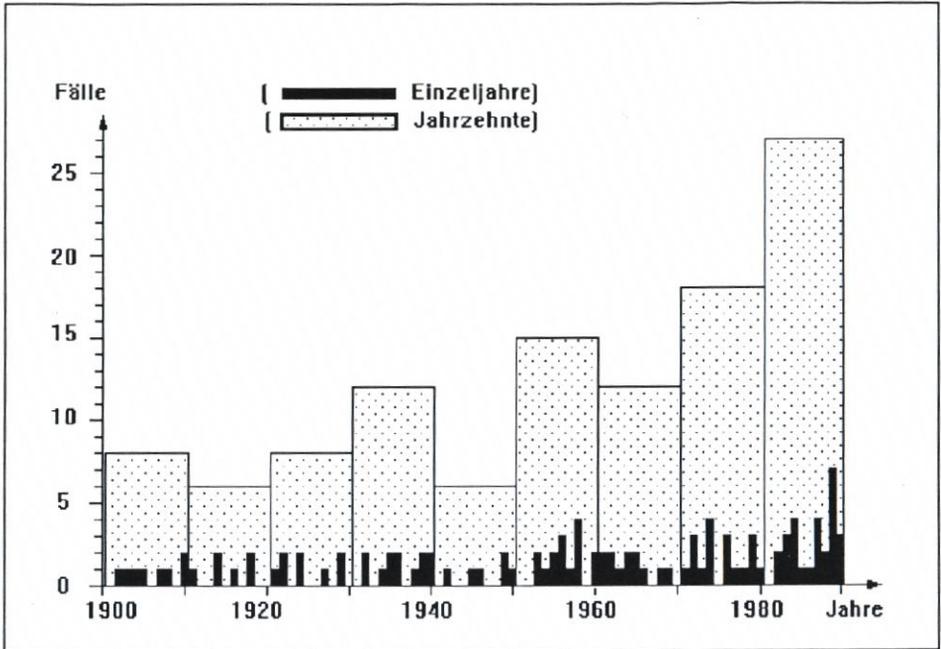


Abb. 4: Anzahl der Sturmfluten in Warnemünde seit 1901

dert. Besonders auffällig wird dies hinsichtlich der Jahrzehnte. Das Ergebnis steht im Einklang mit ähnlichen Untersuchungen an der deutschen Nordseeküste (FÜHRBÖTER, TÖPPE, 1991) sowie mit den Beobachtungen am Pegel Travemünde (JENSEN, TÖPPE, 1990).

Es stellt sich nun die wichtige Frage, inwieweit sich diese Häufigkeitszunahme schon aus dem mittleren Meeresspiegelanstieg, aus veränderten hydrodynamischen Randbedingungen oder gar aus veränderten klimatologischen Szenarien ergibt. Letzteres, z. B. die Verstärkung bestimmter wiederkehrender Merkmale in den Luftdruckfeldern, (HUPFER, 1965; für die Deutsche Bucht von PLATE und IHRINGER, 1991, angenommen) ist keineswegs auszuschließen, auch wenn solche Effekte hart an der Nachweisgrenze liegen sollten.

Für die Ostsee wird z. Z. allgemein ein Anstieg der Scheitelwerte extremer Sturmfluten von etwa gleicher Größenordnung wie der Anstieg des mittleren Meeresspiegels erwartet, da sich ein Effekt höherer Ordnung aus dem Meeresspiegelanstieg bisher nicht ableiten läßt. STENGEL und ZIELKE (1991) wiesen z. B. für die Deutsche Bucht mit einer hydronumerischen Methode nach, daß – gleiche meteorologische Szenarien vorausgesetzt – ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels wegen des kleiner werdenden „banking-up-Effektes“ keinen zunächst befürchteten darüber hinausgehenden Anstieg der Hochwasserscheitelwerte an der deutschen Nordseeküste bewirken würde. Dieser auch aus der Praxis der Sturmflutvorhersagen für die Deutsche Bucht bekannte Effekt, der auf der Energietransformation zwischen Tiefwasser und Flachwasser sowie auf der Tatsache beruht, daß der lokale Windstauereffekt in flachen Gewässern höher ausfällt. (ANNUTSCH, 1977) dürfte sinngemäß auch für die Ostsee zutreffen. Das charakteristische Eigenschwingungsspektrum des Ostsee-Beckensystems, das sich insbesondere für hydrologische Extremsituationen zeigt, sollte gegenüber den Änderungen des mittleren Wasserstandes ebenfalls relativ invariant sein (vgl. Pkt. 9). Die seit Jahrzehnten praktizierte Beaufschlagung der Bemessungswasserstände mit dem festgestellten

säkularen Wasserstandsanstieg erscheint damit gerechtfertigt. Die wachsende Sturmfluthäufigkeit wird also bezüglich der Bemessungshöhen relativ unproblematisch sein, solange die Ursache dafür nicht in der Zunahme der anregenden Windenergie selbst liegt. Letzterer Aspekt ist Gegenstand der Klimawirkungsforschung. Vorerst darf man konstatieren, daß sich zumindest ein Teil der Häufigkeitszunahme aus dem Anstieg des mittleren Meeresspiegels erklärt (s. Pkt. 7). Speziell in stärker abriegelten Boddengebieten unterliegt die Hochwasserhäufigkeit auch anthropogenen Einflüssen (Fahrwasservertiefungen, Eindeichungen, Querschnittsverengungen durch Dammschüttungen oder Brückenbau, Änderungen der Wasserbeschaffenheit mit Folgen für Bewuchs, Strömungswiderstände usw.).

7. Wahrscheinlichkeit extremer Wasserstände

Während die „normalen“ Wasserstände in erster Näherung auch normalverteilt um ihren Mittelwert auftreten, zeigen sich seltenere Wasserstandsstufen in guter Übereinstimmung mit stochastischen Gesetzmäßigkeiten POISSON-verteilt. Aus der Tatsache, daß die Exponenten dieser Verteilung mit „seltenerer“ Wasserstandsstufe ebenfalls exponentiell abnehmen, erklärt sich die GUMBEL-Wahrscheinlichkeit als gebräuchliche Extrapolationsfunktion für Scheitelwerte von Ereignissen sehr geringer Wahrscheinlichkeit. Bei Akzeptanz eines im Vergleich zu den üblichen Bemessungswasserständen höheren Restrisikos $1-W(x)$ für den Eintritt einer Sturmflut mit dem Scheitelwert x kann folgende Unterschreitungswahrscheinlichkeit $W(x)$ als Bemessungsgrundlage herangezogen werden:

$$W(x) = e^{-e^{-a(x-b)}}$$

Die Bestimmungsgleichungen $y = a(x - b)$ bzw. $x = cy + b$ werden aus den jährlichen Extremwasserständen vom Wasserstandsvorhersage- und Sturmflutwarndienst des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie nach der Methode von KIRSTEN (1964) berechnet und jährlich im November aktualisiert.

Wiederkehrintervalle $T(x)$ sind als reziproke jährliche Eintrittswahrscheinlichkeiten definiert:

$$T(x) = 1/(1-W[x])$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß ein mehr als einmaliges Auftreten eines Ereignisses der betrachteten Größenordnung pro Jahr praktisch ausgeschlossen werden kann. Bei Wiederkehrintervallen unterhalb von 5 Jahren ist diese Voraussetzung nicht mehr gegeben. Als Obergrenze sinnvoller Wiederkehrintervalle wird die doppelte Spanne des Beobachtungszeitraumes angenommen. Abbildung 5 zeigt den Bereich der den Wiederkehrintervallen zugeordneten Hochwasserstände an den Stationen Wismar (repräsentativ für die Mecklenburger Bucht), Saßnitz (für die Rügensch Ostküste) und Althagen (für den stark abriegelten Saaler Bodden).

Die GUMBEL-Wahrscheinlichkeit erklärt auch die oben erwähnte Häufigkeitszunahme der Sturmfluten. Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels kommt selbstverständlich einem Heruntersetzen der eine Sturmflut definierenden Wasserstandsuntergrenze gleich. Die mit niedrigeren Wasserständen immer höher werdende Eintrittswahrscheinlichkeit vergegenwärtigt man sich am besten mit Hilfe eines Beispiels:

Aus der GUMBEL-Bestimmungsgleichung für Warnemünde leitet sich formal ab (es handelt sich um eine formale Zahlenspielerei, da die GUMBEL-Verteilung in diesem Bereich eigentlich noch nicht gilt!), daß die jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit eines bei 600 cm am

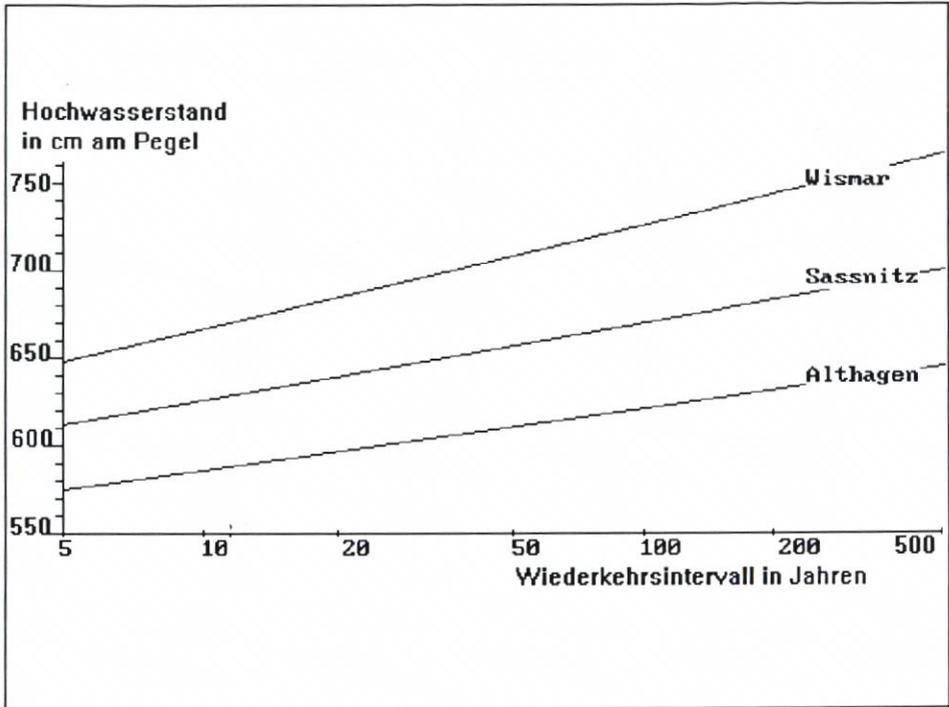


Abb. 5: Hochwasserscheitelwerte als Funktion ihrer statistischen Wiederkehrintervalle

Pegel definierten Hochwassers 53 % betragen müßte. Wäre die Bezeichnung „Hochwasser“ nur jeweils 5 cm darüber bzw. darunter definiert, so ergäben sich Eintrittswahrscheinlichkeiten von 45 % bzw. 61 %.

Mit anderen Worten: Eine Absenkung von nur 10 cm bei der Definition des Begriffes „Hochwasser“ verursacht – bezogen auf die 45 % – eine über 30 % höhere Hochwasserwahrscheinlichkeit!

Die mathematische „Handlichkeit“ theoretischer Extremwertverteilungen verführt, den Geltungsbereich zu verlassen und für sehr hohe Wiederkehrintervalle (ebenfalls rein formal) Sturmflutscheitelwerte zu extrapolieren. Hierzu sei bemerkt, daß die Ergebnisse solcher „Rechnungen“ dann aber oft stärker von der Wahl der theoretischen Anpassungsfunktion abhängen, als von den Meßdaten selbst. Bei höherem Sicherheitsbedürfnis empfiehlt sich also eher die Berücksichtigung der Bemessungshochwasserstände. Für die GUMBEL-Wahrscheinlichkeit bewirkt ein permanenter Anstieg der Hochwasserhäufigkeit, verbunden mit einer geringeren Streuung der jährlichen Höchstwasserstände, zwar eine Erhöhung des absoluten Gliedes b der Bestimmungsgleichung $x = cy + b$, aber der Anstieg c wird geringer. Solange also nicht etwas Sensationelles (etwa wie 1872) passiert, entsteht bei der Extrapolation der Eindruck einer von Jahr zu Jahr geringer werdenden Gefahr.

Auf eine Diskussion der extrem niedrigen Wasserstände (s. MEWES, 1987), die nur für die Seeschifffahrt sowie hinsichtlich spezieller Sedimentbewegungen im Schorrbereich von Interesse sind, soll in diesem Rahmen verzichtet werden.

8. Überschreitungsdauer höherer Wasserstandsstufen

Für einige Bemessungsfragen interessiert die Überschreitungsdauer bestimmter Wasserstandsstufen. Stellvertretend für die Küstenpegel Mecklenburg-Vorpommerns sind in den Tabellen 4 und 5 die langjährigen Auswertungen von den Stationen Warnemünde und Saßnitz angegeben. Die Umstellung des Pegelbezugshorizontes erzeugte insofern eine Inhomogenität, als alle Wasserstände seitdem in Warnemünde 2 cm und in Saßnitz 3 cm höher ausfallen.

Tabelle 4. Verweilzeiten in Stunden pro Jahr innerhalb und oberhalb der Wasserstandsstufen X in cm für den Pegel Warnemünde

Jahr	Wasserstandsstufe X in cm												
	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660
1952	74	20											
1953	374	196	106	45	14								
1954	108	63	40	30	22	20	19	17	16	14	12	8	4
1955	193	116	78	36	16	7	3	1					
1956	384	226	143	96	60	31	13	9	7	3			
1957	208	98	53	30	19	16	6						
1958	362	243	162	106	73	51	32	21	8				
1959	151	83	48	20	3								
1960	155	93	42	29	22	17	11	6					
1961	171	103	71	46	32	23	16	8	1				
1962	361	202	133	78	51	27	15	5					
1963	190	110	61	34	27	16	9						
1964	204	130	89	60	30	9							
1965	164	70	39	31	19	13	10	5					
1966	214	59	18	12	8	5							
1967	143	72	34	4									
1968	306	145	80	35	28	23	20	17	14	11	9	1	
1969	119	71	45	11	7								
1970	277	106	40	2									
1971	408	251	127	63	27	6							
1972	275	158	116	72	51	36	19	9	2				
1973	124	63	15	9	4	4	3	2					
1974	403	255	159	118	70	26	5						
1975	436	200	72	33	5								
1976	341	198	116	55	35	18	11	6	5				
1977	174	81	39	16	5	2							
1978	394	178	70	41	11	5	1						
1979	373	275	207	153	110	65	32	22	14				
1980	178	78	41	34	23	12	5						
1981	602	280	134	58	20								
1982	507	306	183	80	52	13							
1983	425	272	155	90	63	46	32	20	11	2			
1984	446	198	114	82	54	37	20	11	6	2			
1985	185	97	58	33	17	7							
-----Umstellung des Pegelbezugshorizontes!-----													
1986	262	98	44	11	5	3	2						
1987	468	308	219	144	97	64	38	24	15	9	1		
1988	343	169	90	53	19								
1989	628	347	207	137	83	54	29	13	4				
1990	519	274	154	87	54	23	15	5					

Tabelle 5. Verweilzeiten in Stunden pro Jahr innerhalb und oberhalb der Wasserstandsstufen X in cm für den Pegel Saßnitz

* Ausfälle in den Registrierungen

Jahr	Wasserstandsstufe X in cm												
	540	550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660
1954*	13												
1955	250	71	24	9	6								
1956	486	233	124	64	21	11	9						
1957	198	104	23	7									
1958	376	202	101	67	44	25	15	2					
1959	130	83	20	6									
1960	93	49	22	7									
1961	161	95	42	17	2								
1962	369	208	127	86	47	26	17						
1963	120	65	29	7									
1964	198	106	50	18	9	6							
1965	99	33	15	11	7	6	2						
1966	107	17											
1967	129	18	8	6	5	3	2						
1968	211	115	41	21	18	14	8	1					
1969*	64	8											
1970	244	106	45	11									
1971	310	160	83	47	21	1							
1972	224	135	74	50	29	19	4						
1973	101	54	17	4									
1974	439	257	134	70	33	13	2						
1975	432	189	80	33	8								
1976	373	225	97	38	11	8	2						
1977	145	48	19	6	2								
1978	398	200	64	41	12								
1979	308	174	104	61	43	26							
1980	146	67	35	11	1								
1981	691	353	126	41	2								
1982	637	394	198	92	20								
1983	650	436	265	129	79	56	30	13	2				
1984	574	311	134	83	46	28	16	8					
1985	107	60	26	6									
-----Umstellung des Pegelbezugshorizontes!-----													
1986	182	67	24										
1987	478	264	177	122	62	30	10						
1988	242	79	24	2	1								
1989	506	224	100	49	28	18	11	4					
1990	454	231	114	50	20	13	6	1					

An den Boddenküsten Mecklenburg-Vorpommerns sind die Überschreitungsdauern höherer Wasserstandsstufen gemäß der geringeren Hochwasserwahrscheinlichkeit (vgl. Pkt. 7) erheblich reduziert. Die niedrigeren Hochwasserscheitel halten aber auf Grund der hydrodynamischen Verhältnisse im allgemeinen länger an als an der Außenküste.

9. Dauer von Wasserstandsereignissen, die mit hohen Änderungsgeschwindigkeiten eingeleitet werden

Daß die Fallhäufigkeit einer Wasserstandsstufe von der Wahrscheinlichkeit der Hochwasserscheitelhöhen abhängt, ergibt sich aus Punkt 7. Analog bedingen sowohl die festgestellte Zunahme der Hochwasserhäufigkeit als auch eine angenommene Erhöhung der Scheitelwerte die Vergrößerung der in Pkt. 8 angegebenen Überschreitungsdauern und werden sich auch auf die mittlere Andauer bestimmter Wasserstandsstufen des Einzelereignisses auswirken.

Wenn aber die Dauer der exzeptionellen Wasserstandsereignisse als solche interessiert, kommt man an der deutschen Ostseeküste auf eine Häufigkeitsverteilung mit ausgeprägtem Maximum im Bereich von etwa einem Tag. Dies hat sowohl hydrodynamische als auch meteorologische Gründe. Um die Wasserstandsdynamik des Küstenbereiches von Mecklenburg-Vorpommern mit einer größeren Anzahl von Fällen zu untersuchen, als es z. B. die Sturmfluten gestattet hätten, haben wir Ereignisse in Abhängigkeit von der Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserstandes definiert. Wenn in höchstens 12 Stunden wenigstens eine Wasserstandsänderung von 50 cm am Pegel Wismar stattfand und dabei noch eine Abweichung von mindestens 50 cm vom Normalmittelwasser 500 cm auftrat, wurde ein „Fall“ registriert. Als Dauer dieses Falles wurde die Zeit bis zum Wiedererreichen des Ausgangswasserstandes bestimmt. Schließlich wurde die Häufigkeit solcher Ereignisse über ihrer Dauer aufgetragen (Abb. 6).

Bei den meisten Ereignissen mißt man auf diese Weise etwa von Minimum zu Minimum bzw. von Maximum zu Maximum, also über eine ganze „Periode“. Die Häufung der

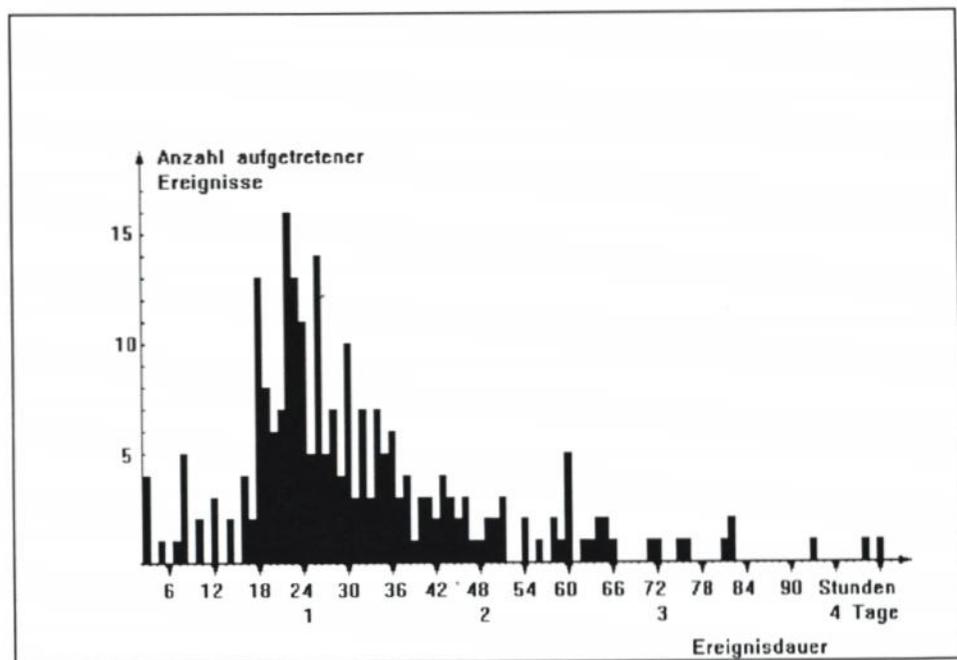


Abb. 6: Häufigkeit von Ereignissen, die mit Wasserstandsschwankungen von mindestens 50cm/12h am Pegel Wismar verbunden waren, über ihrer Dauer

Ereignisse bei den bekannten Eigenperioden der Ostsee ist nicht zu übersehen, und die Statistik verdeutlicht die Wirkung des schwingungsfähigen Systems Ostsee gerade auch bezüglich der seltenen hydrologischen Extremereignisse. Da die mittlere Tiefe der Ostsee bei 55 m liegt, ist ein Zuwachs im Dezimeterbereich in der MERIANschen Formel für die Eigenperioden (vgl. z. B. DIETRICH/KALLE, 1975) größenordnungsmäßig zu vernachlässigen, so daß von einer relativen Invarianz der Hydrodynamik der Ostsee ausgegangen werden darf.

10. Periodische Wasserstandsschwankungen

Die halbtägigen Gezeitenreste der Beltsee stimulieren den Wasseraustausch in den Mündungsgebieten von Trave und Warnow sowie in einigen Boddenbereichen. Nipp- und Springtiden sind noch meßbar, jedoch ohne praktische Bedeutung. Die jährlichen und halbjährlichen Partialtiden sind beachtenswert, da sie Wahrscheinlichkeitsaussagen zur Durchführbarkeit von Arbeitsverfahren gestatten, für die mindestens normale Wasserstände erforderlich sind (Stapelläufe, Nutzung flacherer Fahrwasser für relativ große Schiffe usw.).

Im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie wurden folgende mittlere Amplituden H der Partialtiden aus den Jahren 1978–1987 berechnet (zum Verfahren s. PANSCH, 1988): Wenn man die tägliche Ungleichheit $F = (K_1 + O_1)/(M_2 + S_2)$ zur Typisierung der Gezeitenform heranzieht (SAGER, 1959), ergeben sich für Wismar mit $F = 0,5$ überwiegend halbtägige, für Saßnitz mit $F = 1,6$ überwiegend ganztägige Gezeitenreste. Letztere sind allerdings kaum wahrnehmbar. Augenscheinliche Wasserstandsschwankungen von 8–12 Stunden dürften daher wohl eher Überlagerungen mit den in Punkt 9 genannten Ursachen darstellen.

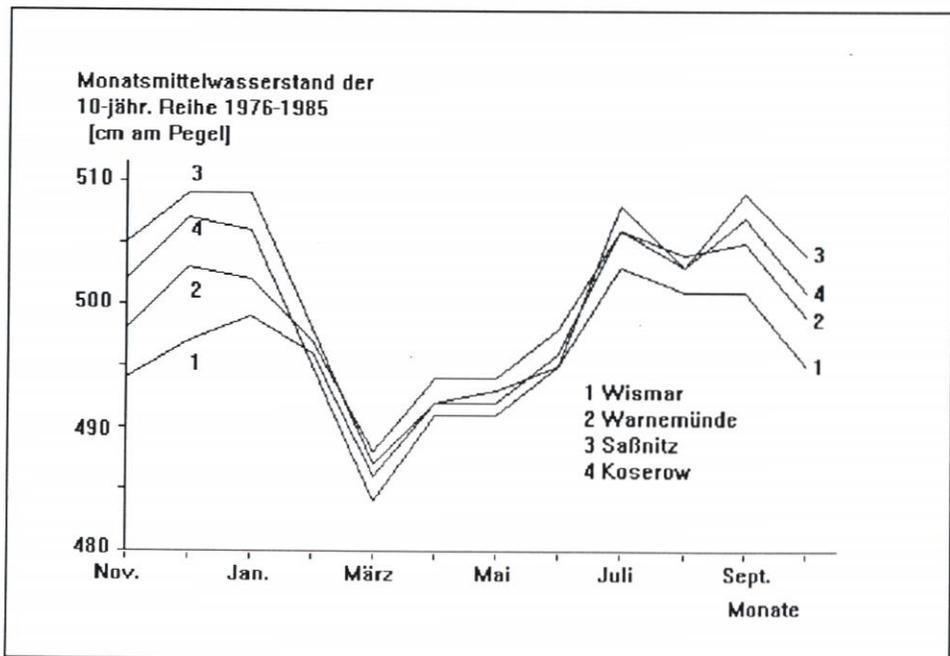


Abb. 7: Jahresgang der mittleren Wasserstände an den Küstenpegeln Mecklenburg-Vorpommerns

Inwieweit es sich bei der schon von MODEL (1939) beschriebenen Jahresperiode S_a um Gravitations-, meteorologische oder anderweitige Effekte handelt, bleibt weiterhin ungewiß. WEISE (1988) konstatierte eine Zunahme der halbjährlichen und jährlichen Amplituden mit wachsender geographischer Länge, die nicht aus den astronomischen Argumenten hervorgeht. Barokline Ursachen sind in diesem Zusammenhang nicht unbedingt auszuschließen, die mittleren Dichteunterschiede innerhalb der Ostsee erklären diesen Effekt allerdings nicht.

Für den Praktiker empfiehlt es sich, einfach die langjährigen monatlichen Hauptzahlen aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern zu berücksichtigen. Abbildung 7 entstand mit Hilfe der Daten der 10jährigen Reihen 1976/85.

Neben den erwähnten Partialtiden existieren noch einige lange Perioden mit Amplituden im Zentimeterbereich, die nur schwer im stochastischen Rauschen auszumachen sind. Immerhin fand WEISE (1990) aber selbst noch die Nodaltide von ca. 18,6 Jahren mit Amplituden von 0,6 cm in Wismar und 1,4 cm in Saßnitz!

Fourieranalysen von Jahresmittelwerten bestätigten sowohl Frequenzen, die von JENSEN, MÜGGE und VISSCHER (1988) für die deutsche Nordseeküste gefunden worden waren, als auch einige weitere Perioden, die für die Ostsee charakteristisch zu sein scheinen. So wird z. B. eine Periode von 10 bis 11 Jahren beobachtet (BREHMER, 1914, LASS, 1991, STIGGE, 1991), die in der Nordsee weniger auffällt und eventuell über die Kausalkette Sonnenaktivität/Klima zustande kommt. Auch eine Periode mit der ungefähren Länge eines Jahrhunderts, die von BREHMER (1914) für den Pegel Swinemünde gefunden wurde, scheint sich aus dem 19. ins 20. Jahrhundert fortzusetzen, wobei Parallelen zur säkularen Periode der Sonnenaktivität auftreten (STIGGE, in Vorb.). Eine Methode, externe und interne Ursachen für die langjährigen Wasserstandsschwankungen der Ostsee zu unterscheiden, stellt der Phasenvergleich zwischen nördlicher und südlicher Ostsee dar. Es zeigt sich, daß Tiden, die auch in der Nordsee nachgewiesen wurden, diesbezüglich geringere Differenzen aufweisen (Gleichphasigkeit), während es bei Ostsee-internen (im Nordseebereich weniger bekannten) Perioden hohe Phasendifferenzen (Gegenphasigkeit) gibt (Abb. 8).

11. Säkulare Wasserstandsänderungen

Unter dem säkularen Wasserstandseffekt versteht man gemeinhin den Trend des mittleren Wasserstandes innerhalb eines Jahrhunderts. Oftmals wird er einseitig als das Ergebnis der rezenten vertikalen Erdkrustenbewegung interpretiert. Tatsächlich läßt die Restvarianz der Meßdaten – statistisch gesehen – kaum eine andere als die lineare Deutung zu. Hilfreich für die Berechnung erwies sich die Methode der 19jährigen übergreifenden Mittel (MONTAG, 1967, LOHRBERG, 1983). WEISE (1990) führte die Trendberechnung auf der Grundlage von Monatsmittelwerten nach Elimination der 5 reellen Perioden 3,2a, 2,9a, 1,2a, 1,0a und 0,5a aus und erhielt unter anderem folgendes Resultat:

Wismar:	-1,44 mm/a +/- 0,01 mm/a
Warnemünde:	-1,20 mm/a +/- 0,01 mm/a
Saßnitz:	-1,56 mm/a +/- 0,06 mm/a

Im Zusammenhang mit Klimaänderungseffekten muß man säkulare Wasserstandsänderungen aber durchaus auch in einem anderen Lichte sehen: Möglicherweise sind noch weitere Schwankungen, die man gemeinhin als stochastisches Rauschen ansieht, nicht so unerklärlich, wie es auf den ersten Blick scheint. Aus diesem Grunde darf man die Argumentation der Varianzanalyse nicht der Untersuchung physikalischer Effekte voranstellen.

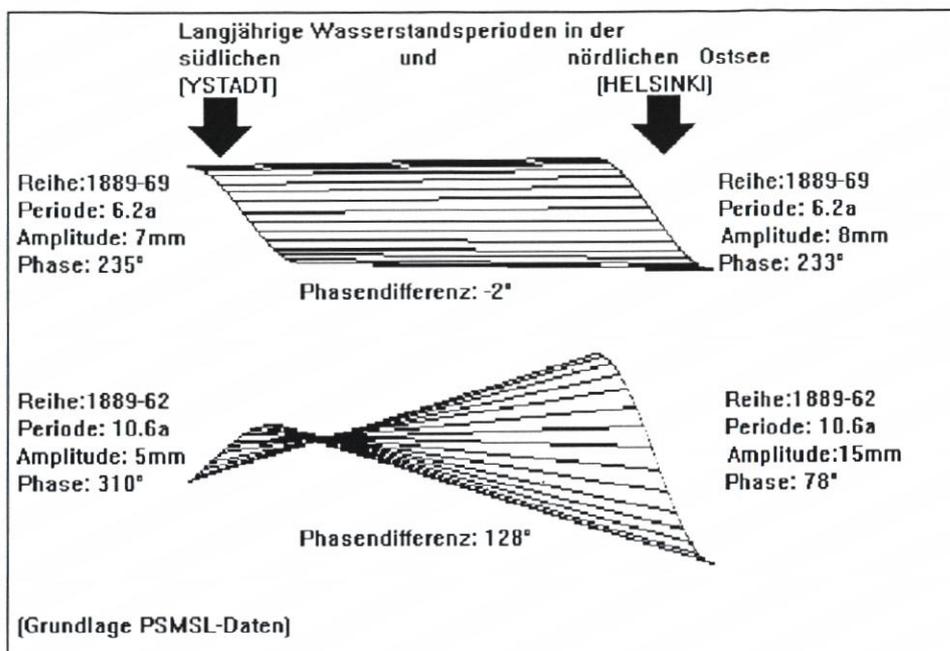


Abb. 8: Beispiel unterschiedlicher Phasendifferenzen zweier langjähriger Wasserstandsperioden in der Ostsee

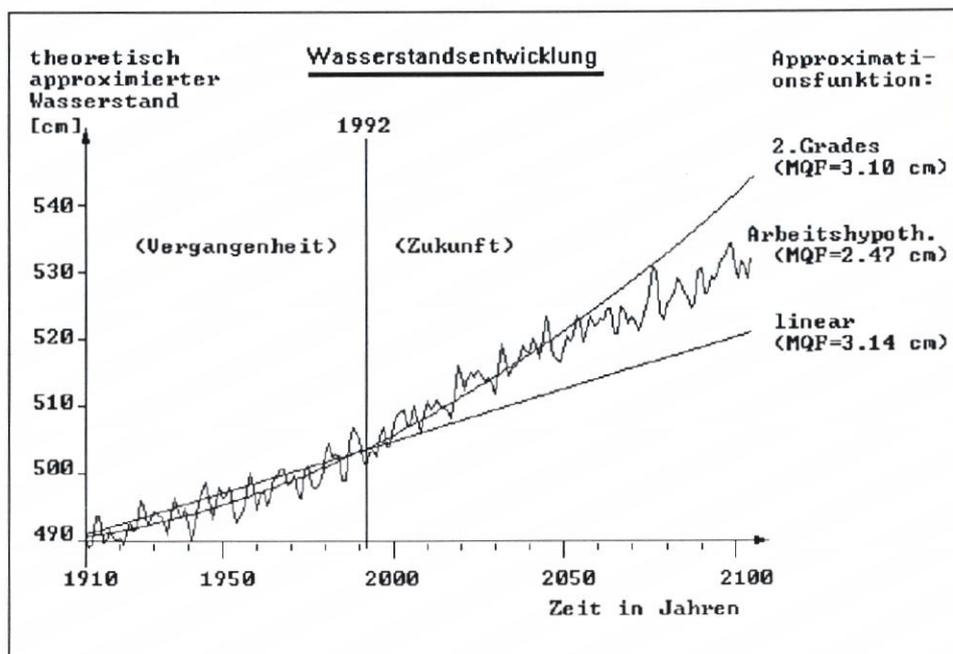


Abb. 9: Approximation der Jahresmittelwasserstände der Mecklenburger Bucht mit Hilfe verschiedener Funktionen

Tatsächlich gelingt mit einigen wenigen langen Perioden, deren Amplituden im Bereich 0,8 bis 1,4 cm liegen, eine um mindestens 20 % genauere Approximation der Jahresmittelwasserstände von 1910 bis in die Gegenwart, als es mit Hilfe des linearen Trends oder einer quadratischen Gleichung möglich ist (STIGGE, 1993 und Abb. 9). Auf diese Weise fanden wir einen nichtlinearen säkularen Wasserstandsanstieg mit einem Richtwert von 24 cm/Jahrhundert. Dieser Wert liegt ebenso deutlich über dem von WEISE (1990) beschriebenen linearen Trend wie unter einem Ansatz, in dem lediglich ein Akzelerationsterm zugelassen wird und der sich hinsichtlich seines mittleren quadratischen Fehlers nicht wesentlich vom linearen Ansatz unterscheidet.

12. Schlußbemerkungen

In diesem Beitrag waren einige terminologische Besonderheiten nicht zu vermeiden (Bemessungswasserstand, Normalmittelwasser usw.) Die Priorität des fachlichen Verständnisses gegenüber der Betonung korrekter DIN-Terminologie mußte vorausgesetzt werden und wird auch für die Lektüre einiger im Schriftenverzeichnis aufgeführter Quellen notwendig sein.

Bei der Anwendung der aufgeführten Wasserstandsdaten sollte man bedenken, daß jede noch so exakte Art einer Naturbeschreibung von Methodik und Modellvorstellungen abhängt. Es ist weder die Aufgabe des Naturwissenschaftlers noch des Ingenieurs, andere als naturwissenschaftliche und technische Aspekte ins Kalkül zu nehmen. In der Praxis wird aber das Sicherheitsbedürfnis der Menschen hinter dem Deich – z.B. über die Investitionsbereitschaft – die Kosten-Nutzen-Relation von Hochwasserschutzmaßnahmen beeinflussen. Die öffentliche Diskussion des Treibhauseffektes und seiner Konsequenzen für den globalen Meeresspiegelanstieg wirkt hier also in einer völlig unbeabsichtigten Weise. Man kann folglich auch nicht erwarten, daß die Anwendung statistischer Daten automatisch das günstigste Kosten-Nutzen-Verhältnis der aus ihnen abgeleiteten Hochwasserschutzmaßnahme garantiert.

13. Schriftenverzeichnis

- ANNUTSCH, R.: Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung. Der Seewart 38 H. 5, Hamburg, 1977.
- BAENSCH: Die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des preußischen Staates. Zeitschr. für Bauwesen Bd. 25, Berlin, 1875.
- BARNEWITZ, F.: Geschichte des Hafens Warnemünde, Rostock, 1925.
- BARTH, M. C. and TITUS, J. G.: Greenhouse Effect and Sea Level Rise: A Challenge for this Generation. Van Nostrand Reinhold, 1984.
- BIERMANN, S. und MELLENTIN, J.: Meßfehleruntersuchungen an Pegelschreibgeräten WWD Küste Warnemünde. 1980 (unveröffentlicht).
- BREHMER: Tiden von langer Periode im mittleren Wasserstände der Ostsee zu Swinemünde. Ann. d. Hydrographie u. Marit. Meteorologie, 1914.
- CUBASCH, U., SANTER, B. D. u. SAUSEN, R.: Szenarienrechnungen mit gekoppeltem globalen Ozean-Atmosphärenmodell. Vortrag zur II. Deutschen Klimakonferenz Neubrandenburg, 1991.
- CORRENS, M.: Der Wasserhaushalt der Bodden- und Haffgewässer der DDR als Grundlage für die weitere Erforschung ihrer Nutzungsfähigkeit für Trink- und Brauchwasserzwecke. Diss. B, Humboldt-Universität, Berlin, 1979.

- DIETRICH, G. u. KÖSTER, R.: Geschichte der Ostsee. In MAGAARD/REINHEIMER, Meereskunde der Ostsee, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1974.
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRAUSS, W., SIEDLER, G.: Allgemeine Meereskunde. 3. Aufl., Geb. Borntraeger, Berlin, 1975.
- DUDEL, H.: Über die Schwankungen der zonalen Windkomponente 500 mb nach Anstiegen der solaren Aktivität. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 1961.
- EKMAN, M. and MÄKINEN, J.: The deviation of mean sea level from the mean geoid in the Baltic sea. Bulletin Geodesique, Springer-Verlag, 1991.
- FÜHRBÖTER, J. und TÖPPE, A.: Duration of storm tides at high water levels. Contribution to the UNESCO-Workshop „storm'91“, Hamburg 1991.
- GEINITZ, E.: Die Sturmflut vom 30. Dezember 1913 in ihren Einwirkungen auf die Mecklenburgische Küste. Mitt. der Geolog. L.-A., Bd 27 Rostock, 1914.
- GRUBERT, J. P.: Greenhouse effect on estuarine saltwater intrusion. Proceedings of the National Conference on Hydraulic Engineering, New York, 1989.
- HACKERT, K.: Ergebnisse von Strömungsmessungen im Greifswalder Bodden. (im Auftrag des VEB Atomkraftwerk Rheinsberg) Wasserwirtschaftsdirektion, Stralsund, 1967.
- HUPFER, P.: Die Ostsee – kleines Meer mit großen Problemen. Teubner VG, Leipzig, 1978.
- HUPFER, P.: Säkulare Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation und der verstärkte Rückgang der Flachküste zwischen Warnemünde und Hiddensee. PGM. Gotha/Leipzig, 1965.
- HURTIG, T.: Die mecklenburgische Boddenlandschaft und ihre entwicklungsgeschichtlichen Probleme. Deutscher Verl. d. Wiss., Berlin, 1954.
- JACOBSEN, T. S.: Water exchange through the Danish Straits. Baltic Sea Environment Proceedings No. 16, Helsinki Commission, 1986.
- JENSEN, J., MÜGGE, H.-E. u. VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 44, 1988.
- JENSEN, J. und TÖPPE, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, 34, H. 1/2, 1990.
- KIRSTEN, M.: Ein neues Verfahren für die Bestimmung der wirtschaftlichen Ausbaugröße und der Würdigkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen. Mitt. d. Inst. f. Wasserwirtschaft, H. 17, Berlin, 1964.
- KOHLMETZ, E.: Untersuchungen über Sturmflutwetterlagen an der deutschen Ostseeküste. Inaugural-Dissertation, Universität Greifswald, 1964.
- KOLP, O.: Sturmflutgefährdung der deutschen Ostseeküste zwischen Trave und Swine. SHD Stralsund, 1955.
- KRAUSS, W.: Methoden und Ergebnisse der Theoretischen Ozeanographie. II-Interne Wellen, Geb. Borntraeger, Berlin, 1966.
- KRÜGER, G.: Über die Sturmfluten an den deutschen Küsten der westlichen Ostsee mit besonderer Berücksichtigung der Sturmflut vom 30./31. Dezember 1904. 10. Jahresber. d. Geogr. Ges., Greifswald, 1911.
- LABITZKE, K. und VAN LOON, H.: Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the Atmosphere. Part I-III, Journal of Climate 1988-1989.
- LABITZKE, K. und VAN LOON, H.: Sonnenflecken und Wetter – Gibt es doch einen Zusammenhang? Die Geowissenschaften 8, 1-6, 1990.
- LASS, U.: Wasserstandsvariationen der Ostsee – ein Indikator?, Vortrag zur II. Deutschen Klimakonferenz Neubrandenburg, 1991.
- LAZARENKO, N. N.: Variations of Mean Level and Water Volume of the Baltic Sea. Baltic Sea Environment Proceedings No. 16, Helsinki Commission, 1986.
- LOHRBERG, W.: Die Säkularvariation an einigen Pegeln zwischen Harlingen und Esbjerg sowie die Bedeutung 19jähriger übergreifender Mittel für deren Bestimmung. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, BfG, Koblenz, 1983.
- MAGAARD, L. und RHEINHEIMER, G.: Meereskunde der Ostsee. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1974.
- MAJEWSKI, A., DZIADZIUŠKO, Z., WISNIEWSKA, A.: Monografia Powodzi Sztormowych 1951-1975. IMGW, Warschau, 1983.
- MAJEWSKI, A.: Niezwykłe krotkotrwale wezbrania morza u południowych i wschodnich brzegów Bałtyku, (Ungewöhnliche kurzzeitige Wasserstandsanstiege an den Süd- und Ostküsten der Ostsee). Przegląd Geofizyczny 1989.

- MERTINKAT, L.: Der Wasserhaushalt der Bodden- und Haffgewässer Mecklenburg-Vorpommerns. Unveröffentl. Unterlagen BSH, Rostock, 1992.
- MEWES, D.: Untersuchung von Langzeitvariationen der Sturm Niedrigwasserstände an der DDR-Küste und deren Ursachen. Diplomarbeit, Sekt. Physik, Humboldt-Universität, Berlin, 1987.
- MIEHLKE, O.: Maßgebende Wasserstände für die DDR-Küste. Unveröff. Unterlagen der Wasserwirtschaftsdirektion Küste, Stralsund, 1967.
- MIEHLKE, O.: Zur ökonomischen Beurteilung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Acta Hydrophysica Bd. XIV, H. 1/2, Akademie-Verlag, Berlin, 1969.
- MODEL, F.: Über die Gebundenheit von Hoch- und Niedrigwasser der Ostsee an ganz bestimmte Kalendertage im Jahre. Ann. d. Hydrographie u. m. M., Hamburg, 1939.
- MONTAG, H.: Die Wasserstände an den ehemaligen Pegelstationen des Geodätischen Instituts Potsdam bis 1944. Arb. aus dem Geod. Inst. Potsdam, 1964.
- MONTAG, H.: Bestimmung rezenter Niveauverschiebungen aus langjährigen Wasserstandsbeobachtungen der südlichen Ostseeküste. Arb. Geod. Inst. Nr. 15, Potsdam, 1967.
- NEUMANN, G.: Eigenschwingungen der Ostsee. Arch. Dt. Seewarte 61, Hamburg, 1941.
- PANSCH, E.: Harmonische Analyse von Gezeiten- und Gezeitenstrombeobachtungen im DHI Hamburg. Interner Technischer Bericht Nr. 1, Hamburg, 1988.
- PASCHEN, F.: Die Geometrischen Nivellements ausgeführt durch die Großherzoglich-Mecklenburgische Landesvermessungs-Commission . . . Großherzogl. Mecklenburg. Landesvermessung IV Theil, Schwerin, 1882.
- PLATE, E. und IHRINGER, J.: Die Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmfluten. HANSA Nr. 19/20, 1991.
- PUGH, D. T.: Sea level rise in: The greenhouse effect and rising sea levels in the UK. MAFF Conference for River and Coastal Engineers, Loughborough, 1989.
- REINHARD, H.: Die Sturmflut am 1. und 2. März 1949 an der Mecklenburgischen Ostseeküste. Zeitschr. f. Meteorologie Heft 7, 1949.
- SAGER, G.: Ebbe und Flut. Verlag VEB Hermann Haack, Gotha, 1959.
- SAGER, G. und MIEHLKE, O.: Untersuchungen über die Abhängigkeit des Wasserstandes in Warnemünde von der Windverteilung über der Ostsee. Annalen d. Hydrographie, Stralsund, 1956.
- STENGEL, T. und ZIELKE, W.: Dynamic Reaction of the North Sea to Storm Tides under Present Conditions and Following a Rise in Mean Sea Level. Contribution to the UNESCO-Workshop „storm'91“, Hamburg, 1991.
- STIGGE, H.-J.: Nullpunktkorrektur für alle DDR-Küstenpegel. Beiträge zur Meereskunde H60, Berlin, 1989.
- STIGGE, H.-J.: The correlation between two water gauges as an indicator of hydrodynamics in the Western Baltic. Contribution to the UNESCO-Workshop „storm'91“, Hamburg, 1991.
- STIGGE, H.-J.: Steuert die Sonnenaktivität die Oberflächenneigung der Ostsee? Vortrag zur II. Deutschen Klimakonferenz, 1991, unveröffentl.
- STIGGE, H.-J.: Akzeleration und Periodizität des säkularen Meeresspiegelanstieges an der Mecklenburgischen Küste. (DHZ in Vorber.)
- STIGGE, H.-J.: Sea level change and high-water probability on the German Baltic coast. Contribution to the UNESCO-Workshop „seachange '93“, Amsterdam, 1993.
- STRIGGOW, K. und TILL: 100jährige Pegelregistrierungen im Ostseeraum. Zeitschr. geol. Wiss. 15, 1987.
- WEISE, H.: Longperiodic and short-periodic fluctuations of the water level of the southern Baltic Sea. Gerlands Beiträge zur Geophysik Bd. 97, H. 3, Leipzig, 1988.
- WEISE, H.: Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen im südlichen Ostseeraum. Veröff. d. Zentralinstituts für Physik d. Erde, Nr. 115, Potsdam, 1990.