

Die Reduktion langjähriger Wasserstandsmessungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns auf einen einheitlichen Höhenbezug

Von GUNTER LIEBSCH, REINHARD DIETRICH, LUDWIG BALLANI u.
GUNTHER LANGER

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die Erarbeitung homogener Langzeitreihen von Monatsmittelwerten der Pegel Wismar, Warnemünde, Sassnitz und Koserow sowie die anschließende Nutzung dieser Reihen zur Untersuchung säkularer Veränderungen beschrieben. Alle Pegel liegen an der deutschen Ostseeküste im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern. Die ersten Beobachtungen in Wismar und Warnemünde erfolgten 1848 bzw. 1855, die Aufzeichnungen der Pegel Sassnitz und Koserow werden seit 1961 bzw. 1974 bearbeitet. Die Pegelreihen von Wismar und Warnemünde mit einer Länge von rund 140 Jahren gehören damit zu den längsten im Ostseeraum. Um diese Beobachtungen für langzeitstatistische Untersuchungen nutzen zu können, mussten verschiedene Korrekturen erarbeitet werden.

Summary

The paper describes the reduction of monthly mean sea level records of the tide gauges Wismar, Warnemünde, Sassnitz and Koserow as well as the use of these records for long-term sea-level investigations. All stations are located at the German coastline of the federal country Mecklenburg-Vorpommern. First observations in Wismar and Warnemünde were carried out in 1848 respectively in 1855, the measurements at Sassnitz and Koserow were considered since 1961 respectively 1974. Therefore, the tide gauge records of Wismar and Warnemünde with an interval of about 140 years belong to the longest records in the Baltic Sea. Different corrections were necessary in order to use these records for long-term investigations.

Inhalt

1. Einleitung	3
2. Der Höhenbezug der Wasserstandsmessungen	6
3. Kontrollnivelllements an den Pegeln	9
4. Einfluss der Gezeiten	13
5. Säkularer Anstieg des Mittelwassers	20
6. Ausblick	25
7. Zusammenfassung	26
8. Dank	27
9. Schriftenverzeichnis	27

1. Einleitung

Pegelmessungen können in Deutschland auf eine lange Tradition zurückblicken. An einigen Orten reichen Aufzeichnungen bis in das 18. Jahrhundert zurück. Beispiel hierfür sind die durch Johann Gottlieb Pötsch ausgeführten Wasserstandsmessungen der Elbe in

Meißen und Dresden (ROHDE, 1968). Auch an der Ostseeküste, wie z. B. in Pillau, wurde frühzeitig mit Messungen begonnen (LANGE, 1960). Oftmals wurden die Beobachtungen jedoch nur unregelmäßig durchgeführt oder richteten sich ausschließlich auf Hochwasserereignisse. Die von Johann Albert Eytelwein ausgearbeitete „Instruction – Wie der Pegel auf den Strömen und Gewässern gesetzt, der Wasserstand beobachtet und die Nachrichten eingezogen und überreicht werden sollen“ vom 13. Februar 1810 ist diesbezüglich ein bedeutender Meilenstein (ECKHOLD, 1965). Sie regte an vielen Stellen den Beginn von Pegelmessungen an und regelte erstmals deren Durchführung. Während die Beobachtungen zunächst meist wirtschaftlichen Interessen dienten, gewannen bald auch wissenschaftliche Aspekte an Bedeutung (HAHN und RIETSCHEL, 1938; LANGE, 1952). In der Geodäsie waren die Bemühungen insbesondere auf die Bestimmung der mittleren Höhe des Meeresspiegels gerichtet, die zur Festlegung des absoluten Niveaus von Höhensystemen benötigt wurde. Dies kommt bereits auf den Konferenzen der Europäischen Gradmessung (später erweitert zur Internationalen Erdmessung) von 1864 und 1867 zum Ausdruck. Ein Ergebnis dieser Konferenzen war u. a. folgender Beschluss:

„Die an das Meer grenzenden Staaten, welche sich an der Europäischen Gradmessung betheiligen, werden dringend ersucht, an möglichst vielen Punkten ihrer Küste, womöglich durch Registrierapparate, die mittlere Höhe des Meeres festzustellen.“ (NAGEL, 1886).

Welches Interesse die Geodäsie weiterhin an Wasserstandsbeobachtungen der Meere hatte, wird im folgenden Zitat von Westphal, einem Potsdamer Geodäten um die Jahrhundertwende, deutlich:

„Die Beobachtung der Wasserstände und das Studium der Mittelwasser an den Meeresküsten bilden eine wichtige Aufgabe der Internationalen Erdmessung. Aus den Mittelwassern läßt sich, in Verbindung mit den Präzisionsnivellements, zunächst erkennen, ob und inwieweit die Meere ein gemeinsames Niveau bilden; dann bietet aber auch das Studium der Wasserstände ein Mittel, das Problem der Gezeiten zu studiren, etwaige Hebungen und Senkungen der Küste zu verfolgen, sowie zu konstatieren, ob und welcher Zusammenhang zwischen der Schwankung der Erdachse und dem Wechsel der Wasserstände besteht.“ (WESTPHAL, 1900).

Die praktische Umsetzung der Beschlüsse der Europäischen Gradmessung zeigt sich besonders gut am Beispiel der vom Geodätischen Institut Potsdam (GIP) – dem damaligen Zentralbüro der Europäischen Gradmessung – betreuten Pegel. Zum Pegelnetz des GIP gehörten die Ostseepegel Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Stolpmünde, Pillau, Memel sowie der Pegel in Bremerhaven. Für diese Pegel übernahm das Geodätische Institut sowohl die Betreuung und Auswertung der Wasserstandsmessungen als auch die regelmäßige Kontrolle der Höhenstabilität der Pegel durch Nivellements zu mehreren lokalen Kontrollfestpunkten. Ein weiterer Verdienst der Mitarbeiter des Geodätischen Instituts besteht in der Verbesserung der Messtechnik. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie die bearbeiteten Wasserstände wurden mehrfach veröffentlicht (u. a. SEIBT, 1885; SEIBT, 1890; WESTPHAL, 1900; KÜHNEN, 1916). Neben diesen Veröffentlichungen existieren noch heute umfangreiche Akten, die ein Stück Pegelgeschichte widerspiegeln. Die Zuständigkeit des Geodätischen Instituts Potsdam für das Pegelnetz endete 1945. Die letzte Veröffentlichung von Wasserstandsmessungen (MONTAG, 1964) umfasst den gesamten Zeitraum, in dem das Geodätische Institut für die Pegelmessungen verantwortlich war.

In der vorliegenden Arbeit wird die Neubearbeitung der Wasserstandsmessungen von Wismar, Warnemünde, Sassnitz und Koserow vorgestellt (Abb. 1). Dabei konnte insbesondere für die Pegel Wismar bzw. Warnemünde auf die umfangreichen Arbeiten des Geodäti-

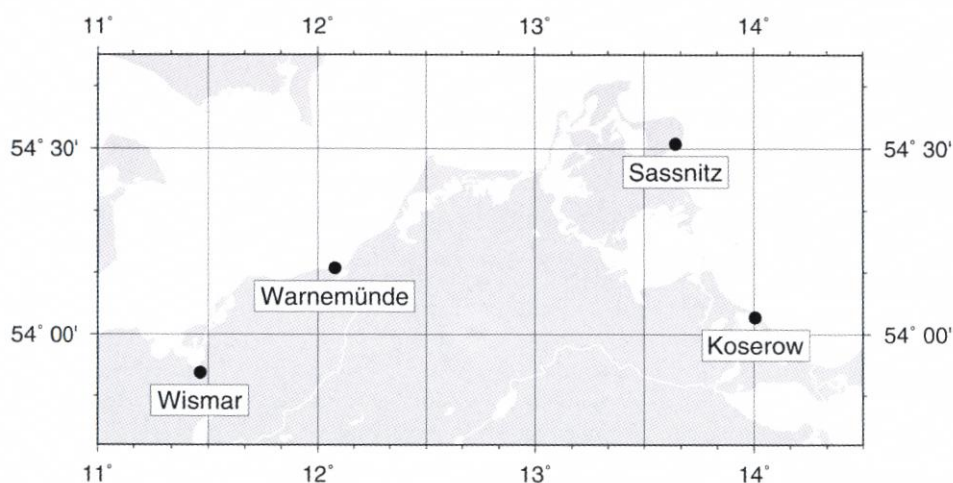


Abb. 1: Lage der Pegelstationen

schen Instituts Potsdam zurückgegriffen werden. Die Betreuung der beiden Pegel durch das GIP begann 1885 bzw. 1883, regelmäßige Wasserstandsmessungen erfolgten aber bereits ab Juli 1848 bzw. April 1855. In der letzten Veröffentlichung von Monatsmittelwerten sind Angaben aus dem Zeitraum von 1882 bis 1944 enthalten (MONTAG, 1964). In unsere Bearbeitung sind diese Werte eingegangen. Darüber hinaus ist es gelungen, bisher verloren geglaubte Monatsmittelwerte von Beginn der Beobachtungen bis 1882 zu finden und homogen an die bisherige Reihe anzupassen. Des Weiteren wurden die Messungen bis 1992 einer einheitlichen Bearbeitung unterzogen. Insgesamt konnten die vorhandenen Reihen von Wismar und Warnemünde um rund 30 Jahre in die Vergangenheit und 48 Jahre in die Gegenwart verlängert werden. Die Pegelreihen von Wismar und Warnemünde haben damit eine Länge von 144 bzw. 137 Jahren.

Die von uns bearbeiteten Wasserstandsreihen von Sassnitz und Koserow beginnen 1961 bzw. 1974. Die Wasserstandsmessungen und Kontrollnivellements dieser Pegel, sowie der Pegel Wismar und Warnemünde im entsprechenden Zeitraum, wurden durch die ehemalige Wasserwirtschaftsdirektion Küste und das Kombinat Geodäsie und Kartographie Schwerin durchgeführt. Eine wissenschaftliche Betreuung erfolgte viele Jahre durch das Zentralinstitut für Physik der Erde (WEISE, 1982, 1983). Die dort durchgeführten Arbeiten sind in unsere Bearbeitung eingeflossen.

Ziel der Arbeiten war es, auf der Grundlage der vorhandenen Informationen Reihen von Monatsmittelwerten zu erarbeiten, die für langzeitstatistische Untersuchungen genutzt werden können. Voraussetzung hierfür sind Pegelreihen:

- die einen im Laufe der Zeit unveränderten Höhenbezug zu einem lokalen Pegelbezugspunkt haben und
- frei von systematischen Fehlern z.B. aufgrund unterschiedlicher Datenaufzeichnungsraten sind.

Diese Voraussetzungen waren für die zur Verfügung stehenden Messungen nicht gegeben. Es mussten deshalb verschiedene Korrekturen für die Pegelmessungen bestimmt werden.

2. Der Höhenbezug der Wasserstandsmessungen

Von besonderer Bedeutung für die Untersuchung langzeitiger Veränderungen in Pegelreihen ist ein im gesamten Beobachtungszeitraum einheitlicher Höhenbezug der Messungen. Der Höhenbezug wird durch die jeweilige Höhe der Pegelnullpunkte definiert. Die praktische Realisierung erfolgt gewöhnlich durch die Festlegung

- von Höhen für einige Höhenfestpunkte in der Nähe der Pegel (Pegelbezugspunkte) und
- von Höhenunterschieden zwischen dem Pegelnullpunkt und den Pegelbezugspunkten.

Im Laufe der Zeit haben sich diese Festlegungen mehrfach verändert. Aufgrund der Größe der Systemunterschiede sind die Auswirkungen verschiedener Höhenbezüge in den Wasserstandsmessungen selbst kaum erkennbar. Das Wissen, wann welches Höhensystem an den Pegeln verwendet wurde, ist deshalb eine wesentliche Voraussetzung zur Reduktion der Wasserstandsmessungen auf ein einheitliches Höhenniveau.

Am Beginn der Pegelbeobachtungen in Wismar und Warnemünde erfolgte eine lokale willkürliche Festlegung des Höhenniveaus der Pegelnullpunkte. Ein die Pegel verbindendes Nivellementsnetz hoher Genauigkeit gab es nicht. Entsprechende Arbeiten wurden wiederum durch die Konferenzen der Europäischen Gradmessung 1864 und 1867 angeregt. In den Beschlüssen dieser Konferenzen heißt es:

„Es ist wünschenswerth, dass in allen an der Europäischen Gradmessung beteiligten Ländern neben den trigonometrischen Höhenbestimmungen geometrische Nivellements erster Ordnung ausgeführt werden, bei welchen die Operationsmethode aus der Mitte auf das Dringlichste zu empfehlen ist. Diese Nivellements werden namentlich für die Verbindung der verschiedenen Meere für unentbehrlich erklärt.“ (NAGEL, 1886).

In Mecklenburg (1869–1873) und Preußen (1868–1894) wurden daraufhin die ersten Landesnivellements mit der Methode des geometrischen Nivellements durchgeführt. Das Nullniveau des Höhensystems von Mecklenburg wurde dabei durch den Pegelnullpunkt von Wismar festgelegt. In Preußen dienten zunächst verschiedene Pegel zur Festlegung des Nullniveaus, u.a. der Pegel von Neufahrwasser. Ab 1879 wurde der Normalhöhenpunkt an der Berliner Sternwarte verwendet, dessen Höhe 37.000 m über dem Nullpunkt des Pegels von Amsterdam betrug (SCHREIBER, 1879). Die Höhen in diesem System wurden als Höhen über Normal Null (später als Höhen über „Normal Null im alten System“, [N.N. „a. S.“]) bezeichnet (SCHREIBER, 1879; BERNDT, 1930). Da die preußischen und mecklenburgischen Landesnivellements an zwei Stellen miteinander verbunden wurden, konnten auch die Höhen Mecklenburgs im N.N. System angegeben werden (PASCHEN, 1882).

In den Jahren 1896 bis 1902 wurden zu wissenschaftlichen Zwecken die Messungen zum Ostseeküstennivellement durchgeführt (Abb. 2). Das Ostseeküstennivellement sollte alle vom Geodätischen Institut Potsdam betreuten Ostseepegel mit dem Normalhöhenpunkt von Berlin verbinden. Die Messungen erfolgten durch die Königlich-Preußische Landesaufnahme. Die bis 1898 fertiggestellten Arbeiten wurden dem Geodätischen Institut Potsdam handschriftlich mitgeteilt und als „Vorläufiges Küstennivellement“ bezeichnet. Da der Höhenanschluss an den Normalhöhenpunkt von Berlin zu diesem Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt war, erfolgte die Festlegung des Höhenbezuges im „Vorläufigen Küstennivellement“ in Anlehnung an „N.N. altes System“. Wie sich später herausstellte, waren die dabei angenommenen Höhen im „Alten System“ falsch (MONTAG, 1967). In den Veröffentlichungen des Geodätischen Instituts Potsdam wurden deshalb alle Höhenangaben um einen konstanten Betrag korrigiert (WESTPHAL, 1900). Das auf diese Weise realisierte Höhensystem wurde als „System Westphal“ bezeichnet. Kenntnis von der Fertigstellung des Ost-

Das Küstennivellement.

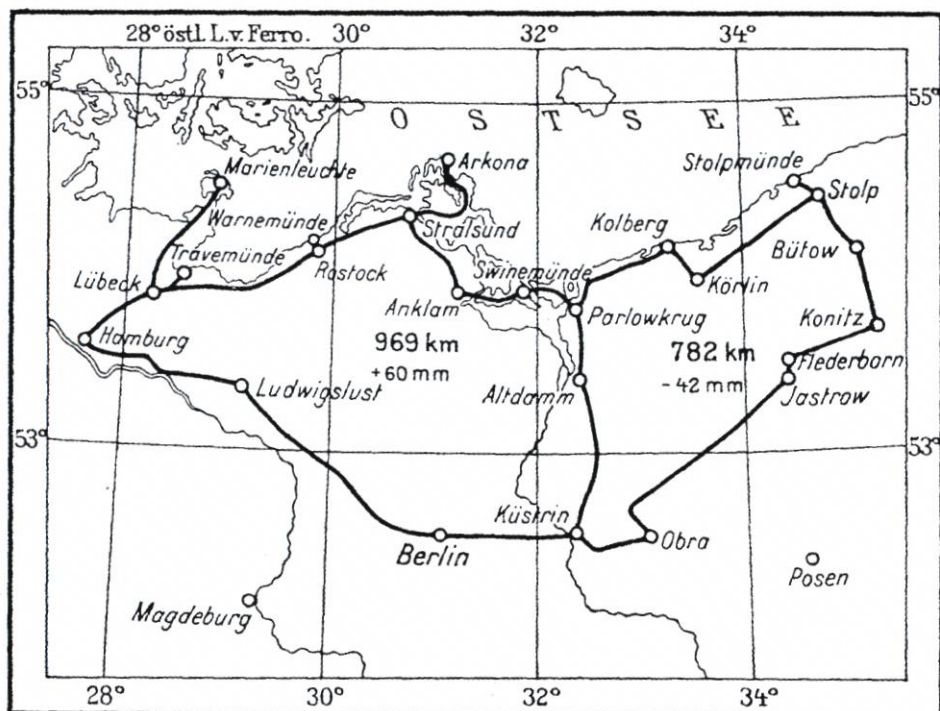


Abb. 2: Die Abb. zeigt einen Überblick über den Linienverlauf des Ostseeküstennivellements. Das Ostseeküstennivellement ist ein Beispiel für die verschiedenen Höhensysteme, die zur Festlegung des Höhenbezuges der Pegel verwendet wurden (aus BERNDT, 1930)

seeküstennivellements erlangte das Geodätische Institut Potsdam erst 1932. Es wurde als System des „Ausgeglichenen Küstennivellements“ bezeichnet und in der Publikation der Monatsmittel von MONTAG (1964) verwendet.

Der zunehmende Verfall des „alten Systems“ und die nunmehr erreichten höheren Genauigkeiten bei den Wiederherstellungsmessungen machten eine systematische Erneuerung des Landesnetzes notwendig (BERNDT, 1930). Im Jahre 1914 wurde mit dieser Arbeit begonnen. Nur der Normalhöhenpunkt, der 1912 nach Hoppegarten verlegt worden war, wurde in seiner Höhe als unverändert angenommen. Die Messungen nahmen jedoch nicht den gewünschten Fortschritt und waren bis zum Ende des zweiten Weltkrieges noch nicht abgeschlossen. Die Höhen in diesem System wurden als Höhen über „Normal Null im neuen System“ (N.N. „n.S.“) bezeichnet. Im Gebiet von Mecklenburg-Vorpommern kam dieses System kaum zur praktischen Anwendung. Die Messungen wurden zum großen Teil erst in den Jahren 1937 bis 1944 durchgeführt. Eine Veröffentlichung der Nivellements erfolgte offensichtlich nur für die Linie von Lübeck nach Wismar (TAL, 1937). Die daraus resultierenden Höhen wurden als „vorläufige Höhen über N.N. im neuen System“ bezeichnet.

Entsprechend der Pegelvorschrift von 1935 wurden die Pegelnullpunkte auf das amtliche Höhensystem umgestellt. Als einheitlicher Höhenbezug galt „N.N. – 5.00 m“. Während die Umstellung am Pegel Wismar auf der Grundlage der „vorläufigen Höhen über

N.N. im neuen System“ erfolgte, wurde am Pegel Warnemünde „N.N. altes System“ verwendet.

In der DDR wurden die vor dem 2. Weltkrieg begonnenen Nivellements nicht fortgeführt. Statt dessen entschied man sich für eine vollständige Neumessung, die in den Jahren 1954 bis 1956 durchgeführt wurde. Die Ausgleichung der Nivellements 1. Ordnung erfolgte 1956 unter Anschluss an das osteuropäische Nivellementsnetz, dessen Ursprung durch den Pegel von Kronstadt festgelegt wurde. Die Pegelnullpunkte wurden nicht auf dieses Höhensystem umgestellt, es wurden jedoch neue Höhen über „N.N. im alten System“ bestimmt. Auch der Pegel Wismar wurde wieder auf N.N. „a.S.“ umgestellt. In den Jahren 1974 bis 1976 erfolgte eine Wiederholungsmessung des Nivellementsnetzes 1. Ordnung. Die Ausgleichung erfolgte zwangsfrei unter Anschluss an die aus der Ausgleichung von 1956 stammende Höhe des Normalhöhenpunktes von Hoppegarten (IHDE, 1991). Dieses Höhensystem wird als „HN76“ bezeichnet. Die Umstellung der Pegelnullpunkte auf der Grundlage von „HN76“ erfolgte am 1. November 1985. Das Pegelnullniveau wurde als „HN76 minus 5,14 m“ definiert (STIGGE, 1989).

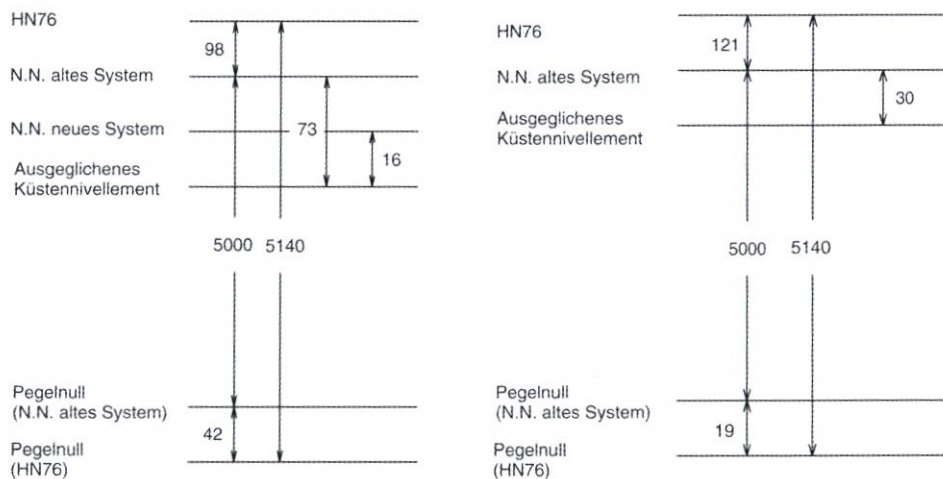


Abb. 3: Höhenbezüge an den Pegeln Wismar (links) und Warnemünde (rechts) in Millimeter

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zur Festlegung des Höhenbezugs der Pegelmessungen von Wismar und Warnemünde verschiedene Höhensysteme verwendet wurden (Abb. 3). Dazu zählen die Realisierungen des N.N.-Systems (N.N. altes System, das Ostseeküstennivellement, N.N. neues System) sowie das Höhensystem HN76, das auch heute noch an den Pegeln Verwendung findet. Die Unterschiede zwischen diesen Systemen sind für jeden Pegel einzeln zu betrachten. Sie betragen zum Teil nur wenige Zentimeter, können aber auch Beträge im dm-Bereich annehmen. Ursachen hierfür können neben den erwähnten Unterschieden in der Festlegung des Nullniveaus der Höhensysteme (Datumspunkt)

- rezente Erdkrustenbewegungen,
- Eigenbewegungen von Festpunkten, z. B. infolge von Gebäudesetzungen,
- Änderungen in der theoretischen Definition der Höhensysteme sowie
- unvermeidliche Messfehler in den Nivellements

sein. Für die Untersuchung langfristiger Veränderungen in den Wasserstandsreihen kann der

Höhenbezug deshalb nur auf der Grundlage eines Höhensystems realisiert werden. In der Neubearbeitung der Pegelreihen wurde als Höhenbezug das Nullniveau des Höhensystems „HN76“ gewählt. Die Realisierung dieser Festlegung erfolgte durch Festpunkte, die sich im Abstand weniger Kilometer vom Pegel befindet. Die dazu verwendeten Punkte sowie die Höhen dieser Festpunkte im Höhensystem HN76 sind in Tab. 1 enthalten.

Messungen, denen ein anderer Höhenbezug zugrunde lag, wurden entsprechend korrigiert. Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Höhenkorrekturen in Wismar und Warnemünde ist in LIEBSCH (1997) enthalten.

Tab. 1: Realisierung des Höhenbezuges für die Pegelreihen

Pegel	Bezugspunkt	Höhe in HN76 [m]
Wismar	3 083 24 141 1	27.226
Warnemünde	4 061 13 105 0	0.109
Sassnitz	4 052 13 132 1	38.768
Koserow	4 065 33 119 1	6.665

3. Kontrollnivellements an den Pegeln

Weitere wichtige Voraussetzungen für die Untersuchung und Interpretation säkularer Veränderungen in den Pegelreihen sind die zeitliche Stabilität und Zuverlässigkeit des Höhenbezuges. Hierfür sind regelmäßige Kontrollen der festgelegten Höhenunterschiede zwischen den Pegelnullpunkten und den Pegelbezugspunkten notwendig. Treten größere Abweichungen der Pegel von der Sollage auf, werden entsprechende Korrekturen in der Regel bereits bei der Auswertung der Pegelaufzeichnungen berücksichtigt.

Derartige Kontrollnivellements standen auch für die hier bearbeiteten Pegel zur Verfügung. Insbesondere für die Pegel Wismar und Warnemünde sind jedoch einige Besonderheiten zu beachten. So war die Häufigkeit, mit der die Pegelkontrollen durchgeführt wurden, im Laufe der Zeit recht unterschiedlich. Nicht im gesamten Beobachtungsintervall konnten dieselben Bezugspunkte verwendet werden. Die Vermarkung der Pegelbezugspunkte wurde außerdem über viele Jahre durch Mauerbolzen an Gebäuden realisiert. Da diese nicht a priori als unveränderlich angenommen werden konnten, wurden zur Beurteilung der Zuverlässigkeit der Pegelbezugspunkte Nivellements zu weiteren Höhenfestpunkten genutzt. Alle dafür verwendeten Festpunkte liegen im Umkreis weniger Kilometer der Pegel.

Bis 1882 wurden Pegelkontrollnivellements sowohl in Wismar als auch in Warnemünde nur vereinzelt durchgeführt. Festgelegte Pegelbezugspunkte gab es in dieser Zeit noch nicht. Messungen, die oftmals im Zusammenhang mit den Landesnivellements standen, erfolgten in den Jahren 1854, 1861, 1869, 1876, 1878 und 1882 (PASCHEN, 1882).

Erst mit der Übernahme der Pegel durch das Geodätische Institut Potsdam wurden diese Arbeiten intensiviert. Die Nivellements erfolgten nun in der Regel in jährlichen Abständen. In den Jahren während des zweiten Weltkrieges sowie in den Nachkriegsjahren konnten die Kontrollnivellements nicht bzw. nur sehr unregelmäßig durchgeführt werden. Bedingt durch den gleichzeitigen Ausfall der Mareographen und die Verwendung von Messungen mehrerer Ersatzpegel stellt sich die Höhenkontrolle in diesem Zeitraum als sehr schwierig dar.

Im Jahr 1965 wurden unterirdische Festpunktgruppen von je 3 Festpunkten in der Nähe

der Pegel errichtet. Während bis dahin ausschließlich Mauerbolzen an Gebäuden zur Pegelkontrolle verwendet wurden, bestand nun die Möglichkeit, diese bezüglich der sicher gegründeten Festpunktgruppen zu kontrollieren. Die dazu notwendigen Nivellements wurden anfänglich jedes Jahr und nach 1980 im Abstand von 2 Jahren durch das Kombinat Geodäsie und Kartographie Schwerin durchgeführt. Die eigentliche Pegelkontrolle erfolgte jährlich durch die für die Wasserstandsmessungen zuständige Wasserwirtschaftsdirektion Küste.

Auf der Grundlage dieser Nivellements wurden die Abb. 4a bis d erstellt. Sie zeigen Höhenänderungen verschiedener Festpunkte bezogen auf die in der Neubearbeitung der Pegelreihen verwendeten Bezugspunkte der Pegel. Die Pegelbezugspunkte selbst werden als konstant angenommen. Jedes Diagramm in Abb. 4a bis d zeigt die zeitlichen Änderungen eines Festpunktes. Die einzelnen Messungen werden durch Kreise symbolisiert. Zeiträume, in denen Festpunkte als Pegelbezugspunkte verwendet wurden, sind durch dickere Linien und größere Kreise markiert. Sie zeigen in diesen Zeiten folglich keine Höhenänderungen. Insgesamt geben die Abbildungen einen interessanten Einblick in die Höhenstabilität in der Umgebung der Pegel.

In Abb. 4a zeigen sich einige Probleme für die in Wismar bis 1965 verwendeten Pegelbezugspunkte 1 und 2. Beide Punkte befinden sich am Baumhaus, das unmittelbar neben dem Pegel liegt. Der Punkt 1 zeigt gegenüber Punkt 2 Setzungen von 18 mm in 75 Jahren (0,24 mm/Jahr). Gegenüber der unterirdischen Festpunktgruppe (Punkte 3, 13 und 14) ist die Setzung offensichtlich noch größer. Sie beträgt 0,62 mm/Jahr.

Auch die Stabilität des Punktes 2 selbst ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die Punkte 4 und 5 (Mauerbolzen in der Nikolaikirche) heben sich zwischen 1890 und 1941 scheinbar in Bezug auf Punkt 2. Bis 1965 bleibt der Höhenunterschied für Punkt 5 konstant. Gegenüber der unterirdischen Festpunktgruppe (Punkte 3, 13 und 14) zeigt die Kirche (Punkt 5) hingegen Setzungserscheinungen. Insgesamt muss deshalb festgestellt werden, dass Setzungen der Pegelbezugspunkte bis 1965 nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Dies hätte zur Folge, dass der relative säkulare Meeresspiegelanstieg in Wismar auf der Grundlage von Analysen der Pegelreihe etwas zu hoch bestimmt wird.

Auffällige Setzungserscheinungen gegenüber der unterirdischen Festpunktgruppe (3, 13 und 14) zeigen auch andere Festpunkte (6, 8, 10, 11). Die Gruppe in sich ist stabil. Seit 1965 kann der verwendete Höhenbezug der Pegelmessungen als zuverlässig eingeschätzt werden.

In Warnemünde ist die Situation etwas einfacher (Abb. 4b). Ebenso wie in Wismar wurden insgesamt 3 verschiedene Pegelbezugspunkte verwendet (Punkte 1, 2 und 3). Die Festpunkte 1 und 2 dienten bis 1965 als Pegelbezugspunkte und befinden sich an der Vogtei. Der Punkt 3 gehört wie die Punkte 13 und 14 zu der unterirdischen Festpunktgruppe. Gegenüber diesen 3 Punkten ergeben sich für die anderen Festpunkte in Warnemünde Setzungen bzw. keine Höhenänderungen.

Einen sehr auffälligen Setzungsverlauf weist beispielsweise die Kirche in Warnemünde auf (Punkte 4 und 5). Die Kirche wurde zwischen 1866 und 1871 erbaut (BARNEWITZ, 1992). Die Setzungen betragen anfangs 1,3 mm/Jahr und klingen später ab. Nach 1900 ändert sich der Höhenunterschied zwischen der Kirche und den Pegelbezugspunkten kaum noch. Setzungen dieser Art sind für Neubauten nicht ungewöhnlich. Für die Kirche von Warnemünde wurden sie erstmals bei WESTPHAL (1900) erwähnt.

Besonders große Setzungen sind auch für den Leuchtturm in Warnemünde (Punkt 6) zu verzeichnen. Er wurde 1898 erbaut. Ähnlich wie bei der Kirche ist der Betrag der Setzungen zunächst sehr groß. Nach 1910 klingen die Setzungen ab. Sie halten aber bis in die Gegenwart an und betrugen in den letzten 20 Jahren etwa 0,3 mm/Jahr. Insgesamt hat sich der Leuchtturm von Warnemünde seit seiner Erbauung um etwa 5 cm gesetzt.

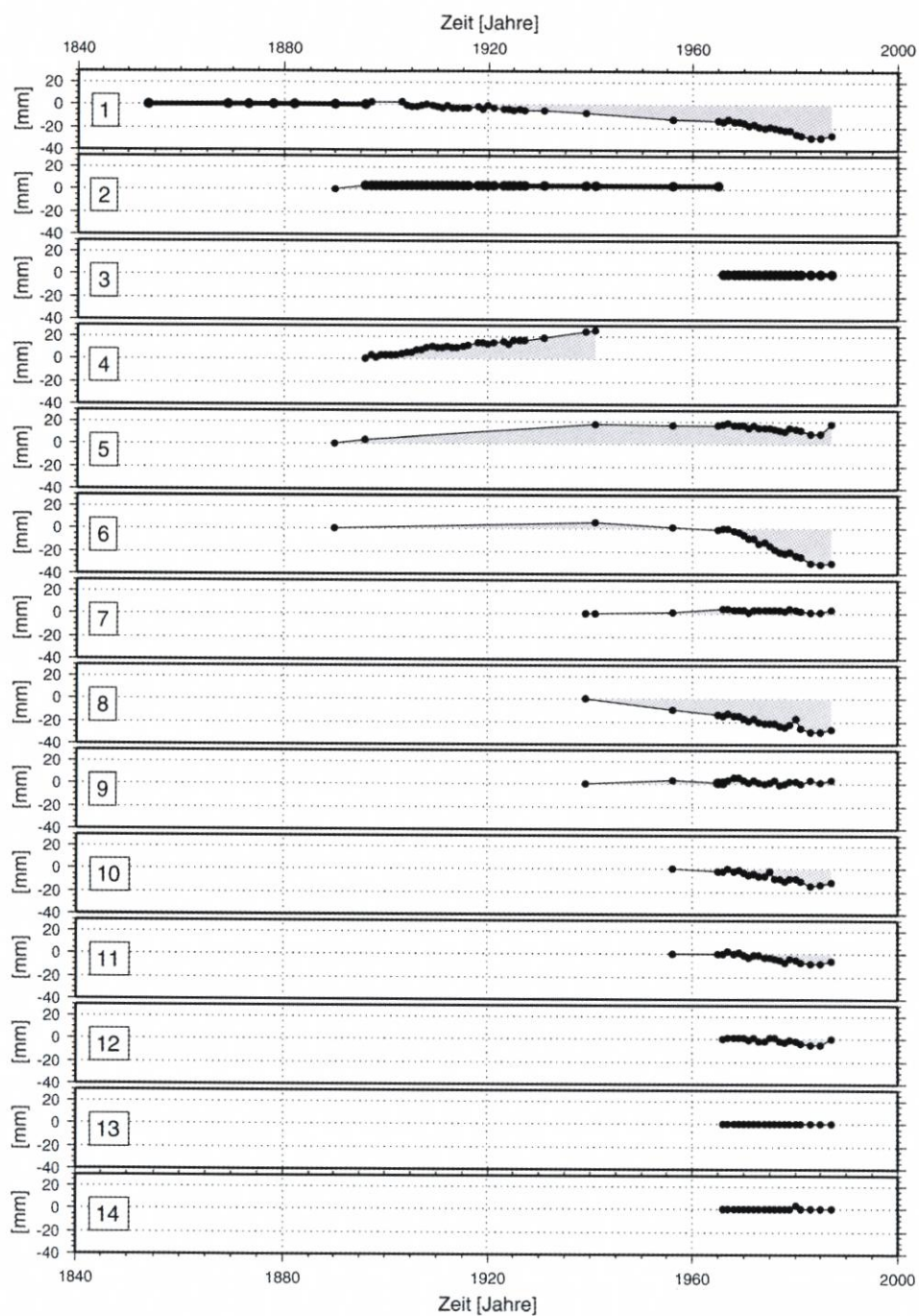


Abb. 4a: Lokale Kontrollnivelements von Wismar

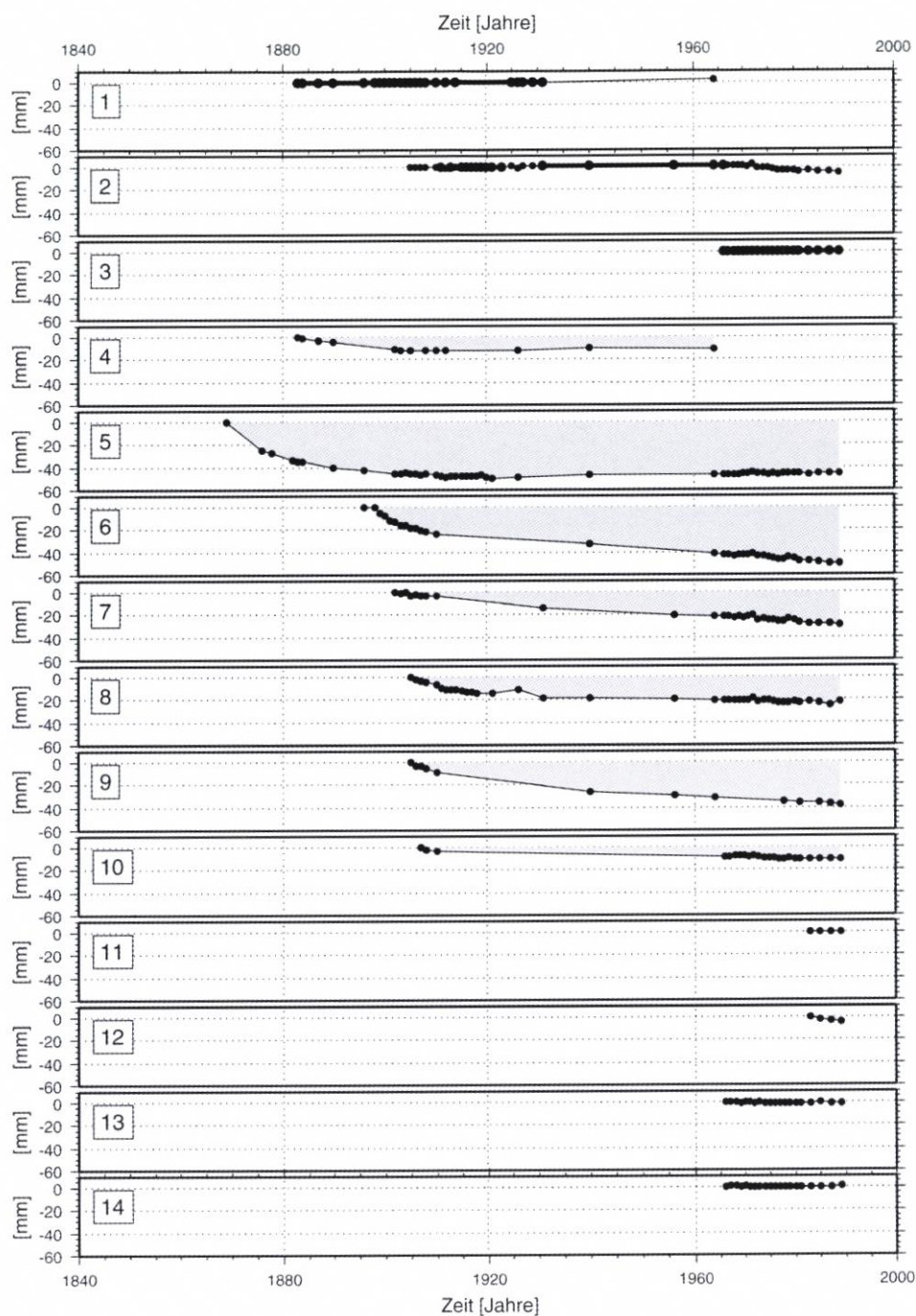


Abb. 4b: Lokale Kontrollnivelemente von Warnemünde

Für die regelmäßigen Pegelkontrollen in Warnemünde wurden in den letzten Jahren die Punkte 2, 8, 9, 11 und 12 verwendet. Während die Punkte 8 (MB 4061132080) und 11 (MB 4061133010) als stabil eingeschätzt werden können, weisen die Punkte 2 (MB 4061132090), 9 (MB 4061122200) und 12 (MB 4061133020) gegenüber der unterirdischen Festpunktgruppe Setzungen auf. Sie betragen für die Punkte 2 und 9 etwa 0.3 mm/Jahr. Aus den wenigen Messungen, die für Punkt 12 (MB 4061133020) vorliegen, ergeben sich deutliche Setzungen von 0.8 mm/Jahr.

Zusammenfassend kann damit festgestellt werden, dass für mehrere Festpunkte in Warnemünde Setzungen nachweisbar sind. Hiervon sind wahrscheinlich auch die Bezugspunkte des Pegels betroffen. Dies führt ebenso wie in Wismar zu einer Überschätzung des relativen säkularen Meeresspiegelanstiegs.

Insgesamt unterstreichen die erwähnten Beispiele die Bedeutung einer zuverlässigen Vermarkung der Pegelbezugspunkte und der regelmäßigen Durchführung von Pegelkontrollnivelements. Die hohe Genauigkeit der durchgeführten Nivellements zeigt sich dabei in der geringen Streuung der Messungen von Jahr zu Jahr. Eigenbewegungen der in Wismar und Warnemünde für die Erarbeitung der Langzeitreihen verwendeten Höhenbezugspunkte können zwar bis 1965 nicht vollständig ausgeschlossen werden, ihr Einfluss auf einen aus den Pegelreihen geschätzten Langzeittrend wird aber einen Betrag von 0.1 mm/Jahr ... 0.2 mm/Jahr vermutlich nicht übersteigen. In Sassnitz ergeben sich für alle im Hafen gelegenen Punkte (7 bis 13) gegenüber den unterirdischen Festpunktgruppen (1 bis 4) Senkungen von etwa 10 mm (Abb. 4c). Die in Koserow verwendeten Festpunkte können als stabil angesehen werden (Abb. 4d).

4. Einfluss der Gezeiten

Ein Einfluss, der zu systematischen Fehlern in den Pegelreihen führt und deshalb insbesondere bei Langzeitreihen zu beachten ist, wird durch unterschiedliche Aufzeichnungsraten der Pegelmessungen hervorgerufen. Die Aufzeichnungsraten der Pegel werden hauptsächlich von der verwendeten Messtechnik bestimmt. In Wismar und Warnemünde haben sich diesbezüglich einige Veränderungen vollzogen.

In der ersten Veröffentlichung über die Pegel wurden die Messungen in Wismar folgendermaßen beschrieben:

„In einiger Entfernung von der Bollwerksbekleidung, dem Baumhause gegenüber, ist ein starker Pfahl eingerammt, an welchem die Pegellatte befestigt wird. Der Pfahl steht mit dem hölzernen Hafenbollwerke durch eine Holzzimmerung in Verbindung, die zum Schutze des Pegelpfahles wasserwärts über denselben hinausreicht und hier an einem zweiten Pfahl angeschraubt ist. Zur Ablesung des Pegels ist eine kleine Laufbrücke vom Bollwerk bis zum Pfahl hergestellt. Die regelmäßigen Ablesungen erfolgen 12 Uhr Mittags seit Juli 1848.

Die hölzerne Pegellatte, geteilt in rheinländische Fusse und Zolle und 7 Fuss lang, ist doppelt vorhanden und wird, wenn eine neue Bemalung nothwendig ist, gewechselt. Die Befestigung an den Pfahl geschieht durch einen Schraubenbolzen, und es ist daher eine Aenderung ihrer Höhenlage, abgesehen von Höhenänderungen des Pfahles, nicht unmöglich.“ (PASCHEN, 1882).

Zum Pegel in Warnemünde heißt es weiter:

„Der offizielle Pegel besteht aus einem starken Pfahle, eingerammt etwa 120 Schritt von der Vogtei entfernt nahe dem linken Ufer der Warnow, welches steil abfällt und mit grossen Bruchsteinen gepflastert ist. Der Pfahl steht frei im Wasser und ist mit dem Ufer nicht ver-

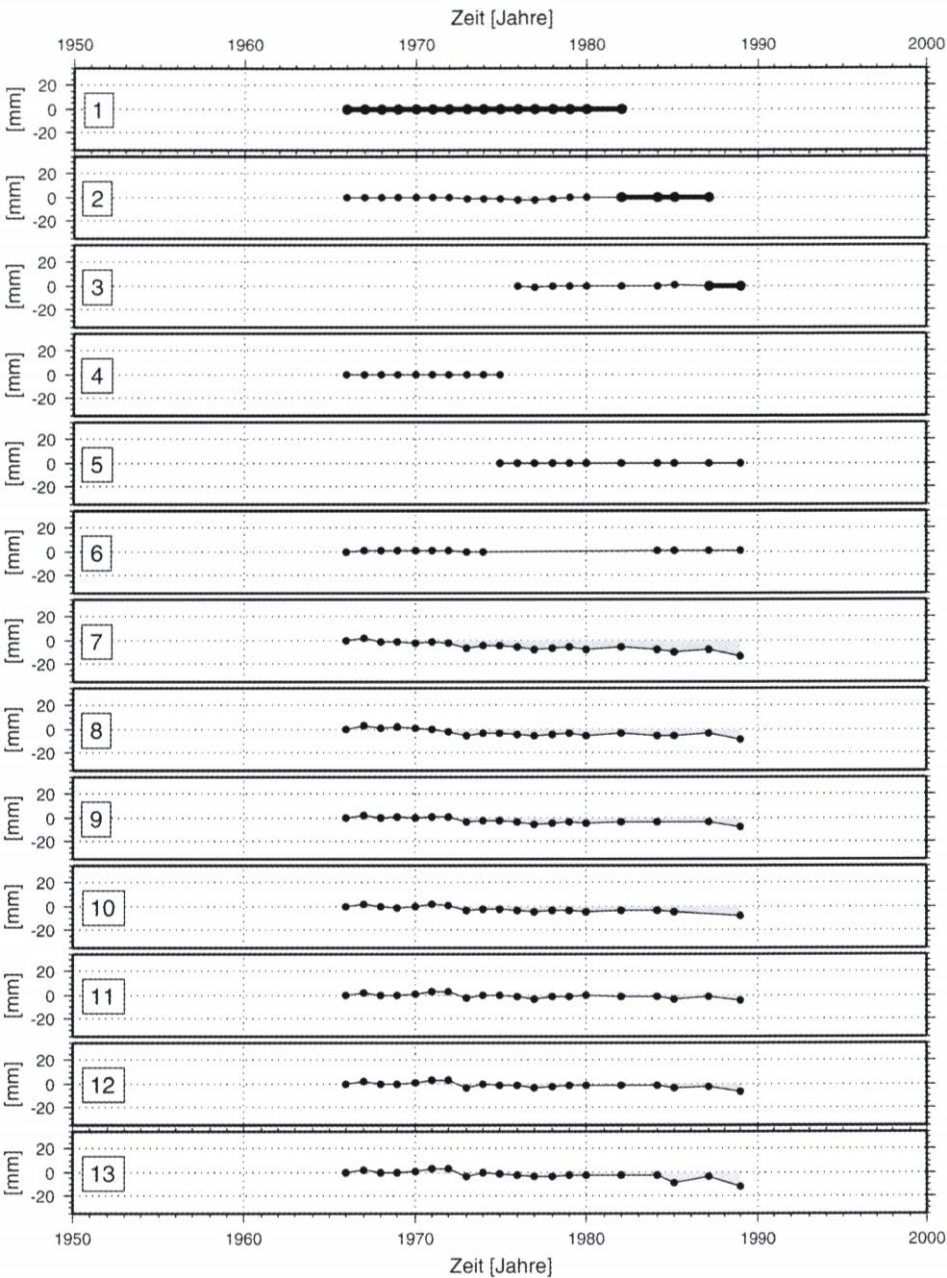


Abb. 4c: Lokale Kontrollnivellements von Sassnitz

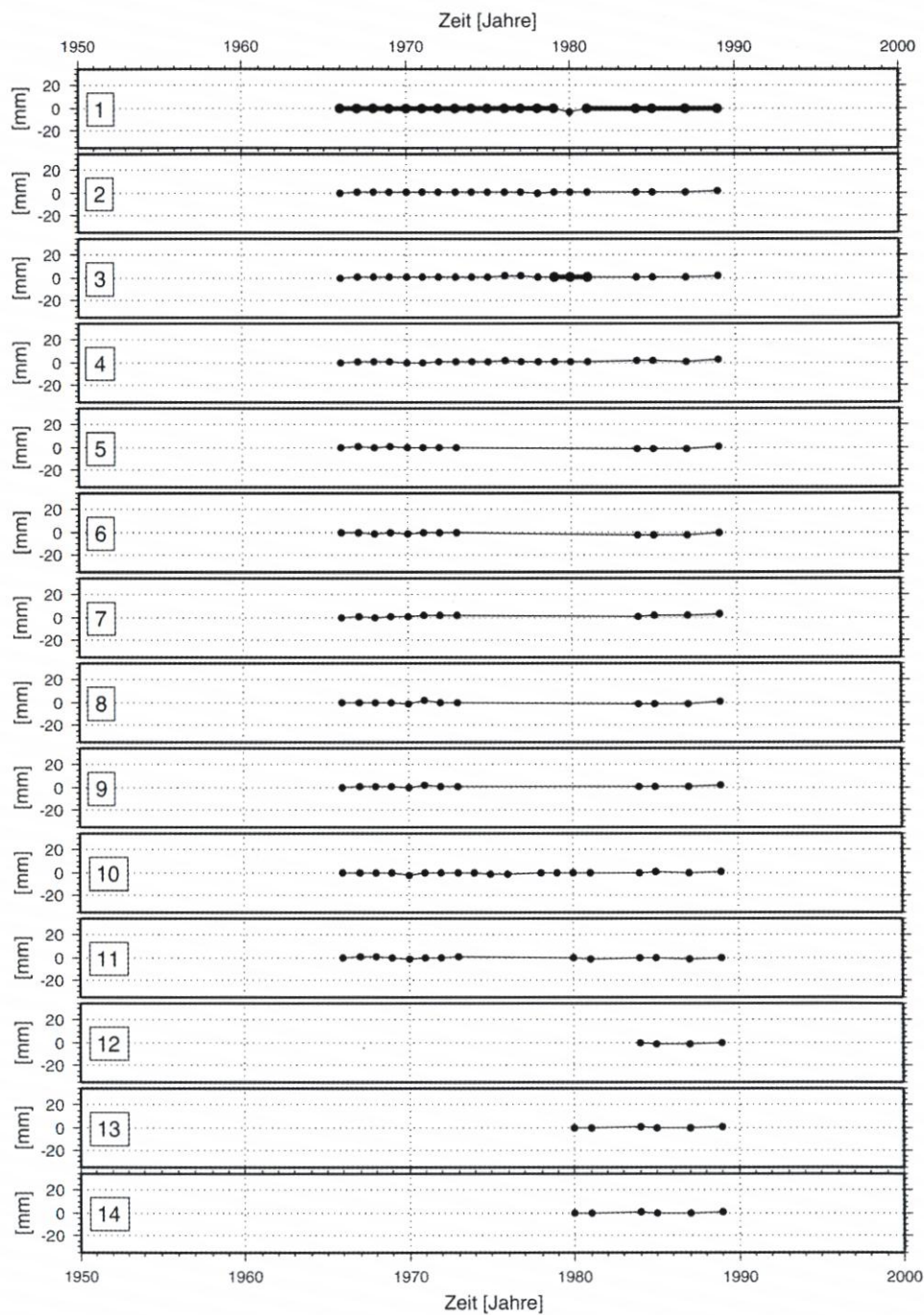


Abb. 4d: Lokale Kontrollnivelements von Koserow

ankert; in seiner Nähe befindet sich eine Landungsbrücke, von welcher aus zwei Laufriegel ausgehen, die ihn frei umgeben, zu seinem Schutze dienen und das Ablesen der Wasserstände ermöglichen. Eine Pegellatte ist nicht vorhanden; die Eintheilung in rheinländische Fusse und Zolle ist durch in die eine Pfahlseite in Zwischenräumen von je einem Zolle eingelassene und verschraubte Messingplatten von der Breite eines Zolles bewirkt. Die regelmässigen Beobachtungen erfolgen seit 1855, Mittags 12 Uhr.“ (PASCHEN, 1882).

In den beiden Zitaten kommt die einfache Bauweise der ersten Lattenpegel sehr deutlich zum Ausdruck. Der Austausch dieser Latten gegen besser ablesbare und robustere Pegellatten war deshalb eines der ersten Anliegen des Geodätischen Instituts Potsdam nach der Übernahme der Betreuung der Pegel. SEIBT, in dieser Zeit Mitarbeiter am Geodätischen Institut Potsdam, konstruierte eine neue Pegellatte. Sie bestand aus verzinktem Guss- und Schmied-

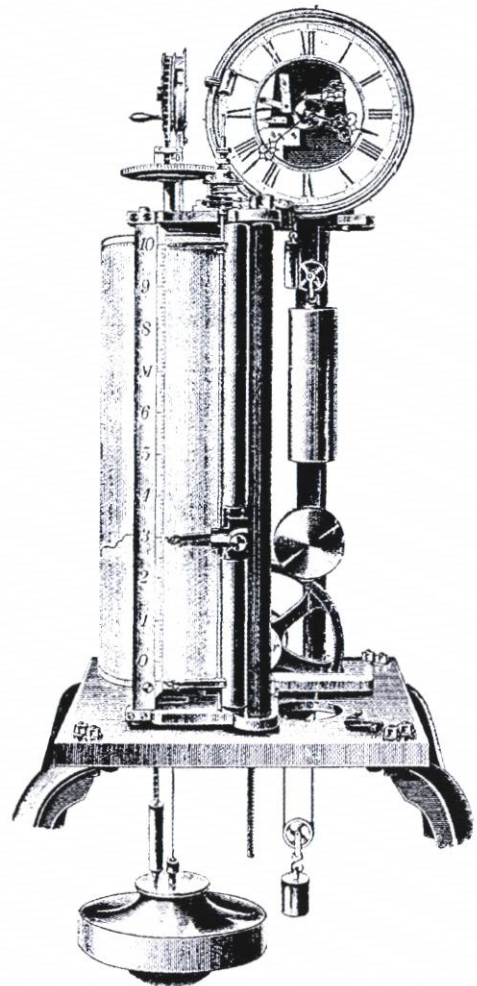
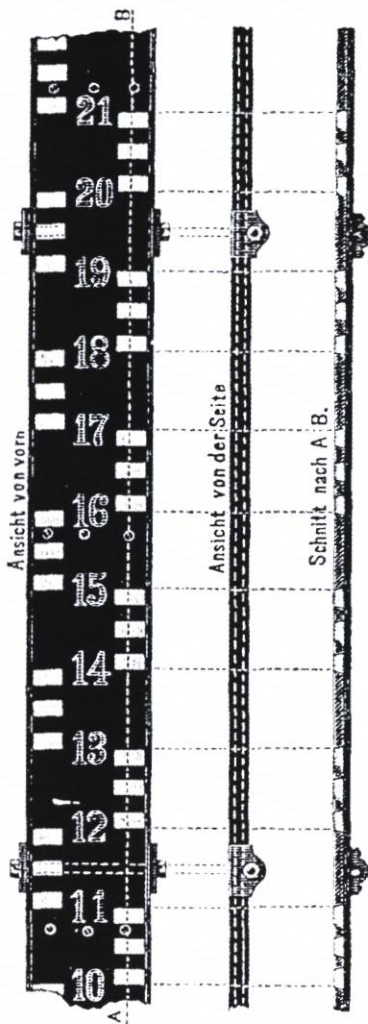


Abb. 5a: links: Pegellatte von Seibt (SEIBT, 1888),
rechts: Mareograph vom Typ Seibt und Fuess (WESTPHAL, 1894)

deisen, als Teilung waren Porzellanmarken in metrischem Abstand eingelassen (SEIBT, 1888, Abb. 5a, links). Diese neue Pegellatte wurde in Wismar am 21. August 1885 erstmals verwendet, in Warnemünde war dies bereits ein Jahr früher, am 23. April 1884, erfolgt (WESTPHAL, 1900). Eine weitere Verbesserung der Pegelmesstechnik wurde im Jahr 1894 erreicht. Seibt hatte zusammen mit dem Berliner Feinmechaniker Fuess mechanische Registrierpegel konstruiert (WESTPHAL, 1894). Diese „selbstregistrierenden Schreibpegel“ wurden im Juni 1894 sowohl in Wismar als auch in Warnemünde aufgestellt. In Abb. 5a (rechts) ist dieser Mareographentyp dargestellt, Abb. 5b zeigt eine dazugehörige Registrierkurve. Die Mareographen arbeiteten bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges sehr zuverlässig. Durch Kriegseinwirkungen wurden vermutlich beide zerstört. Im Jahr 1952 wurden neue Mareographen aufgestellt. Die Zwischenzeit wurde durch Ablesungen an Lattenpegeln überbrückt.

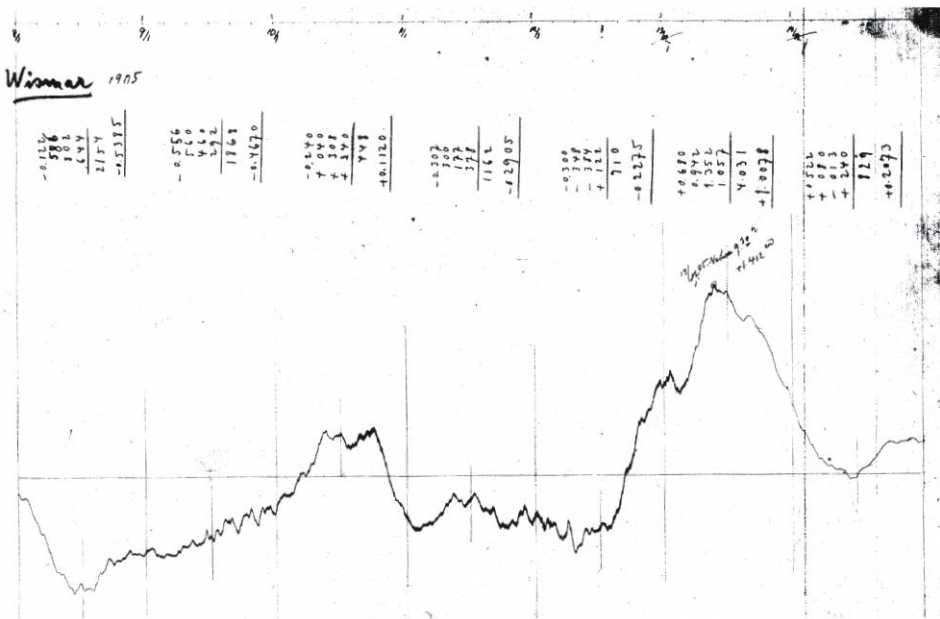


Abb. 5b: Aufzeichnung des Mareographen in Wismar während einer Sturmflut (8.–15. Januar 1905)

Den Beobachtungsinstrumenten entsprechend ist die Anzahl der zur Berechnung der Monatsmittelwerte verwendeten Messungen sehr unterschiedlich. Die Ablesungen an den Lattenpegeln erfolgten zwischen ein- und viermal pro Tag, wobei die Ablesungen naturgemäß nur am Tag durchgeführt wurden. Zur Auswertung der Mareographenregistrierungen wurden unterschiedliche Verfahren getestet. In den ersten Jahren erfolgte eine Berechnung aus Tagesmittelwerten, die durch Integration der Registrierkurve mit einem Planimeter bestimmt worden waren. Im Vergleich dazu wurden Monatsmittelwerte aus 4 äquidistanten Messungen pro Tag gebildet. Es zeigte sich, dass letztgenanntes Verfahren bei entsprechender Genauigkeit mit geringerem Aufwand durchgeführt werden konnte. Zur Ableitung von Gezeitenparametern wurden in den Jahren 1898 und 1899 an allen Pegeln des Geodätischen Instituts Potsdam stündliche Wasserstände ermittelt (KÜHNEN, 1916). Eine durchgehende Erfassung von stündlichen Wasserständen war mit den damals zur Verfügung stehenden Mit-

teln nicht mit vertretbarem Aufwand möglich und zur Bestimmung des Mittelwassers nicht notwendig. Stündliche Werte zur Bildung der Monatsmittelwerte werden in unserer Bearbeitung erst seit 1980 verwendet. Eine Übersicht über die in die Monatsmittel von Wismar und Warnemünde eingegangenen Beobachtungen ist in Tab. 2 enthalten.

Tab. 2: Anzahl der zur Bildung der Monatsmittelwerte von Wismar und Warnemünde benutzten Beobachtungen

Zeit	Wismar	Warnemünde
bis Dezember 1858	einmal täglich 12 Uhr	
bis Dezember 1869		einmal täglich 12 Uhr
bis Juni 1894	4-mal täglich (8, 12, 16 und 20 Uhr)	2-mal täglich (12, 18.15 Uhr)
bis Oktober 1894		Tagesmittelwerte aus den Aufzeichnungen des Mareographen
bis September 1895		3-mal täglich (6, 12 und 18 Uhr)
bis Dezember 1944	4 äquidistante Messwerte aus den Aufzeichnungen des Mareographen (0, 6, 12, 18 Uhr)	4 äquidistante Messwerte aus den Aufzeichnungen des Mareographen (0, 6, 12, 18 Uhr)
bis Dezember 1945		keine Messungen (Ergänzung aus Wismar)
bis Dezember 1947		einmal täglich 12 Uhr
bis März 1950	einmal täglich 12 Uhr	
bis Januar 1952		3-mal täglich (8, 12, 18 Uhr)
bis April 1952	3-mal täglich (8, 12, 18 Uhr)	
bis Juni 1955	Aufzeichnungen des Mareographen	
bis März 1956	einmal täglich 7 Uhr	
bis Dezember 1979	4 äquidistante Messwerte aus den Aufzeichnungen des Mareographen (1, 7, 13, 19 Uhr)	4 äquidistante Messwerte aus den Aufzeichnungen des Mareographen (1, 7, 13, 19 Uhr)
bis Oktober 1992	stündliche Werte aus den Registrierkurven des Mareographen	stündliche Werte aus den Registrierkurven des Mareographen

In Sassnitz und Koserow waren im gesamten Bearbeitungszeitraum Mareographen in Betrieb. Wie in Wismar und Warnemünde wurden die Monatsmittelwerte bis 1980 aus 4 äquidistanten Messungen pro Tag und danach aus stündlichen Werten gebildet.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Aufzeichnungsraten sind in Abb. 6 am Beispiel von Beobachtungen des Pegels Warnemünde zwischen 1986 und 1992 dargestellt. Im linken Bild werden Monatsmittelwerte gezeigt, die zum einen aus einem Wert pro Tag, dem 12-Uhr-

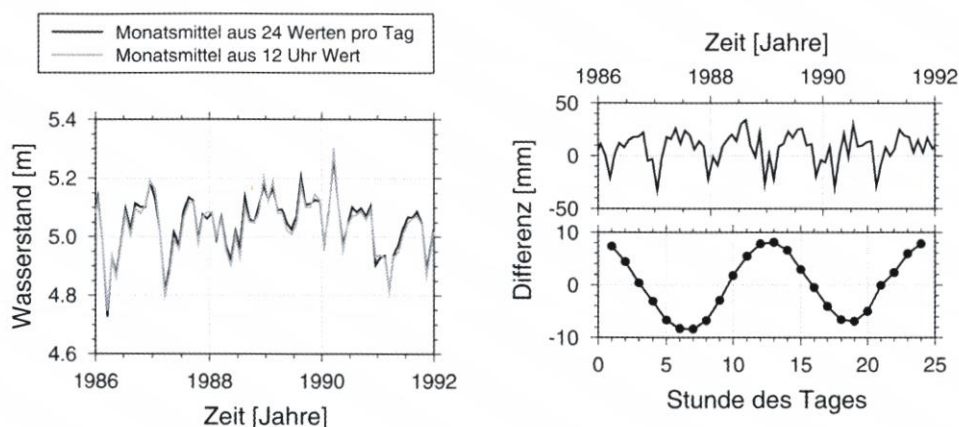


Abb. 6: Vergleich von Monatsmittelwerten aus stündlichen und 12-Uhr-Werten

Wert (graue Linie), und zum anderen aus stündlichen Werten (schwarze Linie) berechnet wurden. Im Vergleich zur Gesamtvariation von etwa 40 cm, die u. a. auch jahreszeitlich bedingte Wasserstandsschwankungen enthält, zeigen beide Kurven eine gute Übereinstimmung. Trägt man jedoch die Differenz der Kurven auf (rechtes oberes Bild), so werden systematisch variierende Unterschiede deutlich. Diese Variationen haben offensichtlich eine Periode von einem Jahr und eine Amplitude von 1–2 cm. Der Mittelwert der dargestellten Differenzen beträgt 8 mm und weicht damit deutlich von Null ab. Entsprechende Mittelwerte von Differenzreihen können auch für Monatsmittelwerte berechnet werden, die aus den Messungen einer jeweils anderen Stunde des Tages ermittelt wurden. Trägt man die Ergebnisse über der entsprechenden Stunde auf, so ist eine doppelte sinusförmige Schwingung erkennbar (Bild rechts unten).

Die Ursache für die in Abb. 6 gezeigten systematischen Auswirkungen unterschiedlicher Aufzeichnungsraten liegt in den Meeresgezeiten. Die Amplituden der größten Partialtiden in Wismar und Warnemünde sind in Tab. 3 enthalten. Um den Einfluss der halbtägigen Gezeiten erfassen zu können, sind laut Abtasttheorem mindestens 4 äquidistante Beobachtungen pro Tag notwendig (TAUBENHEIM, 1969). Monatsmittel, die aus weniger oder nicht äquidistanten Beobachtungen berechnet wurden, werden durch die Gezeiten systematisch beeinflusst. Dabei werden bestimmte tiefere Frequenzen (Aliasfrequenzen) von den

Tab. 3: Amplituden ausgewählter Partialtiden von Wismar und Warnemünde (berechnet aus stündlichen Werten von 1978 bis 1989).

Tide	Periode [h]	Wismar [mm]	Warnemünde [mm]	G (f)
S_2	12.00	10.1	8.4	1.00
M_2	12.42	50.5	42.4	0.05
N_2	12.66	11.5	9.0	-0.07
K_1	23.93	14.3	14.0	0.99
O_1	25.82	17.2	16.2	0.08

gezeitenbedingten Signalanteilen überlagert. Dieser als Aliasing-Effekt bezeichnete Sachverhalt wird am Beispiel der S_2 -Tide besonders deutlich. Die Periode der S_2 -Tide beträgt genau 12 Stunden. Zu einer bestimmten Tageszeit hat sie daher jeweils dieselbe Auslenkung. Pegelablesungen zu dieser Tageszeit werden deshalb stets in derselben Art und Weise beeinflusst. Die S_2 -Tide wirkt sich somit wie ein konstanter Höhenfehler in den Monatsmittelwerten aus und ist für die Verschiebung der Mittelwerte in Abb. 6 (rechts oben) verantwortlich. Der Einfluss anderer Partialtiden auf Monatsmittelwerte aus täglichen Beobachtungen kann anhand der in Tab. 3 angegebenen Durchlasscharakteristik $G(f)$ abgeschätzt werden. Die Durchlasscharakteristik gibt in Abhängigkeit von der Frequenz an, ob durch die Mittelbildung eine Dämpfung (Werte kleiner 1) oder auch Verstärkung (Werte größer 1, die hier jedoch nicht vorkommen) der ursprünglichen, gezeitenbedingten Signalanteile eintritt. Werte kleiner Null bedeuten eine zusätzliche Phasenumkehr (Sprung um 180°) im Vergleich zum ursprünglichen Signal.

Obwohl die halbtägige Mondtide M_2 mit etwa 5 cm die größte Tide ist, wird sie durch die Mittelbildung auf 5% gedämpft. Im Monatsmittel beträgt ihr Einfluss deshalb nur noch etwa 2 mm. Die K_1 -Tide ist ebenso wie die S_2 -Tide fast ungedämpft. Die Aliasfrequenz der K_1 -Tide (Frequenz 1.002738/Tag) beträgt 0.002738/Tag. Dies entspricht einer Periode von einem Jahr. Die K_1 -Tide ist damit für die Jahreswelle in Abb. 6 (rechts oben) verantwortlich.

Aufgrund der gezeigten systematischen Einflüsse müssen Gezeitenkorrekturen für alle Monatsmittelwerte berechnet werden, denen nicht mindestens 4 äquidistante Beobachtungen pro Tag zugrunde liegen. Dies trifft auf alle Zeiträume zu, in denen Beobachtungen an Lattenpegeln erfolgten. Auch die von uns erstmals bearbeiteten Monatsmittelwerte sind davon betroffen.

Die Notwendigkeit von Gezeitenkorrekturen wurde bereits in der Publikation von WESTPHAL (1900) betont. Allerdings wurden Korrektionswerte damals auf rein empirischem Weg abgeleitet und hatten nach eigenen Abschätzungen noch keine ausreichende Genauigkeit. In unserer Bearbeitung erfolgte die Berechnung der Gezeitenkorrekturen auf einem anderen Weg. Aus den uns zur Verfügung stehenden stündlichen Beobachtungen aus den Jahren zwischen 1979 und 1989 wurden Amplitude und Phasenlage von 68 Partialtiden berechnet. Diese Partialtiden wurden dazu benutzt, die Gezeiten für die Zeiträume der Lattenpegelablesungen zu präzisieren. Aus den präzisierten Gezeiten konnte daraufhin der mittlere Einfluss der Gezeiten zu einer bestimmten Uhrzeit (z. B. 12 Uhr) für jeden Monat berechnet werden. Die ermittelten Gezeitenkorrekturen hatten Beträge von bis zu 35 mm. Die vollständige Angabe der verwendeten Korrekturen von Wismar und Warnemünde erfolgte in LIEBSCH (1997).

5. Säkularer Anstieg des Mittelwassers

Durch die beschriebenen Korrekturen und Reduktionen der Monatsmittelwerte wurden systematische Fehlereinflüsse in den Pegelreihen bestmöglich eliminiert und die gesamte Zeitreihe auf der Grundlage lokaler Bezugspunkte in das Höhensystem HN76 überführt. Die eingangs gestellten Forderungen nach homogenen Zeitreihen mit einem im gesamten Datenintervall einheitlichen Höhenbezug konnte damit weitestgehend erfüllt werden.

Eine einfache Möglichkeit zur Einschätzung der Qualität der Pegelreihen ist durch die Bildung von Differenzen benachbarter Pegel gegeben. Da die Meeresspiegelvariationen über

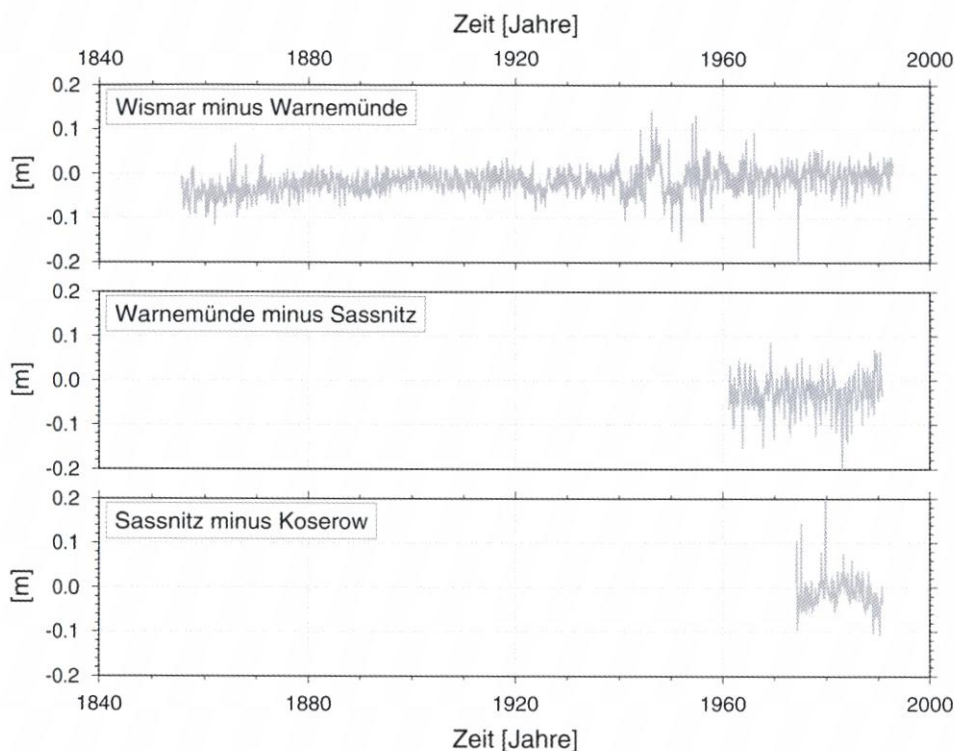


Abb. 7: Differenz zwischen den Reihen von Monatsmittelwerten benachbarter Stationen

diese Entfernungen sehr hohe Korrelationen aufweisen, können sie durch die Differenzbildung zum großen Teil eliminiert werden. Eventuelle Unsicherheiten in der Höhenstabilität der Pegelkontrollpunkte bleiben jedoch erhalten und sind in den Differenzreihen leichter erkennbar. In Abb. 7 sind diese Reihen dargestellt.

Für die Differenzreihe von Wismar und Warnemünde ergibt sich insgesamt eine sehr geringe Standardabweichung von rund 3 cm. Nur wenige Monate weisen Differenzen der Mittelwerte von mehr als 10 cm auf. Eine mögliche Ursache hierfür ist der Ausfall eines der beiden Pegel in dem betreffenden Monat. Da detaillierte Angaben über Pegelausfälle nicht vorlagen, war eine abschließende Klärung jedoch nicht möglich.

In den Anfangsjahren der Beobachtungen bis etwa 1900 zeigt sich in der Differenzreihe von Wismar und Warnemünde ein etwas größerer Trend als im übrigen Zeitintervall. Dieser Sachverhalt ist vermutlich auf die erwähnte Unsicherheit der Höhenstabilität der Pegelbezugspunkte zurückzuführen und ist nicht in tatsächlichen Veränderungen des mittleren Meeresspiegels zwischen Wismar und Warnemünde begründet.

Einige Probleme im Höhenbezug der Messungen könnten auch zwischen 1940 und 1960 bestehen. Welcher Pegel für die auffälligen Unterschiede dieses Zeitraums verantwortlich ist, kann anhand der Pegelreihen selbst nicht beantwortet werden. Eine Möglichkeit zur Beantwortung dieser Frage ist durch den Vergleich mit weiteren Pegelreihen, z. B. dem Pegel Travemünde (JENSEN u. TÖPPE, 1986), gegeben. Diesbezügliche Untersuchungen führten jedoch zu keinen eindeutigen Ergebnissen. Vielmehr konnten auch zeitliche Veränderungen des Meeresspiegels als Ursache nicht ausgeschlossen werden (LIEBSCH, 1997).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Streuung der älteren Messungen nicht größer ist als die der neueren Messungen. Dies kann als Anzeichen für die hohe Qualität gewertet werden, mit der bereits vor 100 Jahren Pegelmessungen durchgeführt wurden.

Im Ergebnis der Arbeiten stehen Zeitreihen zur Verfügung, die zur Analyse säkularer Veränderungen geeignet sind. In Abb. 8 sind die Reihen aller 4 Pegel graphisch dargestellt.

Säkulare Veränderungen in den Zeitreihen sind deutlich erkennbar und werden hier durch einen linearen Trend approximiert. Die berechneten Anstiege und deren mittlere Fehler sind in Tab. 4 zusammengestellt. Darüber hinaus sind in Tab. 4 auch die mittleren Wasserstände der Pegel zum Zeitpunkt 1976.0 über dem Nullniveau des Höhensystems HN76 sowie deren mittlere Fehler enthalten. Diese Wasserstände können damit auch als Abweichung des mittleren Meeresspiegels von einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes interpretiert werden.

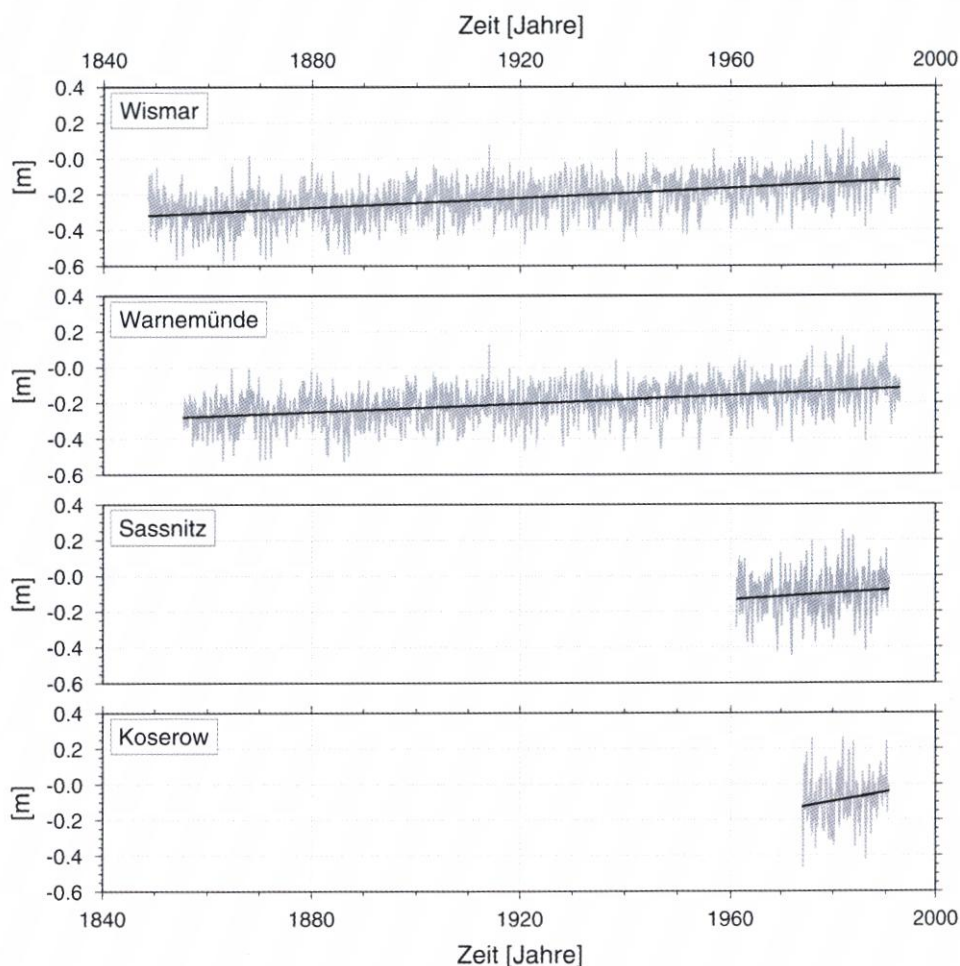


Abb. 8: Wasserstandsreihen der Monatsmittelwerte von Wismar, Warnemünde, Sassnitz und Koserow im Höhensystem HN76

Tab. 4: Linearer Trend und mittlerer Wasserstand im Höhensystem HN76 zum Zeitpunkt 1976.0

Station	Linearer Trend		Wasserstand 1976.0	
	Linearer Trend [mm/Jahr]	Mittlerer Fehler [mm/Jahr]	Wasserstand [m]	Mittlerer Fehler [m]
Wismar	1.37	0.05	-0.144	0.004
Warnemünde	1.18	0.05	-0.137	0.004
Sassnitz	1.77	0.71	-0.105	0.006
Koserow	5.19	1.83	-0.118	0.015

Für alle 4 Pegel ist ein Anstieg des Mittelwassers gegenüber den verwendeten Pegelbezugspunkten zu verzeichnen. Der Unterschied im Anstieg der Reihen von Wismar und Warnemünde ist auf der Grundlage der berechneten Fehlermaße signifikant. Betrachtet man jedoch die in Abschnitt 3 getroffene Abschätzung der Unsicherheit der Pegelbezugspunkte von Wismar und Warnemünde, fällt diese Aussage nicht mehr so deutlich aus.

In Sassnitz und Koserow besteht demgegenüber aufgrund der Vielzahl von Kontrollnivelements im gesamten Beobachtungszeitraum und der zuverlässigen Vermarkung der Pegelbezugspunkte eine geringere Unsicherheit in der Höhenstabilität der Pegelbezugspunkte. Die kurzen Datenreihen (32 bzw. 19 Jahre) führen hier aber zu höheren Fehlern in der Trendberechnung. Selbst innerhalb der Fehlerschranken hat der angegebene Trend für Koserow wenig Aussagekraft und kann beispielsweise nicht zur Extrapolation des mittleren Meeresspiegelniveaus verwendet werden.

Dieser Sachverhalt soll in Abb. 9 verdeutlicht werden. Dargestellt sind Trendwerte für die Pegel Wismar und Warnemünde, die aus Teilintervallen von 20, 30 bzw. 40 Jahren berechnet wurden. Die Teilintervalle wurden über den gesamten zur Verfügung stehenden Zeitbereich um jeweils einen Monat verschoben. In der Abbildung sind die berechneten Trends jeweils dem Mittelpunkt des Zeitfensters zugeordnet worden. Für alle 3 Intervallbreiten sind offensichtlich im gesamten Beobachtungszeitraum Variationen der berechneten Trendwerte vorhanden. Die aus den Reihen von Wismar und Warnemünde berechneten Trends zeigen dabei eine sehr große Ähnlichkeit.

In den 20 Jahre langen Teilintervallen (vergleichbar mit der Länge der Reihe des Pegels Koserow) schwanken die geschätzten Trends zwischen -2 mm/Jahr und 4 mm/Jahr. Die aus dem Gesamtintervall von rund 140 Jahren geschätzten linearen Trends von Wismar und Warnemünde werden damit deutlich über- als auch unterschritten. Höhere Werte von 4 mm/Jahr werden dabei u. a. in den letzten 20 Jahren erhalten, traten aber auch in früheren Zeitintervallen von 20 Jahren (z. B. 1885–1905, 1930–1950) auf. Der gegenüber Wismar und Warnemünde um das 4-fache höhere Trend von Koserow ist also vor allem auf das kurze Datenintervall zurückzuführen.

Für die 10 Jahre längeren Teilintervalle (vergleichbar mit dem Pegel Sassnitz) sind die Variationen der berechneten Trends mit 3 mm/Jahr noch etwa halb so groß. Selbst für die 40 Jahre langen Teilintervalle ergeben sich aber noch Schwankungen in den Trends von mehr als 1 mm/Jahr. Filtertheoretische Betrachtungen und spektrale Untersuchungen ergaben, dass die Ursache der gezeigten Trendschwankungen in langfristigen Meeresspiegeländerungen mit einer Zeitspanne von 25–30 Jahren und einer Größenordnung von 15 mm gesehen werden kann (LIEBSCH, 1997).

Im letzten Abschnitt wurde deutlich, dass die in Tab. 4 angegebenen Trendwerte nicht unmittelbar miteinander verglichen werden können. Unterschiede säkularer Niveauver-

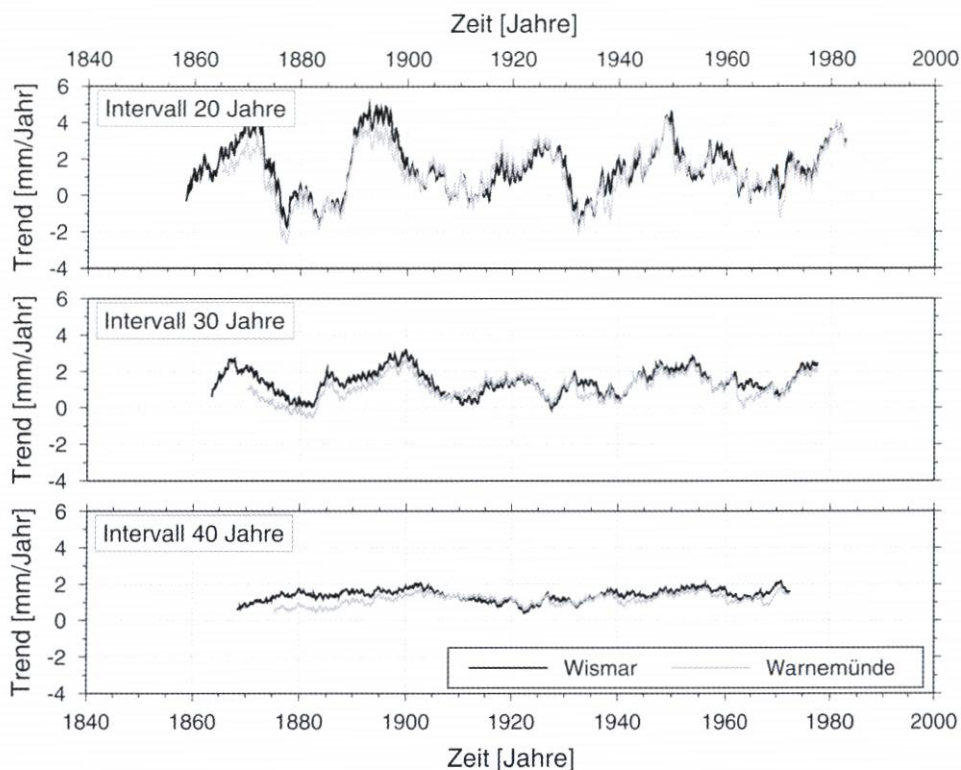


Abb. 9: Linearer Trend aus Monatsmittelwerten der Pegel Wismar und Warnemünde in gleitenden Teilintervallen von 20, 30 und 40 Jahren

schiebungen entlang der Küste von Mecklenburg-Vorpommern können nur aus den Messungen gleicher Zeiträume getroffen werden. Die linearen Trends wurden deshalb noch einmal für die Beobachtungszeiträume der Pegel Sassnitz und Koserow berechnet und in Tab. 5a zusammengestellt. Der Unterschied im linearen Trend zweier Pegelreihen kann natürlich auch direkt aus der Differenz der Monatsmittelwerte geschätzt werden (Tab. 5b). Aufgrund der Korrelation der Wasserstände ergeben sich für die Trenddifferenzen wesentlich geringere Fehlermaße. Die höheren Korrelationen benachbarter Pegel kommen in den in Tab. 5b angegebenen Fehlermaßen sehr gut zum Ausdruck.

Tab. 5a: Vergleich des linearen Trends berechnet aus Monatsmittelwerten desselben Zeitintervalls

Station	1961–1991		1974–1991	
	Linearer Trend [mm/Jahr]	Mittlerer Fehler [mm/Jahr]	Linearer Trend [mm/Jahr]	Mittlerer Fehler [mm/Jahr]
Wismar	2.39	0.55	5.36	1.33
Warnemünde	2.09	0.59	5.43	1.44
Sassnitz	1.77	0.71	4.67	1.73
Koserow	-	-	5.19	1.83

Tab. 5b: Unterschiede im linearen Trend zweier Pegel berechnet aus den Differenzen der Monatsmittelwerte

Station	Sassnitz		Koserow	
	Trenddifferenz [mm/Jahr]	Mittlerer Fehler [mm/Jahr]	Trenddifferenz [mm/Jahr]	Mittlerer Fehler [mm/Jahr]
Wismar	0.61	0.35	0.10	0.94
Warnemünde	0.31	0.25	0.21	0.69
Sassnitz	–	–	–0.57	0.56

Anhand der Tab. 5a und 5b kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass keine signifikanten Unterschiede im Trend der Pegelreihen von Wismar, Warnemünde und Koserow bestehen. Für die Pegelreihe von Sassnitz ergibt sich demgegenüber ein etwas geringerer Trend. Die Fehlermaße sind aber selbst für die Differenzreihen noch sehr groß. Aussagen über mögliche Trendunterschiede haben eine entsprechende Unsicherheit und bedürfen weiterer Untersuchungen.

6. Ausblick

Aufgrund der Größe der relativen säkularen Meeresspiegeländerungen in Mecklenburg-Vorpommern von etwa 1 mm/Jahr werden an Langzeitbeobachtungen von Meeresspiegelveränderungen hohe Anforderungen gestellt werden. Insbesondere systematische Fehlereinflüsse in den Pegelreihen müssen weitgehend vermieden werden. Die Bedeutung eines zuverlässigen Höhenbezuges sowie der Beurteilung der Stabilität der Pegelbezugspunkte für die Interpretation der Ergebnisse ist in diesem Zusammenhang deutlich geworden. Regelmäßige geodätische Höhenkontrollen, die bisher mit der Methode des geometrischen Nivellements durchgeführt wurden, sind zur Kontrolle der Pegelbezugspunkte aus diesem Grund unverzichtbar.

In den letzten Jahren haben satellitengeodätische Messverfahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Mit Hilfe des Global Positioning System (GPS) können Höhen in einem einheitlichen geozentrischen Bezugssystem bestimmt werden. Durch die in den letzten Jahren erreichten Fortschritte der GPS-Technologie ist es möglich geworden, Punktbewegungen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Regelmäßige bzw. kontinuierliche GPS-Messungen werden zukünftig die Trennung rezenter Erdkrustenbewegung und säkularer Meeresspiegeländerungen voneinander ermöglichen. Für Aufgaben der Pegelkontrolle ist die GPS-Technologie damit dem bisher benutzten Verfahren des geometrischen Nivellements hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, aber auch der Genauigkeit, ebenbürtig bzw. überlegen.

Ein Beispiel für GPS-Aktivitäten an Ostseepegeln sind die im Rahmen der Special Sub-commission 8.1. „Studies of the Baltic Sea“ der Internationalen Vereinigung für Geodäsie (IAG) durchgeführten Arbeiten. Insgesamt wurden 3 GPS-Kampagnen organisiert (1990, 1993 und 1997), in denen Messungen an etwa 40 Pegeln in allen Ostseeanrainerstaaten erfolgten. In Mecklenburg-Vorpommern wurden in diesen Kampagnen die Pegel Warnemünde und Sassnitz besetzt. In Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern wurden darüber hinaus in der 2. Kampagne Beobachtungen an den Pegeln Wismar und Koserow durchgeführt. Auswertung und Ergebnisse dieser GPS-Messungen sind u. a. in LIEBSCH u. DIETRICH (1994 und 1995), LIEBSCH et al. (1999) und LIEBSCH (1997) beschrieben.

Die Bedeutung von GPS-Messungen zur Kontrolle von Pegelbezugspunkten kommt auch in der Resolution Nr. 1 der Internationalen Vereinigung für Geodäsie, die auf der XXI. Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) verabschiedet wurde, zum Ausdruck. Darin heißt es:

„Die Internationale Vereinigung für Geodäsie

- stellt fest, daß Pegelmessungen im wesentlichen Relativmessungen darstellen,
- billigt den Vorschlag, sie in ein geodätisches Referenzsystem einzubeziehen, um damit Vorgänge auf Land und auf See voneinander zu trennen, insbesondere solche niederer Frequenz (z. B. Einflüsse durch Klimaänderungen),
- empfiehlt, innerhalb dieses Systems Höhenbestimmungen mit Subzentimetergenauigkeit durchzuführen, und
- ersucht die in Frage kommenden Institutionen, diese Anforderungen unmittelbar vor Ort über permanente GPS-Beobachtungen oder über entsprechende Verbindungsmessungen vergleichbarer Genauigkeit zu erfüllen.“

(Resolution Nr. 1 der Internationalen Vereinigung für Geodäsie, Boulder/Colorado 1995 [ZfV 4/1996, S. 178])

7. Zusammenfassung

Die Erfassung und Überwachung von Meeresspiegeländerungen sowohl als Indikator für globale Klimaänderungen als auch zur Planung von Küstenschutzmaßnahmen ist heute von aktueller Bedeutung. Für diese Aufgaben werden möglichst lange, homogene Pegelreihen benötigt, die im gesamten Datenintervall einen einheitlichen, durch lokale Festpunkte definierten Höhenbezug haben. Im vorliegenden Beitrag wurde die Erarbeitung entsprechender Reihen für die Pegel Wismar, Warnemünde, Sassnitz und Koserow in Mecklenburg-Vorpommern beschrieben.

Für unsere Arbeiten konnten wir auf umfangreiche Akten und Veröffentlichungen verschiedener Institutionen zurückgreifen. Den dort enthaltenen Monatsmittelwerten lagen verschiedene Pegelnullpunktshöhen sowie unterschiedliche Datenaufzeichnungsraten zugrunde. Zur Nutzung der Daten für die Untersuchung säkularer Veränderungen mussten deshalb Höhen- und Gezeitenkorrekturen bestimmt werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten bestand in der Beurteilung der zeitlichen Stabilität und Zuverlässigkeit der verwendeten Pegelbezugspunkte. Die zunehmende Bedeutung von GPS-Messungen für die Belange der Pegelkontrolle wird hervorgehoben.

Als Höhenbezug für die Neubearbeitung der Pegelreihen wurde das auf der Grundlage lokaler Festpunkte bestimmte Nullniveau des Höhensystems HN76 gewählt. Eine Umstellung der Pegelreihen auf das gesamtdeutsche Höhensystem DHHN92 wird durch eine einfache Reduktion der Datenreihen möglich sein. Die notwendigen Reduktionsgrößen sind dabei für jeden Pegel einzeln zu bestimmen und ergeben sich aus dem Höhenunterschied der jeweiligen Pegelbezugspunkte in beiden Höhensystemen.

Säkulare Veränderungen des Meeresspiegels in Bezug auf die verwendeten Pegelbezugspunkte sind in den erarbeiteten Reihen aller 4 Pegel deutlich erkennbar. Für die Pegelreihen von Wismar und Warnemünde wurde ein linearer Trend von 1.4 mm/Jahr bzw. 1.2 mm/Jahr bestimmt. Für die Pegel Sassnitz und Koserow ergeben sich demgegenüber deutlich höhere Werte. Die Ursache hierfür liegt in dem Einfluss von langfristigen Meeresspiegelschwankungen mit einer Zeitspanne von 25–30 Jahren auf die wesentlich kürzeren Zeitreihen dieser Pegel. Am Beispiel der Pegelreihen von Wismar und Warnemünde konnte gezeigt werden,

dass derartige Meeresspiegelschwankungen in der Vergangenheit mehrfach auftraten. Sie bewirken eine gegenüber dem Langzeittrend um ein Vielfaches höhere Schätzung des linearen Trends aus Daten der letzten 20–30 Jahre.

Die Trendberechnungen von Sassnitz und Koserow haben daher noch eine große Unsicherheit und können insbesondere nicht zur Extrapolation des mittleren Meeresniveaus über längere Zeiträume verwendet werden.

8. Dank

Die vorliegende Arbeit wurde durch das Staatliche Amt für Umwelt und Natur des Landes Mecklenburg-Vorpommern gefördert. Den Vertretern dieser Behörde, Herrn Dr. Weiss und Herrn Dr. Gurwell, sei für die Zusammenarbeit und Unterstützung besonders gedankt.

9. Schriftenverzeichnis

- BARNEWITZ, F.: Geschichte des Hafenortes Warnemünde. Konrad Reich Verlag, Rostock, 1992.
- BERNDT: Ergebnisse der Feineinwägungen, Vorheft. Im Auftrag der Trigonometrischen Abteilung der Landesaufnahme, Berlin, 1930.
- ECKHOLD, M.: Johann Albert Eitelwein (1746–1848). Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 9, 1 S. 1–7, 1965.
- HAHN, A. u. RIETSCHEL, E.: Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee – VI. Baltische Hydrologische Konferenz, Berlin, 1938.
- IHDE, J.: Geodätische Bezugssysteme. – Vermessungstechnik 39 (1991)1 S. 13–15 und 39 (1991) 2 S. 57–63, 1991.
- JENSEN, J. u. TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 30 (1986) 4, S. 99–107, 1986.
- KÜHNEN, F.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau und Memel und das Mittelwasser der Nordsee bei Bremerhaven in den Jahren 1898–1910. – Berlin, 1916. (Veröffentlichung des Königl. Preussischen Geodätischen Institutes, Neue Folge No. 80)
- LANGE, O.: Entwicklung des Pegelwesens. – Gedenkschrift der Bundesanstalt für Gewässerkunde zur 50-jährigen Wiederkehr der Gründung der Preussischen Landesanstalt für Gewässerkunde. Bielefeld, 1952. S. 10–28 (Besondere Mitteilung zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 4)
- LANGE, O.: 150 Jahre deutsches Pegelwesen. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 1, 4 S. 1–3, 1960.
- LIEBSCH, G. u. DIETRICH, R.: Final results of the First Baltic Sea Level campaign – In: Kakkuri, J. (Hrsg.), Final results of the Baltic Sea Level 1990 GPS campaign, Reports of the Finnish Geodetic Institute, Helsinki, 4, 2, S. 31–40, 1994.
- LIEBSCH, G. u. DIETRICH, R.: Analysis strategy and final results of the Second GPS Baltic Sea Level Campaign – In: Kakkuri, J. (Hrsg.), Final results of the Baltic Sea Level 1993 GPS campaign, Reports of the Finnish Geodetic Institute, Helsinki, 95, 2, S. 39–56, 1995.
- LIEBSCH, G.: Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, H. 485, 108 S., München, 1997.
- LIEBSCH, G.; DIETRICH, R. u. HALBEFASS, S.: Determination of heights and height changes in the Baltic Sea region using the Baltic Sea Level GPS Campaigns 1993 and 1997 – In: Poutanen, M. and Kakkuri, J. (Hrsg.), Final results of the Baltic Sea Level 1997 GPS campaign, Reports of the Finnish Geodetic Institute, Kirkkonummi, 4, S. 159–175, 1999.
- MONTAG, H.: Die Wasserstände an den ehemaligen Pegelstationen des Geodätischen Instituts Potsdam bis 1944. – Potsdam, 1964. (Arbeiten aus dem Geodätischen Institut Potsdam Nr. 5)

- MONTAG, H.: Bestimmung rezenter Niveauverschiebungen aus langjährigen Wasserstandsverschiebungen der südlichen Ostsee. – Potsdam, 1967. (Arbeiten aus dem Geodätischen Institut Potsdam Nr. 15)
- NAGEL, A.: Astronomisch-Geodätische Arbeiten für die Europäische Gradmessung im Königreich Sachsen, IV. Abtheilung, Das Landesnivellement. – Druck und Verlag von P. Stan-kiewicz, Berlin, 1886.
- PASCHEN, F.: Grossherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung. – IV. Theil, Die Geometrischen Nivellements, Schwerin, 1882.
- ROHDE, H.: Regelmäßige Pegelbeobachtungen in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts – ein Beitrag zur Geschichte der Gewässerkunde. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 12, 1, S. 15–19, 1968.
- SCHREIBER: Der Normal-Höhenpunkt für das Koenigreich Preussen an der Koeniglichen Sternwarte zu Berlin. – Berlin, 1879.
- SEIBT, W.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde. – Berlin, 1885. (Publikation des Königl. Preussischen Geodätischen Institutes)
- SEIBT, W.: Gradmessungs-Nivellement zwischen Anklam und Cuxhaven. – Berlin, 1888. (Publikation des Königl. Preussischen Geodätischen Institutes)
- SEIBT, W.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. – Berlin, 1890. (Publikation des Königl. Preussischen Geodätischen Institutes)
- STIGGE, H.-J.: Nullpunktkorrektur für alle DDR-Küstenpegel (Mitteilung der Wasserwirtschafts-direktion Küste). – Beitr. Meeresd., Berlin 60, S. 53–59, 1989.
- TAL: Ergebnisse der Feineinwägungen, Heft IVb (Land Mecklenburg). – Berlin, 1937, Trigonometrische Abteilung des Reichsamtes für Landesaufnahme
- TAUBENHEIM, J.: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. – Leipzig, 1969, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.
- WEISE, H.: Bezugsniveau rezenter Krustenbewegungen. – Interner Forschungsbericht des Zentralinstituts für Physik der Erde, Potsdam, 1882.
- WEISE, H.: Untersuchungen zum Problem des Bezugshorizontes zwecks Ableitung von Niveauverschiebungen zwischen Land und Meer. – Interner Forschungsbericht des Zentralinstituts für Physik der Erde, Potsdam, 1983.
- WESTPHAL, A.: Der kurvenzeichnende Kontrollpegel, System Seibt-Fuess. – Zeitschrift für Instrumentenkunde 16, 2, S. 41–45, 1894.
- WESTPHAL, A.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde in den Jahren 1882/1897 – Berlin, 1900. (Veröffentlichung des Königl. Preussischen Geodätischen Institutes, Neue Folge No. 2).