

# Zyklen in den Differenzen täglicher mittlerer Wasserstände zwischen nördlichen und südlichen Ostseepegeln

Von HANS-JOACHIM STIGGE, INES PERLET u. BARRY BROMAN

## Zusammenfassung

Die Differenzen täglicher mittlerer Wasserstände zwischen der nördlichen und südlichen Ostsee (Schweden und Deutschland) wurde mit Hilfe einer 20-jährigen Reihe untersucht. Neben dem isostatischen Effekt und einer deutlichen Jahresperiode wurde ein etwa 10-jähriger Zyklus gefunden. Außerdem gibt es Symptome für verschiedene Zyklen der Größenordnung Monate und Wochen. Einige dieser Zyklen werden auch bei atmosphärischen Prozessen beobachtet. Der Zusammenhang zwischen Wind und Hydrodynamik lässt es deshalb naheliegend erscheinen, auch längere Zyklen in den Wasserstandsunterschieden zwischen nördlicher und südlicher Ostsee als Indikatoren für Wetter und Klima aufzufassen.

## Summary

*The differences of daily mean water levels between the northern and southern Baltic Sea (Sweden and Germany) has been investigated by means of a 20 years series. In addition to the isostatic effect and a distinct yearly period, a cycle of about 10 years was found. Moreover, there are symptoms of various cycles in the range of months and weeks. Some of these cycles have been observed on atmospheric processes, too. Due to the correlation between wind and hydrodynamics, it seems to be obvious, to consider longer cycles in the water level differences between northern and southern Baltic sea as indicators of weather and climate.*

## Inhalt

1. Einleitung .....	29
2. Vorbereitung der Daten .....	30
3. Auswertung .....	31
3.1 Mittelwerte und Trend .....	31
3.2 Harmonische Analyse .....	33
4. Interpretation und Schlussfolgerungen .....	35
5. Schriftenverzeichnis .....	35

## 1. Einleitung

Abschätzungen künftiger hydrologischer Extremereignisse stützen sich meist auf Statistik oder die Annahme von Szenarien. Spezielle Arbeiten (HUPFER et al., 1998) lassen den Schluss zu, dass mögliche globale Klimaveränderungen keine neue Qualität von Sturmflut-szenarien an der deutschen Ostseeküste liefern werden und ein wachsendes Gefährdungspotential sich eher aus dem langsamen Meeresspiegelanstieg infolge der Plattentektonik oder infolge eines eustatischen Effektes ergeben könnte. Bei der Untersuchung langjähriger Was-

serstandsmessreihen der Ostsee fallen aber immer wieder Zyklen auf, die sowohl astronomisch als auch wetter- bzw. klimabedingt sind. Halbtägige Gezeitenreste gibt es wegen der relativ engen Verbindungen zur Nordsee nur in der Beltsee. Ihre Amplituden betragen dort einen bis höchstens zwei Dezimeter und klingen im Zentralbereich der Ostsee ab. Ganztägige Zyklen können sowohl als Gezeitenanregung als auch als Windwirkungen gedeutet werden. Entsprechende Signale findet man auch in Strömungs- und Trübungsmessreihen (GIENAPP, 1993). Wesentlich langsamere Vorgänge, wie halbjährliche oder noch längere Tiden wurden im gesamten Seegebiet schon auf der Basis von Monatsmittelwasserständen untersucht. Ihre Amplituden nehmen oft ‚binnenwärts‘ zu. Selbst bei der Saros-Periode, die an der deutschen Ostseeküste nur ca. einen Zentimeter beträgt, scheint dies der Fall zu sein (WEISE, 1990, S. 88). Die statistische Signifikanz langer Wasserstandsperioden ist allerdings umstritten und scheint von den verwendeten Zeitreihen abzuhängen (LIEBSCH, 1997, S. 56). Vergleiche der Phasenlagen langer Partialtiden an der nördlichen und südlichen Ostsee zeigten, dass es offenbar externe und interne Anregungsmechanismen gibt (STIGGE, 1993). Während sich langfristige Veränderungen des Wasserhaushaltes an allen Pegeln gleichphasig bemerkbar machen, können die internen Anregungen durch eine relative Gegenphasigkeit von nördlichen und südlichen Ostseepegeln gekennzeichnet sein. Dies ist der Fall, wenn eine z. B. über Jahre dominante Windrichtung im Norden und Süden entgegengesetzte Wirkungen hervorzurufen vermag. (Im Ostseeraum dominiert Südwestwind.) Normalerweise verändern sich die ursächlichen Luftdruck- und Windfelder jedoch innerhalb von Stunden oder Tagen. Der Umkehrschluss, dass alle langen Wasserstandszyklen, die sich aus den Windfeldern über der Ostsee herleiten, im Norden und Süden entgegengesetzte Phasenlagen aufweisen, wäre also falsch. Aus dem Vergleich der Wasserstände und Höhensysteme geht hervor, dass der mittlere Meeresspiegel in St. Petersburg etwa 15 cm höher liegt als an der deutschen Küste. Auch dies resultiert unter anderem aus der windgetriebenen Hydrodynamik (vgl. WEISE, 1990, S. 37). Die Momentanwerte der Wasserstandsdifferenzen zwischen nördlichen und südlichen Ostseepegeln liegen größenordnungsmäßig oft bei mehreren Dezimetern und können im Extremfall bis zu 5 Meter betragen (Hochwasser im Süden, Niedrigwasser im Norden oder umgekehrt). Da die einknotigen Eigenperioden der Ostsee 27 bis 39 Stunden betragen, erfordert eine Untersuchung eigentlich stündliche Auflösung. Zur Darstellung der hier interessierenden Frequenzbereiche musste der Vergleich von Tagesmittelwerten ausreichen.

## 2. Vorbereitung der Daten

Die Datenbasis bildeten zwei synchrone 20-jährige Wasserstandsmessreihen, die aus den Tagesmittelwerten der Stationen Wismar und Warnemünde (Deutschland) bzw. Stockholm und Spikarna (Schweden) bestanden. Wie üblich wurden dabei die Sollhöhenunterschiede zu den Pegelfestpunkten konstant gehalten. Damit ist die physikalische Höhe der Pegelnullpunkte zeitlich variabel. Da auf Theorie und Unsicherheiten der Höhensysteme nicht eingegangen werden kann, wurde die Interpretation absoluter Wasserstände unterlassen. Es wurde lediglich versucht, zu einem Zeitpunkt einen ungefähren gemeinsamen Höhenbezug herzustellen. Zunächst wurden die älteren deutschen Wasserstandsdaten auf den aktuellen Pegelnullpunkt  $PN = HN 76-514$  cm umgerechnet. Dazu wurden die Originaldaten von Wismar vom Beginn der Reihe bis zum 31. 10. 1985 um jeweils 4 cm erhöht. Die Originaldaten von Warnemünde wurden vom Beginn der Reihe bis zum 31. 10. 1985 um jeweils 2 cm erhöht. Anschließend erfolgte ein formaler Bezug auf NN. Da die Systemdifferenz HN-NN pau-

schal mit 15 cm angegeben wird, wurden alle deutschen Daten um 499 cm reduziert. Für den Norden wurde von schwedischer Seite folgende Datentransformation empfohlen:

- Reduktion der Originaldaten von Stockholm um 192 cm.
- Reduktion der Originaldaten von Spikarna um 309 cm.

Durch Bildung der arithmetischen Mittelwerte aus jeweils zwei nördlichen bzw. zwei südlichen Pegeln sollten lokale Effekte unterdrückt werden.

### 3. Auswertung

#### 3.1 Mittelwerte und Trend

In Abb. 1 ist die nach 2 aufbereitete Zeitreihe der Wasserstandsunterschiede zwischen nördlichen und südlichen Pegeln dargestellt. Die Lage des Mittelwertes um Null zeigt, dass die Höhenreduktion der Daten zweckmäßig war. Sehr auffällig ist der Jahreszyklus. Da das Kalenderjahr die Winter schneidet, zählt man 21 mehr oder weniger ausgeprägte Fluktuationssmaxima.

In Abb. 2 wurde diese Zeitreihe zunächst einer 365 Tage übergreifenden Mittelwertbildung unterzogen. Dadurch reduziert sich der Ordinatenmaßstab, so dass der Trend zur Abnahme der Differenzen von 0,68 cm/a deutlicher hervortritt (Regressionsgerade in Abb. 2).

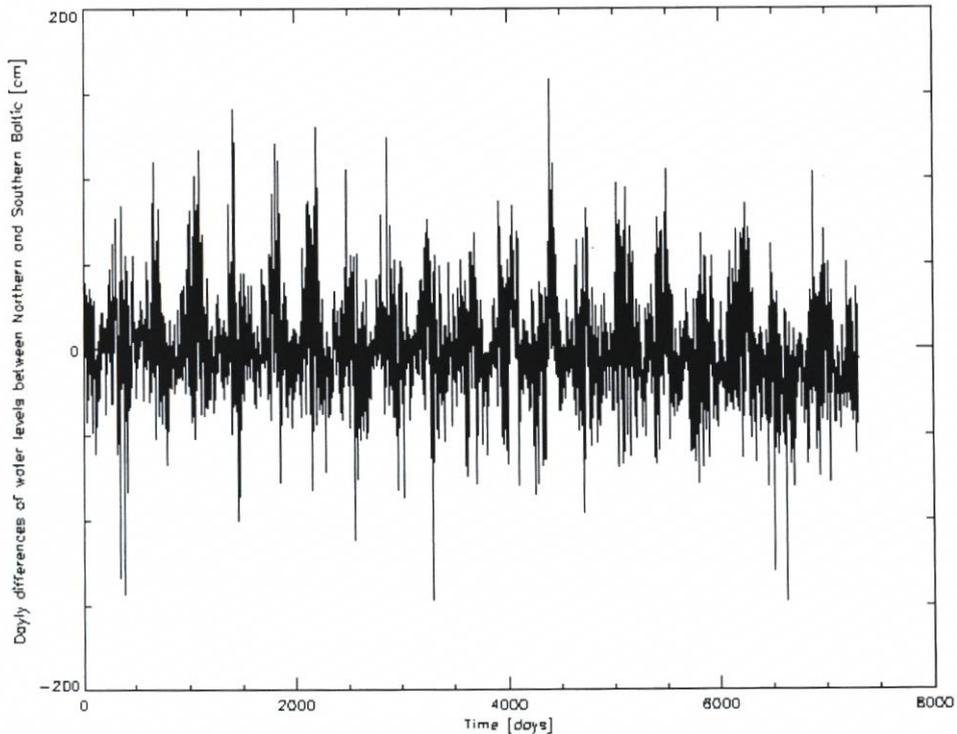


Abb. 1: 20-jährige Zeitreihe der täglichen Wasserstandsunterschiede zwischen nördlichen und südlichen Ostseepegeln (1978–1998)

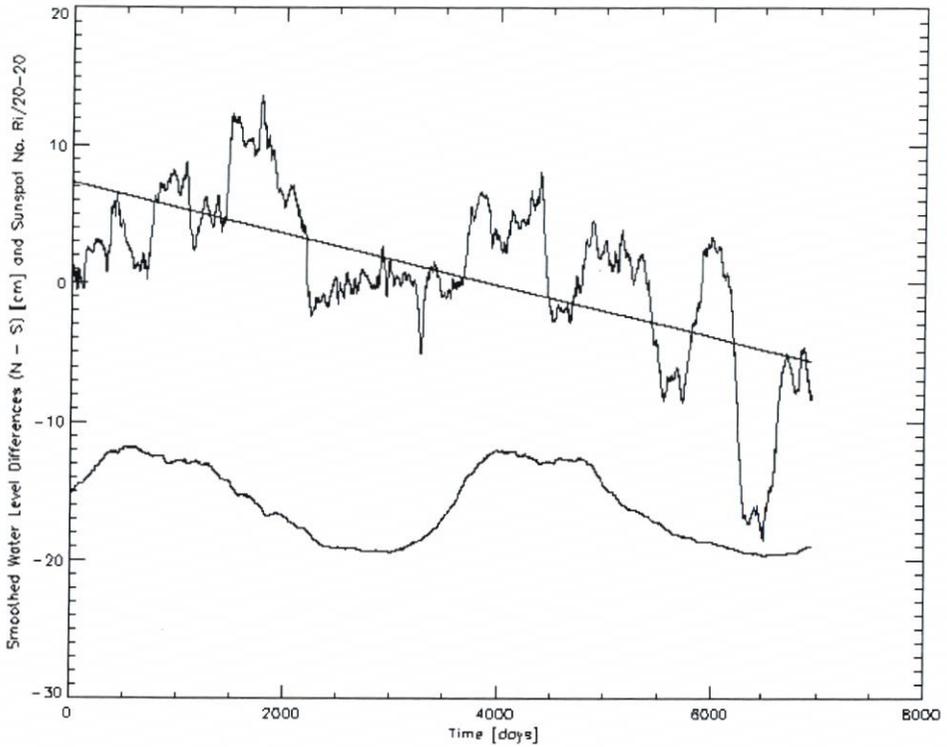


Abb. 2: 365 Tage übergreifende Mittelwerte der täglichen Wasserstandsunterschiede zwischen nördlicher und südlicher Ostsee aus den Kalenderjahren 1978 bis 1997, dazugehöriger Trend und transformierte Sonnenflecken - Relativzahlen (s. Text)

Infolge der rezenten Erdkrustenbewegung nehmen die mittleren Wasserstände im Süden zu und im Norden ab, so dass sich die Differenzen (Nord - Süd) mit der Zeit verkleinern. Die Wasserstandsdaten weisen aus, dass dieser Effekt zu ca 88 % auf die Landhebungen im Norden und nur zu 12 % auf die Landabsenkungen im Süden zurückzuführen ist. Da der Trend gut mit den bekannten lokalen Raten übereinstimmt, scheint er eher geotektonischen als hydrodynamischen Ursprungs zu sein. Auch ein eustatischer Anteil dürfte schwerlich regionale Unterschiede dieser Größenordnung bewirken. Denkt man sich die Kurve in Abb. 2 um den linearen Anteil reduziert, erkennt man einen 10-jährigen und zeitweise auch einen ca. 3-jährigen Zyklus. Während man eine 10-jährige Periode nachweist, werden 3-jährige Perioden nur im Zeitfenster der letzten 10 Jahre gefunden. Das Auftauchen und Verschwinden eines ca. 3-jährigen Zyklus der Wasserstände in der südlichen Ostsee ist bekannt (vgl. LIEBSCH, 1997, S. 60). Als Ursache der hohen Differenzen im 1. und 3. Viertel der Messperiode gegenüber den relativ geringen Differenzen im 2. und 4. Viertel kommt die nahezu phasengleich liegende Sonnenfleckenhäufigkeit in Betracht. Zum Vergleich wurden die entsprechenden Sunspot-files des SIDC am Royal Observatory of Belgium (URL 1) in die Abb. 2 aufgenommen.

Dazu wurden die Relativzahlen in gleicher Weise wie die Wasserstandsunterschiede geglättet und wegen des Ordinatenmaßstabes durch 20 dividiert sowie um 20 reduziert. Beziehungen zwischen der Sonnenfleckenhäufigkeit und den Ostseewasserständen wur-

den schon frühzeitig entdeckt (BREHMER, 1914). Sie sind vermutlich durch atmosphärische Vorgänge bzw. Witterungsprozesse bedingt (LABITZKE u. VAN LOON, 1988; STIGGE, 1991). Der Korrelationskoeffizient zwischen den Kurven in Abb. 2 beträgt allerdings nur 0,56.

### 3.2 Harmonische Analyse

Periodische oder zyklische Prozessverläufe treten in der Natur häufig auf. Ein Standardwerkzeug der mathematischen Auswertung ist die harmonische Analyse. Um zu betonen, dass dies lediglich ein Verfahren ist, um physikalische Inhalte verständlicher zu machen, sei hier die Mathematik kurz erläutert. Bei gegebenen  $2n$  Stützstellen  $y_m$  einer Funktion bzw. Zeitreihe, ist deren trigonometrische Summe

$$s_n = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} c_k \cos(k\omega t - \varphi_k) + \frac{a_n}{2} \cos n\omega t \quad (1)$$

mit

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \varphi_k = \arctan \frac{a_k}{b_k} \quad (2a, b)$$

eine beste Approximation, im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate, wenn die Fourierkoeffizienten  $a_k$  und  $b_k$  nach den Besselschen Formeln ermittelt werden:

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{2n-1} y_m, \quad a_k = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{2n-1} y_m * \cos\left(\frac{m}{n} * k * \pi\right) \quad (3a, b)$$

$$b_k = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{2n-1} y_m * \sin\left(\frac{m}{n} * k * \pi\right) \quad \text{für } k = 1, 2, 3 \dots n \quad (4)$$

Die Koeffizienten  $c_k$  lassen die Bedeutung einzelner Partialtiden erkennen. Der Vergleich der Phasenwinkel  $\varphi_k$  im Norden und Süden gestattet weitere Schlüsse. Im vorliegenden Falle fiel auf, dass die hochfrequenten Anteile im Süden, die niederfrequenten Anteile im Norden dominieren. Das hochfrequente Rauschen im Süden ist teilweise auf die Gezeitenreste zurückzuführen. Abb. 4 zeigt das Spektrum der periodischen Anteile in den täglichen Wasserstandsunterschieden zwischen südlicher- und nördlicher Ostsee. Die im Einzelfall sehr hohen Differenzen aus Abb. 1 lassen sich in erster Linie stochastisch deuten. Sie erzeugen ein breites Spektrum hochfrequenter Anteile. Offensichtlich gibt es aber auch charakteristische Zyklen im niederfrequenten Bereich. Mit Blick auf die Phasenlagen wurden nicht nur die Wasserstandsunterschiede zwischen Süden und Norden, sondern auch die jeweiligen lokalen Wasserstände analysiert. In Tab. 1 sind Amplituden und Phasenlagen von den 16 markantesten periodischen Summanden der insgesamt 3652 harmonischen Anteile dargestellt. Da es auch auf den Vergleich der Phasenlagen zwischen nördlichen (N) und südlichen (S) Pegeln ankam, war bei deren Berechnung die Mehrdeutigkeit des Arkustangens (Gl. 2b) zu berücksichtigen. Die Phasenwinkel (Ph) wurden abhängig von Größe und Vorzeichen der  $a_k$  und  $b_k$  ihrem jeweiligen Quadranten zugeordnet. Die Differenz der im Norden und Süden

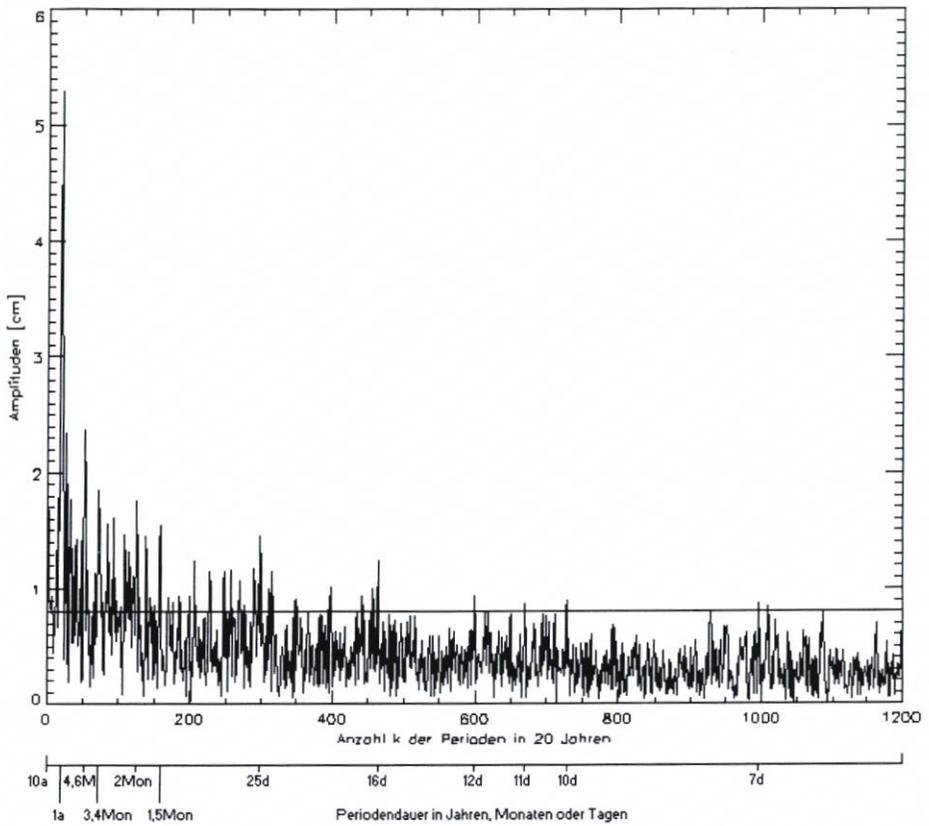


Abb. 4: Amplitudenspektrum der täglichen Wasserstandsunterschiede zwischen nördlichen und südlichen Ostseepegeln aus der 20-jährigen Reihe 1978-1997

Tab. 1: Konstante und 16 markante periodische Summanden zur Approximation einer 20-jährigen Reihe der täglichen Wasserstandsunterschiede zwischen nördlichen und südlichen Ostseepegeln

k	T [d]	AS [m]	AN [mm]	AD [mm]	PhN	PhS	Marke
0	0	60	72	-12	/	/	/
1	7305	16	44	31	85	111	+
2	3652	4	25	21	154	165	+
19	384	22	56	37	213	190	+
20	365	38	88	53	298	280	+
21	347	18	53	39	41	10	+
23	317	13	37	25	329	348	+
53	137	11	23	24	99	177	
72	101	8	20	19	350	59	
125	58	10	12	18	222	332	
159	45	8	15	16	173	251	
298	24	10	5	15	112	257	-
464	15	11	3	12	276	29	
599	12	9	2	9	94	194	
670	10	7	2	9	21	140	
729	10	8	2	9	284	35	
997	7	7	1	9	14	165	-

ermittelten Phasenlagen  $|\text{PhS} - \text{PhN}|$  kann höchstens  $180^\circ$  betragen. Betrug sie weniger als  $61^\circ$ , wurde in der letzten Spalte ‚Marke‘ von Tab. 1 das Zeichen ‚+‘ eingetragen, betrug sie mehr als  $120^\circ$  wurde hier ein ‚-‘ gesetzt. Zwischen  $61^\circ$  und  $120^\circ$  erfolgte keine Kennzeichnung.

#### 4. Interpretation und Schlussfolgerungen

Untersuchungen der Wasserstandsdifferenzen zwischen nördlicher und südlicher Ostsee erfolgten bisher meist auf der Basis von Jahrhundertreihen monatlicher Mittelwerte. Unsere Messreihe hat zwar nur eine Länge von 20 Jahren, dafür aber eine 30-fach höhere Auflösung und basiert auf stündlichen Messwerten. Damit entfallen sowohl Zufallseinflüsse als auch Aliasingeffekte aus den Gezeitenresten, die bei Messreihen auf der Basis täglicher Terminwerte nicht auszuschließen sind. Der in Tab. 1 vorgenommene Vergleich von Amplituden und Phasen der nördlichen und südlichen Komponenten erklärt das Zustandekommen der Wasserstandsdifferenzen. Man erkennt die allgemein niedrigen Phasendifferenzen für Langzeitprozesse, während die hohen Phasendifferenzen meist erst im höheren Frequenzbereich auftreten. Wenn man in einer Tabelle alle Amplituden über 0,8 cm darstellt (oberhalb der Markierung in Abb. 4), wird dies noch deutlicher. Aus Platzgründen wurde darauf verzichtet. Auch der anfangs erwähnte ca. 10-jährige Zyklus tritt bei  $k = 2$  im Norden und Süden relativ gleichphasig und mit wesentlich höherer Amplitude im Norden auf. Die Amplitude der Grundschwingung ( $k = 1$ ) liegt mit 3,1 cm in einer Größenordnung, die den linearen Trend abbilden könnte. Da die niedrigen Frequenzen des Fourierspektrums auch einfache stetige Funktionen abbilden, ist bei ihrer Interpretation Vorsicht geboten. Wir haben hier aber nicht einmal den Trend eliminiert, weil es durchaus sein könnte, dass lineare Anteile, die man im Datenmaterial feststellt, teilweise auch durch periodische bzw. zyklische Abläufe erzeugt sein könnten. Artefakte sind also in keinem Falle ganz auszuschließen. Der Jahresgang bei  $k = 19 \dots 23$  und ein ca. 5-monatiger Zyklus bei  $k = 53$  dürfen jedoch eindeutig natürliche Phänomene widerspiegeln. Für die 3-, 2- und 1,5-monatigen Anteile ( $k = 72 \dots 159$ ) fehlt z. Z. eine Erklärung. Interessant erscheinen aber auch die Perioden um 24 d ( $k = 298$ ), 16 d ( $k = 464$ ), 12–10 d ( $k = 599 \dots 729$ ) und 7d ( $k = 997$ ). Es liegt nahe, dass es selbst im Mittel langer Zeiträume Wahrscheinlichkeitsmaxima für die Veränderung der Windcharakteristik bei 12, 8 oder 6 bis 3,5 Tagen gibt. Atmosphärische Zyklen in den hier beobachteten Größenordnungen sind nicht unbekannt. SCHERHAG (1948) beschrieb z. B. eine 16-tägige troposphärische Welle. APPENZELLER (1995) berichtet von einem 7-Tages-Zyklus bei der Intrusion stratosphärischer Luft in die zentraleuropäische Troposphäre als Auslöser für Instabilitätsentwicklungen. Die Amplituden der Perioden unterhalb von 20 Tagen sind im Norden durchweg kleiner als ein halber Zentimeter, d. h., die Schwankungen basieren hauptsächlich auf den Fluktuationen an den südlichen Pegeln. Trotzdem wird angeregt, die Differenzen zwischen nördlichen und südlichen Ostseepegeln weiterhin aufmerksam zu analysieren und Vergleiche mit meteorologischen Zeitreihen vorzunehmen. Letzteres war in diesem Rahmen leider nicht möglich.

#### 5. Schriftenverzeichnis

- APPENZELLER, C.: Wave developments on surface fronts and stratospheric intrusions, Ph.D. thesis, ETH-Zuerich, Nr. 10471, 1995.
- BREHMER: Tiden von langer Periode im mittleren Wasserstande der Ostsee zu Swinemünde. Ann. d. Hydrographie u. Marit. Meteorologie, Berlin, 1914.

- GIENAPP, H.: Seiches, Tides and their Subharmonics in the Baltic. Deutsche Hydrogr. Zeitschr. 45, Hamburg, 1993.
- HUPFER, P.; BAERENS, C.; KOLAX, M. und TINZ, B.: Zur Auswirkung von Klimaschwankungen auf die deutsche Ostseeküste. Spezialarbeiten aus der AG Klimaforschung des Met. Inst. der Humboldt-Universität zu Berlin, Nr. 12, Berlin, 1998.
- LABITZKE, K. u. VAN LOON, H.: Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the Atmosphere, Part I – III, Journal of Climate, 1988–1989.
- LIEBSCH, G.: Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen. Deutsche geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Dissertationen, H. 485, München, 1997.
- SCHERHAG, R.: Neue Methoden der Wettervorhersage und Klimaforschung, Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1948.
- 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.: Sea level change and high-water probability on the German Baltic coast. Contribution to the UNESCO-Workshop „SEACHANGE '93“, Amsterdam, 1993.
- 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 der Erde Nr. 115, Potsdam, 1990.
- URL 1: Royal Observatory of Belgium, Sunspot Index Data Center: <http://www.oma.be/KSBORB/SIDC/DATA/DAILYSSN/dssn19xx.dat>