

Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht*

Von JÜRGEN JENSEN, HANS-ECKHART MÜGGE und WOLFGANG SCHÖNFELD

Zusammenfassung

Die Entwicklung des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht wurde mit mathematisch-statistischen Methoden anhand von Scheitelwasserständen (Thw, Tnw) und deren Eintrittszeiten analysiert. Hintergrund dieser Untersuchungen ist ein vermuteter weltweiter Meeresspiegelanstieg, der insbesondere an flachen Küsten und Tideästuaren zu tiefgreifenden morphologischen Veränderungen führen kann. Im Gegensatz zu ähnlichen Untersuchungen, die bisher überwiegend auf der Basis von Mittelwerten (z.B. die Jahresmittelwerte MThw, MTnw und MThb) durchgeführt wurden, wird in den vorliegenden Untersuchungen von Einzelwerten ausgegangen, d. h. allen Tidehoch- und Tideniedrigwasserständen einschließlich der Eintrittszeiten. Damit sind nicht nur Aussagen zur Entwicklung der Tidewasserstände bzw. des Tidehubs (Thb), sondern auch zur Entwicklung der Ebbe- und Flutdauer sowie der Tidelaufzeiten möglich. Für das Thw ist bei allen Pegeln ein Anstieg zu verzeichnen, der sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt hat. Das Tnw weist, nachdem es Anfang der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zunächst leicht absank, in den vergangenen Jahren ein stationäres Verhalten bzw. einen leicht positiven Trend auf. Die Entwicklung der Scheitelwasserstände bewirkt dementsprechend nach 1950 eine Zunahme des Tidehubs. Das Tidehalbwasser, als Approximation für den mittleren Meeresspiegel (MSL), zeigt demzufolge ein unterschiedliches Verhalten; es steigt in geringerem Maße als das Thw. Allerdings deuten die Auswertungen für den kurzen Zeitraum der letzten zwei Jahrzehnte bis 1991 an, daß zukünftig für das MTnw und das MThw und damit auch für das $MT\frac{1}{2}w$ bzw. den MSL ein Anstieg erwartet werden kann. Die Amplitude und Phasenverschiebung der Nodaltide, mit einer Periode von 18,6 Jahren und einem Maximum der Gezeitenkräfte z. B. in den Jahren 1978/79, wurden mit Hilfe von Optimierungsrechnungen ermittelt. Die Untersuchungen zur Gezeitendynamik deuten ebenfalls Veränderungen an. Die Zeitdifferenzen zwischen dem Auftreten der Scheitelwasserstände und dem Monddurchgang durch den Nullmeridian weisen auf eine Reduzierung der Tidelaufzeiten hin.

Summary

The high and low water peaks and their occurrence times in the German Bight were statistically analysed with the goal of investigating the extent of sea level rise which can consequently cause significant morphological changes in shallow coastal and tidal areas. Contrary to previous studies which primarily used mean values (i.e. yearly MThw, MTlw and mean tidal range), this study included all of the measured values. Thus it is not only possible to arrive at conclusions regarding the tidal water levels and range but also about the Ebb and Flood Tide durations. A rise in the Thw, which has accelerated over the past decades, is found at all of the stations. The Tnw sank slightly during the beginning of the second half of this century but subsequently stabilized or shown a light positive trend. This has resulted in a tidal range increase since 1950. The mean tidal water level, as an approximation for mean sea level, has therefore not risen as fast as the Thw. On the other hand, the evaluation of the data for the last two decades until 1991 indicates that a continued rise in the MThw and MTlw as well as in the $MT\frac{1}{2}w$ and the MSL can be expected. The amplitude and time lag of the nodal tide, with a period of 18.6 years and its associated maximum in tidal forces i.e. in 1978/79 could be determined using optimization techniques. The tidal dynamics investigations also indicate changes. A decrease in tidal duration can be deduced from the time lag between the peak water levels and the passage of the moon through the null meridian.

* Abschlußbericht zum KFKJ-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“

I n h a l t

1. Veranlassung und Aufgabenstellung	212
2. Datenaufbereitung	214
2.1 Vorbemerkungen	214
2.2 Datenkontrolle	216
2.3 Datenkorrektur	218
2.4 Einfluß von Standortveränderungen	222
2.5 Datenbasis	224
3. Statistische Analysen	225
3.1 Vorbemerkungen	225
3.2 Trenduntersuchungen	230
3.3 Analyse der Tideeintrittszeiten	238
3.4 Hauptkomponentenanalyse	244
3.5 Untersuchungen zu Periodizitäten	246
3.6 Untersuchungen zur Notaltide	247
4. Anpassungsfunktion für Thw-Scheitelwerte	253
4.1 Vorbemerkungen	253
4.2 Entwicklung und Anwendung des Verfahrens	255
4.3 Bewertung des Verfahrens	262
5. Schließen von Datenlücken in Wasserstandszeitreihen	262
5.1 Vorbemerkungen	262
5.2 Ergänzung fehlender Wasserstände	263
5.2.1 Lineare Interpolation	263
5.2.2 Lineare Regression	264
5.2.3 Lückenschließung mit gefilterten Werten	264
5.3 Lückenschließung über Eintrittswahrscheinlichkeiten	265
5.4 Schließen der Meßlücke 1945 bis 1952 des Pegels Helgoland	269
5.5 Ergänzung fehlender Eintrittszeiten	270
5.6 Bewertung des Verfahrens	271
6. Zusammenfassung und Ausblick	272
7. Schriftenverzeichnis	274

1. Veranlassung und Aufgabenstellung

Angeregt durch die Diskussion über einen weltweiten Anstieg des Meeresspiegels wurden in dem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) über den Zeitraum vom 01. 07. 1988 bis 31. 12. 1990 geförderten Forschungsprojekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ die im Bereich der deutschen Nordseeküste vorhandenen Pegeldaten auf der Basis von Einzelwert-Zeitreihen der Tidewasserstände bearbeitet. Anhand dieses Datenmaterials wird untersucht, inwieweit signifikante Veränderungen in der Entwicklung der Tidewasserstände und deren Eintrittszeiten über den Beobachtungszeitraum stattgefunden haben.

Langfristig ist die Wasserstandsentwicklung in der Nordsee durch Folgerscheinungen der letzten Eiszeit (eustatische Effekte) und Relativbewegungen zwischen Land und Meer (isostatische und tektonische Effekte) geprägt. Allerdings können an der Küste beobachtete Veränderungen der Wasserstände und der Tidedynamik auch auf menschliche Aktivitäten an der Küste und in den Tideflüssen zurückzuführen sein.

Für den Bereich der deutschen Nordseeküste kann anhand von Daten eine Veränderung der Wasserspiegellage bis in das 16. Jahrhundert zurückverfolgt werden. Nachdem die Relativbewegung zwischen dem Land- und Wasserniveau von SCHÜTTE (1908) erkannt, aber als Küstensenkungserscheinung interpretiert wurde, hat LÜDERS (1936) erstmalig einen

Anstieg des Wasserspiegels im Nordseebereich festgestellt. Nach neueren Untersuchungen muß davon ausgegangen werden, daß auch Landsenkungen zu berücksichtigen sind (AUGARTH, 1990); Untersuchungen des RIJKSWATERSTAATS bestätigen diese Ergebnisse für den Bereich der Niederlande.

In einer Vielzahl von Veröffentlichungen ist diese Thematik behandelt worden. Die Entwicklung der Meeresspiegellagen ist dabei nicht stationär, sondern unterliegt zeitlichen Veränderungen (vgl. z. B. JENSEN, 1984; FÜHRBÖTER und JENSEN, 1985; FÜHRBÖTER 1986; LUCK, 1987).

Im Zwischenbericht der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ (1989) werden nach Modellrechnungen Werte für einen weltweiten Meeresspiegelanstieg bis zu 1.5 m für den Zeitraum der nächsten 100 Jahre angegeben. Ob solche Werte realistisch sind, ist in der Fachdiskussion sehr umstritten. Die vorliegenden Untersuchungen haben deshalb auch zum Ziel, solche Prognosen durch statistische Analysen der bisherigen Entwicklung der Tidedynamik zu bewerten bzw. zu verifizieren.

Veränderungen der Wasserstände haben verschiedene Auswirkungen. Der Anstieg des Tidehochwassers bewirkt eine stärkere Belastung der Küstenschutzbauwerke und der Küstenvorfelder und damit eine erhöhte Gefährdung der flachen Küstenregionen. Das Abbruchgeschehen an den sandigen Küsten der Nordseeinseln kann als Indiz für diese Entwicklung angesehen werden. Der seit dem 16. Jahrhundert bekannte Anstieg des Meeresspiegels um durchschnittlich 20 bis 30 cm in 100 Jahren ist allerdings bereits in den Bemessungswasserständen für Deiche und andere Küstenschutzbauwerke berücksichtigt (ROHDE, 1977). Eine Vergrößerung des Tidehubs hat unter anderem eine Erhöhung des Energieeintrags in die Ästuarie und, damit verbunden, größere Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge. Veränderungen des Tideniedrigwassers betreffen in erster Linie die Schiffbarkeit von Wasserstraßen.

In diesem Forschungsprojekt wird mit mathematisch-statistischen Methoden die Entwicklung des Tidegeschehens in der Deutschen Bucht untersucht. Dabei geben Pegelzeitreihen in erster Linie Auskunft über die regionale Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. Solche kleinräumigen Wasserstandsveränderungen können mit globalen Klimamodellen nicht oder nur sehr bedingt simuliert werden. Die räumliche Auflösung dieser Klimamodelle ist mit einem Gitterpunktabstand von 200 bis 500 km so groß, daß Gebiete wie die Deutsche Bucht nicht oder nur unzureichend erfaßt werden können. Der mit Klimamodellen prognostizierte Anstieg des globalen Meeresspiegels wird in erster Linie indirekt aus einer Erhöhung der mittleren Wassertemperatur des Ozeans ermittelt.

Aussagen über die Auswirkungen eines globalen Meeresspiegelanstiegs auf die Wasserstandsentwicklung an den Küsten der Deutschen Bucht sind nur bedingt möglich, da die Pegelmeßwerte sehr stark durch regionale Besonderheiten im Umfeld der Pegel, wie z. B. Ausbaumaßnahmen in Tideästuarie, geprägt werden.

Auf der Basis täglich aufgezeichneter Pegeldata sind nicht nur Aussagen zur Entwicklung der Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände (Thw, Tnw) sowie des Tidehubs (Thb), sondern auch zur Entwicklung der Eintrittszeiten des Thw und Tnw an den einzelnen Pegeln möglich. Neben den Untersuchungen mit täglichen Scheitelwerten wurden einige Analysen auch mit den aus den Einzelwert-Zeitreihen abgeleiteten Jahresmittelwerten (MThw, MTnw und MThb) durchgeführt.

Die Auswertung der Pegeldata erfolgte mit verschiedenen statistischen Methoden. Zur Erkennung langfristiger Entwicklungen innerhalb der Zeitreihen wurde das Verfahren der linearen Regression herangezogen. Da die Wasserstandsentwicklung an den einzelnen Pegelstandorten durch die lokalen Randbedingungen Unterschiede aufweist, wurde eine Haupt-

komponentenanalyse auf die Pegelzeitreihen angewandt. Mit dieser Methode kann der Anteil des Gezeitensignals, der in allen betrachteten Pegelzeitreihen gemeinsam enthalten ist, ermittelt werden. Damit ist es möglich, die Größe eines gemeinsamen Trends der Wasserstandsentwicklung an den deutschen Pegelstandorten anzugeben. Um festzustellen, welche Perioden (z. B. die Nodaltide) oberhalb der halbtägigen Haupt-Mondtide in den Pegeldaten auftreten und wieviel Energie in diesem Spektralbereich vorhanden ist, wurden die Datenreihen mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Durch Rücktransformation und digitale Filterung konnten bestimmte Spektralbereiche in den Zeitreihen näher untersucht werden.

Die Entwicklung einer Verteilungsfunktion für die Thw-Zeitreihen ermöglicht zum einen die Abschätzung von Wasserständen mit bestimmten Wiederkehrintervallen und zum anderen das Schließen von Datenlücken innerhalb der Thw-Zeitreihen über geeignete Bezugspegel. Zeitliche Veränderungen der Gezeitendynamik konnten anhand der Flut- und Ebbdauern sowie der Eintrittszeitdifferenzen zum Monddurchgang durch den Nullmeridian untersucht werden. Ein großer Teil der geleisteten Arbeit wurde für die Beschaffung, Kontrolle und Korrektur der Pegeldaten aufgewandt.

Die Forschungsarbeiten wurden von einer Projektgruppe durch einen regelmäßigen Erfahrungsaustausch und vertiefende Fachdiskussionen begleitet. In der Projektgruppe waren die beteiligten Dienststellen und Institute durch folgende Mitglieder vertreten, denen für ihr Interesse und ihr Engagement gedankt wird:

RD Annutsch	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BD Dietze	WSD Nordwest
BOR Franzius	
BD Dr.-Ing. Wismer	WSD Nord
LRBD Petersen	Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten
RBD Schulz-Kosel	
Prof. Dr.-Ing. Siefert	Strom- und Hafengebäude Hamburg
RD Schmidt	Seewetteramt Hamburg
Dr.-Ing. Luck (Obmann bis 31. 1. 88)	NLWA-Forschungsstelle Küste
BD Dr.-Ing. Kunz	
LBD Dr.-Ing. Rohde	Bundesanstalt für Wasserbau
Prof. Dr.-Ing. Jensen (Obmann ab 1. 2. 88)	Außenstelle Küste
Mitarbeiter in diesem Projekt waren:	
Dipl.-Ing. G. Visscher	(Juli 1986 bis Dez. 1988)
Dipl.-Ing. H.-E. Mügge	(Nov. 1987 bis Dez. 1990)
Dipl.-Oz. W. Schönfeld	(April 1989 bis Dez. 1990)

2. Datenaufbereitung

2.1 Vorbemerkungen

Die Untersuchungen wurden sowohl mit täglichen Scheitelwerten des Tidehochwassers (Thw) und des Tideniedrigwassers (Tnw) als auch mit deren Jahresmittelwerten (MThw, MTnw) durchgeführt. Da insbesondere bei Trendberechnungen die Ergebnisse identisch sind, wurden diese ebenso wie die Hauptkomponentenanalyse mit Jahresmittelwerten durchgeführt.

Die Auswahl der Pegel wird im 1. Zwischenbericht (JENSEN et al., 1988) erläutert.

Die entscheidenden Kriterien für diese Auswahl sind:

- ein möglichst wenig beeinflusster und für einen bestimmten Küstenabschnitt repräsentativer Standort sowie
- zeitlich weit zurückreichende (nach Möglichkeiten lückenlose) Aufzeichnungen von Scheitelwasserständen und deren Eintrittszeiten.

Eine Übersicht der für die Untersuchung ausgewählten Pegelstandorte zeigt Abb. 1. Nach der geographischen Lage lassen sich drei Kategorien unterscheiden: Festlandspegel, Inselpegel und Pegel an Tideästuaren (vgl. JENSEN, 1984). Dabei ist zu beachten, daß viele der hier unter einer Bezeichnung zusammengefaßten Pegel im Laufe der Zeit umgebaut und z. T. mehrfach versetzt wurden. Damit verbunden war oft auch eine Änderung der Bezugshöhe. Bei den Standorten „Borkum“ und „Lt. Alte Weser“ handelt es sich jeweils um zwei unterschiedliche Pegelanlagen (Borkum Südstrand und Borkum Fischerbalje bzw. Rotersand und Lt. Alte Weser), die einige Kilometer voneinander entfernt liegen. Der Pegel „Bremerhaven“ wurde ausschließlich in die Untersuchungen einbezogen, die mit Jahresmittelwerten durchgeführt wurden.

Die Pegeldata wurden der Projektgruppe von der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe (BAW), der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BfG) und dem Deutschen Hydrographischen Institut in Hamburg (DHI) bzw. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie (BSH) auf Datenträgern überlassen. Weitere Pegeldata erhielt die Projektgruppe

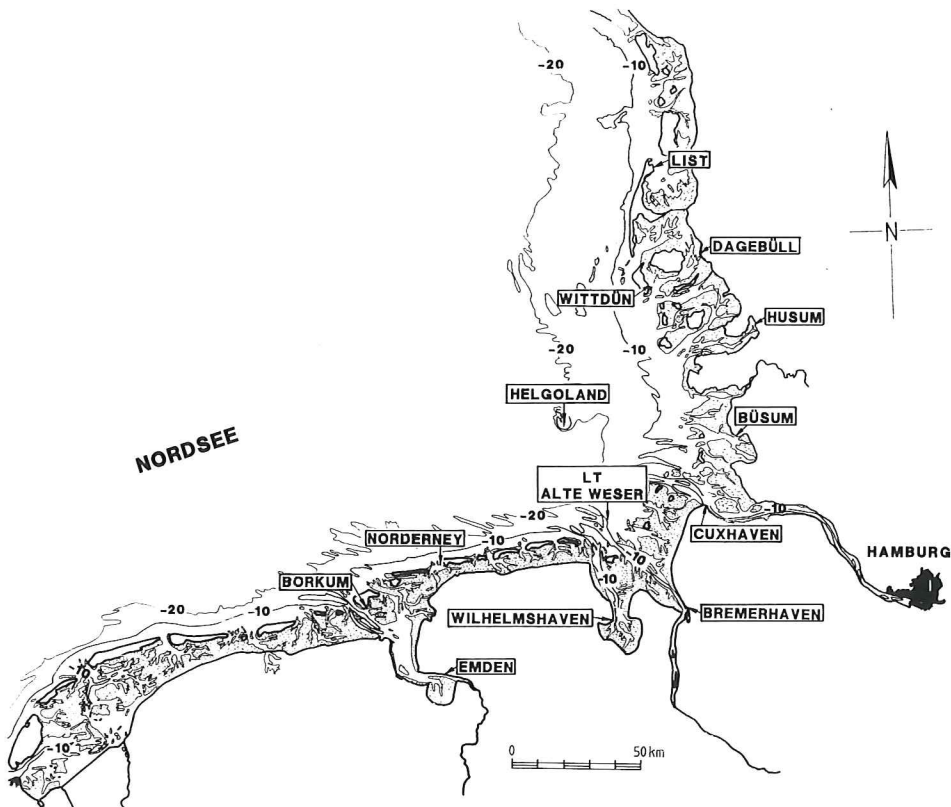


Abb. 1: Pegelstandorte im Bereich der Deutschen Bucht

von den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen (WSD) NORD in Kiel und NORDWEST in Aurich sowie vom Pegelarchiv des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Tönning, wobei die Daten des WSA Tönning im Rahmen der Projektbearbeitung aus Pegelbögen abgelesen und von Hand eingegeben wurden. Der größte Teil der Daten ist in den „Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern“ veröffentlicht. Eine zusammenfassende Übersicht der auf Datenträgern vorhandenen Originaldaten mit Angabe des Zeitraums, für den die Daten vorhanden sind, und der Quelle der Daten ist dem Forschungsbericht zu entnehmen. Die Datenbasis der vorliegenden Untersuchungen besteht aus mehr als $2 \cdot 10^6$ Einzelwerten.

2.2 Datenkontrolle

Zur Untersuchung langfristiger Meeresspiegelschwankungen und Änderungen der Gezeitendynamik müssen nicht nur möglichst lange Zeitreihen analysiert werden, sondern es werden auch hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Daten gestellt.

Bevor die Daten einer umfassenden Zeitreihenanalyse zugeführt wurden, mußten die Originaldaten auf Eingabe- und Übertragungsfehler, Lücken und andere Inkonsistenzen geprüft und korrigiert werden. Die Prüfverfahren wurden sowohl auf die Wasserstände als auch auf die Eintrittszeiten angewandt.

Nach der Eliminierung von groben, offensichtlichen Fehlern bei der Datenfernübertragung wurden die Daten für die weiteren Kontrollen und für die statistischen Auswertungen in einem einheitlichen Format abgespeichert. Ein Datensatz besteht danach aus dem Datum, der Eintrittszeit und dem Wasserstand des 1. Tnw dieses Tages, der Eintrittszeit und dem Wasserstand des 1. Thw, des 2. Tnw, des 2. Thw usw. Abb.2 zeigt eine detaillierte Beschreibung des Datenformates.

Die Daten wurden zunächst mit mehreren Kontrollprogrammen geprüft, um eventuelle Fehler herauszufinden und zu korrigieren. Im einzelnen wurde geprüft, ob:

- die Reihenfolge der Datumsangaben kontinuierlich aufsteigend ist,
- ein oder mehrere Tage in der Zeitreihe fehlen,
- innerhalb eines Datensatzes (1 Tag) Meßlücken vorhanden sind,
- ein 3. Thw oder Tnw an einem Tag vorhanden ist,
- die Reihenfolge von Thw und Tnw korrekt ist,
- die Wasserstände und die Differenzen zweier aufeinanderfolgender Thw oder Tnw einer Zeitreihe innerhalb festgelegter Schranken liegen,
- die Eintrittszeiten zwischen 0 und 24 Uhr liegen,
- aufeinanderfolgende Zeiten kontinuierlich aufsteigend sind,
- das 1. Thw/Tnw des Tages vor 14 Uhr liegt,
- die Zeitdifferenzen zwischen aufeinanderfolgenden Thw und Tnw (Steig- und Fallzeiten) einer Zeitreihe innerhalb festgelegter Schranken liegen,
- für die Wasserstände die Minima, Maxima, Monatssummen und die Mittelwerte für die Monate, Halbjahre und Jahre mit den Angaben in den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern übereinstimmen (unter Berücksichtigung einer eventuellen Nullpunktverschiebung s. u.),
- sich die Differenzen der Tidedaten von zwei Pegeln stark verändern und innerhalb festgelegter Schranken liegen.

Bei negativen Prüfmeldungen wurden die betreffenden Datensätze für eine Fehleranalyse isoliert.

Durch Bildung von Monats-, Halbjahres- und Jahressummen aus den Einzelwerten

Datum	1. Tnw	1. Thw	2. Tnw	2. Thw	3. Tnw	3. Thw
JJJJMMTT	HHMMXXXXXK	HHMMXXXXXK	HHMMXXXXXK	HHMMXXXXXK	HHMMXXXXXK	HHMMXXXXXK

Erklärung:

Datum: Jahr, Monat, Tag (JJJJMMTT);

Tnw/Thw: Eintrittszeit : Stunde, Minute (HHMM);

Wasserstand : in cm bezogen auf NN - 500cm (XXXX);

Kontrollziffer: (K)

0 = Erfassungswerte

1 = Zeit und Höhe sind korrigiert oder nachgetragen (durch DHI)

2 = nur die Zeit ist korrigiert oder nachgetragen (durch DHI)

3 = nur die Höhe ist korrigiert oder nachgetragen (durch DHI)

4 = nicht benutzt

5 = vom KFKI-Projekt von Hand eingegeben

6 = Zeit und Höhe sind korrigiert oder nachgetragen (durch WSD)

7 = nur die Zeit ist korrigiert oder nachgetragen (durch WSD)

8 = nur die Höhe ist korrigiert oder nachgetragen (durch WSD)

9 = Zeit (bei Eisgang) nachgetragen

Anmerkungen:

Die chronologische Abfolge der Meßwerte erfolgt getrennt nach Tide-niedrig und Tidehochwasser. Die Eintrittszeit des 1. Thw kann also in diesem Format früher sein als die des 1. Tnw.

Wenn ein zweites oder drittes Thw oder Tnw nicht vorhanden ist, steht für die Eintrittszeit und den Wasserstand jeweils "9000".

Abb. 2: Datenformat der Pegeldata

erfolgten weitere Kontrollen. So konnten bislang noch nicht bemerkte Fehler im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ) entdeckt werden; zum Beispiel wurde der Jahresmittelwert des Tnw am Pegel Dagebüll für das Jahr 1954 im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ) um 20 cm zu hoch angegeben.

2.3 Datenkorrektur

Mit den in Abschnitt 2.2 dargestellten Kontrollroutinen wurden noch keine Veränderungen in den Zeitreihen durchgeführt. Erst nach individueller Prüfung der einzelnen Fehler wurde entschieden, ob ein als fehlerhaft erkannter Datensatz wirklich korrigiert werden muß. Während mit den Kontrollroutinen in erster Linie „objektive“ Fehler (z. B. Thw/Tnw vertauscht, Zahlendreher usw.) gefunden werden können, muß für eine weitere Korrektur der Daten auf die einschlägige Literatur und auf Hinweise der Fachbehörden zurückgegriffen werden.

Insbesondere bei älteren Datensätzen vor 1936 sind Korrekturen problematisch. Hier mußten die Daten teilweise mit den Original-Tidekurven verglichen und ggf. korrigiert werden. Weiterhin war es bei einigen Zeitreihen notwendig, die Pegelstände von ‚Fuß‘ und ‚Zoll‘ in das metrische System umzurechnen.

Durch Veränderungen der Pegelstandorte wie z. B. Setzungen oder Sackungen der einzelnen Pegel mußten die Bezugshöhen für die Wasserstände entsprechend angepaßt werden. Im Gegensatz zu den Veröffentlichungen in den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern sind die Wasserstände im Rahmen dieser Bearbeitung *immer auf NN -5,00 m bezogen*. Wenn sich also die Bezugshöhe eines Pegels z. B. von NN -5,00 m auf NN -5,02 m geändert hatte, wurden alle Wasserstände innerhalb des betreffenden Zeitraums um 2 cm reduziert. Damit wurde ein einheitlicher Niveaubezug garantiert.

Alle verfügbaren Informationen zu einem Pegel, über den Betrieb, die Bezeichnung sowie den Standort der Pegelanlage, die unterschiedlichen Nullpunktlagen und die Korrekturen sind in einem „Pegelprotokoll“ dokumentiert. Beispielhaft für den Pegel Cuxhaven zeigt Abb. 3 Form und Inhalt dieser Zusammenstellungen, die für jeden Pegel angefertigt wurden. Weitere Informationen, insbesondere zu einzelnen Datenkorrekturen, sind im jeweiligen Pegelordner dokumentiert.

Neben den Nullpunktveränderungen müssen auch Lageveränderungen der Pegel berücksichtigt werden. Der Pegel Büsum ist beispielsweise zwischen 1915 und 1987 siebenmal versetzt worden. In derartigen Fällen muß sichergestellt sein, daß durch die Standortverlegung der Meßeinrichtung – oft infolge von Baumaßnahmen – eine eindeutige Beziehung zwischen alten und neuen Pegelmeßdaten besteht. Nur wenn an beiden Standorten noch eine ausreichende Zeit parallel aufgezeichnet wird, ist eine Zuordnung bei hoher Korrelation relativ gut möglich.

Meist ist eine Parallelaufzeichnung über einen längeren Zeitraum nicht erfolgt, so daß nur über Beziehungen zu Nachbarpegeln eine Überprüfung auf Homogenität der Datenreihe (z. B. durch eine Doppelsummenanalyse) durchgeführt werden kann.

Dabei können die Umrechnungsbeziehungen zwischen den beiden Meßpunkten sowohl bei den Wasserständen als auch bei den Eintrittszeiten der Thw und Tnw durchaus unterschiedlich sein.

Der Wechsel des Pegelstandortes Leuchtturm (Lt.) Roter Sand nach Lt. Alte Weser mag als Beispiel dazu dienen, wie vorgegangen werden kann. Bereits mehrere Autoren (LOHRBERG, 1980; LIETZ, 1986; Studie der WSD NORDWEST, 1986) haben mit unterschiedlichen Verfahren, wie z. B. der Doppelsummenanalyse, versucht, eine Höhenangleichung bzw. eine Ermittlung des Pegelnullpunktes (PNP) beider Pegel rechnerisch zu erreichen. Dabei ergaben sich Differenzen zwischen Lt. Roter Sand und Lt. Alte Weser von 6 bis 10 cm für das mittlere Thw und Tnw. Die Pegelnullpunkte liegen nach dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch bei NN -4,82 m für Lt. Roter Sand und NN -4,96 m für Lt. Alte Weser. Die Differenzen zu verschiedenen Nachbarpegeln aus gefilterten Einzelwerten weisen jedoch beim

PEGEL: Cuxhaven**PEGELDATEI: 506**
-----**PEGELBETRIEB:**

Lattenpegelablesungen seit 01.01.1843
 (z.T. lückenhaft, insbesondere Eintrittszeiten)
 Schreibpegel seit 01.01.1899

PEGELNAME / STANDORT:

1. Cuxhaven 1843 - 1900
2. Cuxhaven Steubenhöft ab 1901

PEGELNULLPUNKTE:

ab 1843	NN -364 cm
ab 1933	NN -500 cm
ab 1955	NN -501 cm
ab 1964	NN -502 cm

(nS ab 1936)

UMFANG DER DATEI:

01.01.1843 - 31.10.1987 52899 Datensätze

KORREKTUREN:

Anpassung aller Werte auf ein einheitliches PN von NN -5,00 m

Höhenkorrektur nach Siefert (Die Küste, H.42, 1985)
 1855 - 1900 +10 bis -2,7 cm wegen Sackung des
 Pegelnullpunktes (Kerbe Leuchtturm)

Zusätzliche Änderungen einzelner Daten im zugehörigen Pegel-
 ordner (**506**) protokolliert

Abb. 3: Protokoll für den Pegel Cuxhaven

Übergang von Lt. Roter Sand zu Lt. Alte Weser (Abflußjahre 1964/1965) übereinstimmend einen Sprung auf. Aus den Differenzen der gefilterten Wasserstandswerte lassen sich folgende Beziehungen ermitteln:

$$\begin{aligned} \text{Th}_{\text{AW}} &= \text{Th}_{\text{WRS}} + 10 \text{ cm}^*) \text{ und} \\ \text{Tn}_{\text{AW}} &= \text{Tn}_{\text{WRS}} + 8 \text{ cm}^*) \end{aligned}$$

Diese Ergebnisse decken sich exakt mit denen, die von der WSD NORDWEST mit Hilfe der Doppelsummenanalyse errechnet wurden. Nach entsprechender Korrektur der Wasserstandsdaten liegt nun für diesen Pegel eine homogene Datenreihe vor.

Die Aufzeichnungen des Pegels Borkum Südstrand wurden ab 1981 durch Werte des Pegels Fischerbalje ersetzt, da Störungen und Unregelmäßigkeiten am Pegel auftraten. Die Analysen weisen darauf hin, daß durch die Standortverlegung die Homogenität der Reihe gestört ist, wenn die Daten des Pegels Südstrand durch die des Pegels Fischerbalje ergänzt werden. Aus diesem Grund wurden für die Auswertungen des Pegelstandortes Borkum die Daten des Pegels Südstrand mit Hilfe linearer Regressionen auf den Standort Fischerbalje umgerechnet.

Für die aus den Einzelwerten errechneten Jahresmittelwerte erfolgte eine *h ö h e n b e z o g e n e* Korrektur, die zu folgender Anpassung für den Pegel Borkum führte. Bezogen auf die Mittelwerte (d. h. MThw bzw. MTnw) ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{Th}_S &= \text{Th}_F + 7 \text{ cm und} \\ \text{Tn}_S &= \text{Tn}_F - 2 \text{ cm} \end{aligned}$$

Einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die Erweiterung der Datenbasis, die Datenaufbereitung, Kontrolle und Analyse unter Einbeziehung von Bezugshöhen und Standortveränderungen (vgl. auch JENSEN und TÖPPE, 1986). Am Beispiel des Pegels Büsum soll das Vorgehen dargestellt und erläutert werden (MÜGGE und JENSEN, 1991).

Die für den Pegel Büsum auf Datenträger verfügbaren täglichen Wasserstandswerte (ab 1. Januar 1952) sowie die in den Pegelstambüchern enthaltenen Informationen sind für eine vertrauenswürdige statistische Analyse nicht ausreichend. Der erste Schritt bestand daher in der Aufbereitung täglicher Tidescheitelwerte auf der Grundlage von Gewässerkundlichen Jahrbüchern. Daneben mußten aber auch ältere, überwiegend handschriftliche Aufzeichnungen sowie die Original-Pegelschriebe zur Kontrolle herangezogen werden.

Die vom Pegelarchiv des WSA Tönning zur Verfügung gestellten Originaldokumente (beginnend mit dem Mai 1867) sind handschriftliche Wasserstandsaufzeichnungen mit Eintragungen anfangs noch in der Einheit ‚Fuß‘ bzw. ‚decimale Zoll‘ (s. Abb. 4) und ab 1872 auch in ‚Meter‘ bzw. ‚Zentimeter‘.

Nach Erfassung und Aufbereitung der Daten, einschließlich der Umrechnung der alten Maßeinheiten, erfolgte die Anpassung aller Werte auf ein einheitliches Niveau von NN –5.00 m. Bei den Höhenangaben bis 1932 war zusätzlich die Umrechnung vom alten System der Landesaufnahme (NNaS) in das neue System (NNnS) zu berücksichtigen. Nach LOHRBERG (1983) wird die Differenz für den Pegel Büsum mit 8.4 cm angegeben.

Als Ergebnis liegt eine weitgehend geschlossene Tageswertreihe (zunächst eine Lattenablesung pro Tag während der Tagesstunden) der Thw des Pegels Büsum ab 1. Mai 1867 vor. Vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Schreibpegels am 2. August 1915 enthält die Reihe bis auf wenige Lücken alle Thw. Daneben enthält die Zeitreihe die ab 1930 aufgezeichneten Tnw,

*) Bei JENSEN et al. (1988), Die Küste, Heft 47, S. 139, wurden die Vorzeichen vertauscht, die Minuszeichen sind durch Pluszeichen zu ersetzen.

1867.

Monat und Tage	Zustand der Luft				Luftdruck		Windrichtung				Wetter	
	Temperatur		Feuchtigkeit		Barometer		Windrichtung		Windstärke			
	Min.	Max.	Min.	Max.	h. d. T.	h. d. N.	h. d. T.	h. d. N.	h. d. T.	h. d. N.		
1.	10	30			10	4					H. d. T.	flau
2.	11	15			10	2					H. d. T.	friff
3.	12	-			8	6					H.	friff
4.			12	45	10						H.	friff
5.			1	30	10	3					S. O.	friff
6.			2	15	10	5					O.	flau
7.			3	-	11	9					S. W.	friff
8.			4	-	11	3					H.	flau
9.			4	45	10	3					O.	flau
10.			5	30	11	7					O.	friff
11.			6	30	10	2					O.	flau
12.	7	45			9	5					W.	flau
13.	8	15			7	2					O. d. O.	friff
14.	9	15			9						H. d. O.	
15.	10	30			9	8					H. d. O.	flau
16.	11	15			10						H. d. O.	flau
17.	12	-			10	3					H. d. W.	friff
18.			1	-	10	3					H.	flau
19.			1	45	10	3					S. O.	friff
20.			2	-	10	3					H.	flau
21.			2	45	10	3					O.	flau
22.			3	15	10	2					O.	flau
23.			4	-	10	1					H. d. O.	friff
24.			4	30	10	-					H.	friff
25.			5	15	9	5					H. d. W.	flau
26.			6	-	9	9					S. O.	friff
27.	6	30			8	4					O.	friff
28.	7	15			9	3					H. d. W.	friff
29.	8	-			9	4					S.	flau
30.	9	-			9	5					S. O.	
31.	10	30			9	1					H.	
			auf dem Meer		107	8						
			auf dem Land		9	9,5						1

Abb. 4: Originalaufzeichnungen der Wasserstände vom Mai 1867

die jedoch z. T. durch die Baumaßnahmen beeinflusst sind. Die aufgearbeiteten Daten stehen für weitergehende Untersuchungen zur Verfügung.

2.4 Einfluß von Standortveränderungen

Bereits bei der Aufbereitung der Daten am Beispiel des Pegelstandortes Büsum zeigte es sich, daß die Wasserstandsbeobachtungen eng mit der Entwicklung und dem Ausbau des Hafens verknüpft sind.

Anhand älterer Unterlagen konnten die früheren Standorte der Schreibpegel rekonstruiert werden. Die zusammengetragenen Informationen sind in dem Lageplan auf Abb.5 dargestellt.

Der Lageplan gibt vereinfacht die heutigen Umrisse (durchgezogene Linie) des Hafens

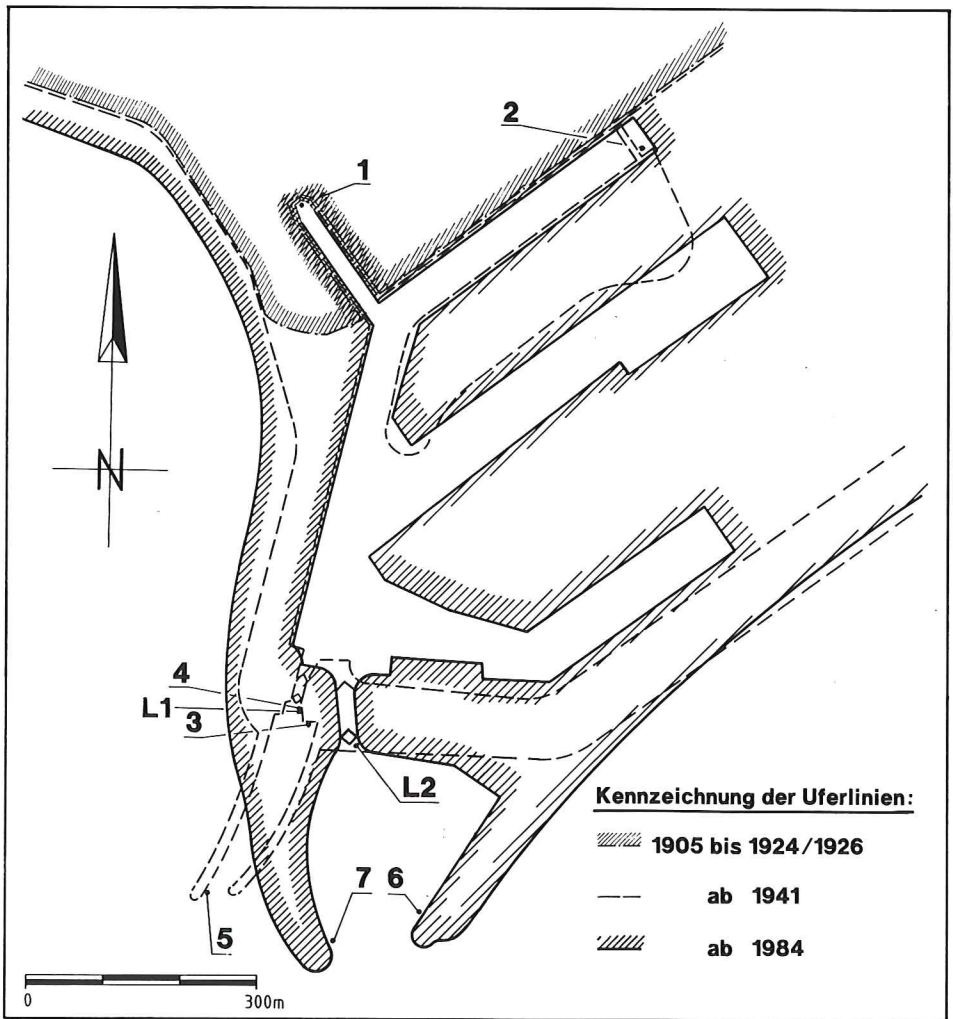


Abb. 5: Die Standorte der Schreibpegel im Bereich des Büsumer Hafens

Büsum wieder. Daneben sind frühere Ausbauzustände der Hafengebäude sowie der Schleusen- anlage durch unterschiedliche Signatur gekennzeichnet. Zusätzlich sind in der Abbildung die verschiedenen Standorte der Schreibpegel im Bereich des Büsumer Hafens eingezeichnet.

In Tabelle 1 sind die für die Wasserstandsaufzeichnungen maßgeblichen Pegel mit den zugehörigen Pegelnulllagen zusammengestellt.

Tabelle 1. Zusammenstellung der Büsumer Pegelstandorte

Nr.	Pegelstandort	Bauart	Beobachtungszeitraum	Pegelnull NNnS (NNaS)
1	Alter Hafen	L	01. 05. 1867/31. 08. 1893	-1,885 m
		L	01. 09. 1893/01. 08. 1915	-1,856 m (-1,940 m)
		Ss	02. 08. 1915/28. 02. 1930	-1,855 m (-1,939 m)
2	Inselbrücke	Ss	01. 03. 1930/30. 06. 1932	-1,855 m (-1,939 m)
		Ss	01. 07. 1932/31. 10. 1935	-1,858 m
		Ss	01. 11. 1935/31. 10. 1941	-5,000 m
3	Seeschleuse	Ss	01. 11. 1941/19. 01. 1943	-5,000 m
4	Seeschleuse	Ss	20. 01. 1943/31. 10. 1950	-5,000 m
		Ss	01. 11. 1950/30. 11. 1953	-5,005 m
5	Westmolenkopf	Ss	01. 12. 1953/31. 10. 1984	-5,005 m
6	Neue Ostmole	Ss	01. 11. 1984/09. 04. 1987	-5,005 m
		Ss	10. 04. 1987/02. 11. 1987	-5,000 m
7	Neue Westmole	Ss	ab 02. 11. 1987	-5,000 m

nS = neues System der Landesaufnahme; aS = altes System der Landesaufnahme; L = Lattenpegel;
Ss = Schwimmerschreibpegel

Um die Frage nach eventuellen Beeinträchtigungen der Wasserstandsaufzeichnungen durch Umsetzung der Pegelanlage oder bauliche Veränderungen in der Nähe eines Pegels zu klären, wurden vergleichende Analysen mit Nachbarpegeln durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, signifikante Änderungen der Pegelaufzeichnungen infolge von Standortverlegungen oder Baumaßnahmen nachzuweisen.

Die Schwierigkeit bei derartigen Untersuchungen besteht darin, einen Bezugspegel zu finden, dessen Aufzeichnungen mit denen des versetzten Pegels sehr gut korrelieren. Außerdem müssen die Daten des Bezugspegels homogen und jegliche Beeinträchtigungen auszuschließen sein. Da sich in unmittelbarer Nähe des Standortes Büsum kein weiterer Pegel befindet, mußten weiter entfernt gelegene Bezugspegel gewählt werden.

Zu diesem Zweck wurden anhand von Einzelwerten Doppelsummenanalysen der Pegelreihen Cuxhaven, Helgoland und anderer Nachbarpegel mit den Daten von Büsum durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen ist festzuhalten, daß keine signifikanten Änderungen der Thw nachgewiesen werden können, die in Zusammenhang mit einer Standortverlegung stehen. Die festgestellten Änderungen der Thw seit 1978 sind auf die Auswirkungen der Eindeichung der Meldorfer Bucht zurückzuführen.

Analysen der Trendentwicklung der Thw des Pegels Büsum zeigen keine Auffälligkeiten im Vergleich zu benachbarten Pegeln an der schleswig-holsteinischen Küste.

Um die Frage nach Säkulartrendveränderungen infolge der Eindeichung der Meldorfer Bucht abschließend beantworten zu können, ist der Zeitraum ab 1978 jedoch zu kurz.

Die Analyse der Tideeintrittszeitpunkte bezogen auf den Monddurchgang in Greenwich zeigt, daß die Vordeichung in der Meldorfer Bucht einen deutlichen Einfluß auf diesen Parameter hat. Infolge dieser Baumaßnahme treten die Thw- durchschnittlich 20 Minuten früher und die Tnw-Scheitelwasserstände 12 Minuten früher ein. Die unterschiedliche Verkürzung führt zu Veränderungen der Flut- und Ebbdauer und damit der Tidedynamik.

Am Beispiel des Pegels Büsum wird deutlich, daß nach sorgfältiger Aufarbeitung des gesamten Pegel- und Datenmaterials vertrauenswürdige Einzelwertzeitreihen aufbereitet werden können. Allerdings sind bei der Analyse der einzelnen Wasserstandszeitreihen (Tnw, Thw) bzw. der Tideeintrittszeitpunkte oder Laufzeiten unbedingt die spezifischen Randbedingungen der jeweils betrachteten Pegel zu beachten. Für den Pegel Büsum folgt daraus, daß die Thw-Zeitreihe durchaus für eine allgemeine Wasserstandsanalyse der Westküstenpegel Schleswig-Holsteins herangezogen werden kann; allerdings gilt dies aufgrund des Pegelstandortes Büsum nicht für die Tnw-Zeitreihen bzw. die Tideeintrittszeitpunkte und Tidelaufzeiten.

Eine sorgfältige Prüfung und Korrektur des gesamten Datenmaterials einschließlich der Aufarbeitung historischer Aufzeichnungen für jeden einzelnen Pegel ist eine unerläßliche Voraussetzung im Hinblick auf eine zuverlässige Analyse der Wasserstandsentwicklung.

2.5 Datenbasis

Die Eintrittszeitpunkte werden *immer auf MEZ bezogen* und entsprechend korrigiert. Neben der Korrektur der mitteleuropäischen Sommerzeit mußten die Daten der Jahre 1945 und 1947 um eine weitere Stunde korrigiert werden, da in diesen Jahren eine „Hochsommerzeit“ eingeführt worden war.

Durch die Datenaufbereitung stehen lückenlose Zeitreihen der täglichen Tidescheitelwerte und deren Eintrittszeitpunkte für die Pegel nach Tabelle 2 zur Verfügung und sind auf Datenträgern gesichert.

Für einige Pegel existieren darüber hinaus Datenaufzeichnungen, die jedoch mehr oder

Tabelle 2. Pegel und Zeiträume, für die *lückenlose* Zeitreihen der Tageswerte vorliegen

Pegel	Zeitreihe*)
Borkum	1936 – 1987
Norderney	1936 – 1987
Emden	1950 – 1987
Helgoland	1954 – 1987
LT Alte Weser/Roter Sand	1936 – 1987
Wilhelmshaven	1936 – 1987
Cuxhaven	1890 – 1987
Büsum	1953 – 1987
Husum	1952 – 1987
Wittdün	1952 – 1987
Dagebüll	1952 – 1987
List	1952 – 1987

*) die Zeitangaben beziehen sich auf Abflußjahre (1. 11. bis 31. 10.) entsprechend dem DGJ

weniger große Lücken aufweisen. Um die Datenbasis zu vergrößern, wurden Verfahren zur Lückenschließung entwickelt.

Die Untersuchungen wurden sowohl mit täglichen Scheitelwerten des Thw und des Tnw als auch mit deren Jahresmittelwerten (MThw, MTnw) durchgeführt (JENSEN, 1984).

Die Berechnung der Jahresmittelwerte erfolgte aus den korrigierten Zeitreihen der halbtägigen Scheitelwerte. Zur Vergrößerung der Datenbasis wurden weitere Jahresmittelwerte und für einige Analysen Daten des Pegels Bremerhaven aus JENSEN (1984) herangezogen, wobei diese Daten zwischenzeitlich ebenfalls korrigiert und ergänzt wurden. Insgesamt bilden die in Tabelle 3 aufgeführten Pegelzeitreihen die Grundlage der mit Jahresmittelwerten durchgeführten Berechnungen. Die Jahresangaben beziehen sich immer auf „Abflußjahre“ (vom 1. 11. des Vorjahres bis zum 31. 10.).

Tabelle 3. MThw und MTnw-Zeitreihen der ausgewählten Pegel

Pegel		MThw-Zeitreihe	MTnw-Zeitreihe
Borkum	(BOR)	1931 – 1991	1931 – 1991
Norderney	(NOR)	1891 – 1991	1891 – 1991
Emden	(EMD)	1901 – 1991	1901 – 1991
Helgoland	(HEL)	1953 – 1991	1953 – 1991
LT Alte Weser	(LTW)	1901 – 1991	1901 – 1991
Wilhelmshaven	(WIL)	1873 – 1991	1901 – 1991
Bremerhaven	(BRV)	1881 – 1991	1881 – 1991
Cuxhaven	(CUX)	1855 – 1991	1855 – 1991
Büsum	(BUE)	1871 – 1991	1931 – 1991
Husum	(HUS)	1868 – 1991	1906 – 1991
Wittdün	(WIT)	1952 – 1991	1952 – 1991
Dagebüll	(DAG)	1874 – 1991	1936 – 1991
List	(LIS)	1931 – 1991	1931 – 1991

Nach dieser Datenaufbereitung steht ein qualitativ hochwertiges Datenkollektiv zur Verfügung. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, daß durch weitere aufwendige Untersuchungen einzelner Pegel (vgl. MÜGGE und JENSEN, 1991) Korrekturen der etwa $2 \cdot 10^6$ Einzelwerte angebracht werden müßten (vgl. auch LOHRBERG, 1989).

3. Statistische Analysen

3.1 Vorbemerkungen

Vor der eigentlichen statistischen Analyse wurden für jeden Pegel getrennt für Thw und Tnw Histogramme der täglichen Scheitelwerte und die Jahressgänge der täglichen Mittelwerte in einer Vorauswertung zusammengestellt. Beispielhaft für den Pegel Cuxhaven sind in Abb. 6 und 7 die Histogramme der täglichen Scheitelwerte der Thw und Tnw einschließlich der jeweiligen Standardabweichungen über den Zeitraum von 1856 bis 1987 dargestellt. Damit wird die Annahme einer Normalverteilung der Wasserstände über einen langen Beobachtungszeitraum bestätigt. Die Werte außerhalb des Darstellungsbereiches sind als Summe an der jeweiligen Darstellungsgrenze aufgetragen.

Abb. 8 und 9 zeigen wiederum beispielhaft für den Pegel Cuxhaven den Jahressgang der Thw und Tnw als Mittelwerte über den Zeitraum von 1856 bis 1987. Der charakteristische

Pegel Cuxhaven

Histogramm der täglichen Scheitelwerte des Thw von 1856 bis 1987

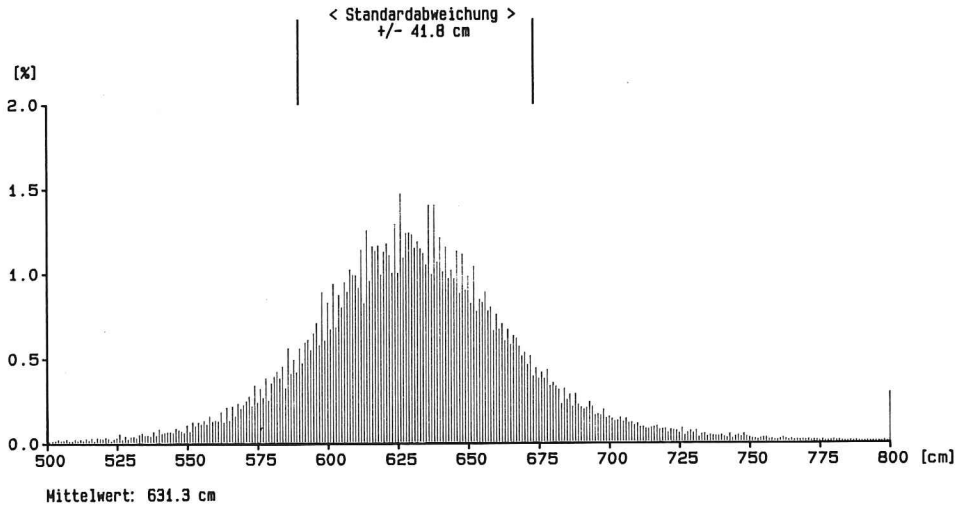


Abb. 6: Verteilung der täglichen Scheitelwerte des Thw der Zeitreihe von 1856 bis 1987 für den Pegel Cuxhaven

Pegel Cuxhaven

Histogramm der täglichen Scheitelwerte des Tnw von 1856 bis 1987

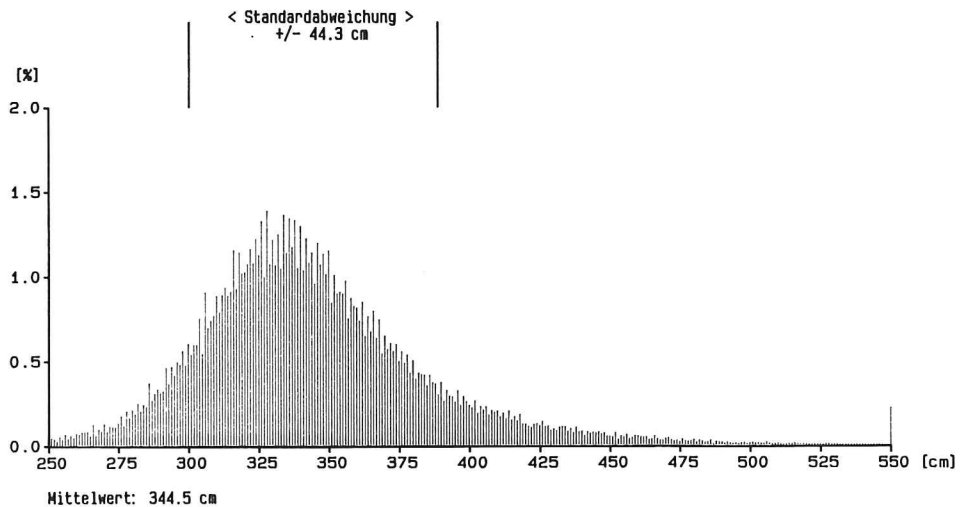


Abb. 7: Verteilung der täglichen Scheitelwerte des Tnw der Zeitreihe von 1856 bis 1987 für den Pegel Cuxhaven

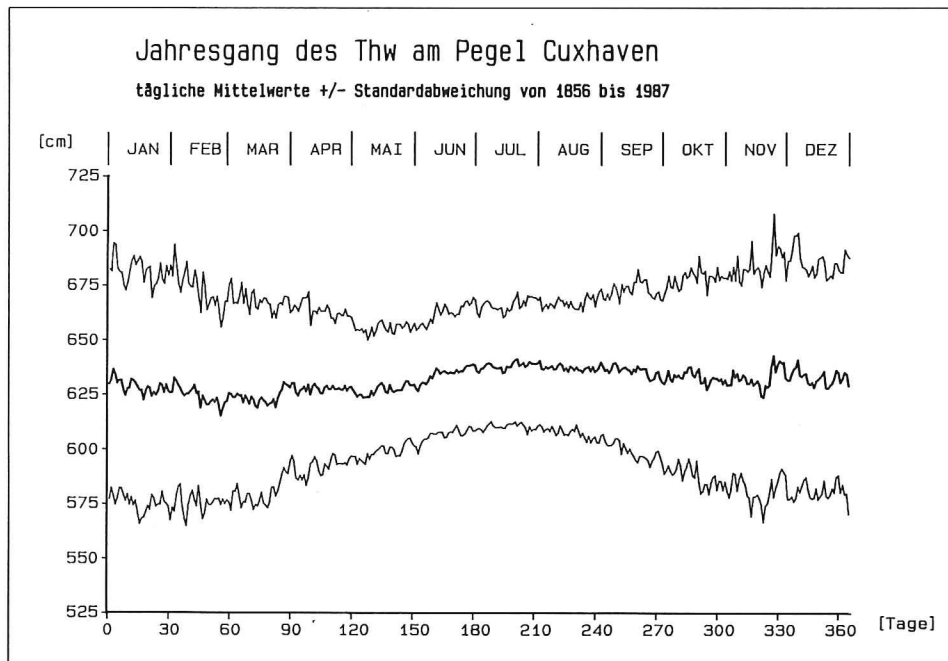


Abb. 8: Jahresgang des Thw der Zeitreihe von 1856 bis 1987 für den Pegel Cuxhaven

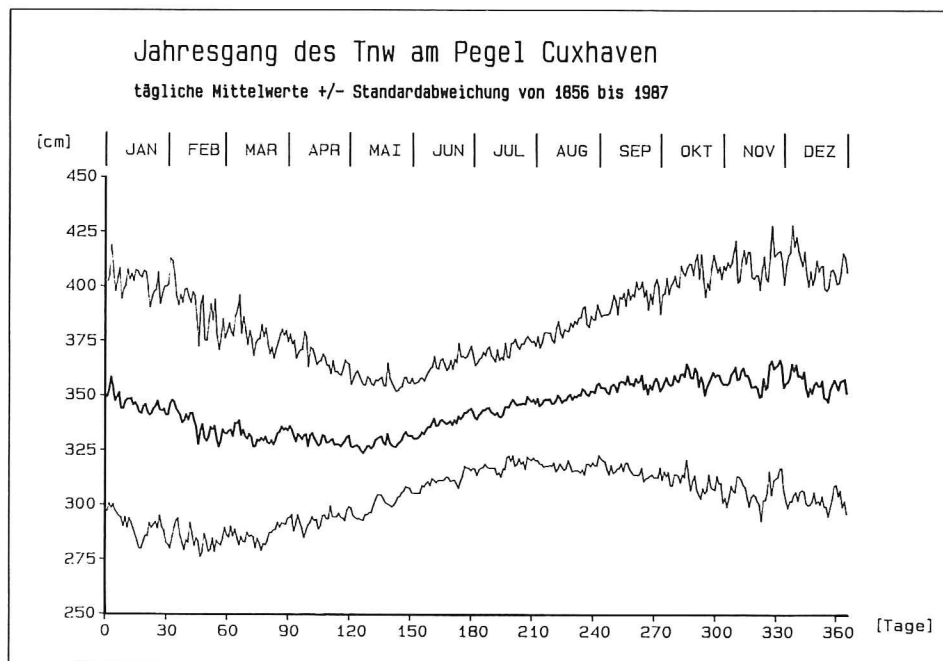


Abb. 9: Jahresgang des Tnw der Zeitreihe von 1856 bis 1987 für den Pegel Cuxhaven

Jahresgang der Thw für die Pegel in der Deutschen Bucht zeigt ein Minimum für die Monate Februar bis April und ein Maximum für die Monate Juli und August. Der entsprechende Jahresgang der Tnw zeigt ein Minimum für die Monate April und Mai und ein Maximum für die Monate Oktober und November.

In Tabelle 4 und 5 sind die Häufigkeitsverteilungen der Thw und Tnw für Abschnitte von 10 Jahren von 1906/1915 bis 1976/1985 mit der Einzelhäufigkeit p und Summenhäufigkeit P_U für eine Klassenbreite von 25 cm sowie die jeweiligen Mittelwerte beispielhaft für den Pegel Cuxhaven aufgeführt. Der Tabelle 4 ist zu entnehmen, daß sich der Mittelwert der Thw vom ersten Zeitraum 1906/1915 von 625 cm auf 648 cm für den letzten Auswertez Zeitraum 1976/1985 erhöht hat. Waren in dem 10-Jahres-Zeitraum 1906/1915 78,5 % der Thw kleiner als 650 cm, so sind es in dem 10-Jahres-Zeitraum 1976/1985 nur 54,7 %. In Abb. 10 und 11 sind die Summenhäufigkeiten der Thw und Tnw dieser 8 Teilzeitreihen dargestellt, die deutliche Verschiebung zu höheren Wasserständen ist über den gesamten Häufigkeitsbereich zu erkennen. Es stellt sich annähernd eine Verschiebung von 25 cm für den gesamten dargestellten Höhenbereich dar, d. h., sowohl kleine wie auch hohe Thw sind im Zeitraum 1976/1985 etwa 25 cm größer. Diese Verschiebung zu höheren Wasserständen ist auf den Säkularanstieg zurückzuführen.

Tabelle 4. Häufigkeitsverteilung in % der Thw (NN -500 cm) für den Zeitraum von 1906 bis 1985 in Abschnitten von 10 Jahren für den Pegel Cuxhaven. Obere Zeile: Einzelhäufigkeit p , untere Zeile: Summenhäufigkeit P_U , Klassenbreite: 25 cm

Klasse Zeitraum	< 500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	Mittel- wert
1906 --	,6	,7	1,0	5,2	15,1	28,5	27,4	13,6	4,7	1,9	,8	,6	625
-- 1915	,6	1,3	2,2	7,4	22,6	51,1	78,5	92,1	96,8	98,6	99,4	100,00	
1916 --	,3	,6	1,1	3,1	10,7	25,8	30,6	17,0	5,6	2,4	1,3	1,3	633
-- 1925	,3	,9	2,1	5,2	15,9	41,7	72,3	89,3	95,0	97,3	98,7	100,00	
1926 --	,3	,5	1,1	3,6	10,0	23,1	30,8	18,7	7,1	2,7	1,1	1,1	635
-- 1935	,3	,8	1,8	5,4	15,4	38,5	69,3	88,0	95,1	97,8	98,9	100,00	
1936 --	,5	,4	,9	2,8	8,6	22,2	30,9	21,0	7,4	2,7	1,4	1,3	638
-- 1945	,5	,8	1,7	4,5	13,1	35,3	66,3	87,2	94,6	97,3	98,7	100,00	
1946 --	,4	,5	1,4	3,2	9,1	22,3	30,2	19,9	7,6	3,2	1,2	1,1	637
-- 1955	,4	,9	2,3	5,5	14,6	36,9	67,1	87,0	94,6	97,7	98,9	100,00	
1956 --	,4	,4	,8	2,8	8,1	21,1	31,6	21,2	8,6	2,9	1,0	1,1	639
-- 1965	,4	,7	1,6	4,3	12,4	33,6	65,2	86,3	94,9	97,9	98,9	100,00	
1966 --	,3	,2	,9	2,5	7,9	18,8	29,6	23,3	9,7	3,6	1,6	1,6	644
-- 1975	,3	,5	1,3	3,9	11,7	30,6	60,1	83,4	93,2	96,8	98,4	100,00	
1976 --	,1	,3	1,0	2,3	6,2	16,2	28,7	24,5	12,4	4,4	2,1	1,9	648
-- 1985	,1	,4	1,3	3,6	9,8	26,1	54,7	79,3	91,7	96,1	98,1	100,00	

Im Vergleich zu der Häufigkeitsverteilung der Thw zeigt die Verteilung der Tnw (s. Tab. 5) ein anderes Verhalten. Ausgehend von dem Zeitraum 1906/1915 zeigt sich ein Anstieg der Tnw im Mittel von 344 cm auf 356 cm im Zeitraum 1946/1955 und danach wieder einen Abfall des Mittelwertes der Tnw auf 347 cm in dem Zeitraum 1976/1985. Der Tnw-Wert von 350 cm wird in dem Zeitraum 1906/1915 von 82,9 %, in dem Zeitraum 1946/1955 von 74,9 % und in dem letzten 10-Jahres-Zeitraum 1976/1985 von 79,7 % aller Werte unterschritten. Entsprechend zeigt sich in Abb. 11 bei der Darstellung der 8 Teilzeitreihen kein einheitliches

Tabelle 5. Häufigkeitsverteilung in % der Thw (NN -500 cm) für den Zeitraum von 1906 bis 1985 in Abschnitten von 10 Jahren für den Pegel Cuxhaven. Obere Zeile: Einzelhäufigkeit p , untere Zeile: Summenhäufigkeit P_U , Klassenbreite: 25 cm

Klasse Zeitraum	< 225	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	Mittel- wert
1906 --	,3	,5	1,8	8,1	23,0	29,5	19,8	8,5	4,1	2,3	1,1	1,1	344
-- 1915	,3	,8	2,5	10,7	33,6	63,1	82,9	91,4	95,5	97,8	98,9	100,00	
1916 --	,3	,7	2,0	7,6	23,1	29,0	18,8	9,0	4,6	2,3	1,2	1,5	345
-- 1925	,3	1,0	3,0	10,6	33,6	62,6	81,4	90,4	95,0	97,3	98,5	100,00	
1926 --	,3	,4	1,5	5,2	18,5	30,6	22,1	11,1	5,1	2,4	1,3	1,5	350
-- 1935	,3	,8	2,3	7,4	26,0	56,6	78,6	89,7	94,8	97,2	98,5	100,00	
1936 --	,6	,6	1,3	6,2	19,5	30,6	21,1	10,3	5,0	2,1	1,4	1,3	348
-- 1945	,6	1,1	2,5	8,6	28,1	58,7	79,7	90,1	95,1	97,2	98,7	100,00	
1946 --	,3	,3	,9	4,0	15,2	30,6	23,6	12,2	6,2	3,2	1,6	1,8	356
-- 1955	,3	,6	1,5	5,5	20,7	51,4	74,9	87,1	93,4	96,6	98,2	100,00	
1956 --	,2	,4	,9	4,5	17,2	31,8	22,9	12,1	4,6	2,6	1,2	1,5	352
-- 1965	,2	,6	1,5	6,0	23,3	55,1	77,9	90,0	94,6	97,2	98,5	100,00	
1966 --	,2	,2	1,0	4,3	17,9	30,4	22,4	11,9	5,1	2,8	1,5	2,2	354
-- 1975	,2	,5	1,5	5,8	23,7	54,1	76,5	88,5	93,6	96,4	97,8	100,00	
1976 --	,3	,6	2,0	7,9	22,3	28,6	18,0	9,5	5,2	2,5	1,4	1,7	347
-- 1985	,3	,9	2,8	10,7	33,1	61,6	79,7	89,2	94,4	96,9	98,3	100,00	

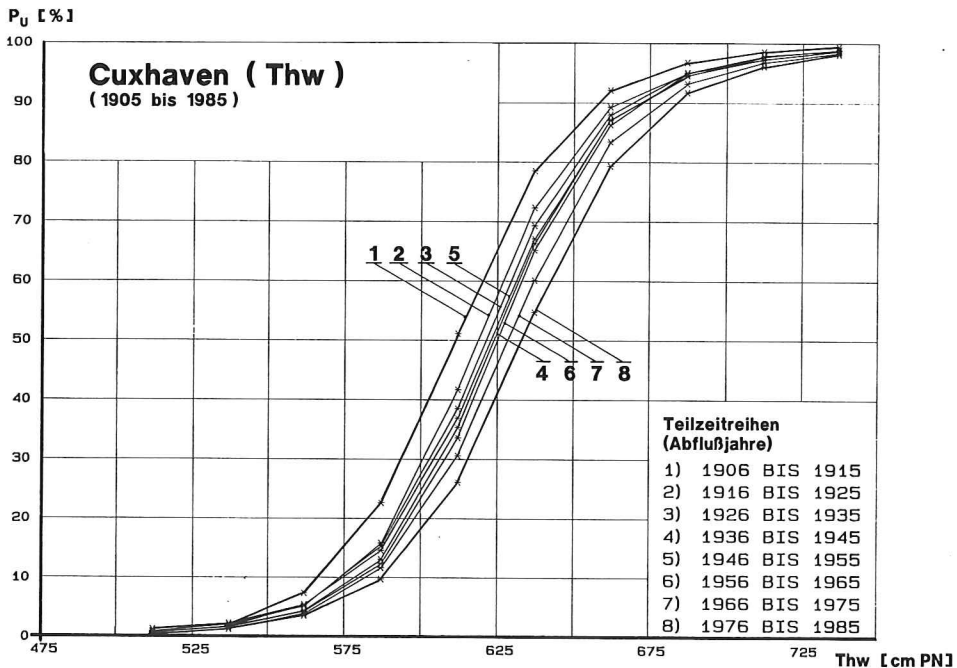


Abb. 10: Summenhäufigkeiten der Thw der 8 Teilzeitreihen von 1906/1915 bis 1976/1985 für den Pegel Cuxhaven

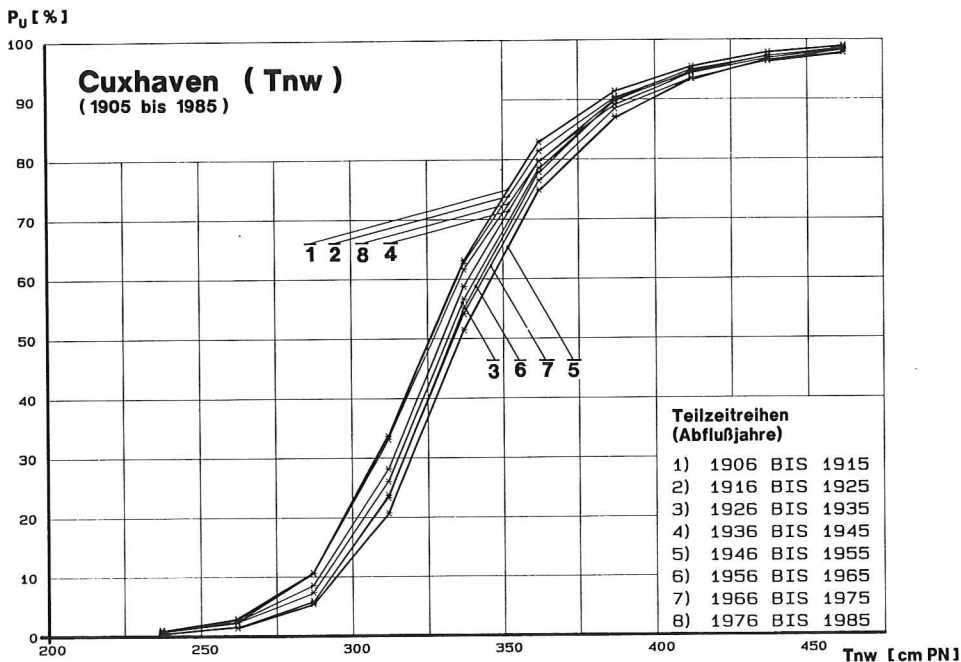


Abb. 11: Summenhäufigkeiten der Tnw der 8 Teilzeitreihen von 1906/1915 bis 1976/1985 für den Pegel Cuxhaven

Bild. Eine eindeutige Verschiebung zu niedrigeren oder höheren Tnw-Werten ist nicht zu erkennen.

Entsprechende Voruntersuchungen wurden für alle Pegel durchgeführt; diese Auswertungen sind dem Anlagenband zum Abschlußbericht „Wasserstandentwicklung in der Deutschen Bucht“ zu entnehmen. Zusammenfassend ist hierzu festzustellen, daß alle Pegel ein der oben angeführten Charakteristik des Pegels Cuxhaven ähnliches Verhalten aufweisen.

3.2 Trenduntersuchungen

Die mittlere Änderung der Wasserstände innerhalb eines bestimmten Zeitraumes kann mit Hilfe linearer Regression bestimmt werden (JENSEN, 1984). Häufig wird der Trend als Säkulartrend (Säkulum = 100 Jahre) in cm/100 Jahre angegeben. Dieser Trend gilt nur für den Auswertzeitraum und darf insbesondere bei kürzeren Beobachtungszeiträumen nicht als Prognose der Wasserstandsentwicklung für die Zukunft mißverstanden werden; deshalb wird bei kurzen Zeitreihen der Trend in cm/Jahr angegeben.

Für die Beschreibung der Güte der linearen Regression wird ein Vertrauensbereich den Ergebnissen zugeordnet. Unter der Voraussetzung, daß zu jedem Zeitpunkt die abhängige Größe (z. B. Thw oder Tnw) normalverteilt ist, kann ein Konfidenzintervall abhängig von der Prüfverteilung und der Signifikanzzahl angegeben werden. Bei der Angabe eines Konfidenzintervalles wird der Bereich der Verteilung abgegrenzt, der die Wahrscheinlichkeit $1-\alpha$ enthält, wobei $1-\alpha$ das Signifikanzniveau darstellt.

Konfidenzintervalle können für die Regressionsgerade und für die Meßwerte angegeben

werden. Für die durchgeführten Untersuchungen wird das Konfidenzintervall für die Ausgleichsgerade nach YEVJEVICH (1972) herangezogen. Als Prüfverteilung wird die Student-t-Verteilung gewählt.

Auf Abb. 12 und 13 sind, wiederum nur für den Pegel Cuxhaven, die Jahresmittelwerte der MThw und MTnw der Zeitreihe 1855 bis 1991 dargestellt. Neben den dargestellten Jahresmittelwerten ist die Ausgleichsfunktion für den Auswertzeitraum eingezeichnet. Auch bei diesen Darstellungen ist entsprechend Abb. 10 und 11 das unterschiedlichste Anstiegsverhalten der Jahresmittelwerte der MThw und MTnw zu erkennen; die MThw-Zeitreihe beinhaltet einen kontinuierlichen Anstieg von etwa 27 cm/100 Jahre. Der Anstieg der MTnw ist mit 17 cm/100 Jahre deutlich geringer und zeigt darüber hinaus kein einheitliches Verhalten.

M T h w

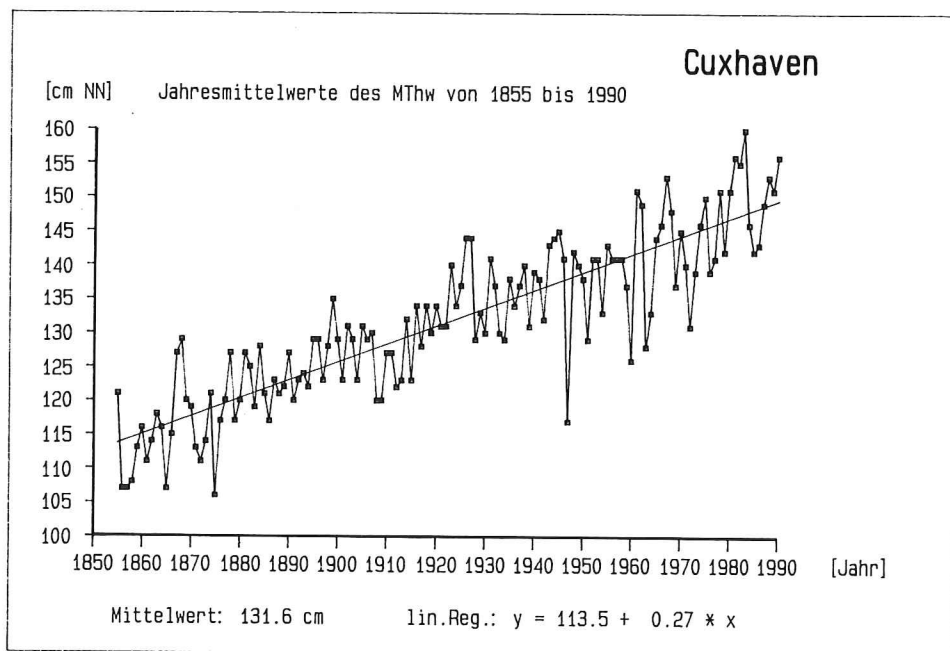


Abb. 12: Jahresmittelwerte und Trend des MThw der Zeitreihe von 1855 bis 1991 für den Pegel Cuxhaven

Die Trends an den einzelnen Pegelstandorten weisen teilweise erhebliche Unterschiede auf. Auch innerhalb einer Pegelzeitreihe besteht eine große Abhängigkeit der Steigung der Ausgleichsgeraden vom Untersuchungszeitraum. Hierbei ist darauf zu achten, daß die Untersuchungszeiträume annähernd ein Vielfaches von 18,6 Jahren betragen, damit der Anteil der Nodaltide nicht fälschlicherweise als langfristiger Trend interpretiert wird.

In Tabelle 6 findet sich eine Zusammenstellung der Trends für die Jahresmittelwerte der MThw, MTnw, MThb und MT $\frac{1}{2}$ w für den Zeitraum der letzten 100, 37 und 19 Jahre bis zum Jahr 1991 an den betrachteten Pegelstandorten (vgl. JENSEN, 1984).

Die Länge der Zeiträume ist durch das Datenmaterial beschränkt, so daß die Trendberechnungen über mehr als 37 Jahre nicht für alle Pegel durchgeführt werden konnten. Um die mittlere Wasserstandsentwicklung innerhalb der letzten 19 Jahre aufzuzeigen, wurden lineare

MTnw

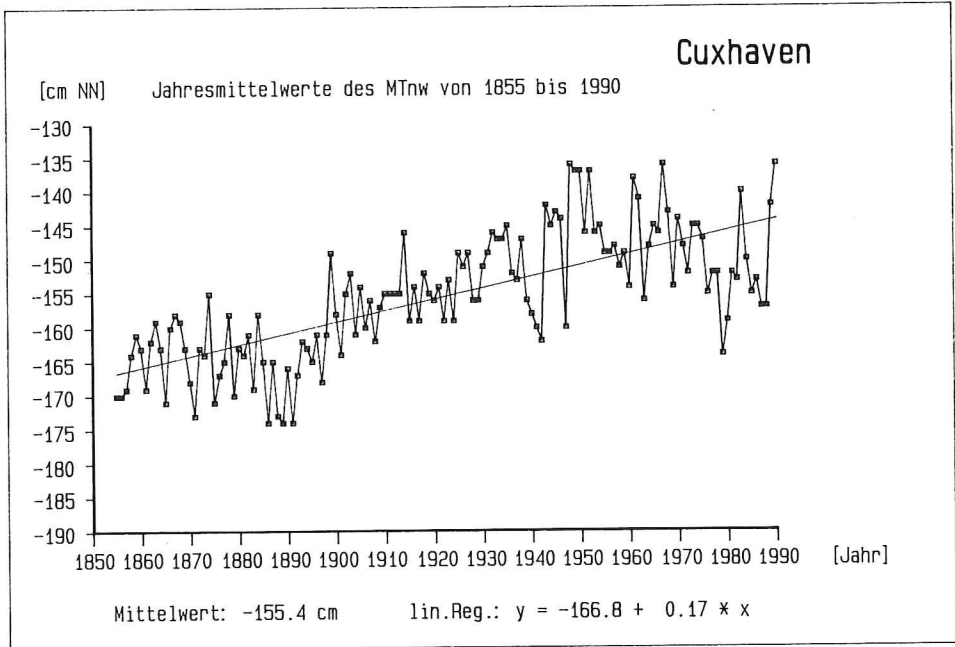


Abb. 13: Jahresmittelwerte und Trend des MTnw der Zeitreihe von 1855 bis 1991 für den Pegel Cuxhaven

Tabelle 6. Lineare Trends für verschiedene Untersuchungszeiträume an Pegeln an der deutschen Nordseeküste

Pegel	Lineare Trends der Regressionsgeraden [cm/a]											
	MThw-Trend			MTnw-Trend			MThb-Trend			MT $\frac{1}{2}$ w-Trend		
	1973 1991 (19a)	1955 1991 (37a)	1892 1991 (100a)	1973 1991 (19a)	1955 1991 (37a)	1892 1991 (100a)	1973 1991 (19a)	1955 1991 (37a)	1892 1991 (100a)	1973 1991 (19a)	1955 1991 (37a)	1892 1991 (100a)
Borkum	0,45	0,33	-	0,47	0,16	-	-0,02	0,17	-	0,46	0,24	-
Emden	0,44	0,43	-	0,19	-0,22	-	0,25	0,65	-	0,31	0,11	-
Norderney	0,09	0,27	-	0,33	0,05	-	-0,24	0,22	-	0,21	0,16	-
Wilhelmshaven	0,35	0,27	0,27	0,31	-0,01	0,01	0,04	0,28	0,26	0,33	0,13	0,15
Bremerhaven	0,17	0,24	0,24	0,25	-0,39	-0,18	-0,03	0,65	0,42	0,21	-0,07	0,03
LT Alte Weser	0,33	0,38	-	0,47	0,14	-	-0,11	0,25	-	0,40	0,26	-
Cuxhaven	0,32	0,34	0,25	0,16	-0,10	0,13	0,17	0,44	0,12	0,23	0,12	0,19
Helgoland	0,37	0,23	-	0,40	0,02	-	-0,03	0,20	-	0,39	0,13	-
Büsum	0,51	0,47	0,19	0,84	0,36	-	-0,33	0,11	-	0,68	0,41	-
Husum	0,62	0,56	0,31	0,68	0,06	-	-0,37	0,41	-	0,65	0,31	-
Wittdün	0,43	0,46	-	0,50	0,01	-	-0,07	0,44	-	0,47	0,23	-
Dagebüll	0,74	0,60	0,29	0,48	-0,17	-	0,42	0,81	-	0,61	0,21	-
List	0,42	0,32	-	0,37	0,04	-	0,05	0,28	-	0,39	0,18	-
Mittelwert	0,40	0,38	0,26	0,42	0,0	0,01	-0,02	0,35	0,27	0,43	0,19	0,13

Trendrechnungen über den Zeitraum von 1973 bis 1991 durchgeführt. Dies entspricht der Periode der Nodaltide, so daß die Trendrechnungen von diesem Effekt nicht beeinflusst werden. Auch die längeren Zeiträume entsprechen etwa einem Vielfachen von 18,6 Jahren.

Weitere Trends wurden über 37 Jahre (1955 bis 1991) und 100 Jahre (1892 bis 1991) entsprechend den vorhandenen Datenreihen berechnet. Der Vertrauensbereich beträgt – auf einem Signifikanzniveau von 99 % – für die aus den Jahresmittelwerten der Wasserstandszeitreihen der verschiedenen Pegel berechneten Trendgeraden ± 2 cm.

In Tabelle 6 ist nicht nur die zeitliche Variabilität der Trends zu erkennen, sie zeigt auch die unterschiedliche Entwicklung an den einzelnen Pegelstandorten. Beim MThw ist eine deutliche Zunahme der positiven Trends innerhalb der kürzeren Zeiträume zu erkennen. Insbesondere die Auswertungen über die letzten 19 Jahre ergeben an einigen Pegeln Anstiegsraten des MThw, die sich gegenüber denen der längeren Zeiträume von 37 und 100 Jahren zum Teil verdoppelt haben. Einschränkend ist jedoch zu bemerken, daß kurzfristige Fluktuationen innerhalb der Zeitreihen bei der Betrachtung 19jähriger Zeiträume relativ starke Auswirkungen auf den Trend haben. Dies kann auch anhand der Ergebnisse für Berechnungen mit 25jährigen Zeitfenstern der Zeitreihen festgestellt werden (JENSEN et al., 1988). Hier sind z. B. für das MThw des Pegels Cuxhaven ähnlich starke Schwankungen Anfang dieses Jahrhunderts zu verzeichnen (vgl. LOHRBERG, 1989).

Berechnungen für das MTnw über 37 Jahre ergeben überwiegend negative Trends, d. h., innerhalb dieses Zeitraums ist im Mittel ein Absinken des Tideniedrigwassers zu verzeichnen. Ähnlich wie beim MThw zeigen die Trends über die letzten 19 Jahre einen Anstieg der MTnw, so daß an fast allen Pegeln auch für das MTnw die Trends für diesen Zeitraum positiv sind. Da der mittlere Tidehub aus der Differenz von MThw und MTnw gebildet wird, haben Trendberechnungen für diesen Parameter die entsprechenden Merkmale wie die Trends für MThw und MTnw. Bei den Trends des MThb sind jedoch, insbesondere innerhalb der letzten 19 Jahre, räumliche Unterschiede festzustellen. So sind die mittleren Anstiege des MThb für die Pegel an den Mündungen der Tideflüsse (Ems, Weser und Elbe) erheblich größer als die der anderen Pegel (vgl. JENSEN und SCHÖNFELD, 1990; SCHÖNFELD und JENSEN, 1991). Das $MT\frac{1}{2}w$ berechnet sich als arithmetischer Mittelwert aus dem MThw und MTnw. Dementsprechend ergeben sich für den Zeitraum der 19 Jahre bis 1991 auffällig hohe $MT\frac{1}{2}w$ -Trends; für die Pegel Büsum und Dagebüll ergeben sich Werte von bis zu 0,68 cm/Jahr. Neben den linearen Trends der einzelnen Pegel sind in der unteren Zeile der Tabelle 6 die Mittelwerte der untersuchten Pegelstandorte für die jeweiligen Auswertzeitreihen aufgeführt, ohne die Qualität bzw. Vertrauenswürdigkeit der einzelnen Pegel für die Mittelwertbildung zu berücksichtigen. Für den Zeitraum der 100 Jahre bis 1991 ergibt sich als Mittelwert für die Pegel in der Deutschen Bucht der für das MThw erwartete Säkularanstieg von 26 cm/100 Jahre; für das MTnw ergibt sich keine signifikante Änderung. Der Tidehub hat sich in dieser Zeit um 19 cm/100 Jahre vergrößert und das $MT\frac{1}{2}w$, als Approximation für den Mean Sea Level (MSL), ein Wert von 17 cm/100 Jahre. Über den Zeitraum einer Nodaltide, d. h. der 19 Jahre bis 1991, ergibt sich für das MThw und MTnw ein Anstieg von 0,4 cm/100 Jahre (40 cm/100 Jahre), für den MThb ergibt sich dementsprechend keine signifikante Änderung und für das $MT\frac{1}{2}w$ als Näherung für den MSL ein Anstieg von 0,4 cm/Jahr (40 cm/Jahre) (vgl. auch SIEFERT und LASSEN, 1985; LASSEN, 1989).

In Abb. 14 und 15 sind die Zeitreihen der Jahresmittelwerte des Tidehoch- und Tideniedrigwassers aller 13 Pegel als Abweichung vom jeweiligen Mittelwert über den Zeitraum von 1953 bis 1991 dargestellt. Zusätzlich sind die Regressionsgeraden mit den diesem Auswertzeitraum zugeordneten Trends in cm/Jahr angegeben.

Die Darstellung der MThw und MTnw zeigen für den Zeitraum der letzten 20 Jahre ein

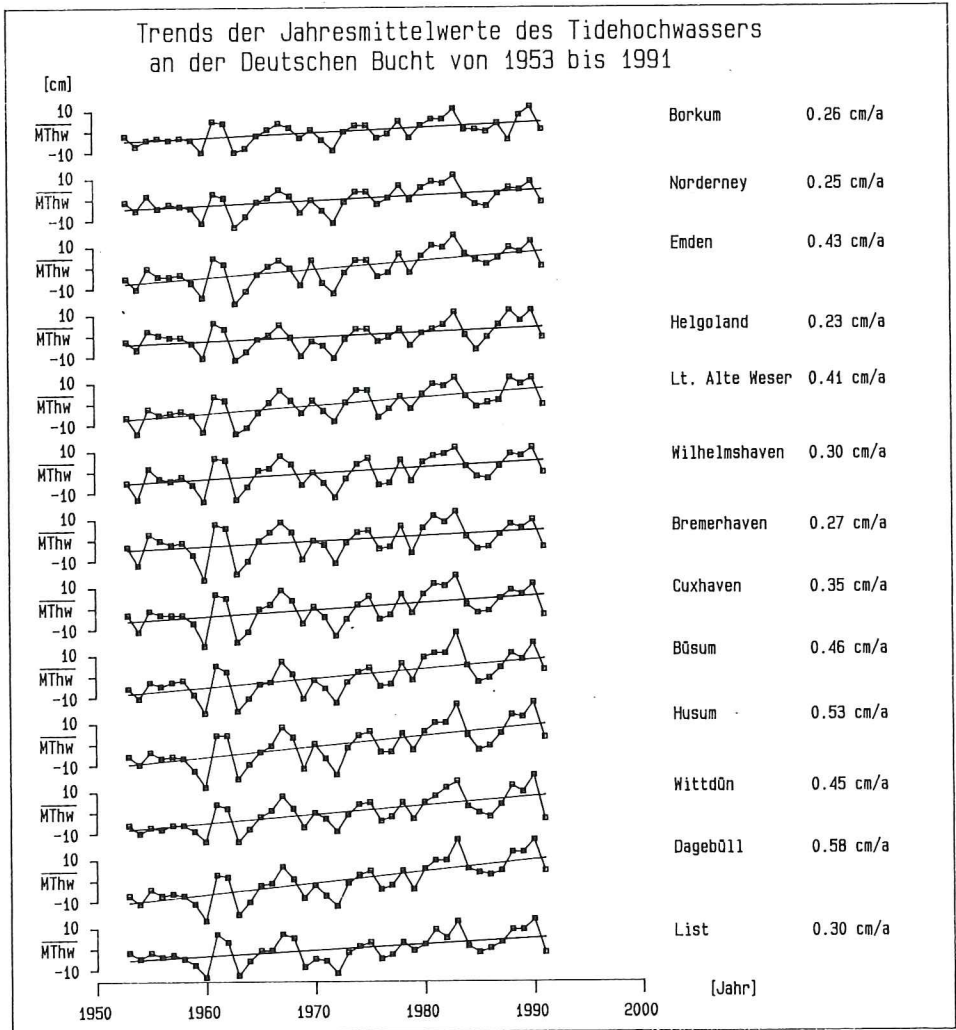


Abb. 14: Jahreswerte der MTHw als Abweichung vom jeweiligen Mittelwert und lineare Trends der Zeitreihe 1953 bis 1991

sehr gleichsinniges Verhalten. Auffällig sind die ausgesprochen niedrigen MTHw- und MTnw-Werte im Jahr 1991. Der Wertevorrat der Ausgleichsfunktionen der MTHw-Zeitreihen reicht von 0,23 cm/Jahr am Pegel Helgoland bis zu 0,58 cm/Jahr am Pegel Dagebüll. Die entsprechende Bandbreite für die MTnw-Zeitreihen reicht von -0,37 cm/Jahr am Pegel Bremerhaven bis 0,31 cm/Jahr am Pegel Büsum, wobei der MTnw-Verlauf am Pegel Büsum als gestört zu betrachten ist (vgl. MÜGGE und JENSEN, 1991).

Im folgenden sollen die zeitgleichen Veränderungen in den Zeitreihen der Thw und Tnw in den Häufigkeitsverteilungen nach Abb. 10 und 11 bzw. die Ergebnisse nach Tabelle 6 näher analysiert werden. Dazu werden Trendberechnungen der Zeitreihen ausgewählter Quantile für die einzelnen Pegel durchgeführt. Abb. 16 zeigt schematisch am Beispiel einer Thw-Häufigkeitsverteilung mit Dichtefunktion (oben) und Verteilungsfunktion (unten) die folgen-

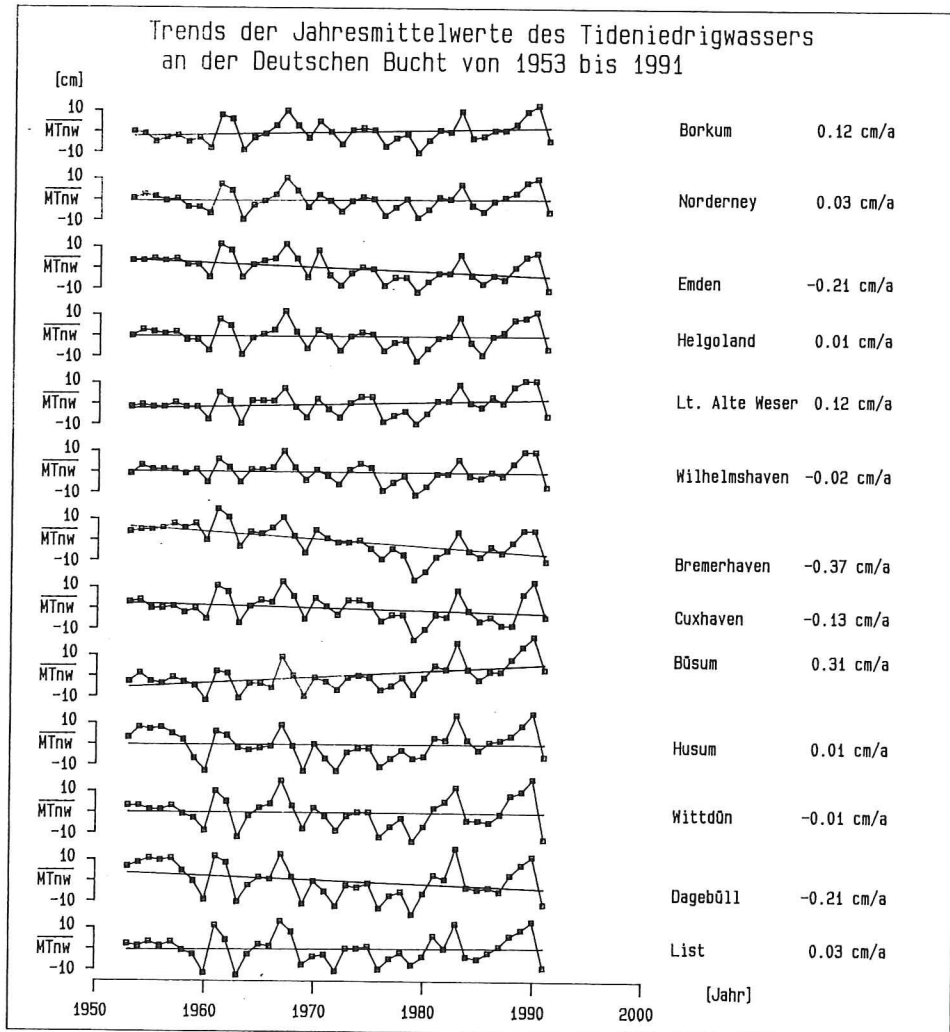


Abb. 15: Jahreswerte der MTnw als Abweichung vom jeweiligen Mittelwert und lineare Trends der Zeitreihe 1953 bis 1991

den statistischen Parameter: Modalwert, Medianwert (50%-Quantil), arithmetischer Mittelwert und das 90%-Quantil. Das Thw_{99} -Quantil repräsentiert den Wert der von 99% aller Thw, in dem jeweiligen Jahr, unterschritten wird; dementsprechend ist das Tnw_{50} -Quantil der Wert, der in dem jeweiligen Jahr von 50% der Tnw unter- bzw. überschritten wird (entspricht ungefähr dem arithmetischen Mittelwert).

In Abb. 17 sind am Beispiel des Pegels List für die Zeitreihen der Thw_{50} -, Thw_{90} -, Thw_{99} -Quantile und der HThw (Jahreshöchstwerte) von 1952 bis 1987 die einzelnen Trendfunktionen mit der Angabe der Veränderung in cm/Jahr innerhalb des Auswertezitraumes und in Abb. 18 die entsprechenden Trendfunktionen für das Tnw (Tnw_{50} , Tnw_5 , Tnw_1 und $NTnw$) dargestellt.

Abb. 17 zeigt, ausgehend von einem Trend von 0,21 cm/Jahr für das Thw_{50} , eine

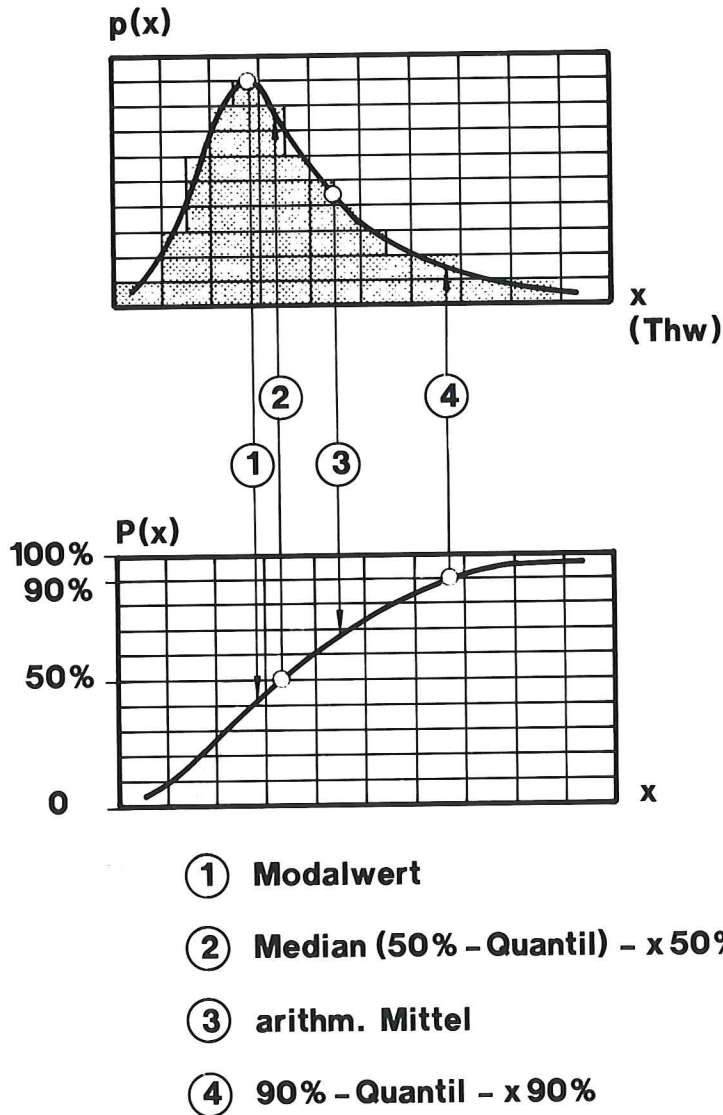


Abb. 16: Schematische Darstellung der Dichte- und Verteilungsfunktion mit den statistischen Parametern

Verstärkung des Trends über 0,42 cm/Jahr für das Thw_{95} bzw. 0,54 cm/Jahr für das Thw_{99} auf 0,86 cm/Jahr für das HThw . D. h., je seltener das Ereignis, desto stärker ist die Veränderung in der selektierten Zeitreihe. Allerdings ist anzumerken, daß in dem ohnehin kurzen Auswertzeitraum von 36 Jahren bei der HThw -Zeitreihe nur noch ein Wert pro Jahr enthalten ist. Für die Tnw -Quantile des Pegels List ergibt sich ein entsprechendes Bild; der negative Trend von $-0,14$ cm/Jahr für das Tnw_{50} verstärkt sich über $-0,30$ cm/Jahr für das Tnw_5 und Tnw_1 auf $-0,39$ cm/Jahr für das NTnw .

In Tabelle 7 sind entsprechend Abb. 17 und 18 Auswertungen für alle Pegel über den Auswertzeitraum von 1954 bis 1987 zusammengestellt. Danach kann festgestellt werden, daß

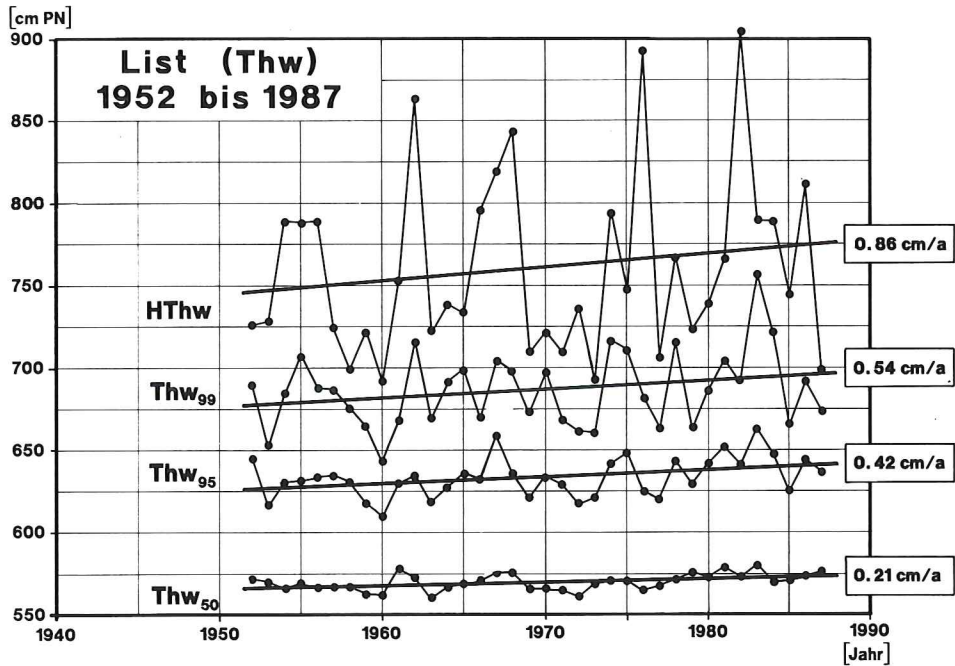


Abb. 17: Trendfunktionen einzelner Thw-Quantile des Pegels List von 1952 bis 1987

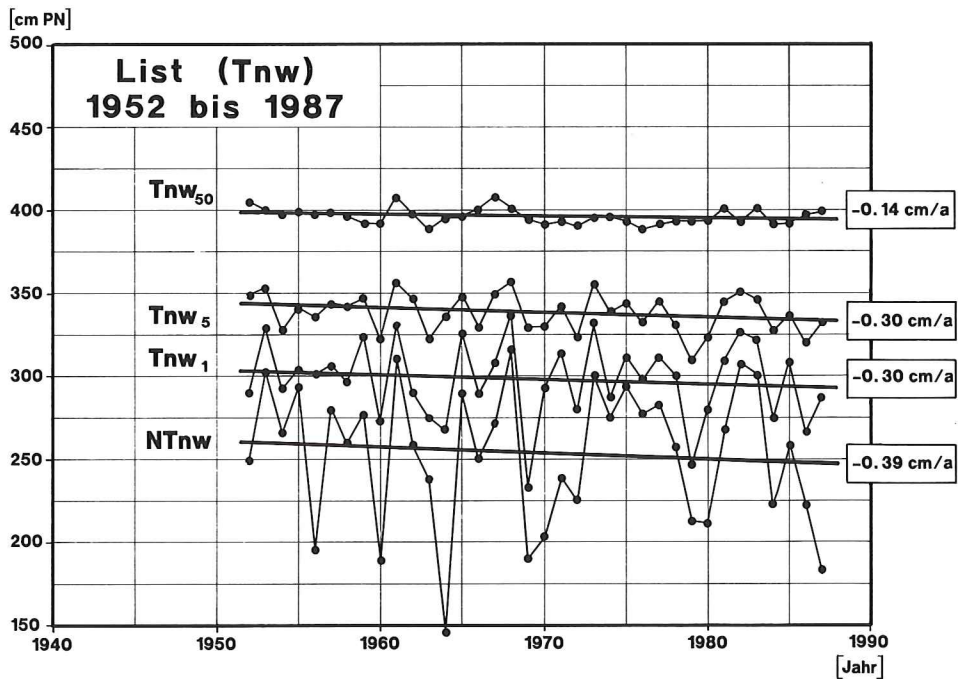


Abb. 18: Trendfunktionen einzelner Tnw-Quantile des Pegels List von 1952 bis 1987

Tabelle 7. Trends der Regressionsgeraden für Thw- und Tnw-Quantile der einzelnen Pegel der Zeitreihe von 1954 bis 1987

	Thw-Trend [cm/a]			Tnw-Trend [cm/a]		
	Thw 99 %	Thw 95 %	Thw 50 %	Tnw 50 %	Tnw 0,5 %	Tnw 0,1 %
Borkum	0,46	0,42	0,28	0,05	-0,10	0,00
Emden	0,81	0,52	0,42	-0,30	-0,54	-0,48
Norderney	0,44	0,43	0,26	-0,06	-0,18	-0,09
Wilhelmshaven	0,46	0,37	0,28	-0,14	-0,16	-0,14
LT Alte Weser	0,69	0,71	0,38	0,04	-0,12	-0,17
Cuxhaven	0,44	0,64	0,36	-0,27	-0,44	-0,36
Helgoland	0,23	0,39	0,12	-0,12	-0,26	-0,21
Büsum	0,49	0,65	0,44	0,14	0,09	-0,15
Husum	0,58	0,81	0,47	-0,10	-0,34	-0,50
Wittdün	0,62	0,71	0,43	-0,17	-0,25	-0,23
Dagebüll	0,76	0,77	0,50	-0,35	-0,76	1,06
List	0,48	0,47	0,26	-0,10	-0,22	-0,23

die stärker meteorologisch beeinflussten Scheitelwerte der Thw und Tnw einen stärkeren Trend aufweisen als die zugehörigen Mittelwerte; und zwar derart, daß die hohen Thw-Werte einen stärkeren positiven Trend und die niedrigeren Tnw-Werte einen stärkeren negativen Trend beinhalten.

Daraus kann geschlossen werden, daß nicht nur die Tidewasserstände zeitliche Veränderungen aufweisen, sondern auch die meteorologischen Randbedingungen, die für extreme Niedrig- bzw. Hochwasserstände (Sturmflut-Wasserstände) verantwortlich sind.

3.3 Analyse der Tideeintrittszeiten

Die Gezeiten in der Nordsee sind hauptsächlich bestimmt durch die halbtägige M_2 -Gezeit. Die Gezeitenwelle aus dem Atlantik durchläuft die Nordsee entgegen dem Uhrzeigersinn zunächst entlang der schottischen und englischen Ostküste südwärts bis in die Deutsche Bucht und verläßt die Nordsee entlang der norwegischen Küste. Daher treten die Thw und Tnw an den einzelnen Pegelstandorten in einer bestimmten zeitlichen Abfolge auf. Änderungen in der Gezeitendynamik bewirken neben Wasserstandsänderungen auf diese Weise auch Änderungen der Eintrittszeiten von Hoch- und Niedrigwasser an den einzelnen Pegelstandorten.

Obwohl die Gezeit in der Nordsee nicht direkt durch das astronomische Gezeitenpotential bestimmt wird, – die Gezeit in der Nordsee ist als Mitschwinggezeit abhängig von der Tidewelle aus dem Atlantischen Ozean – besteht eine Relation zwischen der Position des Mondes und der Eintrittszeit von Thw und Tnw. Daher wurde für die folgenden Betrachtungen der Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian in Greenwich als Referenzzeit gewählt. Diese Referenzzeit ist nur von astronomischen Faktoren abhängig. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Veränderungen der Zeitdauer zwischen dem Eintreten von Thw und Tnw an den Pegeln in der Deutschen Bucht und dem Monddurchgang durch den Nullmeridian. Diese Daten werden nicht durch Änderungen der Pegelnullpunkte bzw. Sackungen usw. beeinflusst. Die Eintrittszeitdifferenzen wurden auf der Basis von Tageswerten ermittelt. Für die Berechnung der Trends und die graphische Darstellung wurden Jahresmittelwerte herangezogen.

Für die Trendberechnungen wurde wieder für alle Pegel der Zeitraum von 1954 bis 1987 gewählt. In Abb. 19 und Abb. 20 ist die Entwicklung der Eintrittszeitdifferenzen für den Eintritt von Thw und Tnw als Abweichung vom Mittelwert dargestellt.

Die Mittelwerte über den Gesamtzeitraum und die linearen Trends sowie die absoluten Veränderungen innerhalb der 34 Jahre finden sich in Tabelle 8 und 9.

An fast allen Pegeln ergeben sich negative Trends, d.h., die Thw und Tnw treten, bezogen auf den Monddurchgang in Greenwich, früher ein. Ausnahmen bilden hier die Pegel Borkum und Lt. Alte Weser. An diesen beiden Pegeln haben jedoch Standortverlegungen stattgefunden, so daß hier jeweils zwei Teilzeitreihen betrachtet und aneinandergesetzt wurden. Eine Anpassung und Verbindung der Teilzeitreihen konnte nur bei den Wasserständen vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 2). Die Umstellung in den Pegelzeitreihen erfolgte für den Pegel Borkum mit dem Abflußjahr 1964 und für den Pegel Lt. Alte Weser/Roter Sand

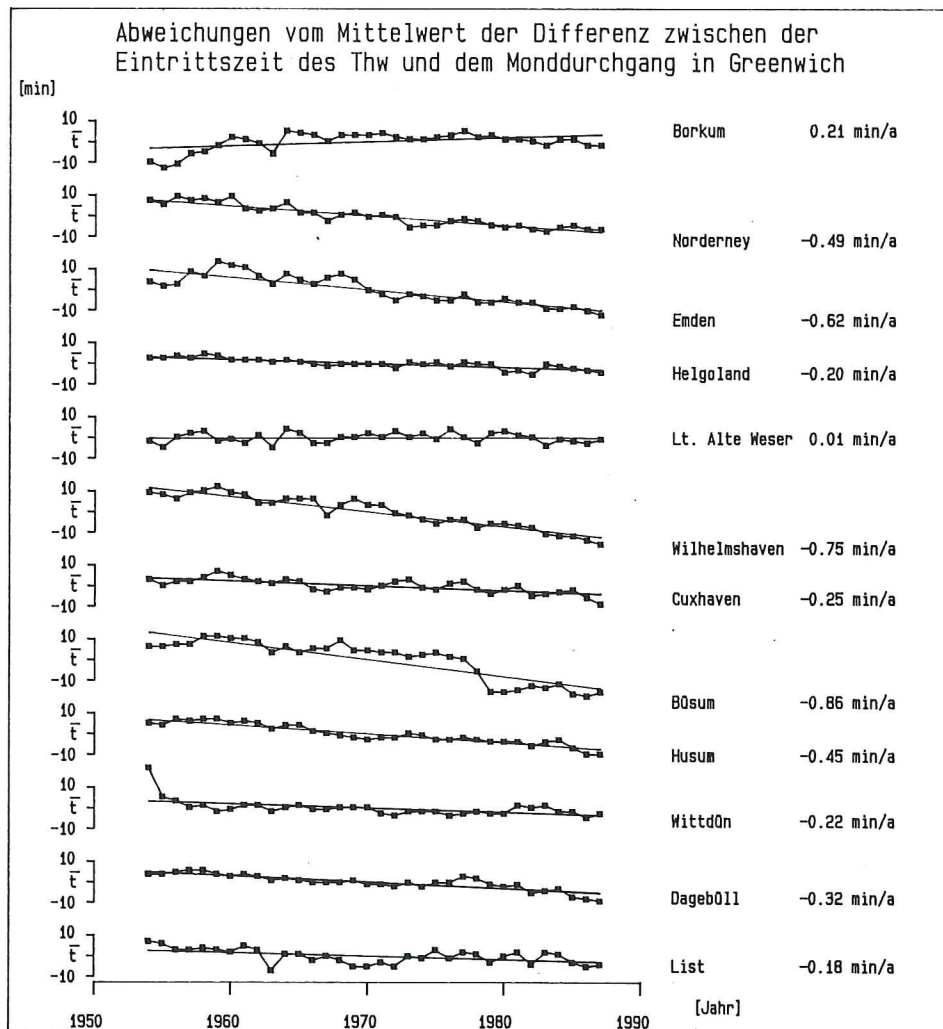


Abb. 19: Jahreswerte der Eintrittszeitdifferenzen des Thw bezogen auf den Mittelwert der Zeitreihen von 1954 bis 1987 und lineare Trends

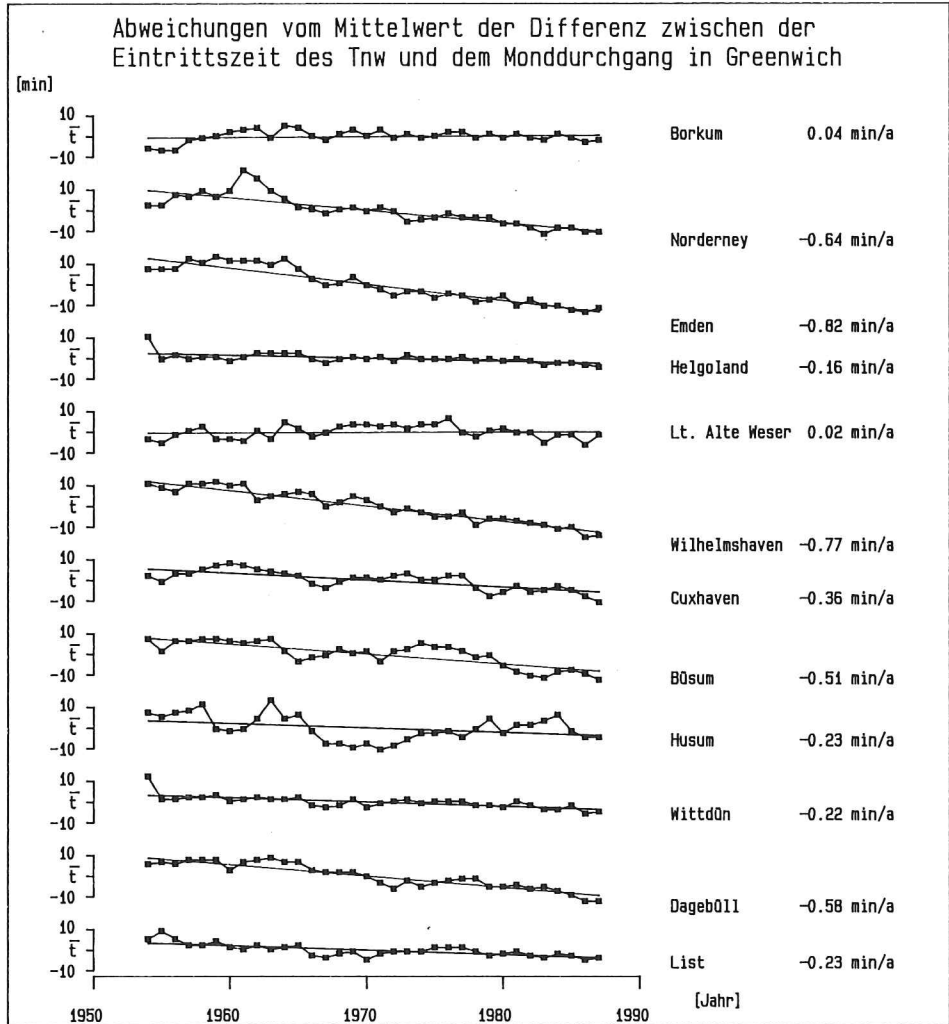


Abb. 20: Jahreswerte der Eintrittzeitdifferenzen des Tnw bezogen auf den Mittelwert der Zeitreihen von 1954 bis 1987 und lineare Trends

mit dem Abflußjahr 1965. Trendrechnungen, die zu diesen Zeitpunkten beginnen, ergeben am Pegel Borkum ab 1964 für den Eintritt des Thw $-0,19$ min/Jahr und für das Tnw $-0,17$ min/Jahr, am Pegel Lt. Roter Sand (ab 1965) betragen die Trends $-0,07$ min/Jahr (Thw) und $-0,24$ min/Jahr (Tnw). Die Eintrittzeitdifferenzen haben sich also auch an diesen beiden Pegeln verkürzt.

Die Entwicklung der absoluten Eintrittzeitdifferenzen für einige ausgewählte Pegel sind in Abb. 21, 22 und 23 dargestellt.

In den Abb. 21, 22 und 23 ist jeweils ein Küstenpegel (bzw. ein Pegel in einem Tideästuar) einem küstenfernen Pegel (Inselpegel) gegenübergestellt. Die Unterschiede der Eintrittzeitdifferenzen ergeben die Laufzeit der Tidewelle in dem betreffenden Ästuar. Deutlich ist eine Verkürzung der mittleren Laufzeit zu erkennen, d. h., die Fortschrittsge-

Tabelle 8. Mittelwerte und lineare Trends der Eintrittszeitdifferenzen der Thw sowie deren Veränderung zwischen 1954 und 1987

Pegel	Thw Eintrittszeitdifferenz von 1954 bis 1987		
	Mittelwert [min]	Trend [min/a]	Veränderung in 34 Jahren [min]
Borkum	587	0,21	*)
Norderney	613	-0,49	-17
Helgoland	637	-0,20	- 7
LT Alte Weser	653	0,01	*)
Emden	678	-0,62	-21
Büsum	701	-0,86	-30
Wilhelmshaven	711	-0,75	-26
Cuxhaven	716	-0,25	- 9
Wittdün	734	-0,22	- 7
Husum	764	-0,45	-15
Dagebüll	783	-0,32	-11
List	802	-0,18	- 6

*) Pegelstandort verlegt, siehe Text

Tabelle 9. Mittelwerte und lineare Trends der Eintrittszeitdifferenzen der Tnw sowie deren Veränderung zwischen 1954 und 1987

Pegel	Tnw Eintrittszeitdifferenz von 1954 bis 1987		
	Mittelwert [min]	Trend [min/a]	Veränderung in 34 Jahren [min]
Borkum	222	0,04	*)
Norderney	253	-0,64	-22
Helgoland	297	-0,16	- 5
LT Alte Weser	303	0,02	*)
Emden	314	-0,82	-28
Büsum	321	-0,51	-17
Wilhelmshaven	334	-0,77	-26
Cuxhaven	378	-0,36	-12
Wittdün	388	-0,22	- 7
Husum	406	-0,23	- 8
Dagebüll	444	-0,58	-20
List	425	-0,23	- 8

*) Pegelstandort verlegt, siehe Text

schwindigkeit der Tidewelle im Emsästuar und in der Außenjade hat sich vergrößert. Dies ist vermutlich auf Ausbaumaßnahmen in der Ems und in der Außenjade zurückzuführen. Im Gegensatz dazu hat sich die mittlere Laufzeit zwischen Helgoland und Cuxhaven (Abb. 23), vermutlich aufgrund der größeren Entfernung zwischen den Pegeln, in weit geringerem Maße verkürzt.

Weitere Besonderheiten in den Zeitreihen der Eintrittszeitdifferenzen können am Pegel Büsum festgestellt werden (vgl. Abschnitt 2). Der starke Knick in der Zeitreihe Ende der siebziger Jahre fällt genau mit der Eindeichung der Meldorfer Bucht zusammen, so daß

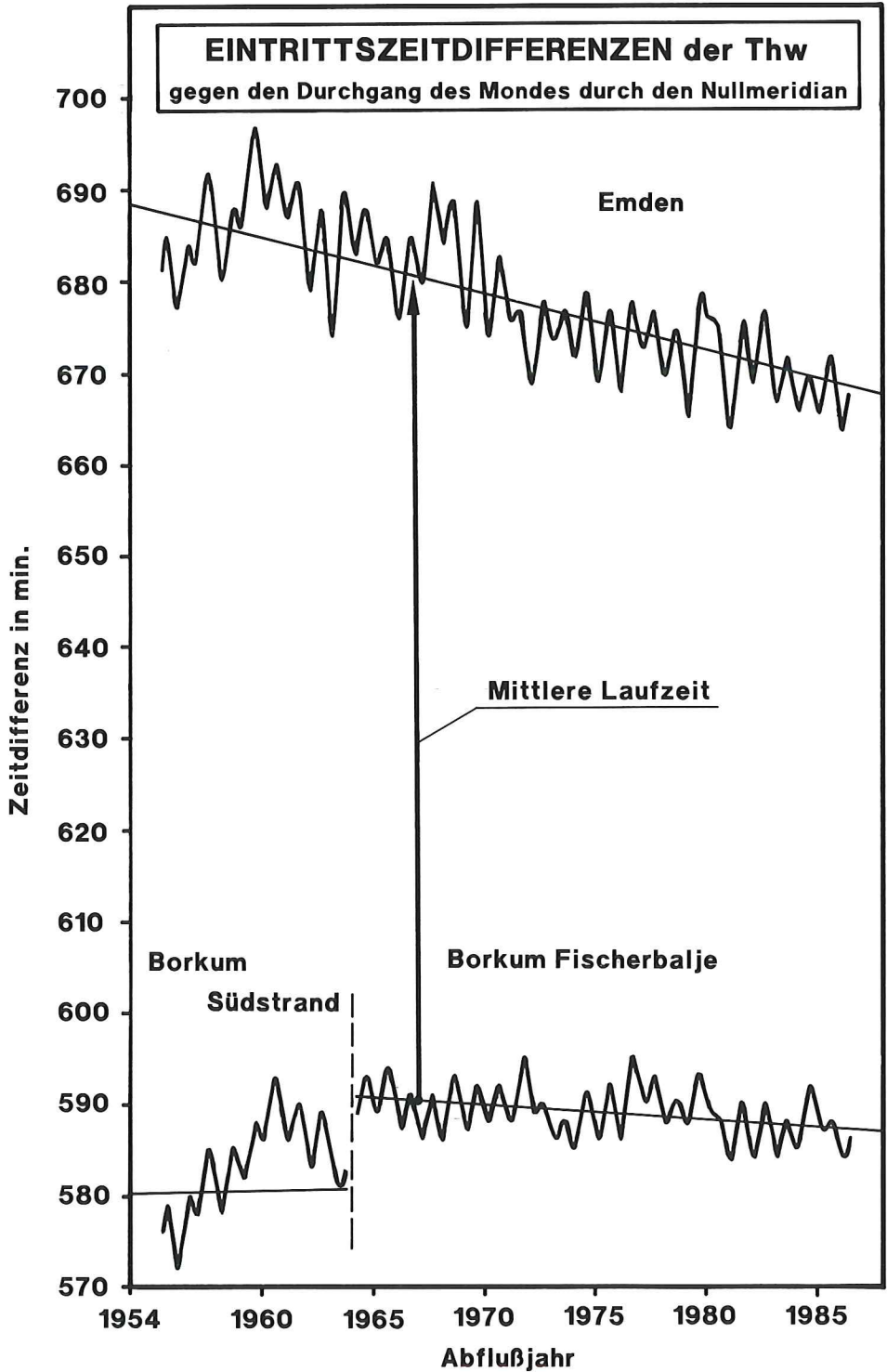


Abb. 21: Eintrittszeitdifferenzen der Thw an den Pegeln Emden und Borkum

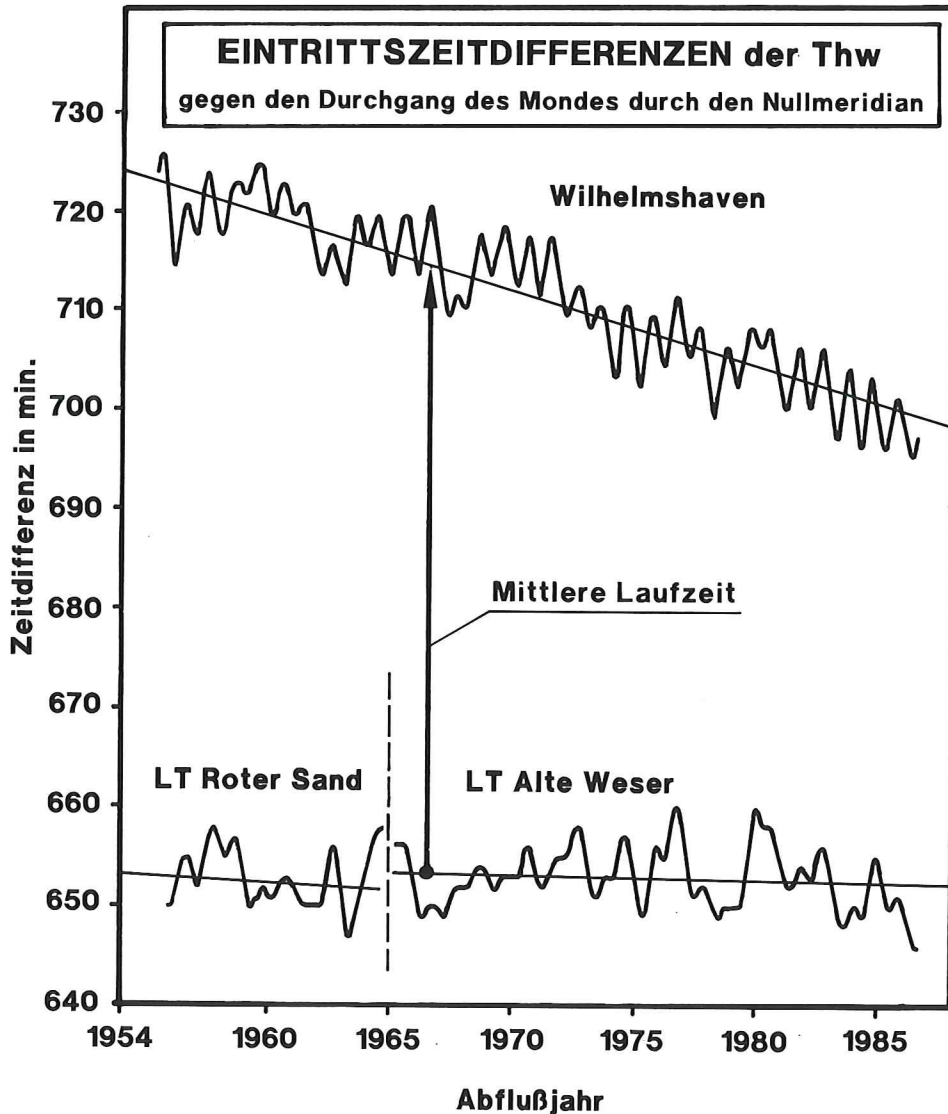


Abb. 22: Eintrittszeitdifferenzen der Thw an den Pegeln Wilhelmshaven und Lt. Alte Weser

festgestellt werden kann, daß aufgrund dieser Baumaßnahme die Thw am Pegel Büsum ca. 20 Minuten früher eintreten als zuvor.

Aussagen über Veränderungen der Laufzeit der Tidewelle innerhalb der Deutschen Bucht zwischen den einzelnen Pegelstandorten sind sehr stark abhängig von der Wahl des Bezugspiegels. Wie die Untersuchungen der Eintrittszeitdifferenzen zum Monddurchgang in Greenwich zeigen, weisen diese an den einzelnen Pegelstandorten verschiedene Trends auf.

Die Frage, ob sich die Tidewelle innerhalb der Nordsee aufgrund einer Vergrößerung der relativen Wassertiefe beschleunigt hat oder ob sie vom Atlantik kommend früher die Nordsee erreicht, kann nur durch Laufzeituntersuchungen unter Einbeziehung niederländischer, englischer und schottischer Pegeldata geklärt werden.

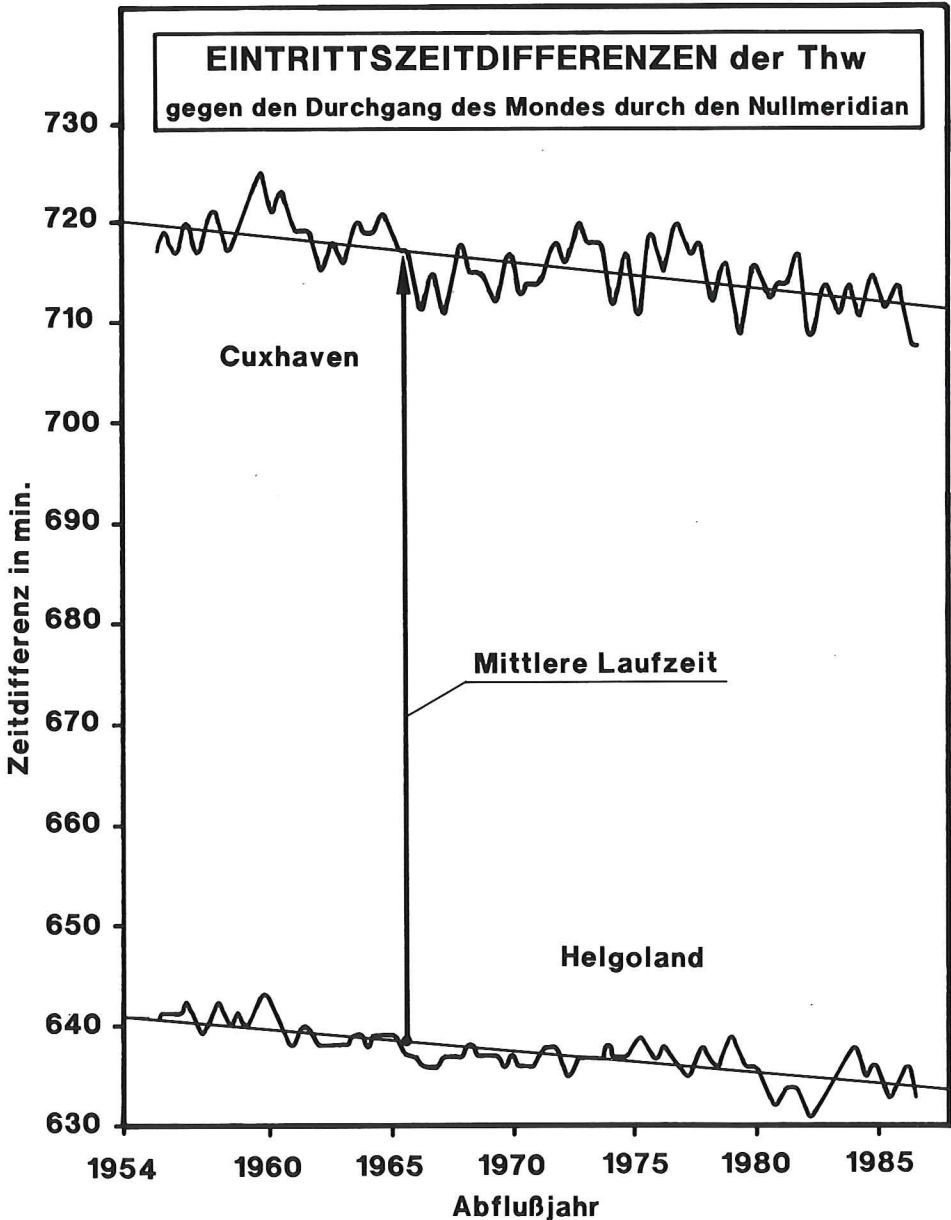


Abb. 23: Eintrittszeitdifferenzen der Thw an den Pegeln Cuxhaven und Helgoland

3.4 Hauptkomponentenanalyse

Die untersuchten Wasserstandszeitreihen geben zunächst die Entwicklung an den einzelnen Pegelstandorten an. Aussagen über die allgemeine Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht sollten jedoch anhand mehrerer Pegelzeitreihen getroffen werden. Die

gemeinsamen Merkmale z. B. Trends der Pegel können mit der Hauptkomponentenanalyse näher untersucht werden.

Weiterhin können die Größe des gemeinsamen Signals, gemessen an der Gesamtvarianz, und die Anteile der einzelnen Zeitreihen am gemeinsamen Signal ermittelt werden. Die Hauptkomponenten selbst können als Zeitreihen angesehen und entsprechend ausgewertet werden. Dies kann, wie im vorliegenden Fall, zu einer erheblichen Verminderung des Untersuchungsaufwands führen.

Die Hauptkomponentenanalyse (Faktorenanalyse, Eigenanalyse oder Analyse empirischer Orthogonalfunktionen) ist eine „statistische Methode zur Ableitung hypothetischer Größen aus einer Menge beobachteter Variablen“ (ÜBERLA, 1971). Sie entstand am Anfang dieses Jahrhunderts und wurde vornehmlich in der Psychologie und in den Sozialwissenschaften angewandt. Seit Ende der 50er Jahre findet diese Methode zunehmend Einsatz auch in den Naturwissenschaften wie Meteorologie (LORENZ, 1959; SPETH und DETLEFSEN, 1979), Geologie (AUBREY, 1979) und Ozeanographie (PREISSENDORFER, 1988). Untersuchungen von Wasserstandszeitreihen mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wurden u. a. von TÖRNEVİK (1977), AUBREY und EMERY (1983), NYBERG (1983) und DE VALK (1988) vorgenommen.

Eine detaillierte Darstellung der Methode und Ergebnisse sind im 2. Zwischenbericht (SCHÖNFELD und JENSEN, 1991) beschrieben.

Wegen der unterschiedlichen Zeiträume, für die lückenlose Wasserstandszeitreihen vorliegen, wurde die Hauptkomponentenanalyse auf drei verschiedene Zeiträume angewandt. In die erste Auswertung wurden alle verfügbaren Pegelzeitreihen miteinbezogen. Da die Wasserstandsdaten des Pegels Helgoland erst seit 1953 vorliegen, beschränkt sich dieser Zeitraum auf die 37 Jahre von 1953 bis 1989. Ein Zeitraum von 54 Jahren (1936 bis 1989) konnte untersucht werden, wobei die Pegel Helgoland und Wittdün nicht in die Analyse mit einbezogen wurden. Schließlich wurde die Hauptkomponentenanalyse noch auf eine lange Zeitreihe von 109 Jahren, beginnend im Jahre 1881, angewandt. Hier wurde nur das MThw der Pegel Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Büsum, Husum und Dagebüll betrachtet (s. Abb. 24).

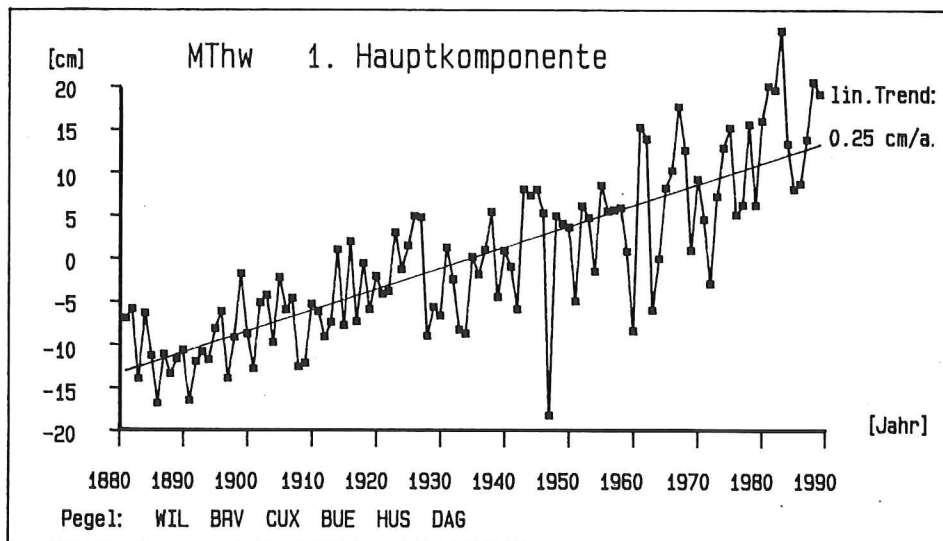


Abb. 24: Zeitreihe der 1. Hauptkomponente des MThw von 6 Pegeln über 109 Jahre (1881 bis 1989)

Die Länge der Untersuchungszeiträume entspricht mit 37, 54 und 109 Jahren in etwa einem Vielfachen von 18,6 Jahren, so daß die durchgeführten Trendberechnungen durch diesen langperiodischen Anteil des astronomischen Gezeitenpotentials (Nodaltide) nicht bzw. nur sehr gering beeinflusst werden.

Bei der Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Zeitreihen von jährlich gemittelten Scheitelwasserständen von 13 Pegeln in der Deutschen Bucht über drei verschiedene Zeiträume entfallen beim MThw mehr als 90 % und beim MTnw ca. 75 % der Gesamtvarianz auf die 1. Hauptkomponente. Dies bedeutet, daß sich lokale Effekte an den einzelnen Pegelstandorten stärker auf das Niedrigwasser als auf das Hochwasser auswirken.

Da der Zeitraum für die Hauptkomponentenanalyse durch die Länge der kürzesten Zeitreihe beschränkt ist, mußte für die Untersuchungen von mehr als 37 Jahren die Anzahl der Pegel verringert werden. Trendrechnungen mit linearer Regression ergeben aufgrund der vorliegenden Daten für die 1. Hauptkomponente des MThw, je nach Untersuchungszeitraum, mittlere Anstiege von 0,25 bis 0,38 cm/a, wobei der stärkste Anstieg in den Jahren nach 1950 zu verzeichnen ist. Die 1. Hauptkomponente des MTnw an der deutschen Nordseeküste sinkt nach diesen Berechnungen im Mittel um 0,06 bis 0,07 cm/a.

3.5 Untersuchungen zu Periodizitäten

Die Höhe der Wasserstände in einem durch Gezeiten dominierten Tidegewässer, wie in der Deutschen Bucht, setzt sich zusammen aus periodischen Schwankungen, einem langfristigen Trend und einem stochastischen Anteil. Zur Untersuchung der periodischen Vorgänge wurde mit Hilfe der Fast-Fourier-Analyse (FFT) eine Transformation der Pegeldatenreihen vom Zeitbereich in den Frequenzbereich durchgeführt (vgl. STEARNS, 1987). Als Ergebnis erhält man ein Spektrum, d. h. die Anteile der einzelnen harmonischen Schwingungen, aus denen sich die Wasserstandsreihe zusammensetzt. Die Energie der einzelnen Frequenzen ist ein Maß für die Amplitude der Schwingung in der Zeitreihe.

Diese Untersuchungen wurden mit den Einzelwert-Zeitreihen der Thw durchgeführt, da nur auf der Basis von Einzelwerten die Analyse von periodischen Vorgängen möglich ist. Die Erfassung der einzelnen Frequenzen ist um so genauer, je größer die Anzahl der Stützstellen gewählt wird. Allerdings muß bei der FFT die Anzahl der Stützstellen 2^n betragen. Die Auflösung des Spektrums nimmt zum hochfrequenten Teil hin zu. Mit der FFT lassen sich lange Perioden bis zu einem Fünftel des untersuchten Zeitraums ausreichend genau bestimmen.

In Abb.25 ist am Beispiel der Thw des Pegels Cuxhaven das durch eine Fourier-Transformation erzeugte Periodenspektrum für die Jahresreihe von 1894 bis 1986 dargestellt.

Auf der Abszisse sind in logarithmischem Maßstab die in Perioden umgerechneten Frequenzen aufgetragen, wobei eine Periode der Anzahl der Tiden pro Schwingung entspricht. Auf der Ordinate ist die zugehörige Amplitude in cm dargestellt. Deutlich erkennt man über einem „Grundrauschen“ einzelne Perioden mit erheblich größeren Amplituden. Die höchste Amplitude und somit auch die größte Energie oberhalb der halbtägigen Hauptmond-tide ist der 14tägigen Ungleichheit (Spring- bzw. Nipptide) zuzuordnen. Daneben hebt sich aber auch die Monats- und die Jahresschwingung (705 Tiden/Jahr) heraus. Diese drei genannten Perioden lassen sich auf die bekannten astronomischen Ursachen zurückführen. Zusätzlich ist bei dem Jahreszyklus noch ein meteorologischer Anteil vorhanden.

Für die vorliegende Untersuchung sind in erster Linie die langperiodischen Vorgänge von Interesse. Als längere, besonders herausragende Perioden sind in Abb.25 die 1jährige, die

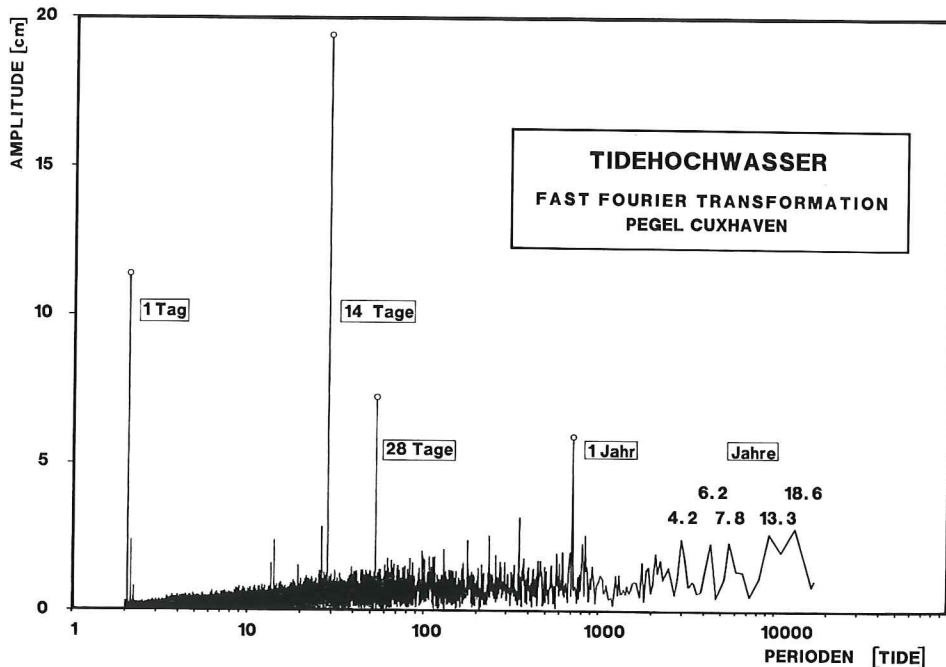


Abb. 25: Periodenspektrum der Thw am Pegel Cuxhaven von 1894 bis 1986

4,2-, 6,2- und 7,8jährige sowie die 13,3- und 18,6jährige Periode markiert. Die Schwingungen mit Perioden zwischen 1 Jahr (bzw. 14 Monaten) und 18,6 Jahren können nicht auf astronomische Ursachen zurückgeführt werden. Es ist anzunehmen, daß sie durch meteorologische und hydrographische Zyklen entstehen.

Einen weiteren Schritt bei der Datenanalyse bildet die Rücktransformation mit Tiefpaßfiltern. Die so gefilterte Datenreihe enthält keine hochfrequenten Anteile mehr, wie z. B. die 14tägige Ungleichheit, die durch ihre hohe Amplitude den Verlauf der Kurven stark überlagert. Die langperiodische Dynamik wird erst durch eine Filterung in der Zeitreihe sichtbar. Die Verwendung von Jahresmittelwerten ist hierzu nicht geeignet.

Ein Beispiel für die Rücktransformation des Thb am Pegel Cuxhaven zeigt Abb. 26. Hier wurden die Schwingungen von $T = 13,3$, $18,6$ und $T \geq 18,6$ Jahre überlagert.

Der daraus resultierende Verlauf enthält ausschließlich langperiodische Anteile $> 13,3$ Jahre. Das Maximum des Tidehubs im Jahr 1982 ist demnach vermutlich auf langperiodische Schwingungen zurückzuführen.

Weitere Untersuchungen mit der Fast-Fourier-Transformation und verschiedenen Filtertechniken sind im Zwischenbericht (JENSEN et al., 1988) und im Abschlußbericht des Projektes ausführlich beschrieben.

3.6 Untersuchungen zur Notaltide

Neben der Analyse von Scheitelwasserständen und Eintrittszeiten ist die Ermittlung von langperiodischen Komponenten zur Beschreibung des Gesamtsignals der einzelnen Wasserstandszeitreihen eine wesentliche Fragestellung zur Beurteilung der Wasserstandsentwicklung. Neben den astronomisch bedingten Gezeiteneinflüssen, wie der einjährigen Tide, dem

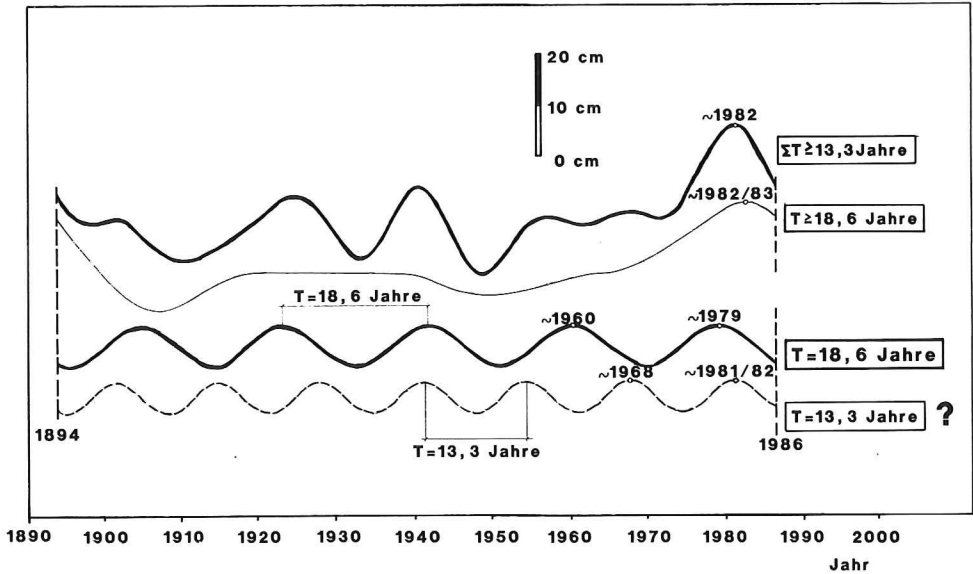


Abb. 26: Überlagerung langperiodischer Schwingungen der Thb am Pegel Cuxhaven von 1894 bis 1986

Chandler-Effekt mit einer Periode von 14 bzw. 12 Monaten und der Nodaltide mit einer Periode von 18,6 Jahren (vgl. z. B. BARTELS, 1952; LISITZIN, 1974) werden auch meteorologische Schwankungen wie z. B. ein etwa 7jähriger meteorologischer Zyklus vermutet.

Die Entwicklung der Tidewasserstände und Tidehübe kann nach DIETRICH (1954) den Wechselwirkungen der Systeme: Ozean mit Mond/Sonne, mit der festen Erde und mit der Atmosphäre zugeordnet werden. Die einzelnen Einflußgrößen, die zu Wasserstandsänderungen führen, können separiert und quantifiziert werden. Eine Trennung dieser Effekte ist jedoch nur unter Berücksichtigung von umfangreichen meteorologischen, hydrographischen und geodätischen Datensätzen möglich.

Ziel dieser Untersuchungen ist die Beschreibung des Gesamtsignals hinsichtlich einer Trennung in die deterministischen und stochastischen Anteile. Bekannt sind die halbtägigen und eintägigen sowie monatlichen Ungleichheiten (Partial-Tiden), die allerdings bei der Verwendung von Jahresmittelwerten keinen Einfluß haben. Bei den folgenden Untersuchungen werden nur langperiodische Komponenten mit Schwankungen bzw. Zyklen von mehr als einem Jahr betrachtet, d. h., alle Partialtiden mit einer Periode bis zu einem Jahr werden nicht mit einbezogen.

Im folgenden werden die Ergebnisse von Untersuchungen zur Beschreibung der Nodaltide hinsichtlich Amplitude und Phase vorgestellt. Die Nodaltide bewirkt periodische Änderungen des astronomischen Gezeitenpotentials mit einer Periode von etwa 18,6 Jahren. Sie entsteht aus der Relativbewegung von Mond und Erde. Die Schnittpunkte (auf- und absteigender Knoten) dieser beiden Bahnebenen bewegen sich mit einer Umlaufzeit von etwa 18,6 Jahren. Die astronomische Ursache der Nodaltide wird in Abb. 27 veranschaulicht.

Die Berechnungen wurden auf der Basis der Monddurchgangszeit durch den Vollkreis bei Greenwich durchgeführt. *) Die maximale monatliche Deklination des Mondes schwankt

*) Die Berechnungen wurden von dem studentischen Mitarbeiter Herrn Chr. Wobbe durchgeführt, wofür ihm herzlich gedankt wird.

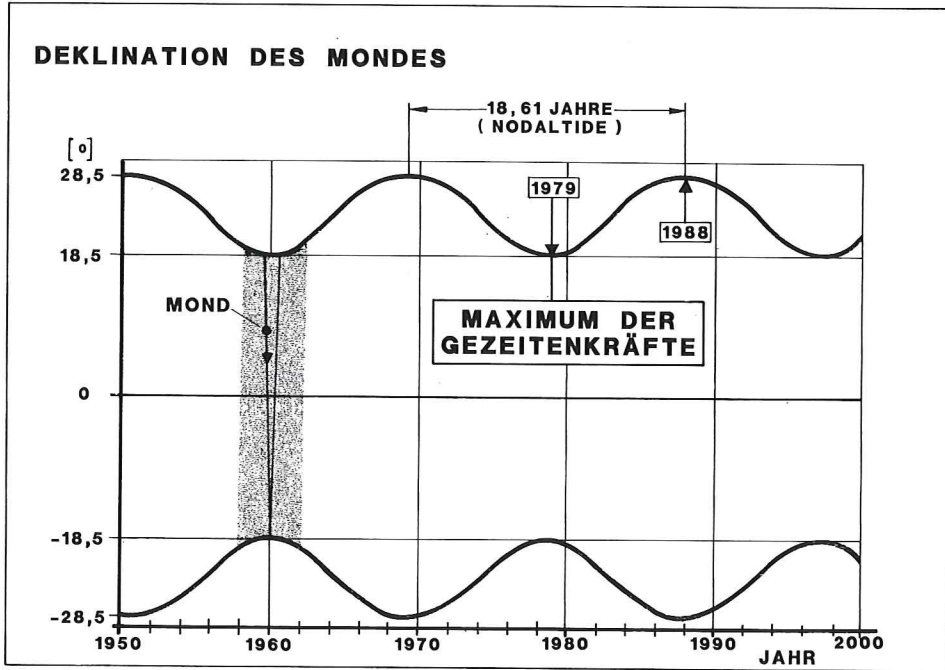


Abb. 27: Schematische Darstellung der Deklination des Mondes

in einem Bereich zwischen $\pm 18,5^\circ$ und $\pm 28,5^\circ$ um den Äquator. Bei der minimalen Auslenkung des Mondes von der Äquatorebene, wie z. B. im Jahre 1979, ergibt sich das Maximum der Gezeitenkräfte für die Nodaltide.

Eine Abschätzung der Größenordnung der Amplitude der Nodaltide kann anhand einer Spektralanalyse ermittelt werden. Bei der Berechnung des Anteils der Nodaltide an den Wasserstandsänderungen konnte allerdings nicht der direkte Weg über eine harmonische Analyse gewählt werden, da für die zu bestimmenden harmonischen Konstanten (Amplitude und Phasenwinkel) für jede Partialtide und jeden Pegelstand stündliche Wasserstandsdaten über einen Zeitraum von mindestens 18,6 Jahren notwendig wären. Diese Datenreihen liegen nicht vor. Deshalb wurden Optimierungsrechnungen zur Ermittlung der Parameter der Nodaltide nach dem Kriterium des mittleren Fehlers auf Grundlage der Jahresmittelwerte durchgeführt. Dabei wurden die MThb-Zeitreihen mit einem linearen Trend und einer Sinusschwingung zur Erfassung der Nodaltide funktional beschrieben.

Die Parameter der Nodaltide (Hub und Phasenverschiebung) wurden mit einem Optimierungsverfahren nach MARQUARDT wie folgt berechnet:

$$f_{MThb} = \underbrace{a + S_T \cdot t}_{\text{linearer Trend}} + \underbrace{H_N/2 \cdot \sin [2 \cdot \pi/T \cdot (t + \varphi)]}_{\text{Anteil der Nodaltide}}$$

mit: f_{MThb} = Ausgleichsfunktion	[cm]	H_N = Hub der Nodaltide	[cm]
a = Absolutwert	[cm]	T = Periode (18,613 Jahre)	[Jahre]
S_T = linearer Trend	[cm/Jahr]	φ = Phasenverschiebung	[Jahre]
t = Zeit	[Jahre]		

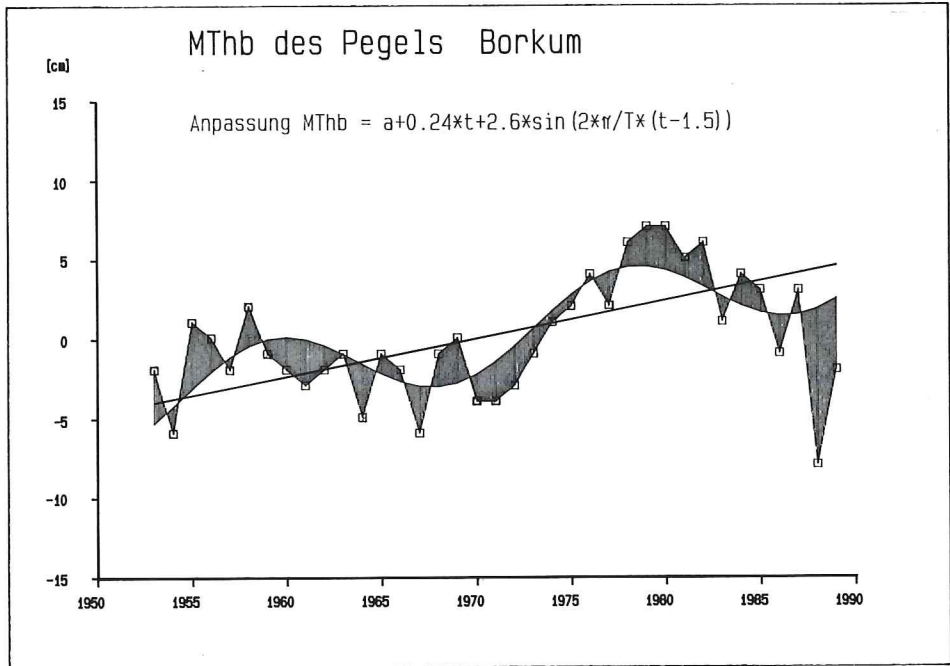


Abb. 28: Ausgleichsfunktion zur Ermittlung des Anteils der Nodaltide an der Zeitreihe des MThb des Pegels Borkum von 1953 bis 1989

Beispielhaft ist in Abb. 28 in erster Näherung diese Ausgleichsfunktion für die MThb-Zeitreihe des Pegels Borkum für die Jahre von 1953 bis 1989 dargestellt.

Die schraffierten Flächen repräsentieren die Fluktuation, die dem linearen Trend und dem Anteil der Nodaltide überlagert sind. Dabei ist festzustellen, daß durch die Berücksichtigung der Nodaltide eine eindeutige Verbesserung der Anpassung an die Originalwerte im Vergleich zur linearen Anpassung erfolgt.

In Abb. 29 und 30 ist die Ausgleichsfunktion nach dem Optimierungsverfahren von MARQUARDT am Beispiel der MThb-Zeitreihen der Pegel Vliissingen (ab 1840) und Helgoland (ab 1909) im Vergleich zu den beobachteten MThb-Werten dargestellt. Nach Berücksichtigung der Nodaltide wird der stochastische Restanteil bei der Beschreibung der MThb-Zeitreihen deutlich reduziert.

Die entsprechenden Untersuchungen für die MThw- und MTnw-Zeitreihen zeigen nach Berücksichtigung der Nodaltide keine eindeutige Verbesserung der Anpassungsgüte. Das Signal der Nodaltide ist in den MThw- und MTnw-Zeitreihen deutlich schwächer und z. T. nicht signifikant nachweisbar. Die Wirkung der Nodaltide zeigt sich in erster Linie in den MThb-Zeitreihen.

Die Ergebnisse der Berechnungen, d. h. der Trend S_T in cm/Jahr, der Hub der Nodaltide H_N in cm und der Zeitpunkt des letzten Maximums sind in Tabelle 10 für die deutschen Nordseepegel von Borkum bis List auf Sylt sowie für den niederländischen Pegel Vliissingen für die MThb-Zeitreihen zusammengefaßt.

Die Bandbreite der Trends der MThb-Zeitreihen ist entsprechend der unterschiedlichen Beobachtungslänge (z. B. Cuxhaven ab 1843 und Helgoland ab 1953 bis 1989) sehr groß. Für Norderney ergibt sich ein Trend von $S_T = 0.10$ cm/Jahr und für Dagebüll von 0,86 cm/Jahr.

Darstellung der MThb-Zeitreihe

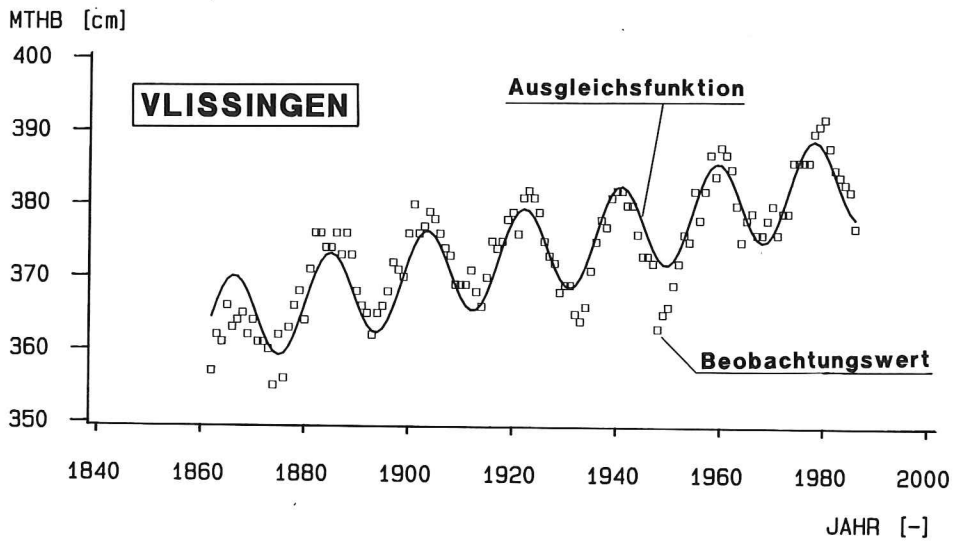


Abb. 29: Darstellung der MThb-Zeitreihe mit Nodaltide und Ausgleichsfunktion für den Pegel Vlissingen

Darstellung der MThb-Zeitreihe

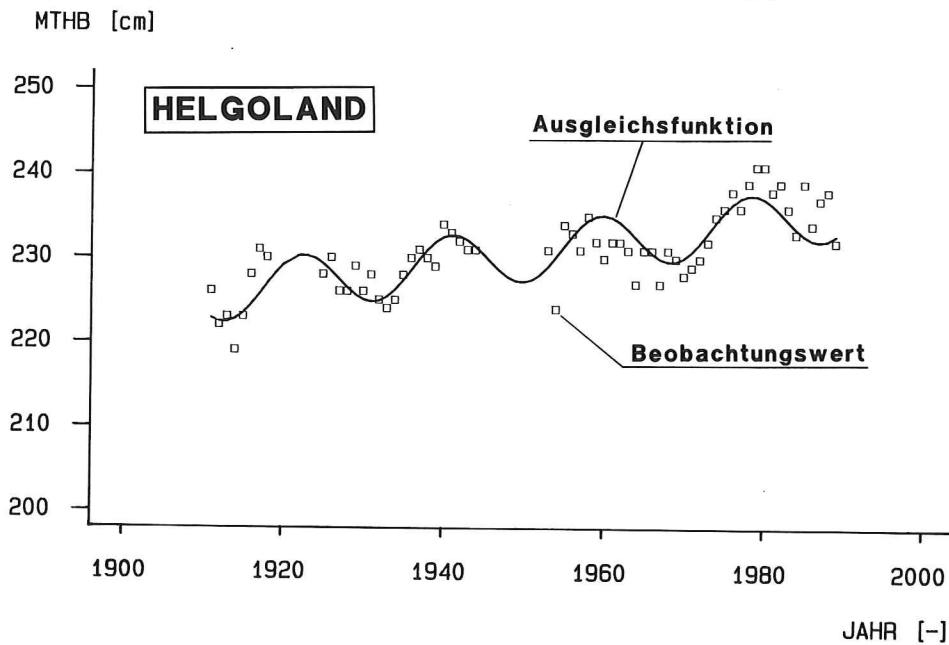


Abb. 30: Darstellung der Mthb-Zeitreihe mit Nodaltide und Ausgleichsfunktion für den Pegel Helgoland

Tabelle 10. Parameter der Ausgleichsfunktion (linearer Trend und Nodaltide)

Pegel	Zeitreihe	Säkular- trend S_T [cm/a]	Hub der Nodaltide H_N [cm]	letzter Maximalwert [-]
[-]	[-]			
Borkum	1931/1989	0,21	8,8	1979
Norderney	1891/1989	0,10	5,0	1978
Helgoland	1953/1989	0,30	6,6	1978
LT Roter Sand/Alte Weser	1901/1989	0,16	7,2	1979
Emden	1901/1989	0,13	5,0	1979
Büsum	1931/1989	0,22	8,8	1979
Wilhelmshaven	1873/1989	0,20	6,6	1978
Bremerhaven	1881/1989	0,37	8,2	1978
Cuxhaven	1843/1989	0,09	6,2	1979
Husum	1906/1989	0,30	3,6	1978
Dagebüll	1936/1989	0,86	8,8	1978
List	1931/1989	0,36	7,2	1978
Vlissingen	1862/1986	0,17	12,4	1978
Mittelwerte (ohne Vliss.)		0,28	7,0	1978

Der jeweils berechnete Hub der Nodaltide zeigt für die untersuchten Standorte eine deutlich geringere Bandbreite; die Extremwerte ergeben sich bei Norderney mit $H_N = 5,0$ cm und bei Borkum, Büsum und Dagebüll mit $H_N = 8,8$ cm. Die Phasenverschiebung bzw. der letzte Maximalwert der gezeitenerregenden Kräfte liegt im Bereich 1978 bis 1979 und zeigt damit eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen nach Abb. 27. Die Mittelwerte (ohne den Pegel Vlissingen) betragen für den Säkularrend $S_T = 0,28$ cm/Jahr, für den Hub $H_N = 7,0$ cm und der letzte Maximalwert ergibt sich für das Jahr 1978.

Für die Pegel in der Deutschen Bucht ergibt sich dementsprechend für den Hub der Nodaltide der MThb-Zeitreihen ein Mittelwert von ca. 7 cm. Für die MThb-Zeitreihen am niederländischen Pegel Vlissingen ergibt sich ein Wert von 12 cm. Aus MThb-Zeitreihen englischer Nordseepegel wurden Werte von mehr als 16 cm ermittelt (WOODWORTH et al., 1990). Durch den Tideverlauf im Nordseebecken, d. h. entlang der britischen Küste zur holländischen Küste und in Richtung Skandinavien entlang der deutschen Küste, wird offensichtlich das Signal der Nodaltide von anderen Einflüssen überlagert.

In Tabelle 11 sind für die Pegel nach Tabelle 10 die Korrelationskoeffizienten r_T als einfaches Maß für die Güte der Anpassungsfunktion zum einen nur für den linearen Trend (Säkularrend S_T) und zum anderen der Korrelationskoeffizient r_{T+HUB} für den linearen Trend und die Nodaltide (Säkularrend S_T und Hub der Nodaltide H_N) zusammengestellt.

Der Korrelationskoeffizient r wurde durch die Berücksichtigung der Nodaltide im Mittel von etwa $r_T = 0,70$ auf $r_{T+HUB} = 0,79$ verbessert. Bei einzelnen Pegeln wird eine deutlich bessere Beschreibung der MThb-Zeitreihen durch die Nodaltide erzielt; z. B. bei Borkum von $r_T = 0,65$ auf $r_{T+HUB} = 0,86$. Für Husum ergibt sich nur eine geringfügige Verbesserung von $r_T = 0,81$ auf $r_{T+HUB} = 0,82$.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Wirkung der Nodaltide zeigt sich deutlich in den Tidehub-Zeitreihen; für das Tideniedrigwasser und Tidehochwasser ist das Signal der Nodaltide wesentlich schwächer. Der Mittelwert für den Gesamthub der Nodaltide beträgt für die Pegel in der deutschen Bucht

Tabelle 11. Korrelationskoeffizienten der linearen Ausgleichsfunktion sowie der linearen Ausgleichsfunktion und der Nodal tide

Pegel	Zeitreihe	Lin. Trend		Lin. Trend und Nodal tide		
		Säkular- trend	Korrel.- koeff.	Säkular- trend	Hub der Nodal tide	Korrel.- koeff.
		S_T [cm/a]	r [-]	S_T [cm/a]	H_N [cm]	r [-]
[-]	[-]					
Borkum	1931/1989	0,21	0,65	0,21	8,8	0,86
Norderney	1891/1989	0,10	0,55	0,10	5,0	0,64
Helgoland	1953/1989	0,23	0,61	0,30	6,6	0,81
LT Roter Sand/ Alte Weser	1901/1989	0,16	0,69	0,16	7,2	0,79
Emden	1901/1989	0,13	0,49	0,13	5,0	0,56
Büsum	1931/1989	0,23	0,64	0,22	8,8	0,81
Wilhelmshaven	1873/1989	0,20	0,76	0,20	6,6	0,80
Bremerhaven	1881/1989	0,36	0,86	0,37	8,2	0,89
Cuxhaven	1843/1989	0,09	0,51	0,09	6,2	0,58
Husum	1906/1989	0,30	0,81	0,30	3,6	0,82
Dagebüll	1936/1989	0,81	0,92	0,86	8,8	0,95
List	1931/1989	0,36	0,87	0,36	7,2	0,94
Vlissingen	1862/1986	0,16	0,73	0,17	12,4	0,92

etwa 7 cm; das nächste Maximum der gezeitenerzeugenden Kräfte der Nodal tide ist 1997 zu erwarten.

- Die Wirkung der Nodal tide auf Wasserstandszeitreihen der untersuchten Pegel von Vlissingen (NL) bis List zeigt eine Abhängigkeit von der Lage der Pegel (Einfluß der Kanaltide bzw. lokale Topographie); für den Pegel Vlissingen ergibt sich im Vergleich zu den Pegelstationen an der deutschen Nordseeküste ein deutlich größerer Wert von über 12 cm.
- Für instationäre Säkular trenduntersuchungen ergibt sich bei Verwendung von Zeitfenstern, die nicht einem Vielfachen der Nodal tide entsprechen, wie z. B. bei 25jährigen Zeitfenstern (JENSEN, 1984; FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985), nur eine geringfügige Beeinflussung des Säkular trends durch die Nodal tide.
- Im Vergleich zu LISITZIN (1974), wo in einer Zusammenstellung Amplituden der Nodal tide von etwa 2 cm angegeben werden, ergeben sich für den Bereich der Deutschen Bucht deutlich größere Werte. Nach einem Minimum der Gezeitenwirkung der Nodal tide etwa im Jahr 1988 werden die Tidehübe bis zum nächst gelegenen Maximum im Jahr 1997 aufgrund der Nodal tidewirkung wieder zunehmen.
- Mit den Untersuchungen zur Nodal tide wurde die Verwendung von 19jährigen Mittelwerten, die bis auf LÜDERS (1936) zurückgeführt werden kann, bestätigt (vgl. auch DIETRICH, 1954).

4. Anpassungsfunktion für Thw-Scheitelwerte

4.1 Vorbemerkungen

Kurzfristige Änderungen des Meeresspiegels lassen sich nicht allein durch deterministische Modelle beschreiben. Deshalb wird die Wahrscheinlichkeitsrechnung zu einem wichtigen

Hilfsmittel der Analyse, wobei hydrologische Ereignisse als Zufallserscheinung gedeutet werden.

Auf der Grundlage der aufgearbeiteten Einzelwertreihen wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem über eine mathematisch definierte Funktion jedem Thw eines Pegels eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann. Die Anwendung der im folgenden vorgestellten KFKI- μ -Verteilung (vgl. MÜGGE, 1992) erlaubt zum einen, Datenlücken in Einzelwertreihen zu schließen (vgl. Abschnitt 5), zum anderen können Scheitelwasserstände für bestimmte Wiederkehrintervalle angegeben werden.

In der Hydrologie werden zur statistischen Einordnung seltener Ereignisse, wie z. B. minimaler oder maximaler Wasserstände, Abflüsse usw., verschiedene Verteilungsfunktionen verwendet. Neben der Normal- und log.-Normalverteilung sind dies meist spezielle Extremverteilungen, wie z. B. die Pearson-Typ-III-, log.-Pearson-Typ-III-, Gumbel-, log.-Gumbel-, Exponential- und Jenkinson-Verteilung (vgl. FÜHRBÖTER, 1976; JENSEN, 1985; JENSEN, 1987; MANIAK, 1988).

Mit Hilfe dieser Anpassungsfunktionen werden Eintrittswahrscheinlichkeiten für extreme Beobachtungswerte ermittelt. Durch Extrapolation kann dann auf Extremereignisse mit Wiederkehrintervallen geschlossen werden, die außerhalb der gemessenen Zeitreihe liegen. Mittlere Ereignisse werden mit den o. g. Verteilungsfunktionen nicht erfaßt.

Bevor Verteilungsfunktionen für die Beschreibung einer Zeitreihe von Scheitelwasserständen verwendet werden, sind verschiedene statistische Voraussetzungen zu prüfen, wie z. B. eine für die Grundgesamtheit repräsentative Stichprobe und die Unabhängigkeit und Zufälligkeit der einzelnen Beobachtungswerte innerhalb der Stichprobe. Hierzu, wie auch zur Ermittlung der statistischen Parameter, wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (vgl. z. B. AITCHINSON und BROWN, 1957; CHOW, 1964; MANIAK, 1988).

Weiterhin müssen die Daten einer Beobachtungsreihe homogen sein, d. h., eine solche Datenreihe ist im statistischen Sinn eine Stichprobe der Grundgesamtheit. Bei Zeitreihen von Pegelaufzeichnungen können Veränderungen der Grundgesamtheit durch anthropogene Einflüsse wie z. B. Baumaßnahmen im unmittelbaren Bereich des Pegels, Eindeichungen oder Vertiefungen einer Fahrrinne hervorgerufen werden. Aus diesem Grund können Pegeldaten einiger Standorte (z. B. Bremen oder Hamburg-St. Pauli) für Zeitreihenanalysen nicht herangezogen werden (vgl. auch SIEFERT, 1982). Daneben sind die Wasserstandsaufzeichnungen durch den eustatischen Meeresspiegelanstieg beeinflusst. Für die untersuchten Thw-Scheitelwerte erfolgte eine Homogenisierung der trendbehafteten Daten durch eine Beschickung, wobei vereinfachend ein linearer Trend der Thw von 20 cm/100 Jahre zugrunde gelegt wurde (vgl. FÜHRBÖTER, 1976 und JENSEN, 1985). Mit dieser Maßnahme ist sichergestellt, daß alle Wasserstände vergleichbar sind, bevor sie einer statistischen Analyse unterzogen werden.

Für die Ermittlung von Bemessungsereignissen (z. B. maßgebender Sturmflutwasserstand) werden bestimmte Wiederkehrintervalle bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten (Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeiten) herangezogen.

Geht man von der Unabhängigkeit der Daten aus, ist es möglich, die Einzelwerte einer Beobachtungsreihe der Grundgesamtheit heranzuziehen. Dabei wird die Struktur der zeitlichen Folge dieser Zufallsvariablen außer acht gelassen. Da es sich praktisch um äquidistante Werte handelt (705 bzw. 706 Thw-Scheitelwerte pro Jahr), wird das Wiederkehrintervall (oder die Wiederholungszeitspanne) T_n als durchschnittliche Zeitspanne (in Jahren) zwischen dem Eintreten von Ereignissen mit gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit definiert.

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit ergibt sich zu:

$$P_{\bar{u}} = 1/T_n$$

oder als komplementäres Ereignis mit $P_u = 1 - P_{\bar{u}}$, die Unterschreitungswahrscheinlichkeit zu:

$$P_u = 1 - 1/T_n$$

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines 100jährigen Sturmflutwasserstandes beträgt $P_u = 1 - 1/100 = 0.99$ bzw. 99 %, wenn die Datenbasis aus jährlichen Maxima besteht. Betrachtet man dagegen alle Maxima des Wasserstandes (d. h. 705 bzw. 706 Thw-Scheitelwerte pro Jahr), erhält man für P_u :

$$1 - 1/(705,5 \cdot 100) = 99,9986 \%$$

4.2 Entwicklung und Anwendung des Verfahrens

Die aufbereiteten Einzelwert-Zeitreihen der Thw der 12 bzw. 13 Pegel bilden die Basis für eine Wahrscheinlichkeitsanalyse. Das Ziel der Analyse ist es, mit Hilfe einer mathematisch definierten Verteilungsfunktion jedem Thw-Scheitelwert eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen.

Mit den bekannten Verteilungsfunktionen können Eintrittswahrscheinlichkeiten entweder für häufig wiederkehrende mittlere oder aber für seltene extreme Beobachtungswerte berechnet werden.

Da die Anwendung der gebräuchlichen Verteilungsfunktionen (s. Abschnitt 4.1) bei Tageswerten nicht zu befriedigenden Ergebnissen führte, wurde ein Verfahren entwickelt, das folgende wesentliche Forderungen erfüllt:

- gute Repräsentanz aller gemessenen Thw-Scheitelwerte einschließlich der Sturmflutwasserstände
- geringe mittlere Abweichung zwischen den gemessenen Werten und der Anpassungsfunktion über den gesamten Bereich
- die Möglichkeit der Optimierung unter Berücksichtigung der charakteristischen Eigenschaften der Zeitreihe.

Bei der KFKI- μ -Verteilung wird zunächst für jeden Meßwert die empirische Wahrscheinlichkeit nach WEIBULL ermittelt. Anschließend werden die einzelnen Meßwerte entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit in ein Gitternetz eingetragen, dessen Abszisse logarithmisch und dessen Ordinate nach dem Integral der Gauß'schen Verteilung geteilt ist.

Auf der Abszisse werden die Thw in cm, auf der Ordinate deren Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Prozent aufgetragen. Ausgehend vom geometrischen Mittel der Thw und der 50 %-Linie der y-Achse, deren Schnittpunkt den Nullpunkt eines Koordinatensystems x' - y' definiert, folgen die beobachteten Werte sehr genau einem Kurvenzug, der durch die Funktion:

$$y' = \operatorname{arsinh} x' = \ln [x' + \sqrt{(x')^2 + 1}]$$

beschrieben wird.

Abhängig von der untersuchten Zeitreihe und dem jeweiligen Pegel ist das Koordinatensystem x' - y' gegenüber dem ursprünglichen System um den Winkel μ gedreht.

Die Abb. 31 zeigt im oberen Teil die Dichtefunktion der KFKI- μ -Verteilung im Vergleich zur log.-Normalverteilung. Der Kurvenverlauf der Dichtefunktion verdeutlicht, daß im Bereich des Mittelwertes (etwa \pm Standardabweichung σ) eine höhere Dichte angenommen wird als bei der log.-Normalverteilung. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß Hochwasserstände in der Größenordnung des Mittelwertes \pm 34 % häufiger, die Thw mit größerer

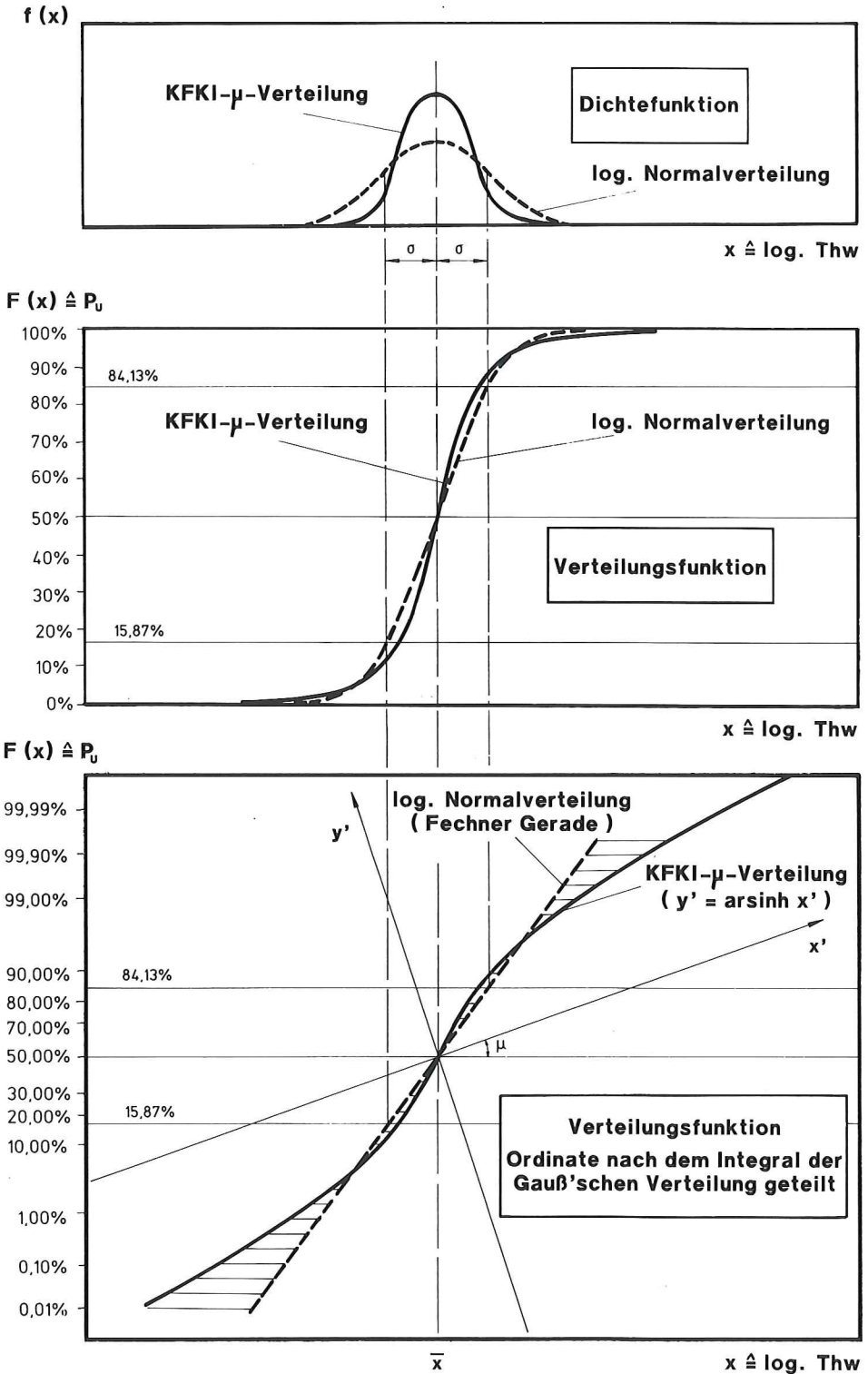


Abb. 31: Dichte- und Verteilungsfunktion der log. Normalverteilung und der KFKI- μ -Verteilung

Abweichung zum Mittelwert dagegen seltener eintreten als nach der log.-Normalverteilung geschätzt.

Der S-förmige Kurvenzug (Abb. 31, Mitte) stellt die zugehörigen Verteilungsfunktionen als Integral der Dichtefunktionen dar. Auf der logarithmisch geteilten Abszisse sind die Thw und auf der Ordinate die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten P_u in % linear aufgetragen. Im Gegensatz zur log.-Normalverteilung weist die KFKI- μ -Verteilung im mittleren Bereich eine stärkere Steigung auf. Für Unterschreitungswahrscheinlichkeiten oberhalb von $\approx 95\%$ (bzw. unterhalb von $\approx 5\%$) schmiegt sich die Funktion flacher der 100 %-Achse (bzw. 0 %-Achse) an.

Teilt man die y-Achse nach dem Integral der Gauß'schen Verteilung (vgl. Abb. 31 unten), d. h., die Ordinatenkala wird entsprechend verzerrt, erhält man als Darstellung der log.-Normalverteilung eine Gerade (Fechner-Gerade). Bei dieser Art der Auftragung ist die KFKI- μ -Verteilung als $y' = \operatorname{arsinh} x'$ definiert, wobei die Achsen dieses gedrehten Koordinatensystems linear geteilt sind. Wegen der unterschiedlichen Achsenteilungen der beiden Koordinatensysteme x - y und x' - y' sind die Zuordnungen nicht linear.

Im Gegensatz zur Normalverteilung, die mathematisch von $-\infty$ bis $+\infty$ definiert ist, sind durch die Logarithmierung der x-Achse bei beiden Funktionen nur positive Werte definiert. Bei der Anwendung auf Naturereignisse ist beidseitig eine Begrenzung auf einen physikalisch sinnvollen Bereich vorzunehmen.

Als Kriterium für die Anpassungsgüte dieser Funktion an die gemessenen Einzelwerte wird der mittlere Fehler F_M herangezogen (JENSEN, 1985):

$$F_M = \sqrt{1/(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2$$

- mit: x_i : beobachteter Merkmalswert
 X_i : theoretischer Merkmalswert
 n: Anzahl der Stichprobenelemente

Der Drehwinkel μ wird so optimiert, daß der mittlere Fehler zu einem Minimum wird. Eine Darstellung der beobachteten Thw unter Verwendung der empirischen Wahrscheinlichkeit nach WEIBULL und der Anpassungsfunktion zeigt die Abb. 32 am Beispiel der Tageswertreihe 1890/1987 des Pegels Cuxhaven. Dabei ist eine recht gute Übereinstimmung zwischen theoretischer Funktion und gemessenen Werten festzustellen. Dies gilt insbesondere auch für extreme Sturmflutwasserstände. So weicht der gemessene Maximalwasserstand der Sturmflut vom 3. Januar 1976 (HHThw = 1010 cm, bezogen auf NN - 5,00 m; beschickt: 1016 cm) am Pegel Cuxhaven nur wenige cm vom berechneten Wert (1012 cm bzw. beschickt: 1023 cm) ab. Entsprechendes gilt auch für den Sturmflutwasserstand vom 16. Februar 1962.

Der mittlere Fehler beträgt ca. 2 cm bezogen auf alle (69 162) Thw; betrachtet man dagegen nur die Extremwerte der Zeitreihe, z. B. die 2 % höchsten Thw, vergrößert sich der mittlere Fehler um etwa 1 cm.

Zur Beurteilung der Anpassungsgüte nach dem Kriterium des mittleren Fehlers wurden alle Einzelwertreihen untersucht. Dazu wurde der mittlere Fehler auf die jeweils längste (lückenlos vorhandene) Einzelwertreihe bezogen. Die Ergebnisse schwanken zwischen $F_M = 1,4$ cm für den Pegel Wittdün und $F_M = 3,0$ cm für den Pegel Wilhelmshaven. Werden die entsprechenden Abweichungen für die jeweils 2 % höchsten Thw berechnet, so beträgt die Spannweite $F_M = 2,0$ cm (Pegel Borkum) bis $F_M = 5,3$ cm (Pegel Emden).

Wird nun die KFKI- μ -Verteilung zur Ermittlung von Wasserständen mit bestimmten

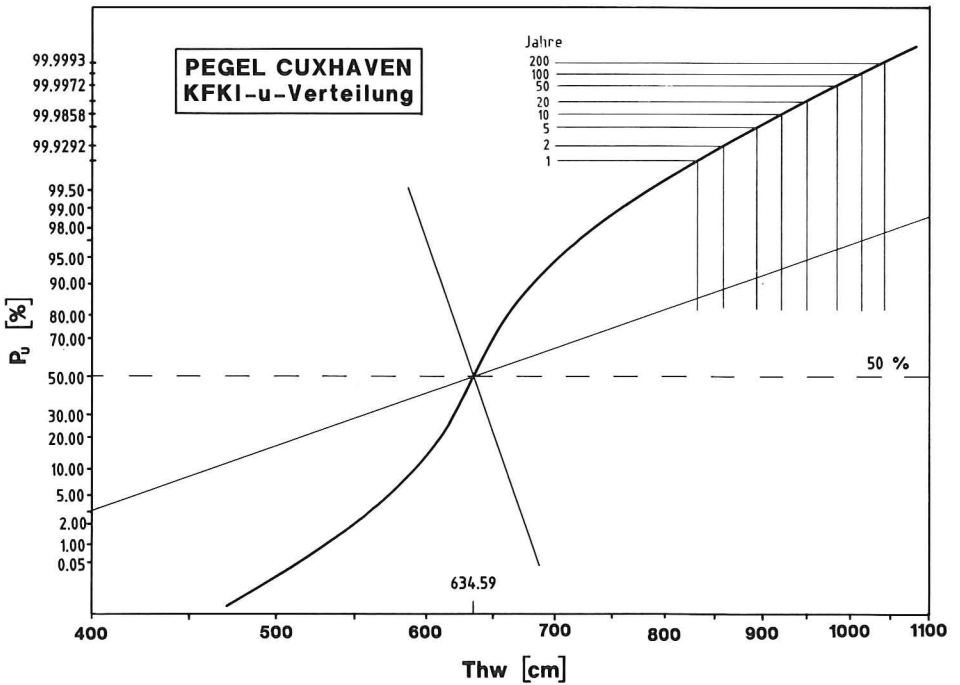
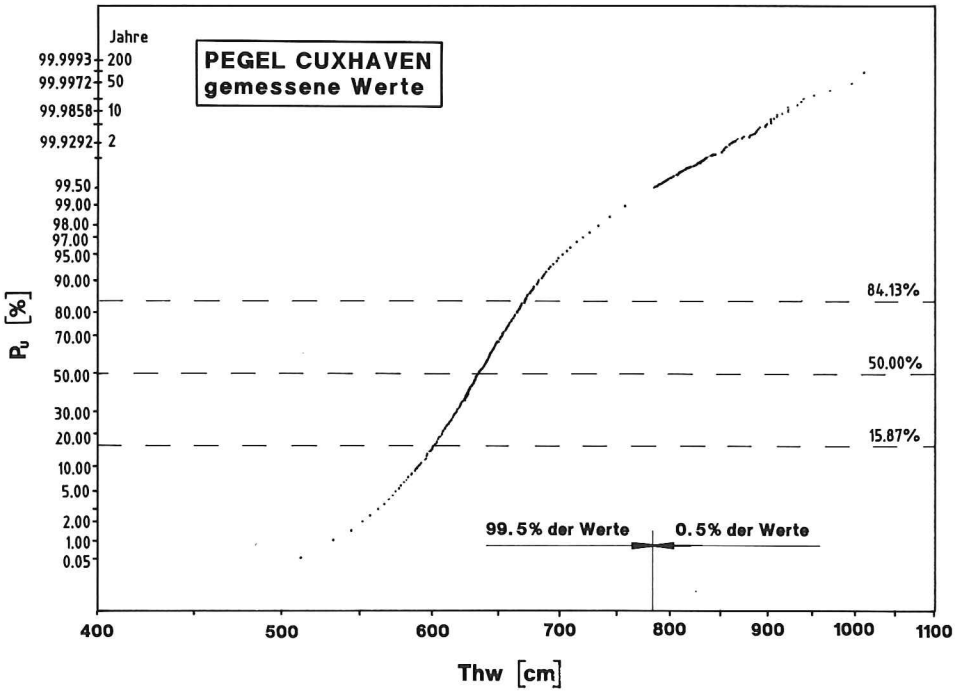


Abb. 32: Beobachtete Thw-Werte (oben) und KFKI- μ -Verteilung (unten) für den Pegel Cuxhaven von 1890 bis 1987

Wiederkehrintervallen herangezogen, können verschiedene Kriterien zur Optimierung der Anpassungsfunktion gewählt werden. In einer ersten Näherung sind die Ergebnisse einer Berechnung von Sturmflutwasserständen für Wiederkehrintervalle von 50, 100 und 200 Jahren auf der Basis der 2 % höchsten Thw-Werte in Tabelle 12 zusammengestellt. Grundlage dieser Berechnungen bilden die jeweils längsten lückenlos vorhandenen Zeitreihen. Die Thw sind unabhängig vom jeweiligen PNP einheitlich auf NN -5,00 m bezogen.

Tabelle 12. Sturmflutwasserstände berechnet nach der KFKI- μ -Verteilung (optimiert nach den 2 % höchsten Werten) für Wiederkehrintervalle von 50, 100 und 200 Jahren

Pegel	Jahres- reihe	Sturmflutwasserstand [cm] für ein Wiederkehrintervall von n Jahren		
		n = 50	n = 100	n = 200
Borkum	1935 – 1986	886	907	929
Norderney	1935 – 1986	914	936	959
Emden	1953 – 1986	1002	1032	1061
Helgoland	1953 – 1986	875	895	915
LT Alte Weser	1935 – 1986	918	940	962
Wilhelmshaven	1935 – 1986	998	1023	1049
Cuxhaven	1890 – 1986	998	1026	1054
Büsum	1953 – 1986	1019	1048	1077
Husum	1953 – 1986	1072	1106	1141
Wittdün	1953 – 1986	927	952	976
Dagebüll	1953 – 1986	990	1020	1049
List	1953 – 1986	905	931	958

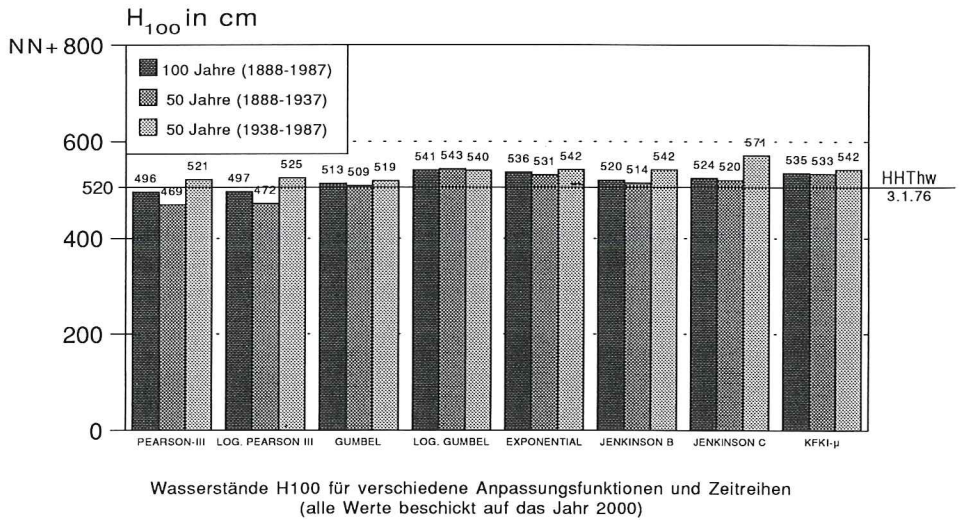
Die Optimierung der Anpassungsfunktion unter Verwendung aller Einzelwerte wurde beispielhaft für den Pegel Cuxhaven durchgeführt; die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen keine signifikanten Abweichungen von den Ergebnissen für Cuxhaven nach Tabelle 12.

Die Berechnungen der Sturmflutscheitel sind selbstverständlich abhängig von der Beobachtungsreihe, für die die Parameter der Anpassungsfunktion bestimmt wurden. Da die Beschickung mit Hilfe eines linearen Trends vorgenommen wurde, wirken sich Änderungen des Trends signifikant auf das Ergebnis einer Extrapolation aus.

Bei FÜHRBÖTER et al. (1988) werden die Wasserstände H_{100} und H_{1000} , d. h. Bemessungswasserstände mit Wiederkehrintervallen von 100 und 1000 Jahren, nach verschiedenen Verfahren ermittelt. Die Berechnungen wurden für die einzelnen Pegel mit jeweils drei Zeitreihen durchgeführt, wobei die 100jährige Zeitreihe von 1888 bis 1987 in zwei 50jährige Teilzeitreihen von 1888 bis 1937 und 1938 bis 1987 getrennt wurde. Entsprechende Untersuchungen wurden mit der KFKI- μ -Verteilung für die Pegel Büsum und Cuxhaven durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abb. 33 für den Pegel Büsum und Abb. 34 für den Pegel Cuxhaven vergleichend zu den anderen Verfahren dargestellt.

Neben den einzelnen H_{100} - und H_{1000} -Werten ist der jeweilige HHThw-Wert vom 3. 1. 1976 eingezeichnet. Die mit der KFKI- μ -Verteilung ermittelten Resultate zeigen keine auffallenden Abweichungen von den mit den anderen Verfahren ermittelten Ergebnissen. Entsprechend den anderen Verfahren ergeben sich auch bei der KFKI- μ -Verteilung die größten Werte für H_{100} und H_{1000} für die aktuelle 50jährige Zeitreihe von 1938 bis 1987.

PEGEL BÜSUM



PEGEL BÜSUM

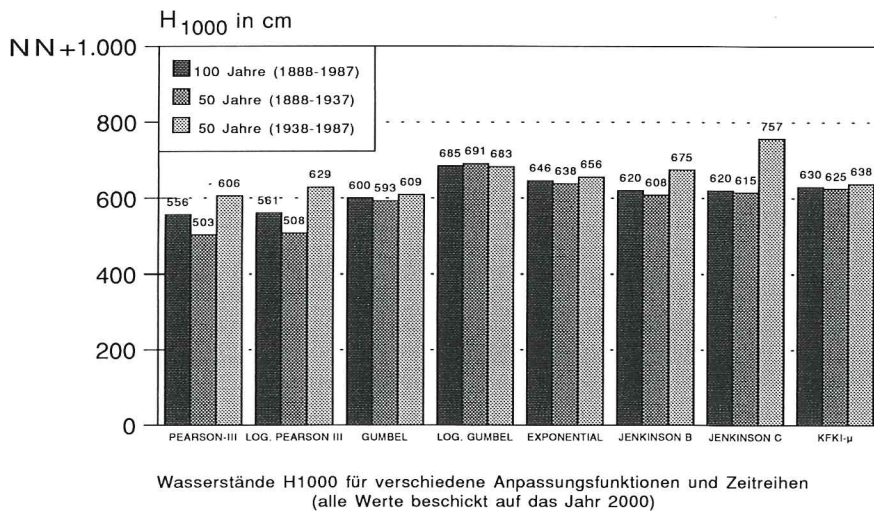
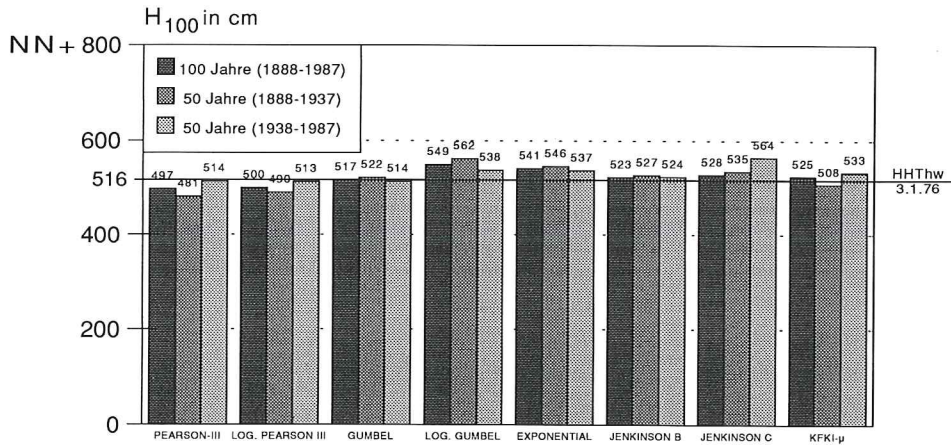


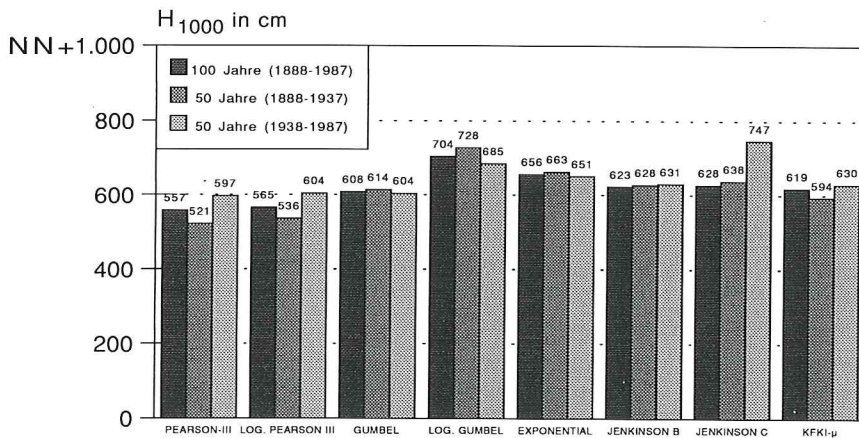
Abb. 33: Wasserstände H_{100} (oben) und H_{1000} (unten) für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen des Pegels Büsum

PEGEL CUXHAVEN



Wasserstände H100 für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschickt auf das Jahr 2000)

PEGEL CUXHAVEN



Wasserstände H1000 für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen (alle Werte beschickt auf das Jahr 2000)

Abb. 34: Wasserstände H₁₀₀ (oben) und H₁₀₀₀ (unten) für verschiedene Anpassungsfunktionen und Zeitreihen des Pegels Cuxhaven

4.3 Bewertung des Verfahrens

Auf der Basis aufgearbeiteter Einzelwert-Zeitreihen der täglichen Tidehochwasser-Scheitelwerte wurde eine Anpassungsfunktion entwickelt. Diese Funktion ermöglicht, durch Optimierungsrechnungen alle beobachteten Thw-Scheitelwerte eines Pegels zu beschreiben.

Mit Hilfe dieser Anpassungsfunktion können dann Extrapolationen durchgeführt und so z. B. Sturmflut-Scheitelwasserstände mit bestimmten Wiederkehrintervallen abgeschätzt werden. Die Untersuchungen zur Ermittlung von Bemessungsereignissen auf der Basis der KFKI- μ -Verteilung sind noch nicht abgeschlossen; insbesondere sind weitergehende Untersuchungen zur Optimierung der Ausgleichsfunktion erforderlich.

Der Vorteil der Berechnung auf der Grundlage aller (verfügbaren) Thw liegt in der größeren Datenbasis im Vergleich zu jährlichen oder partiellen Zeitreihen, bei denen nach bestimmten Kriterien Maximalwerte ausgewählt werden. Jede Auswahl hat unmittelbaren Einfluß auf den Stichprobenumfang und damit auf die daraus berechneten statistischen Parameter. Voraussetzung für die Anwendung der KFKI- μ -Verteilung sind allerdings qualitativ hochwertige Einzelwert-Zeitreihen der einzelnen Hochwasser-Scheitelwerte. Daraus folgt, daß die Anwendung dieses Verfahrens auf Pegel mit langen Beobachtungsreihen beschränkt ist.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen war das wesentliche Ziel, mit Hilfe einer geeigneten Anpassungsfunktion Lücken in den Beobachtungsreihen zu schließen.

5. Schließen von Datenlücken in Wasserstandszeitreihen

5.1 Vorbemerkungen

Insbesondere bei länger zurückreichenden Pegelaufzeichnungen sind in den Meßwertreihen mehr oder weniger große Lücken vorhanden. Die Ursachen für lückenhafte Aufzeichnungen können sein:

- Technische Defekte bzw. Reparatur des Pegels, der Übertragungseinrichtung oder des Registriergerätes
- Außerbetriebnahme wegen Baumaßnahmen im unmittelbaren Bereich des Pegels oder
- Vereisung des Schwimmerschachtes und/oder Zulaufrohres

Für Zeiträume während bzw. nach dem 1. und 2. Weltkrieg existieren für einige Pegel keinerlei Unterlagen, da sie verloren gingen oder Pegelbeobachtungen nicht durchgeführt werden konnten. So wurden z. B. am Pegel Helgoland zwischen 1945 und 1952 keine Wasserstände registriert bzw. sind nicht auffindbar (ROHDE, 1982 und 1990).

Da es für die weitere statistische Bearbeitung und Analyse der Zeitreihen notwendig ist, lückenlose Eingangsdaten zu verwenden, wurde der Versuch unternommen, nicht aufgezeichnete Wasserstände durch berechnete zu ergänzen. Viele Analyseverfahren können nur bei einer Datenbasis äquidistanter Werte angewandt werden. So sind z. B. für die Fast-Fourier-Transformation lückenlose Einzelwertreihen eine notwendige Voraussetzung für die Auswertung.

Eine entsprechende Empfehlung bzw. Richtlinie für das Vorgehen bei der Ermittlung fehlender Meßwerte existiert bislang noch nicht. Einige Interpolations- und Regressionsmethoden sind bei VAN DER MADE (1988) aufgeführt. Einflüsse von Lücken auf gefilterte Zeitreihen werden bei LAUKART (1981) beschrieben.

Eine Möglichkeit, lückenhafte Zeitreihen zu ergänzen, besteht grundsätzlich darin,

Nachbarpegel als Bezugspegel auszuwählen, deren Aufzeichnungen mit denen des lückenhaften Pegels gut korrelieren; anschließend wird eine Beziehung aufgestellt, nach der die Daten des Bezugspegels umgerechnet werden können. Bereits die Definition „Nachbarpegel“ erweist sich dabei als äußerst problematisch, da sich bei der bisherigen Datenanalyse gezeigt hat, daß selbst die Aufzeichnungen von relativ dicht beieinanderliegenden Pegeln (wie z. B. Borkum Südstrand und Borkum Fischerbalje oder Lt. Roter Sand und Lt. Alte Weser) unterschiedlich große Abweichungen aufweisen.

Bei weiter voneinander entfernt liegenden Standorten ist dies in verstärktem Maße festzustellen. Die Gründe dafür liegen zum einen in den unterschiedlichen Eintrittszeiten der Tidescheitelwerte zweier Pegel (Eintrittszeitdifferenzen der Thw u. Tnw), zum anderen spielen die topographischen Randbedingungen (Gewässersohle u. Ufer) sowie die meteorologischen Parameter (Windrichtung, -stärke u. -dauer) eine entscheidende Rolle. Astronomisch bedingte Perioden (z. B. die halbmonatliche Ungleichheit von Spring- u. Nipptide oder der Jahresgang) können darüber hinaus zwischen benachbarten Pegeln zu periodisch veränderten Höhen- und Zeitdifferenzen führen.

Bei Pegeln an Tideästuaren sind Oberwasserzuflüsse insbesondere im Niedrigwasserbereich von Bedeutung. Unterschiedlich starke Vereisungen in den Wintermonaten verändern den Querschnitt und die Rauheit und beeinflussen damit Laufzeiten und Scheitelhöhen und somit die Beziehung benachbarter Pegel.

Schon diese kurze Aufstellung läßt erkennen, daß es nicht möglich sein wird, eine feste Beziehung zwischen benachbarten Pegeln über einen längeren Zeitraum hinweg aufzustellen und so lückenhafte Zeitreihen zu ergänzen. Um dennoch zu praktischen Ergebnissen zu gelangen, wurden mögliche Methoden zur Lückenschließung in Tidedateien getestet.

5.2 Ergänzung fehlender Wasserstände

Ein erster Schritt ist die Erfassung und Zusammenstellung der Zeiträume mit lückenhaften Aufzeichnungen. Es zeigt sich dabei, daß die Größe der Lücken von einem bis zu mehreren hundert Tidescheitelwasserständen reicht. Ein einheitliches Verfahren zum Schließen der Meßwertlücken erscheint aus diesem Grunde nicht sinnvoll. Die Lücken sollten vielmehr in verschiedene Kategorien eingeteilt und in Abhängigkeit von der Länge des fehlenden Zeitraumes mit interpolierten oder abgeleiteten Daten aufgefüllt werden.

Anschließend werden Bezugspegel ausgewählt, deren Aufzeichnungen mit denen des lückenhaften Pegels gut korrelieren. Ein Maß für die Güte der linearen Beziehung ist der Korrelationskoeffizient r , der durch lineare Regression zweier Tageswertreihen berechnet wird. Bei Werten für r größer als 0,95 liegt eine gute Übereinstimmung vor, ab $r = 0,99$ korrelieren die Daten sehr gut. Für diese Aufgabenstellung wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem lückenhafte Tageswertreihen bearbeitet werden können. Um entsprechende Wasserstände, die innerhalb derselben Tide eingetreten sind, einander zuzuordnen, werden Datum und Eintrittszeit jedes Thw bzw. Tnw miteinander verglichen.

5.2.1 Lineare Interpolation

Fehlt in einem längeren Zeitabschnitt nur ein einzelner Wert, so kann diese Lücke durch lineare Interpolation geschlossen werden. Rechnungen mit künstlich erzeugten Lücken zeigen, daß bei der Anwendung dieser einfachen Art der Lückenschließung die Abweichung

zum gemessenen Wert im Mittel nicht größer ist als bei aufwendigeren Verfahren. Die statistischen Parameter werden dadurch nicht oder nur unwesentlich verändert.

Wegen der starken Streuung der Tidescheitelwerte (die Standardabweichung beträgt bei den untersuchten Zeitreihen 35 bis 45 cm) sind lineare Interpolationen bei Lücken von mehreren Tagen nicht zu empfehlen. Da Periodizitäten nicht berücksichtigt werden können, scheidet dieses Verfahren für das Schließen größerer Lücken aus.

5.2.2 Lineare Regression

Mit Hilfe von Regressionsgeraden lassen sich neben einzelnen Fehlwerten auch größere Lücken ergänzen. Von Ausnahmen abgesehen sollte nur je eine Regressionsbeziehung für Thw und Tnw für die Berechnung herangezogen werden. Zeigen sich jedoch im Bereich sehr hoher und/oder sehr niedriger Wasserstände stärkere Abweichungen von der ermittelten Regressionsgeraden, können in Abhängigkeit von der Höhe des Wasserstandes auch unterschiedliche Beziehungen aufgestellt werden.

Genauere Ergebnisse können mit höhenbezogenen Regressionen z. B. für den unteren, mittleren und oberen Höhenbereich erwartet werden. Bei der Ermittlung der einzelnen Regressionsbeziehungen ist zu beachten, daß beim Übergang von einem zum anderen Bereich Sprünge zu vermeiden sind. Durch ein Verschieben der Bereichsgrenzen und anschließende Neuberechnung der Regressionsbeziehung kann das Problem iterativ gelöst werden. Der größere Rechenaufwand bei diesem Verfahren führt jedoch nicht unbedingt zu besseren Resultaten, da die Werte häufig stark streuen.

Die Länge des Zeitraumes, für den eine Regressionsbeziehung aufgestellt wird, richtet sich nach der Größe der Lücke, wobei Periodizitäten zu berücksichtigen sind. Bei relativ kurzen Ausfallzeiten kann sich der Berechnungszeitraum auf ca. 14 Tage vor und nach der Lücke beschränken. Dabei ist die Zeitdauer so zu wählen, daß die halbmonatliche Ungleichheit (ca. 60 Werte) berücksichtigt wird. Bei größeren Lücken können sich die Berechnungszeiträume auf ein Abflußjahr erstrecken. Bei der Aufstellung von Regressionsbeziehungen über noch größere Zeiträume ist zu prüfen, ob sich die Abhängigkeiten über die Zeit verändert haben. Dies ist notwendig, da selbst bei benachbarten Pegeln signifikant unterschiedliche Säkularrends ermittelt werden (vgl. Abschnitt 2), was Auswirkungen auf den linearen Zusammenhang zweier Zeitreihen hat.

5.2.3 Lückenschließung mit gefilterten Werten

Für das Schließen von größeren Lücken bis zu mehreren hundert Werten oder sogar einigen Jahren wurde im Rahmen dieses Projektes ein Verfahren entwickelt, das die Daten eines oder mehrerer Bezugspegel mit geeigneten Perioden filtert. Als geeignete Methode wird die Filterung mit dem Verfahren nach Butterworth (vgl. STEARNS, 1987) herangezogen. Um die gefilterten Werte des Bezugspegels höhenmäßig an den Lückenpegel anzupassen, wird für den betreffenden Zeitraum die mittlere Differenz zwischen beiden Wasserstandszeitreihen gebildet. Anschließend werden die Lücken mit den gefilterten und in der Höhe angepaßten Daten geschlossen. Dieses Verfahren eignet sich gleichermaßen für größere Lücken innerhalb der Thw- und Tnw-Zeitreihen.

Ausgehend von der Überlegung, daß bei der Analyse langfristiger Veränderungen im Tidegeschehen kurzfristige stochastische Einflüsse auf die Scheitelwasserstände, die sich als

Rauschen den längeren Schwingungen überlagern, nicht von entscheidender Bedeutung sind, wird bewußt darauf verzichtet, diese irreguläre, zufällige Komponente (Residuen) zu berücksichtigen. Vorher sind die Daten des Bezugspegels dahingehend zu überprüfen, ob sprunghafte Veränderungen stattgefunden haben, etwa durch Ausbaumaßnahmen, Eindeichungen, Wechsel des Pegelstandortes o.ä. oder andere Besonderheiten längerfristige Veränderungen bewirkt haben. Diese Überprüfung kann mit Hilfe des Doppelsummenlinienverfahrens oder dem Test nach Cochran (vgl. SACHS, 1974) durchgeführt werden. Nur wenn sich während des in Frage kommenden Zeitraumes derartige Störungen in der Zeitreihe des Bezugspegels ausschließen lassen, kann dieser für die Lückenschließung herangezogen werden.

Bei der weiteren Bearbeitung von Zeitreihen, deren Lücken mit gefilterten Daten aufgefüllt wurden, ist zu beachten, daß sich die statistischen Parameter ändern. So wird durch die in diesem Abschnitt beschriebene Methode der Lückenschließung zwangsläufig die Größe der Varianz bzw. die Standardabweichung verringert.

Beispielhaft wird im folgenden gezeigt, wie das Verfahren anzuwenden ist. Zu diesem Zweck wird zunächst innerhalb einer vollständigen Datenreihe eine größere Lücke künstlich erzeugt, die anschließend mit gefilterten und höhenmäßig angepaßten Werten geschlossen wird. Die Güte des Ergebnisses kann anhand einer Darstellung beurteilt werden, die sowohl die berechneten als auch die gemessenen und anschließend gefilterten Wasserstandsdaten wiedergibt.

Für das nachfolgende Beispiel wurde der Pegel Büsum ausgewählt. Innerhalb der vollständigen Zeitreihe (Thw-Scheitelwerte der Abflußjahre 1952 bis 1986) wird eine Lücke von 10 Jahren zwischen dem 1. 11. 1960 und dem 31. 10. 1970 durch Herausnahme aller Thw in diesem Zeitraum geschaffen. Danach werden die Thw der Nachbarpegel Husum, Helgoland und Cuxhaven mit denen des Pegels Büsum korreliert. Mit Hilfe linearer Regressionen mit Tageswerten über jeweils ein Jahr (insgesamt je 8 Jahre vor und nach der Lücke) werden die Korrelationskoeffizienten berechnet. Da die Werte von Cuxhaven mit denen von Büsum mit Korrelationskoeffizienten von $r = 0,99$ einen sehr straffen Zusammenhang zeigen, wird Cuxhaven als Bezugspegel gewählt.

Anschließend wird die Tageswertreihe des Bezugspegels mit einer Periode von 1024 tiefpaßgefiltert. Diese Periode (sie entspricht ca. 1,5 Jahren) wurde gewählt, um auch die Jahresschwingung weitgehend zu eliminieren und so längere Perioden deutlich sichtbar werden zu lassen. Je nach Zielsetzung bei der weiteren Bearbeitung der Zeitreihen und abhängig von der Länge der Lücke kann die Periode beliebig festgelegt werden. Unter Berücksichtigung der Höhendifferenz der gemittelten Thw kann die Lücke anschließend mit den gefilterten Werten geschlossen werden.

Abb. 35 zeigt die gefilterte Zeitreihe (1952 bis 1985) der Thw des Pegels Büsum mit der künstlich erzeugten Lücke. In Abb. 36 sind die über den Bezugspegel Cuxhaven gerechneten und höhenmäßig korrigierten Thw dargestellt. In Abb. 37 sind die gefilterten Hochwasserstände zusammen mit den berechneten gezeichnet. Die gute Übereinstimmung ist nicht nur an den Übergängen von den gemessenen zu den gerechneten Werten, sondern auch innerhalb des gesamten Zeitraumes von zehn Jahren zu erkennen.

5.3 Lückenschließung über Eintrittswahrscheinlichkeiten

Eine weitere Möglichkeit, fehlende Wasserstände in Tageswertreihen zu ergänzen, besteht darin, über einen Bezugspegel den Fehlerten Eintrittswahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Mit den für die Fehlerte berechneten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten können

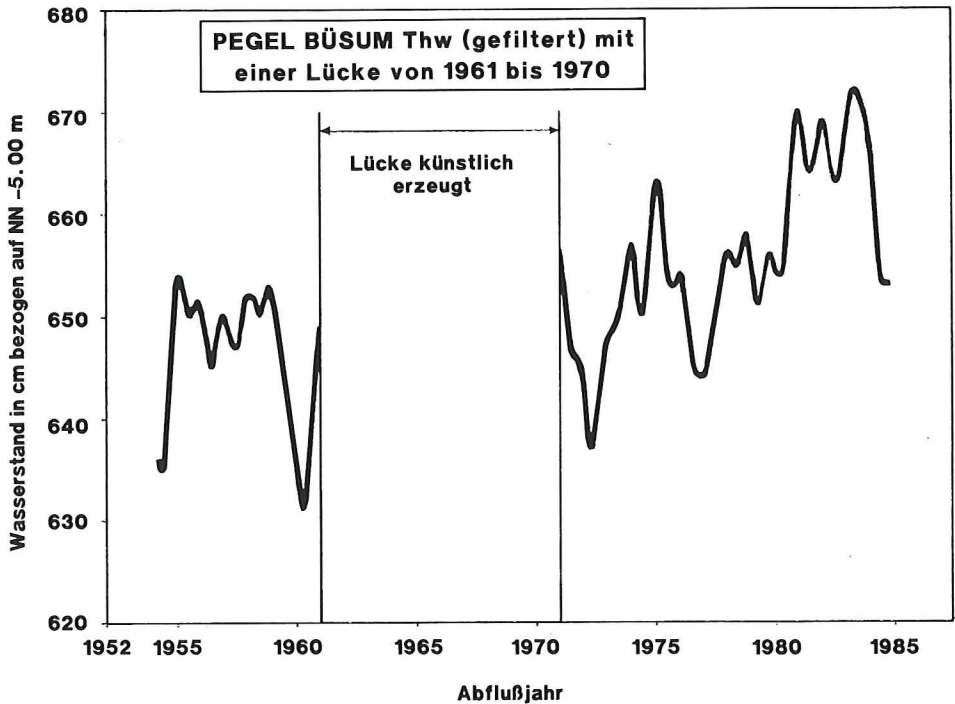


Abb. 35: Gefilterte Werte der Thw des Pegels Büsum von 1952 bis 1985 mit einer Lücke von 10 Jahren (1961 bis 1970)

über eine Anpassungsfunktion des lückenhaften Pegels die zugehörigen Wasserstandshöhen ermittelt werden. Über diesen nichtlinearen Zusammenhang können beliebig viele Werte ergänzt werden, auch wenn beide Pegelreihen Meßlücken aufweisen.

Voraussetzung für die Realisierung dieser Methodik ist eine gut angepasste Verteilungsfunktion, die alle Scheitelwasserstände des Bezugspegels repräsentiert. Eine entsprechende Anpassungsfunktion muß auch für die Zeitreihe des lückenhaften Pegels über einen ausreichend langen Zeitraum ermittelt werden.

Mit Hilfe der KFKI- μ -Verteilung (vgl. Abschnitt 4) können fehlende Thw-Scheitelwerte in der beschriebenen Weise ergänzt werden. Bei einer sehr geringen mittleren Abweichung zwischen der Verteilungsfunktion und den gemessenen Thw wird die Forderung nach Repräsentanz der Wasserstände durch eine Anpassungsfunktion über den gesamten Höhenbereich erfüllt. Für die Tnw-Scheitelwerte existiert eine derartige Anpassungsfunktion bislang noch nicht.

Die Lücken in Tageswertzeitreihen können wie folgt geschlossen werden: Im ersten Schritt werden sowohl für den Bezugspegel als auch für den lückenhaften Pegel die Parameter der KFKI- μ -Verteilung (geometrisches Mittel und Drehwinkel μ) bestimmt. Daraufhin wird für jedes Thw des Bezugspegels, das einem nicht aufgezeichneten Thw des lückenhaften Pegels zugeordnet ist, die Unterschreitungswahrscheinlichkeit bzw. das Wiederkehrintervall bestimmt. Im nächsten Schritt werden mit Hilfe dieser Eintrittswahrscheinlichkeiten aus der für den lückenhaften Pegel berechneten Verteilungsfunktion die fehlenden Thw ermittelt.

Zur Überprüfung der Anpassungsgüte wird daneben der mittlere Fehler F_M bestimmt.

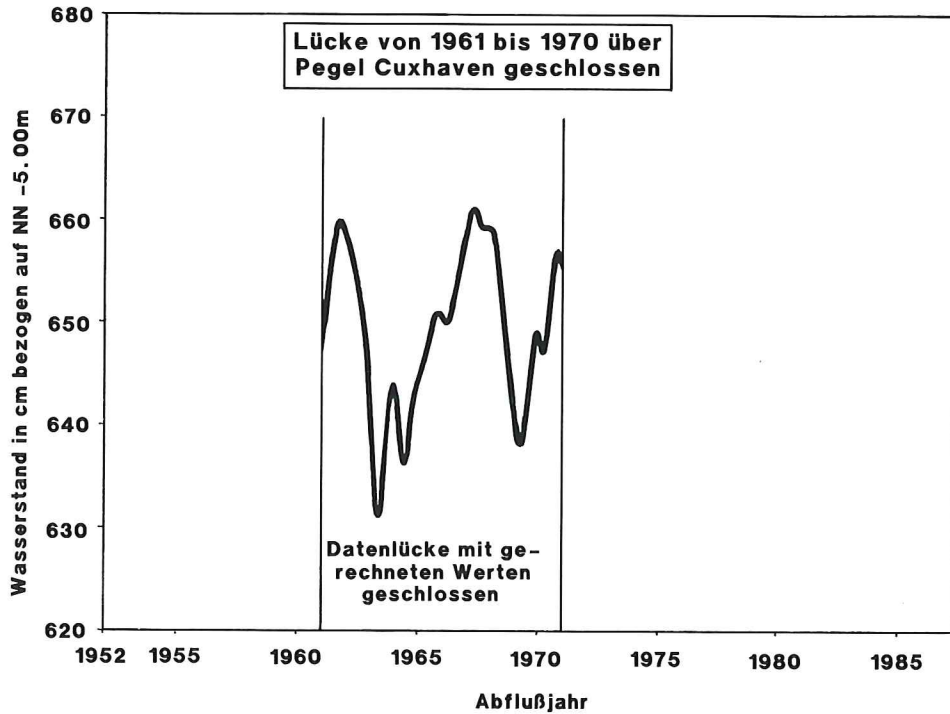


Abb.36: Lückenschließung der Thw des Pegels Büsum von 1961 bis 1970 über den Bezugspegel Cuxhaven

Grundsätzlich sollte bei der Anwendung dieses Verfahrens die Datenbasis möglichst groß gewählt werden, um genaue Ergebnisse zu erzielen.

Abb. 38 soll am Beispiel der Pegel Cuxhaven und Büsum das Verfahren veranschaulichen. In der Darstellung sind über einer logarithmisch geteilten Abszisse, auf der die Thw-Scheitelwerte (bezogen auf NN -5,00 m) in cm aufgetragen sind, die Verteilungsfunktionen beider Pegel dargestellt. Auf der (nach dem Integral der Gauß'schen Verteilung geteilten) Ordinate sind die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten aufgetragen. Ausgehend vom Wasserstand des Bezugspegels wird über die Wahrscheinlichkeit P_U das zugehörige Thw des lückenhaften Pegels ermittelt.

Um das Verfahren zu testen, wurden unterschiedlich große Lücken erzeugt, die anschließend mit gerechneten Tageswerten geschlossen wurden. Der Vergleich von gerechneten und gemessenen Thw am Pegel Büsum zeigt eine gute Übereinstimmung.

Bei der Anwendung dieses Verfahrens wird davon ausgegangen, daß die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Thw am Bezugspegel mit der des lückenhaften Pegels übereinstimmt. Diese Annahme wird im Einzelfall sicher nicht exakt zutreffen. Hinzu kommt die Abweichung zwischen empirischer und theoretischer Wahrscheinlichkeit, d.h., die gemessenen Werte streuen (abhängig von ihrer Größe) um die Verteilungsfunktion. Folglich wird es für Einzelwerte geringe Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Thw geben, was beim Schließen von (echten) Lücken zu berücksichtigen ist.

Bei einer weiteren Proberechnung wurden die 705 Thw des Pegels Helgoland für das Abflußjahr 1982 über den Bezugspegel Lt. Alte Weser errechnet. Der Vergleich der für den

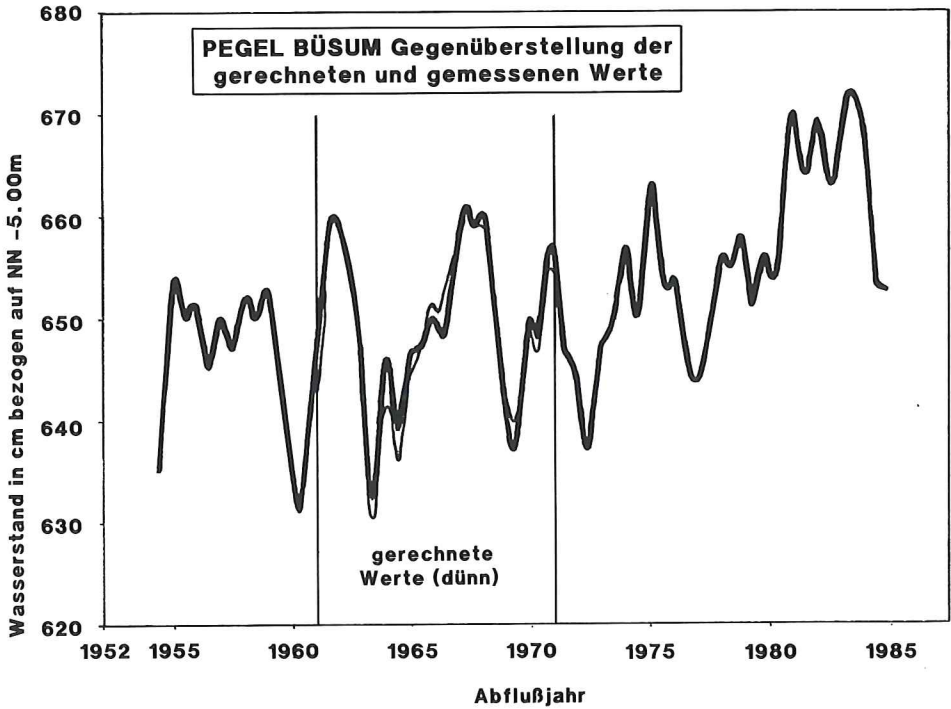


Abb. 37: Gegenüberstellung von gerechneten und beobachteten Thw für die künstliche Lücke am Pegel Büsum von 1961 bis 1970

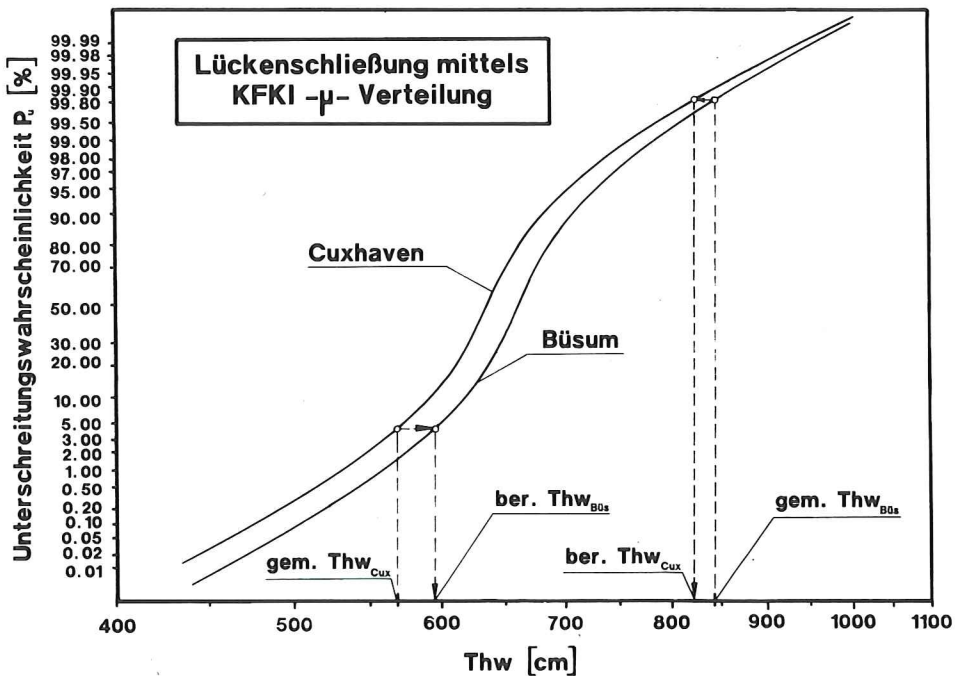


Abb. 38: Prinzip der Lückenschließung über Eintrittswahrscheinlichkeiten am Beispiel der Pegel Cuxhaven und Büsum

Pegel Helgoland errechneten Werte für das Jahr 1982 mit den tatsächlich beobachteten 705 Thw zeigt lediglich Differenzen von einigen cm. Bei der Bildung von Monats- oder Jahresmitteln verringern sich die Abweichungen zwischen gemessenen und gerechneten Werten zwar, dennoch ist bei der Anwendung dieses Verfahrens nicht auszuschließen, daß die Differenzen in Ausnahmefällen die Größenordnung von ± 10 cm erreichen können.

Um die Anwendbarkeit dieses Verfahrens zum Schließen von Datenlücken in Thw-Zeitreihen nachzuweisen und zugleich eine Fehlerabschätzung vorzunehmen, wurden Vergleiche zur häufig angewandten linearen Regression angestellt. An künstlich erzeugten Lücken (verschiedener Pegel und unterschiedlich langer Zeitreihen) wurden über einen Bezugspegel Thw-Scheitelwerte errechnet und anschließend mit den gemessenen Werten verglichen.

Bei der Auswertung wurde die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und gerechneten Wasserständen als Beurteilungskriterium herangezogen. Hierbei zeigten sich durchweg etwas bessere Ergebnisse bei der Berechnung fehlender Daten über Eintrittswahrscheinlichkeiten als bei der linearen Regression, d. h., der mittlere Fehler war geringer.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die im Vergleich zur linearen Regression größere Datenbasis, die als Grundlage der Berechnung dient. Während die Regressionsgerade nur aus Wertepaaren ermittelt werden kann, die zeitlich vor und/oder nach der Meßlücke liegen, fließen beim Ermitteln der Verteilungsfunktion des Bezugspegels die Daten des Zeitraums der Lücke mit in die Berechnung ein. Insbesondere beim Schließen von Lücken über einen größeren Zeitraum ist dies ein entscheidender Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der linearen Regression.

Trotz der bei diesen Untersuchungen insgesamt besseren Ergebnisse sollten vor dem Schließen echter Datenlücken stets Proberechnungen an künstlich erzeugten Lücken durchgeführt werden. Anhand der Ergebnisse (besonders für extreme Wasserstände) ist von Fall zu Fall zu entscheiden, welchem Verfahren der Vorzug zu geben ist.

5.4 Schließen der Meßlücke 1945 bis 1952 des Pegels Helgoland

In der Zeit nach dem 2. Weltkrieg konnten zwischen 1945 und 1952 am Pegel Helgoland keine Wasserstände aufgezeichnet werden bzw. sind nicht mehr auffindbar. Wegen der besonderen Bedeutung dieses Inselpegels im Küstenvorfeld für die Bewertung der Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht wurde versucht, diese Lücke zu schließen.

Aufgrund von Regressionsberechnungen wurde der Pegel Lt. Roter Sand als Bezugspegel ausgewählt. Berechnungen mit künstlich erzeugten Lücken des Pegels Helgoland, die mit Hilfe der Daten dieses Bezugspegels über Eintrittswahrscheinlichkeiten geschlossen wurden, zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung; der mittlere Fehler beträgt 4 cm. Wie u. a. die Trenduntersuchungen in Abschnitt 3 zeigen, weist der Pegel Helgoland mit einem deutlich geringeren Anstieg der MThw ein anderes Verhalten als die übrigen untersuchten Zeitreihen auf. Wegen dieser Abweichungen ist es schwierig, einen direkten Bezug zu anderen Pegelstandorten herzustellen.

Nachdem allerdings eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Thw bei der Schließung künstlicher Lücken des Pegels Helgoland festgestellt wurde, wurden mit Hilfe der KFKI- μ -Verteilung die fehlenden 5644 Thw-Scheitelwerte zwischen 1945 und 1952 ermittelt. Abb. 39 zeigt eine Zusammenfassung der aus den für die Datenlücke berechneten Einzelwerten ermittelten Monats- und Jahresmittelwerte.

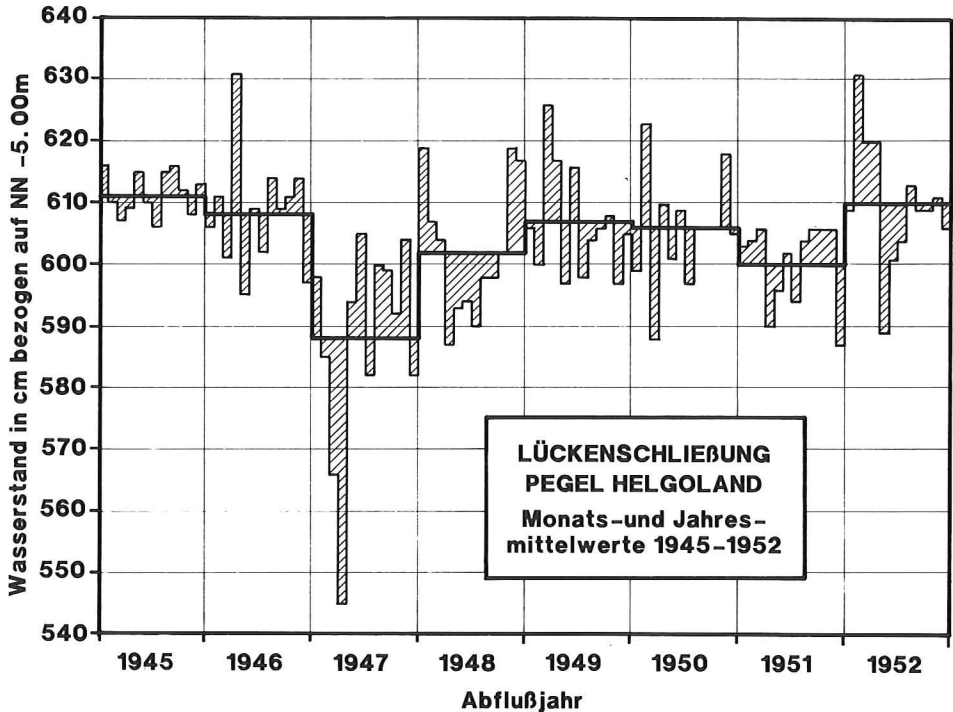


Abb. 39: Monats- und Jahresmittelwerte des Pegels Helgoland von 1945 bis 1952 ergänzt mit Hilfe der KFKI- μ -Verteilung

In Tabelle 13 sind die mit Hilfe der KFKI- μ -Verteilung ermittelten Jahresmittelwerte des Tidehochwassers den von JENSEN ermittelten Werten gegenübergestellt. Die Differenz zwischen den nach verschiedenen Verfahren berechneten Mittelwerten beträgt lediglich ± 1 cm.

5.5 Ergänzung fehlender Eintrittszeiten

Im Regelfall fehlen bei lückenhaften Wasserstandsaufzeichnungen auch die zugehörigen Eintrittszeiten. Die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) veröffentlichten vorausberechneten Gezeitentafeln können nur die astronomischen Einflüsse auf die Eintrittszeiten berücksichtigen, nicht aber die meteorologischen Wirkungen. Wegen der z. T. erheblichen Abweichungen zwischen den berechneten und den eingetretenen Zeiten können fehlende Eintrittszeiten nicht ohne weiteres aus den Gezeitentafeln übernommen werden.

Als Möglichkeit zur Ergänzung fehlender Zeitaufzeichnungen bietet es sich an, Zeitdifferenzen (Gezeitenunterschiede) zu Nachbarpegeln zu berechnen. Bei der Auswertung solcher Ergebnisse zeigt es sich jedoch, daß die Eintrittszeitdifferenzen sehr stark streuen. Abweichungen vom Mittelwert der Laufzeitdifferenzen können selbst bei benachbarten Pegeln 120 Minuten und mehr betragen. Ursache dafür sind die topographischen Randbedingungen und meteorologische Wirkungen. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden bislang keine Zeitlücken mit Hilfe berechneter Gezeitenunterschiede geschlossen.

Daneben wurden im Rahmen dieses Projektes Berechnungen der Eintrittszeitdifferenzen

Tabelle 13. Vergleich berechneter Thw-Jahresmittelwerte von 1945 bis 1952 für den Pegel Helgoland

Jahr	Berechnung der MThw [cm bezogen auf NN -5.00 m]		Differenz [cm]
	nach JENSEN	mit KFKI- μ -Verteilung	
1945	612	611	-1
1946	609	608	-1
1947	589	588	-1
1948	601	602	+1
1949	607	607	0
1950	606	606	0
1951	600	600	0
1952	611	610	-1

der Thw (und Tnw) gegen den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.2). Gegenüber der Ermittlung von Zeitdifferenzen zu Nachbarpegeln hat diese Art der Berechnung den Vorteil, Einflüsse der Bezugspegel auf die Differenzbildung auszuschließen. Dennoch ist auch bei diesen Ergebnissen noch eine erhebliche Streuung festzustellen.

Darüber hinaus unterliegen die Zeitdifferenzen abhängig vom Pegelstandort einem signifikanten Trend in Richtung einer Laufzeitverkürzung, d. h., die Thw bzw. Tnw treten, bezogen auf den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian, eher ein als in zurückliegenden Jahren. Bezogen auf 34 Jahre (berechnet aus ca. 24 000 Einzelwerten der Zeitreihe 1954 bis 1987) ergibt sich eine Reduzierung von bis zu $28 \pm 0,7$ Minuten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Ergänzung fehlender Eintrittszeiten vor allem wegen der vielfältigen zufälligen Einflüsse außerordentlich schwierig ist.

5.6 Bewertung des Verfahrens

Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob fehlende Wasserstände oder deren Eintrittszeiten zu ergänzen sind. Es wurde gezeigt, daß eine allgemeingültige Empfehlung für ein Verfahren nicht gegeben werden kann. Je nach Größe der Lücke eignen sich verschiedene Methoden, diese zu schließen. Daneben ist zu beachten, in welcher Weise die Daten weiterverarbeitet werden sollen und mit welcher Zielsetzung die Zeitreihen ausgewertet werden. Beim Auffüllen von Datenlücken sind Trends sowie Periodizitäten in einer Wasserstandsreihe zu berücksichtigen. Weiterhin ist zu prüfen, inwieweit sich die statistischen Parameter einer Datenreihe nach dem Ergänzen von Werten geändert haben.

Bevor eine bestimmte Methode zum Schließen einer Datenlücke ausgewählt wird, sollte die Güte des Verfahrens an mehreren künstlich erzeugten Lücken der betreffenden Pegeldatenreihe überprüft werden. Ergänzte Werte, d. h. nachträglich berechnete Wasserstände oder Eintrittszeiten, sind zur Unterscheidung von gemessenen Daten in einem Datensatz mit einer entsprechenden Kennziffer zu versehen. Zur Information für spätere Bearbeiter sollte jede Ergänzung entsprechend dokumentiert werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsprojektes „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) wurde mit mathematisch-statistischen Methoden die Entwicklung des Tidegeschehens anhand von Scheitelwasserständen (Th_w , Tn_w) und deren Eintrittszeiten analysiert. Hintergrund dieser Untersuchungen ist ein vermuteter weltweiter Meeresspiegelanstieg, der insbesondere an flachen Küsten und Tideästuarien zu tiefgreifenden Veränderungen (z. B. der Morphologie) führen kann.

Die Wasserstandsentwicklung in der Nordsee ist seit dem Ende der letzten Eiszeit durch Transgressions- (Wasserspiegelanstieg) und Regressionsphasen (Wasserspiegelrückgang) gekennzeichnet. Die Entwicklung der Tidewasserstände steht dabei in unmittelbarem Zusammenhang mit der gesamten Topographie des Küstenvorfeldes und dem Abbruchgeschehen an den Küsten. Für die Unterhaltung und Planung von Küstenschutzmaßnahmen sind Aussagen zur Entwicklung der Tidewasserstände sowie der Tidedynamik erforderlich.

Im Gegensatz zu ähnlichen Untersuchungen, die bisher überwiegend auf der Basis von Mittelwerten (z. B. die Jahresmittelwerte MTh_w , MTn_w und MTh_b) durchgeführt wurden, wird in den vorliegenden Untersuchungen von Einzelwerten ausgegangen, d. h., alle Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände einschließlich der Eintrittszeiten bilden die Grundlage der Analysen. Auf der Basis dieses Datenmaterials sind nicht nur Aussagen zur Entwicklung der Tidewasserstände bzw. des Tidehubs (Th_b), sondern auch zur Entwicklung der Ebbe- und Flutdauer sowie der Tidelaufzeiten zwischen den einzelnen Pegeln möglich. Damit können durch die Verbindung von hydrologischen und meteorologischen Daten auch die meteorologischen Wirkungen auf die Wasserstände und das Tidegeschehen beurteilt werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Analyse der Wasserstandsentwicklung sind möglichst lange qualitativ hochwertige Datenreihen. Deshalb wurde nach der Beschaffung der „Rohdaten“ bei der Projektbearbeitung größter Wert auf die Aufarbeitung, d. h. die Kontrolle und Ergänzung bzw. Korrektur der Einzelwert-Zeitreihen, gelegt.

Nach diesen Vorarbeiten konnte ein qualitativ hochwertiges Datenkollektiv von Einzelwert-Zeitreihen zusammengestellt werden. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, daß durch weitere Untersuchungen Korrekturen der etwa $2 \cdot 10^6$ Einzelwerte angebracht werden müßten.

Die Auswertung der Pegeldata erfolgte mit verschiedenen statistischen Methoden. Zur Erkennung langfristiger Entwicklungen innerhalb der Zeitreihen wurde das Verfahren der linearen Regression herangezogen. Da die Wasserstandsentwicklung an den einzelnen Pegelstandorten durch die lokalen Randbedingungen Unterschiede aufweist, wurde die Hauptkomponentenanalyse auf die Pegelzeitreihen angewandt. Mit dieser Methode kann der Anteil des Gezeitensignals, der in allen betrachteten Pegelzeitreihen gemeinsam enthalten ist, ermittelt werden. Damit wurde es möglich, die Größe eines gemeinsamen Trends der Wasserstandsentwicklung an den deutschen Pegelstandorten anzugeben. Um festzustellen, welche Perioden oberhalb der halbtägigen Haupt-Mondtide in den Pegeldata auftreten und wieviel Energie mit diesem Spektralbereich vorhanden ist, wurden die Datenreihen mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Durch Rücktransformation und digitale Filterung konnten bestimmte Spektralbereiche in den Zeitreihen näher untersucht werden.

Die Amplitude und Phasenverschiebung der Nodaltide, mit einer Periode von 18,6 Jahren und einem Maximum der Gezeitenkräfte z. B. in den Jahren 1978/79, wurden mit Hilfe von Optimierungsrechnungen ermittelt. Damit kann ein Teil der Tidehubentwicklung erklärt werden.

Die Untersuchungen zur Entwicklung einer Verteilungsfunktion für die Thw-Einzelwert-Zeitreihen ermöglichen eine Abschätzung von Wasserständen mit bestimmten Wiederkehrintervallen und das Schließen von Datenlücken innerhalb der Thw-Zeitreihen.

Die bisher eingetretene langfristige Entwicklung der Wasserstände ist im wesentlichen bekannt. Für das Thw ist bei allen Pegeln ein Anstieg zu verzeichnen, der sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt hat. Das Thw weist, nachdem es Anfang der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zunächst leicht absank, in den vergangenen Jahren ein stationäres Verhalten bzw. einen leicht positiven Trend auf. Die Entwicklung der Scheitelwasserstände bewirkt dementsprechend nach 1950 eine Zunahme des Tidehubs. Das Tidehalbwasser, als Approximation für den mittleren Meeresspiegel (MSL), zeigt demzufolge ein unterschiedliches Verhalten; es steigt in geringerem Maße als das Thw. Allerdings deuten die Auswertungen für den kurzen Zeitraum der letzten zwei Jahrzehnte bis 1991 an, daß zukünftig für das MTnw und das MThw und damit auch für das MT^{1/2}w bzw. den MSL ein einheitlicheres Anstiegsverhalten erwartet werden kann.

Die Gezeitendynamik in der Deutschen Bucht wurde auch anhand der Flut- und Ebbbedauern sowie der Eintrittszeitdifferenzen zum Monddurchgang durch den Nullmeridian untersucht. Diese Untersuchungen deuten ebenfalls Veränderungen der Tidedynamik an. Die Zeitdifferenzen zwischen dem Auftreten der Scheitelwasserstände und dem Monddurchgang durch den Nullmeridian weisen auf eine Reduzierung der Tidelaufzeiten hin.

Weitere Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sind in den folgenden Veröffentlichungen dargestellt: JENSEN, MÜGGE und VISSCHER (1988), JENSEN, MÜGGE und SCHÖNFELD (1990), JENSEN und SCHÖNFELD (1990a), JENSEN und SCHÖNFELD (1990b), SCHÖNFELD und JENSEN (1991), MÜGGE und JENSEN (1991) und MÜGGE (1992).

Aus den vorliegenden Untersuchungen können keine Prognosen für die zukünftige Wasserstandsentwicklung abgeleitet werden. Die Aussagen zur bisherigen Entwicklung weisen allerdings auf Änderungen des Tidegeschehens in der Nordsee hin. Diese Änderungen sind bei der Beurteilung der zukünftigen Wasserstandsentwicklung bzw. Tidedynamik zu berücksichtigen.

Für die Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, daß für die ostfriesische Küste nach Auswertungen neuerer Nivellements Landsenkungen von 5 bis 10 cm/100 Jahre zu erwarten sind. Sollten sich ähnliche Werte für den Bereich der gesamten deutschen Küste bestätigen, wird die Erklärung der Veränderungen innerhalb der Wasserstandszeitreihen, besonders der Vergrößerung des Tidehubs, noch komplexer.

Aus der vorliegenden Projektbearbeitung ist ein weiterer Forschungsbedarf festzustellen. Neben Aussagen zur Wasserstandsentwicklung in einem bestimmten Seegebiet, wie z. B. die vorliegenden Untersuchungen für den Bereich der Deutschen Bucht, sind Untersuchungen zur globalen Meeresspiegelentwicklung der Nordsee bzw. des Atlantiks und zu lokalen Effekten, wie z. B. Untersuchungen der Wasserstandsentwicklung in den Tideästuaren und -flüssen, von großer Bedeutung. Für eine Gesamtbeurteilung der Wasserstandsentwicklung bzw. eines weltweiten Meeresspiegelanstiegs sind Wasserstandsanalysen der weitgehend tidefreien Ostseepegel unbedingt zu empfehlen.

Weitere genaue Beobachtungen und Analysen der Wasserstände sind gerade im Hinblick auf die Auswirkungen erwarteter Klimaveränderungen dringend notwendig. Dies betrifft sowohl die kontinuierliche Fortschreibung und Kontrolle der Wasserstandszeitreihen als auch Untersuchungen von historischen Daten.

7. Schriftenverzeichnis

- AITCHINSON, J. u. BROWN, J. A. C.: The Lognormal Distribution. Cambridge, 1957.
- AUBREY, D. G.: Seasonal Patterns of Onshore/Offshore Sediment Movement. *Journal of Geophysical Research* Vol. 84, No. C10, 1979.
- AUBREY, D. G. u. EMERY, K. O.: Eigenanalysis of recent United States Sea Levels. *Continental Shelf Research*, Vol. 2, No. 1, 1983.
- AUGARTH, W.: Stand der Untersuchungen zur tektonischen Küstensenkung. Vortrag vor der KFKI-Beratungsgruppe am 3./4. 10. 1989 in Norddeich (unveröffentlicht).
- BARTELS, J.: Gezeitenkräfte. *Handbuch der Physik*, Bd. XLVIII, 1952.
- CHOW, Ven Te: *Handbook of applied hydrology*. Mc Graw Hill, New York, 1964.
- DIETRICH, G.: Ozeanographisch-meteorologische Einflüsse auf Wasserstandsänderungen des Meeres am Beispiel der Pegelbeobachtungen von Esbjerg. *Die Küste*, Jg. 2, H. 2, 1954.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. *Mitt. d. Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig*, H. 51, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstiegs an der deutschen Nordseeküste. *Wasser und Boden*, H. 9, 1986.
- FÜHRBÖTER, A., JENSEN, J., SCHULZE, M. u. TÖPPE, A.: Sturmflutwahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste nach verschiedenen Anpassungsfunktionen und Zeitreihen. *Die Küste*, H. 47, 1988.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, H. 42, 1985.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. *Mitt. d. Leichtweiß-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig*, H. 83, 1984.
- JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der Nordseeküste. *Mitt. d. Leichtweiß-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig*, H. 88, 1985.
- JENSEN, J.: Anwendungen der JENKINSON-Funktion zur Ermittlung von meteorologischen Bemessungsereignissen. *Mitt. d. Leichtweiß-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig*, H. 98, 1987.
- JENSEN, J., MÜGGE, H.-E. u. VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, H. 47, 1988.
- JENSEN, J., MÜGGE, H.-E. u. SCHÖNFELD, W.: Development of water level changes in the German Bight – an analysis based on single value time series. *Proc. 22nd ICCE, Delft*, 1990.
- JENSEN, J. u. SCHÖNFELD, W.: Pegelzeitreihen der deutschen Nordseeküste, Erkenntnisse aus einer statistischen Analyse. *HANSA*, 127. Jahrgang, H. 17/18, 1990/91.
- JENSEN, J. u. SCHÖNFELD, W.: Erkenntnisse aus der statistischen Analyse von Pegelzeitreihen der deutschen Nordseeküste. *Jahrb. HTG*, 45. Bd., 1990.
- JENSEN, J. u. TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertungen von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. *DGM*, Jahrgang 30, H. 4, 1986.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. *Die Küste*, H. 50, 1989.
- LAUKART, W.: Ermittlung langfristiger Wasserstandsänderungen aus Pegelregistrierungen. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Nr. 104, 1981.
- LIETZ, U.: Zum Nullpunkt der Pegel Roter Sand und Alte Weser. *DGM*, Jahrg. 30, H. 2/3, 1986.
- LISITZIN, E.: *Sea-Level Changes*. Elsevier Oceanography Series, Vol. 8, 1974.
- LOHRBERG, W.: Die Höhen der mittl. Tidemittelwasserstände an den Pegeln Roter Sand und Alte Weser und auf Helgoland im Vergleich mit denen einiger Küstenpegel an der Nordsee. *DGM*, Jahrg. 24, H. 1, 1980.
- LOHRBERG, W.: Die Säkularvariation an einigen Pegeln zwischen Harlingen und Esbjerg sowie die Bedeutung 19jähriger übergreifender Mittel für deren Bestimmung. *Bes. Mitt. z. Dt. Gewässerkd. Jahrbuch* 43, Koblenz, 1983.
- LOHRBERG, W.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. *DGM*, Jahrg. 33, H. 5/6, 1989.
- LORENZ, E. N.: *Prospects For Statistical Weather Forecasting; Final Report*, Statistical Forecasting Project, Dpt of Meteorol., Mass. Inst. of Tech., Boston, 1959.
- LUCK, G.: Beschleunigung des Spiegelanstiegs der Weltmeere und Folgen. *Mitt. aus dem Nieders. Landesamt f. Wasserwirtschaft*, H. 5, 1987.

- LÜDERS, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Zentralblatt der Bauverw., H. 50, 1936.
- MADE, J. W. VAN DER: Analysis of some criteria for design and operation of surface water gauging networks. Rijkswaterstaat communications, no. 47, Thesis Technical University Delft, The Hague, 1988.
- MANIAK, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988.
- MÜGGE, H.-E. u. JENSEN, J.: Untersuchungen zum Pegelstandort Büsum. DGM, Jahrg. 35, H. 1, 1991.
- MÜGGE, H.-E.: Anpassungsfunktion der Thw-Scheitelwerte. Wasser und Boden, H. 8, 1992.
- NYBERG, L.: Sea Level Forecasts with an EOF Model, in: Sündermann, J., Lenz, W., (eds.): North Sea Dynamics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1983.
- PREISSENDORFER, R. W.: Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography Elsevier. Amsterdam, New York, 1988.
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
- ROHDE, H.: Zur Geschichte des Pegels Helgoland. DGM, Jahrg. 26, H. 5, 1982.
- ROHDE, H.: Die Pegel auf Helgoland. Die Küste, H. 49, 1990.
- SACHS, L.: Angewandte Statistik. Springer-Verlag, Berlin 1974.
- SCHÖNFELD, W. u. JENSEN, J.: Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln. Die Küste, H. 52, 1991.
- SCHÜTTE, H.: Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste. Jb. Oldenburg, Ver. Altertumskunde, Landesgesch. 16, Oldenburg, 1908.
- SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, H. 37, 1982.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.
- SPETH, P. u. DETLEFSEN, H.: Empirical Orthogonal Functions of Sea Level Pressure and Sea Surface Temperatures for the Upwelling Areas of Northwest Africa. DHZ 32, H. 4, 1979.
- STEARNS, S.: Digitale Verarbeitung analoger Signale. Oldenburg, 3. Aufl., 1987.
- TÖRNEVIK, H.: Application of EOF to sea level forecasting. E.C.M.W.F., Workshop on the use of Empirical Orthogonal functions in Meteorology, 1977.
- ÜBERLA, K.: Faktorenanalyse. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
- DE VALK, C.: Hoofkomponenten-analyse van meetreeksen. Waterloopkundig laboratorium, H. 535, 1988.
- WOODWORTH, P. L., SHAW, S. M. u. BLACKMAN, D. L.: Secular Trends in Mean Tidal Range Around the British Isles and Along the Adjacent European Coastline, unveröffentlichtes Manuskript, 1990.
- YEVJEVICH, V.: Probability and Statistics in Hydrology. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1972.
- Jahrbücher für die Gewässerkunde Norddeutschlands, 1901 bis 1937.
 - Jahrbücher für die Gewässerkunde des Deutschen Reiches, 1938 bis 1940.
 - Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher 1941 bis 1987.
 - Pegelstammbücher des Pegels Büsum.
 - Schutz der Erdatmosphäre: Eine internationale Herausforderung; Zwischenbericht der Enquete-Komm. des 11. Deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“. Hrsg.: Dt. Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn, 1988.
 - WSD NORDWEST: Zur Vergleichbarkeit der Nordseepegel „Roter Sand“ mit „L.T. Alte Weser“, Bericht Dezernat T3, 1986.