

Jobst Augustin

**Das Seegangsklima der Ostsee
zwischen 1958 und 2002
auf Grundlage numerischer Daten**

**ERDSICHT - EINBLICKE IN GEOGRAPHISCHE
UND GEOINFORMATIONSTECHNISCHE ARBEITSWEISEN**

Schriftenreihe des Geographischen Instituts der Universität Göttingen,
Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung

Herausgegeben von Prof. Dr. Martin Kappas

ISSN 1614-4716

Jobst Augustin

**DAS SEEGANGSKLIMA DER OSTSEE
ZWISCHEN 1958 UND 2002
AUF GRUNDLAGE NUMERISCHER DATEN**

ibidem-Verlag
Stuttgart

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Dieser Titel ist als Printversion im Buchhandel
oder direkt bei *ibidem* (www.ibidem-verlag.de) zu beziehen unter der

ISBN 978-3-89821-511-6 .

∞

ISSN: 1614-1111

ISBN-13: 978-3-8382-5511-6

© *ibidem*-Verlag
Stuttgart 2012

Alle Rechte vorbehalten

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und elektronische Speicherformen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in or introduced into a retrieval system, or transmitted, in any form, or by any means (electronical, mechanical, photocopying, recording or otherwise) without the prior written permission of the publisher. Any person who does any unauthorized act in relation to this publication may be liable to criminal prosecution and civil claims for damages.

Vorwort des Herausgebers

Die Reihe „Erdsicht – Einblicke in Geographische und Geoinformationstechnische Arbeitsweisen“ soll Forschungsergebnisse und Arbeiten im Bereich der Erdsystemforschung vorstellen. Die Betrachtung der Erde als System ist als Inhalt heutiger und zukünftiger Geowissenschaftlicher Gemeinschaftsforschung dringend gefordert. Die Herausforderungen liegen zum einen in der Erforschung der vielfältigen Interaktionen zwischen den verschiedenen Teilbereichen des Systems Erde. Hierzu zählen Wechselwirkungen zwischen fester Erde und Atmosphäre, zwischen der Landoberfläche und der Hydrosphäre oder zwischen Biosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre. Der Mensch steht dabei mit seinen zentralen Nutzungsansprüchen (Ernährung – landwirtschaftliche Nutzung – Ressourcennutzung) im Mittelpunkt eines vielfach vernetzten Erdsystems. Der Mensch verändert Landschaften und Atmosphäre und greift somit in alle Skalenbereiche des Erdsystems ein. Insofern müssen diese Veränderungen beobachtet und bewertet werden, damit Konzepte für ein nachhaltiges Erdsystemmanagement auf den unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen entwickelt werden können. Die neuen Geoinformationstechniken (Geostatistik; Geographische Informationssysteme – GIS; luft- und Satellitengestützte Fernerkundungssysteme – Remote Sensing) helfen dabei das System Erde zu beobachten und zu begreifen. Ohne diese Techniken ist eine ganzheitliche Betrachtung der Erde und eine flächenhafte Bereitstellung von Informationen über das Erdsystem nicht möglich.

Die vorliegende Studie zum Seegangsklima der Ostsee wurde am Institut für Küstenforschung des GKSS – Forschungszentrums zu Geesthacht verfasst. Herr J. Augustin wurde durch die Kollegen **Prof. Dr. Hans von Storch** und Herrn **Dr. Ralf Weisse** vor Ort in Geesthacht betreut. Herr von Storch und Herr Weisse stellten auch die Daten sowie die nötige Software zur Verfügung. Ohne ihr Engagement wäre die Studie über die Ostsee in dieser Form nicht möglich gewesen. An dieser Stelle möchte ich mich für die konstruktive Zusammenarbeit bedanken, die beide Institutionen ein Stück näher zusammengebracht hat. Es ist zu hoffen, dass in Zukunft weitere, interdisziplinär angelegte Arbeiten zwischen beiden Forschungseinrichtungen (GKSS, Universität Göttingen) entstehen. Die Arbeit konnte schließlich am Geographischen Institut der Universität Göttingen als Diplom-Arbeit eingereicht werden und gibt einen hervorragenden Überblick über die Entwicklung des Seegangsklima in der Ostsee. Auch für die sehr erfreuliche Zusammenarbeit mit Herrn Augustin in Fragen der Klimatologie und für das sehr konstruktive Arbeitsklima möchte ich mich bedanken. Anregungen und fachliche Hinweise wurden von Herrn Augustin stets berücksichtigt, so dass sich die Arbeit sehr schnell zu einer hervorragenden klimatologischen Studie entwickelte.

Martin Kappas

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Titel	Seite
1.0	Einleitung	1
2.0	Die Ostsee	5
2.1	Die geographischen Gegebenheiten der Ostsee	5
2.2	Die Entstehung der Ostsee und ihr Boden-Relief	7
2.3	Die klimatischen Gegebenheiten des Ostseeraumes	9
2.3.1	Die Ostsee im Rahmen der atmosphärischen Zirkulation.....	9
2.3.2	Klimatische Einflüsse auf den Ostseeraum.....	12
2.3.3	Die Großwetterlagen im Ostseeraum	15
2.3.3.1	Antizyklonale Westlage (Wa).....	16
2.3.3.2	Zyklonale Westlage (Wz)	16
2.3.3.3	Antizyklonale Nordwestlage (NWa)	17
2.3.3.4	Skagerraktief	17
2.3.3.5	Zyklonale Nordwestlage (NWz).....	18
2.3.3.6	Vb-Tief.....	18
2.3.3.7	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, zyklonal (HNFz).....	19
2.3.3.8	Hoch Mitteleuropa (HM)	19
2.4	Beschreibung der zu verwendenden Parameter der Ostsee	21
2.4.1	Wind	21
2.4.2	Seegang.....	23
2.4.3	Eisgang	28
2.4.4	Salinität, Gezeiten und Strömung.....	31
2.4.4.1	Salinität	31

2.4.4.2	Gezeiten und Strömung	34
2.4.4.3	Kausalitätsmodell.....	35
2.4.5	Hochwasserereignisse in der Ostsee	37
3.0	<i>Das methodische Vorgehen</i>	41
3.1	Das Seegangmodell	41
3.2	Datenerhebung	42
3.3	Datenvalidierung	46
3.3.1	Datenvalidierung, Station „Zingst“	46
3.3.2	Datenvalidierung, Station "Arkona"	50
3.3.3	Fazit der Datenvalidierung	52
4.0	<i>Statistische Auswertung der Daten</i>	55
4.1	Mittelwerte und Standardabweichungen	55
4.1.1	Mittelwerte	56
4.1.1.1	Eisbedeckung der Ostsee	56
4.1.1.2	Mittelwerte der Windgeschwindigkeit	58
4.1.1.3	Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe	59
4.1.1.4	Mittelwerte der Wellenperiode	61
4.1.2	Standardabweichung	62
4.1.3	Fazit Mittelwerte und Standardabweichung.....	64
4.2	Extremwerte der Seegangsklimatologie	65
4.2.1	Windgeschwindigkeit.....	66
4.2.2	Wellenhöhe.....	70
4.2.3	Wellenperiode	74
4.2.4	Fazit Extremwerte der Seegangsklimatologie.....	76
4.3	Bivariate Verteilungen	76
4.3.1	Gitterpunkt "Arkona"	77
4.3.2	Gitterpunkt "Südliche Ostsee"	80
4.3.3	Gitterpunkt "Zentrale Ostsee"	83

4.3.4	Gitterpunkt "Nördliche Ostsee"	84
4.3.5	Gitterpunkt "Bottnischer Meerbusen"	86
4.3.6	Fazit Bivariate Verteilungen	89
4.4	Lineare Trends	90
4.4.1	Lineare Trends des Seegangsklimas der Ostsee.....	91
4.4.1.1	Wind.....	92
4.4.1.2	Wellenhöhe	95
4.4.1.3	Wellenperiode	97
4.4.1.4	Fazit Lineare Trends des Seegangsklimas der Ostsee	98
4.4.2	Zeitreihen des Seegangsklimas der Ostsee	99
4.4.2.1	"Südliche Ostsee"	101
4.4.2.2	"Zentrale Ostsee"	106
4.4.2.3	"Nördliche Ostsee"	111
4.4.2.4	Fazit Zeitreihen des Seegangsklimas der Ostsee	116
5.0	<i>Multivariate Statistik</i>	<i>119</i>
5.1	Empirische Orthogonalfunktion (EOF)	119
5.1.1	Methodik.....	119
5.1.2	Ergebnisse der EOF-Analyse	122
5.2	Kanonische Korrelationsanalyse (CCA)	126
5.2.1	Methodik.....	127
5.2.2	Ergebnisse der kanonischen Korrelationsanalyse	128
5.3	Fazit der EOF-Analyse und der kanonischen Korrelationsanalyse	131
6.0	<i>Diskussion und Bewertung der Ergebnisse</i>	<i>133</i>
7.0	<i>Zusammenfassung.....</i>	<i>139</i>
	<i>Literaturverzeichnis.....</i>	<i>141</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Titel	Seite
1	Übersicht des Ostseeraumes	6
2	Allgemeine atmosphärische Zirkulation	11
3	Zyklonenbahnen und Jahreszeit ihrer größten Häufigkeit	20
4	Beispiel eines eindimensionalen Seegangsspektrums	25
5	Verhältnis zwischen Wellenhöhe, Wirkdauer, Windgeschwindigkeit und Fetch	26
6	Wellenprofil bei zunehmender Fetch	28
7	Eisverhältnisse der Ostsee während eines schwachen und starken Winters	30
8	Kausalitätsmodell eines Seegangsklimas	37
9	Topographie der Ostsee mit Stationen und bathymetrischen Verhältnissen in m	44
10	Gegenüberstellung der im Modell verwendeten auf ETOPO basierenden und der BSH-Topographie	45
11	Streudiagramm zwischen beobachteter und modellierter, signifikanter Wellenhöhe für die Station „Zingst“	47
12	Streudiagramm zwischen beobachteter und modellierter Wellenperiode für die Station „Zingst“	49
13	Streudiagramm zwischen beobachteter und modellierter, signifikanter Wellenhöhe für die Station „Arkona“	50
14	Streudiagramm zwischen beobachteter und modellierter Wellenperiode für die Station „Arkona“	51
15	Mittlere saisonale Eisbedeckung in %	57
16	Mittlere saisonale Windgeschwindigkeit in m/s	59

17	Mittlere saisonale Wellenhöhe in m	60
18	Mittlere saisonale Wellenperiode in s	61
19	Standardabweichung der saisonalen Wellenhöhe in m	63
20	Schematische Darstellung der Andauer, Anzahl und Intensität einer Zeitreihe für ein fiktives Jahr	66
21a	Langjähriges (1958-2002) 90%-Perzentil der Windgeschwindigkeit in m/s	67
21b	Langjähriges (1958-2002) 99%-Perzentil der Windgeschwindigkeit in m/s	67
22	Mittlere Andauer von Ereignissen die das langjährige (1958-2002), lokale 90%-Perzentil der Windgeschwindigkeit überschreiten in Stunden	68
23	Jährliche Anzahl von Ereignissen die das langjährige (1958-2002), lokale 90%-Perzentil der Windgeschwindigkeit überschreiten	69
24	Mittlere Intensität der Ereignisse die das langjährige (1958-2002), lokale 99%-Perzentil der Windgeschwindigkeit überschreiten	70
25a	Langjähriges (1958-2002) 90%-Perzentil der mittleren Wellenhöhe in m	71
25b	Langjähriges (1958-2002) 99%-Perzentil der mittleren Wellenhöhe in m	71
26	Mittlere Andauer von Ereignissen die das langjährige (1958-2002), lokale 99%-Perzentil der Wellenhöhe überschreiten in Stunden	72
27	Mittlere, jährliche Anzahl von Ereignissen die das langjährige (1958-2002), lokale 99%-Perzentil der Wellenhöhe überschreitet	73
28	Mittlere Intensität der Ereignisse die das langjährige (1958-2002), lokale 90%-Perzentil der Wellenhöhe überschreiten in m	74
29	Langjähriges (1958-2002) 90%-Perzentil der mittleren Wellenperiode in s	75
30	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Gitterpunkt "Arkona"	78
31	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und	

	Wellenhöhe am Gitterpunkt "Arkona"	79
32	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Wellenrichtung und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Arkona"	80
33	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Gitterpunkt "Südliche Ostsee"	81
34	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Wellenrichtung und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Südliche Ostsee"	82
35	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Zentrale Ostsee"	83
36	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Wellenrichtung und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Zentrale Ostsee"	84
37	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Nördliche Ostsee"	85
38	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Wellenrichtung und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Nördliche Ostsee"	86
39	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Gitterpunkt "Bottnischer Meerbusen"	87
40	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Bottnischer Meerbusen"	88
41	Gemeinsame Häufigkeitsverteilung von Wellenrichtung und Wellenhöhe am Gitterpunkt "Bottnischer Meerbusen"	91
42	Schematische Klassifikation von Klimavariationstypen	88
43a	Trend der Windgeschwindigkeiten des 50%-Perzentils in cm/s pro Jahr	92
43b	Trend der Windgeschwindigkeiten des 99%-Perzentils in cm/s pro Jahr	92
44	Trend der mittleren, jährlichen Andauer von Ereignissen die das langjährige 95%-Perzentil überschreiten in min pro Jahr	93
45	Trend der mittleren, jährlichen Anzahl von Ereignissen die das langjährige 90%-Perzentil überschreitet	94
46	Trend der mittleren, jährlichen Intensität, die das langjährige 90%-	

	Perzentil überschreitet in cm/s pro Jahr	95
47a	Trend der signifikanten Wellenhöhe für das 50%-Perzentil in cm/ Jahr	96
47b	Trend der signifikanten Wellenhöhe für das 99%-Perzentil in cm/ Jahr	96
48	Trend der mittleren, jährlichen Anzahl von Ereignissen, die das lang- jährige 90%-Perzentil überschreiten	96
49	Trend der mittleren, jährlichen Intensität die das langjährige 90%- Perzentil überschreitet in cm pro Jahr	97
50a	Trend des 50%-Perzentils der mittleren Wellenperiode in s pro Jahr	98
50b	Trend des 99%-Perzentils der mittleren Wellenperiode in s pro Jahr	98
51	Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die Station "Südliche Ost- see (90%-Perzentil)	101
52	Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die Station "Südliche Ost- see" (99%-Perzentil)	103
53	Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe für die Station "Südliche Ostsee" (90%-Perzentil)	104
54	Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe für die Station "Südliche Ostsee" (99%-Perzentil)	105
55	Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die Station "Zentrale Ostsee" (90%-Perzentil)	107
56	Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die Station "Zentrale Ostsee" (99%-Perzentil)	108
57	Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe für die Station "Zentrale Ost- see" (90%-Perzentil)	109
58	Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe für die Station "Zentrale Ost- see" (99%-Perzentil)	110
59	Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die Station "Nördliche Ost- see" (90%-Perzentil)	112

60	Zeitreihen der Windgeschwindigkeit für die Station "Nördliche Ostsee" (99%-Perzentil)	113
61	Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe für die Station „Nördliche Ostsee“ (90%-Perzentil)	114
62	Zeitreihen der signifikanten Wellenhöhe für die Station „Nördliche Ostsee“ (99%-Perzentil)	115
63	Mittlere Anzahl von Ereignissen im Monat, die das langjährige 90%-Perzentil an der Station „Südliche Ostsee“ überschreiten	121
64	1. EOF-Muster des monatlichen Luftdrucks in hPa mit der dazugehörigen Zeitreihe für den Nordatlantik	123
65	2. EOF-Muster des monatlichen Luftdrucks in hPa mit der dazugehörigen Zeitreihe für den Nordatlantik	124
66	1. EOF-Muster des mittleren 50%-Perzentils des Seegangs (NDJ) in m mit der dazugehörigen Zeitreihe für die Ostsee	125
67	1. EOF-Muster des mittleren 99%-Perzentils des Seegangs (NDJ) in m mit der dazugehörigen Zeitreihe für die Ostsee	126
68	1. CCA, 50%-Perzentil	129
69	1. CCA, 99%-Perzentil	130
70	Standardisierte Zeitreihe des geostrophischen Windes in der Ostseeregion	136

Tabellenverzeichnis

Abbildung	Titel	Seite
1	Cf- und Df-Klima im Überblick	15
2	Klassifikation der Pegelstände	38
3	Stationsnamen mit der dazugehörigen Kartentiefe, Modelltiefe und ihrer Position	43

1.0 Einleitung

Das Klima der Erde unterlag seit ihrer Entstehung -zum Teil deutlichen- natürlichen Schwankungen. Ein Beleg dafür sind die gut nachweisbaren Warm- und Kaltzeiten der Vergangenheit. Einhergehend mit dem zunehmenden Einfluss des Menschen auf die Umwelt sind jetzt allerdings nicht mehr natürliche Schwankungen, sondern vielmehr anthropogen verursachte Veränderungen in der Diskussion. Obwohl jeder Einzelne solche Veränderungen nur subjektiv wahrnehmen kann, ist man sich darüber einig, dass es beispielsweise eine Zunahme von klimatischen Extremereignissen in den letzten Jahren gegeben hat. Auch in der Wissenschaft wird von einem Klimawandel bzw. von einer Erhöhung der Erdmitteltemperatur ausgegangen und es wird ein deutlicher Zusammenhang zwischen den anthropogenen Einflüssen und einer anscheinenden Veränderung des Klimas vermutet. Seit mehreren Jahrzehnten versuchen Wissenschaftler, mittels Klimamodellen das Klima der Zukunft -aber auch der Vergangenheit- unter Berücksichtigung anthropogener Emissionen zu simulieren bzw. zu rekonstruieren. Die Motivation für die Erstellung solcher Simulation ist auch "historisch" begründet. In der Vergangenheit war es sehr schwierig über längere Zeiträume möglichst flächendeckende und vollständige Datenreihen zu erhalten. Die Messungen und Beobachtungen waren oft lücken- bzw. fehlerhaft und nur auf einzelne Punkte auf dem Festland beschränkt. Die Informationsbeschaffung über marine Regionen gestaltete sich als noch schwieriger. Anfang der 1980er Jahre wurden daher erste Versuche unternommen, die Daten mittels einer Simulation zu gewinnen. Die fortschreitende Entwicklung der Fernerkundung (u.a. Satellitentechnologie) unterstützte eine verbesserte Datengewinnung. Es können jetzt sowohl durch Simulationen, wie auch durch Messungen bzw. Beobachtungen vermehrt Informationen gewonnen werden. Dennoch sind fehlerhafte Mess- und Beobachtungsdaten (Inhomogenitäten) nicht auszuschliessen.