

Die Wasserstände an der Ostseeküste

Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel

Inhalt

Vorwort	V
1. Wasserstandsentwicklung in der südlichen Ostsee während des Holozäns	4
1.1 Einführung	4
1.2 Die Ostsee: Geotektonik, Hydrographie und Entwicklung	5
1.3 Relative Meeresspiegeländerungen im Holozän	8
1.4 Küstenlinienentwicklung im Holozän	16
1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	20
2. Der mittlere Wasserstand im 19. und 20. Jahrhundert – Bestimmung, Entwicklung, Variationen	22
2.1 Wasserstandsschwankungen der Ostsee und ihre Ursachen	22
2.2 Bestimmung des Wasserstandes	30
2.2.1 Wasserstandsmessungen mit Pegeln	30
2.2.2 Pegelstationen an der südlichen Ostseeküste	31
2.2.3 Höhensysteme und Pegelvorschriften	38
2.2.3.1 Höhenkoordinaten als Maß potentieller Energie	38
2.2.3.2 Referenzhöhen für die Pegeldaten der deutschen Ostseeküste	39
2.2.3.3 Bedeutung der Bezugsbasis für die Wasserstandsstatistik	40
2.2.4 Auswertung von Pegeldaten	41
2.3 Neue Methoden zur Wasserstandsmessung	43
2.3.1 Anforderungen an die Wasserstandsmessensoren	43
2.3.2 Auswahl „innovativer“ Messverfahren	44
2.3.3 Beschreibung der ausgewählten Messverfahren	45
2.3.3.1 Radarverfahren	46
2.3.3.2 Intervallbetriebenes Einperlverfahren	49
2.3.4 Erprobung	51
2.3.5 Untersuchungsergebnisse und Sachstand	52
2.4 Die Vorhersage des Wasserstandes	53
2.4.1 Statistische Verfahren	57
2.4.1.1 Windstauberechnung nach THIEL (1953)	60
2.4.1.2 Windstauberechnung nach SAGER u. MIEHLKE (1956)	60
2.4.1.3 Windstauberechnung nach SCHMAGER (1984)	60
2.4.1.4 Windstauberechnung nach ENDERLE (1989)	66
2.4.2 Vorhersage mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Modelle	67
2.4.2.1 Zur bisherigen Entwicklung	67
2.4.2.2 Großskalige Hydrodynamik der Ostsee	68
2.4.2.3 Modellbildung	71
2.4.2.4 Numerische Modellierung	72
2.4.2.5 Zur Genauigkeit der vorhergesagten Wasserstände des BSH-Modells	73
2.4.2.6 Hydrodynamische Gleichungen	75
2.4.3 Ausblick auf künftige Vorhersageverfahren	78
2.5 Beobachtete Wasserstandsvariationen an der deutschen Ostseeküste im 19. und 20. Jahrhundert	79
2.5.1 Wasserstandsstatistik	79
2.5.1.1 Wasserstandsstatistik der Außenküste	79
2.5.1.2 Mittlere Wasserstands- und Wasserhaushaltsverhältnisse der Bodden	85

2.5.2	Regelmäßige Wasserstandsschwankungen	90
2.5.2.1	Jahresgang	90
2.5.2.2	Perioden und Zyklen in den Wasserständen der Ostsee	91
2.5.2.3	Wasserstandsschwankungen mit langen Perioden und kleinen Amplituden	93
2.5.3	Eustatische und isostatische Einflüsse	94
2.5.4	Widerspiegelung kosmischer und klimatischer Einflüsse	100
2.6	Zur möglichen Entwicklung des mittleren Wasserstandes im 21. Jahrhundert	102
2.6.1	Annahmen zur Wasserstandsentwicklung im Weltmeer	102
2.6.2	Reaktionen des Ostseewasserstandes	103
2.6.3	Konsequenzen	105
3.	Hoch- und Niedrigwasser	106
3.1	Allgemeine Bedeutung	106
3.1.1	Sehr hohe und sehr niedrige Wasserstände im Leben der Küstenbewohner	106
3.1.2	Sturmflutkatastrophen und Wasserstandsmarken	108
3.1.3	Analyse eines Fallbeispiels: Die Sturmflut vom 4./5. November 1995	113
3.2	Begriffe	116
3.2.1	Terminologie und Definitionen	116
3.2.2	Klassifizierungsmöglichkeiten	120
3.3	Ursachen und Besonderheiten	122
3.3.1	Meteorologische Prozesse	124
3.3.1.1	Luftdruck	124
3.3.1.1.1	Mittlere Entwicklung des Luftdruckfeldes	124
3.3.1.1.2	Mittlerer Verlauf von Luftdruckindizes	127
3.3.1.2	Wetterlagen	133
3.3.1.2.1	Großwetterlagen in Zusammenhang mit extremen Wasserständen	133
3.3.1.2.2	Zugbahnen wasserstandsrelevanter Tiefdruckgebiete	139
3.3.1.2.3	Zum Zusammenhang von Zyklonen-Zugbahnen und Großwetterlagen bei Sturmfluten	144
3.3.1.3	Windklimatologie für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns	145
3.3.1.3.1	Zeitliche Veränderungen der Windgeschwindigkeit	145
3.3.1.3.2	Mittlere Andauer von Windereignissen	147
3.3.1.3.3	Extremwertstatistik von Windgeschwindigkeiten	151
3.3.1.4	Zur Höhenwindentwicklung im Ostseeraum	154
3.3.2	Windstau	159
3.3.2.1	Die tangentielle Schubkraft des Windes an der Meeresoberfläche	159
3.3.2.2	Stauwindrichtungen und Windwirkzeit an der deutschen Ostseeküste	162
3.3.2.3	Beispiel: Windstauverhältnisse in der Mecklenburger Bucht	163
3.3.3	Ozeanographische Faktoren	166
3.3.3.1	Der Füllungsgrad der Ostsee	166
3.3.3.2	Eigenschwingungen	170
3.3.3.2.1	Sturmfluten als Windstauereignis und als Ergebnis hydrodynamischer Schwingungen	170
3.3.3.2.2	Unterscheidungsmöglichkeiten	171
3.3.3.2.3	Ergebnisse der Sturmfluttypisierung	173
3.3.3.2.4	Separierung von Eigenschwingungen durch Spektralanalyse	179
3.3.3.3	Lange Wellen: Die Seebär-Erscheinung	181
3.3.4	Besonderheiten in Bodden	185
3.3.4.1	Sturmfluten und Entstehung der Darß-Zingster Boddenkette	185
3.3.4.2	Sturmfluten	187
3.3.4.3	Salzgehalt und Wasserstand	188
3.3.4.4	Sturmniedrigwasser	190
3.4	Extremwasserstände zwischen Flensburg und Ahlbeck im 19. und 20. Jahrhundert	193
3.4.1	Häufigkeit an den verschiedenen Küstenabschnitten	193

3.4.2	Jahresgänge	197
3.4.3	Zur zeitlichen Entwicklung des Vorkommens extremer Wasserstände	199
3.4.3.1	Langzeitveränderungen der Häufigkeit	199
3.4.3.2	Entwicklung von Sturmflut-Scheitelhöhen	203
3.4.3.3	Hypothesen für die rezenten Veränderungen im Hoch- und Niedrigwassergeschehen	206
3.5	Zum künftigen Vorkommen extremer Wasserstandsereignisse	207
3.5.1	Statistische Modellierung der Häufigkeit von extremen Wasserstandsereignissen	207
3.5.2	Abschätzung auf der Grundlage von Klimamodellrechnungen	212
4.	Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen an der Küste	217
4.1	Allgemeine Bedeutung	217
4.1.1	Hydrodynamische Wirkungen	218
4.1.2	Morphologische Wirkungen	220
4.1.3	Sozio-ökonomische und ökologische Wirkungen	222
4.2	Beeinflussung der Küstenmorphodynamik durch Wasserstandsänderungen	223
4.2.1	Steilküstenerosion und -abrasion	226
4.2.2	Veränderungen an Flachküsten	231
4.2.2.1	Sandriffe	233
4.2.2.2	Strandwall- und Hakensysteme	236
4.2.3	Küsten- und Sedimentdynamik in unterschiedlichen Zeitskalen – Materialtransport und Sedimentbilanz	237
4.3	Folgen der morpho- und sedimentdynamischen Anpassungen für die Küstenstabilität	243
4.3.1	Die Bedeutung von Umlagerung und Erosion durch Sturmhochwasser versus graduelle Veränderungen	245
4.3.2	Beispiele für verschiedene Sturmhochwasserereignisse	251
4.3.3	Erosions-, durchbruchs- und überflutungsgefährdete Küstenabschnitte	256
4.3.4	Beeinflussung der Küstenstabilität und Sedimentbilanz durch Baumaßnahmen	260
4.4	Wasserstandsänderungen: Risiken für den Meeres- und Küstenraum	267
4.4.1	Das sozio-ökonomische Gefährdungspotential entlang der deutschen Ostseeküste	270
4.4.1.1	Methodische Erfassung der Vulnerabilität und Probleme	271
4.4.1.2	Analyse der sozio-ökonomischen Vulnerabilität und Ergebnisse	273
4.4.1.3	Abhängigkeit der sozio-ökonomischen Vulnerabilität vom Betrachtungsmaßstab	278
4.4.1.4	Szenarien der künftigen Risikostruktur	281
4.4.1.5	Schadenswirkungen durch Extremereignisse – der 3. und 4.11.1995 als Beispiel	284
4.4.2	Strategien für den Küstenschutz	285
4.4.2.1	Bemessungsgrundlagen	286
4.4.2.2	Küstenschutzmaßnahmen	287
4.4.3	Integriertes Küstenschutzmanagement – eine zukunftsweisende Strategie	289
4.4.3.1	Küstenschutz-Informationen-System (KIS)	292
4.4.3.2	Beirat Integriertes Küstenschutzmanagement	292
4.4.3.3	Risikomanagement	293
5.	Schriftenverzeichnis	298
6.	Glossar	317