

Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht*

VON JÜRGEN JENSEN, HANS-ECKART MÜGGE U. GEORG VISSCHER

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsprojektes „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) wird versucht, mit mathematisch-statistischen Methoden die Entwicklung des Tidegeschehens zu analysieren. Anlaß hierfür ist der in jüngster Zeit weltweit zu beobachtende Meeresspiegelanstieg, der insbesondere an flachen Küsten und Tideästuaren zu tiefgreifenden Veränderungen führen kann.

Im Gegensatz zu ähnlichen Untersuchungen, die bisher überwiegend mit Mittelwerten durchgeführt wurden, wird in der vorliegenden Untersuchung von Einzelwerten ausgegangen. Die Gründe hierfür liegen darin, daß bei der Verwendung von Mittelwerten die Veränderungen in einer Datenreihe nur mittel- und langfristig beschrieben werden können; kurzperiodische Vorgänge werden unter Umständen verfälscht oder nicht erfaßt.

Nach der Aufbereitung der Daten von insgesamt 12 Tidepegeln erfolgten erste Trendanalysen für verschiedene Zeiträume sowie Untersuchungen über die zeitliche Entwicklung des Trends. Hier zeichnet sich ab, daß in den letzten 30 Jahren eine Veränderung in der Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste eingetreten ist. Eine umfangreiche Analyse (Fast-Fourier-Transform) der in den Zeitreihen enthaltenen periodischen Anteile bestätigt die ersten Ergebnisse aus den Trendberechnungen. Die Amplituden langperiodischer Schwingungen haben sich deutlich verstärkt; vermutlich sind auch Frequenzverschiebungen innerhalb des Spektrums der untersuchten Zeiträume eingetreten.

Summary

In the research project "The Changes in the Water Level along the German Coastline", sponsored by the BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie - Federal Ministry for Research and Technology), the KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen - Direktorium for Research in Coastal Engineering) is trying to analyse the development of tidal phenomena using statistical and mathematical methods. This research has its justification in the sea level rise which has recently been observed world wide. This could result in violent alterations of flat coastal regions.

In the present analysis, isolated rather than mean values have been used since mean values allow only a description of medium and long term events. Short-periodic incidents could be falsified or remain undetected.

After the data of 12 tide gauges had been checked, a first analysis of trends for different time periods as well as their temporal changes was conducted. For the last 3 decades a change in the tidal dynamics of the German North Sea Coast can be detected. An extensive analysis (Fast-Fourier-Transform) of the periodic components of the time series confirms the initial results. The amplitudes of the long period oscillations have intensified; probable frequency shifts have also occurred in the spectra of the investigated time series.

Inhalt

1. Veranlassung	136
2. Pegelauswahl	137
3. Datenerfassung und Datenkontrolle	138

* Zwischenbericht zum KFKI-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“

4. Angewandte Verfahren bei der Zeitreihenanalyse	141
4.1 Lineare Regression	141
4.2 Fast-Fourier-Transform	142
4.3 Butterworth-Filter	142
5. Ergebnisse der Zeitreihenanalysen	143
5.1 Lineare Regression	143
5.1.1 Lineare Regression mit Schrankensetzung	144
5.1.2 Lineare Regression mit 25jährigem Zeitfenster	146
5.2 Fourier-Analyse und Filterung	147
5.2.1 Untersuchung der Tidehochwasser	147
5.2.2 Untersuchung der Tideniedrigwasser	152
5.2.3 Untersuchung des Tidehubs	154
5.2.4 Untersuchung der Flutdauer	155
5.2.5 Untersuchung der Tidelaufzeiten	157
6. Ausblick	160
7. Schriftenverzeichnis	160

1. Veranlassung

Die Wasserstandsentwicklung der Nordsee ist seit dem Ende der letzten Eiszeit durch Transgressions- (Wasserspiegelanstieg) und Regressionsphasen (Wasserspiegelrückgang) gekennzeichnet (vgl. z. B. ROHDE, 1977). Die Entwicklung der Tidewasserstände steht dabei im unmittelbaren 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 (vgl. JENSEN, 1984; FÜHRBÖTER u. JENSEN, 1985).

Die eustatischen Veränderungen des globalen Meeresspiegels sind Folgen von weltweiten Klimaänderungen, die im wesentlichen noch Folgeerscheinungen der letzten Eiszeit sind. Neben den nachgewiesenen eustatischen Änderungen des Weltmeeresspiegels, die als Säkularanstieg bezeichnet werden, stellt sich besonders für ein flaches Randmeer wie die Nordsee die Frage, inwieweit die Tidedynamik durch die Wasserstandsentwicklung beeinflusst wird.

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.

Seitdem ist in einer Vielzahl von Veröffentlichungen diese Thematik behandelt worden (Schrifttumshinweise finden sich z. B. bei JENSEN, 1985). Die Entwicklung der Meeresspiegel-lagen ist dabei nicht stationär, sondern unterliegt zeitlichen Veränderungen bzw. Schwankungen. Bei der Durchsicht der Literatur ist auffällig, daß von vielen Verfassern ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg in der jüngsten Zeit beobachtet wird (FÜHRBÖTER, 1986; LUCK, 1987). Besonders in der amerikanischen Literatur werden nach Modellrechnungen Werte für einen weltweiten Meeresspiegelanstieg von etwa 0,4 bis mehr als 2 m für den Zeitraum der nächsten 100 Jahre angegeben (vgl. BARTH u. TITUS, 1984).

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ des KFKI wird versucht, mit mathematisch-statistischen Methoden die Entwicklung des Tidegeschehens zu analysieren. Abweichend von Untersuchungen, die auf Mittelwerten basieren, wird in diesem Forschungsprojekt von Einzelwerten ausgegangen, d. h., alle Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände einschließlich der Eintrittszeiten bilden die Grundlage der Analysen (vgl. z. B. SIEFERT u. LASSEN, 1985). Auf der Basis dieses Datenmaterials sind nicht

nur Aussagen zur Entwicklung der Tidewasserstände bzw. des Tidehubs (Thb), sondern auch zur Entwicklung der Ebbe- und Flutdauer sowie der Tidelaufzeiten zwischen einzelnen Pegeln möglich. Darüber hinaus soll durch die Einbindung von meteorologischen Daten versucht werden, die meteorologischen Wirkungen auf die Wasserstände und das Tidegeschehen zu beurteilen.

2. Pegelauswahl

In Zusammenarbeit mit den zuständigen Ämtern der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) wurden insgesamt 12 Tidepegel an der deutschen Nordseeküste für die Untersuchungen ausgewählt. Zusätzlich werden zu vergleichenden Betrachtungen in weiteren Untersuchungen die beiden Ostseepegel Kiel und Travemünde herangezogen.

Die Datenreihen der Pegel sollten dabei unter Berücksichtigung der übergeordneten hydrologischen Fragestellung bestimmten Kriterien genügen:

- Die Aufzeichnungen des Pegels sollten nur wenig durch bauliche Maßnahmen (Schleusen, Siele) oder durch umgebende Topographie (Watrücken, Priele) beeinflusst werden
- Veränderungen des Höhenbezugs oder Standortverlegungen innerhalb des Untersuchungszeitraumes sollten möglichst nicht vorliegen oder zumindest ausreichend dokumentiert sein
- Die zur Verfügung stehende Datenreihe sollte einen möglichst langen Zeitraum umfassen
- In Hinsicht auf die geplante rechnergestützte Bearbeitung sollten die Tidewerte in digitaler Form auf Datenträger vorhanden sein

Nur ein geringer Teil dieser Pegel kann jedoch die oben genannten Bedingungen zufriedenstellend erfüllen.

Die überwiegende Anzahl der Pegel wurde im Laufe der Zeit z.T. mehrfach versetzt und in der Bezugshöhe korrigiert. Zudem sind die Daten auf unterschiedlichen Datenträgern in verschiedenen Behörden archiviert, mit z.T. ungenauen Angaben über die Herkunft oder „Unversehrtheit“ der jeweiligen Zeitreihe.

Im Sinne der gestellten Aufgabe werden die Zeitreihen der folgenden Pegel für die Analyse herangezogen:

Pegelstation	Standort	Zeitraum
Emden	Neue Seeschleuse	1950 bis 1986
Borkum	Fischerbalje bzw. Südstrand	1936 bis 1986
Norderney	Riffgat bzw. Hafen	1936 bis 1986
Lt. Alte Weser	bzw. Lt. Roter Sand	1936 bis 1986
Wilhelmshaven	Alter Vorhafen	1936 bis 1986
Cuxhaven	Steubenhöft	1890 bis 1986
Büsum		1953 bis 1986
Husum		1952 bis 1986
Wittdün		1952 bis 1986
Dagebüll		1952 bis 1986
List		1952 bis 1986
Helgoland		1954 bis 1986
Kiel		1939 bis 1986
Travemünde		1937 bis 1986

Abb. 1. gibt eine Übersicht der für diese Untersuchung ausgewählten Pegel. Nach der geographischen Lage lassen sich drei Standortkategorien unterscheiden: Festlandspegel, Inselpegel und Mündungspegel an Tideästuaren.

Ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl der Tidepegel ist die zeitliche Länge der Aufzeichnungen. Je länger eine gesicherte Datenreihe zur Verfügung steht, desto aussagekräftiger sind die Ergebnisse einer statistischen Analyse.

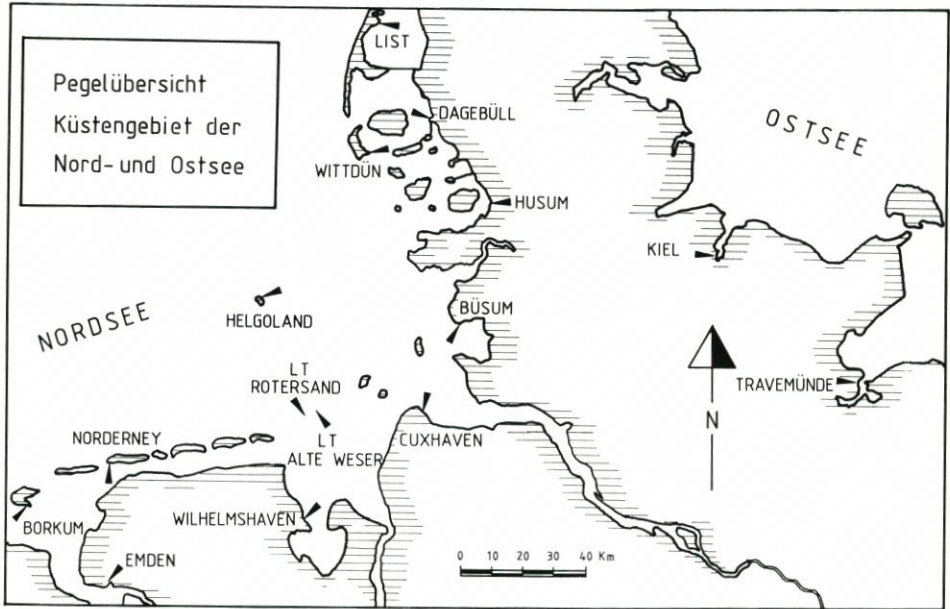


Abb. 1: Übersicht der ausgewählten Pegel in der Nord- und Ostsee

3. Datenerfassung und Datenkontrolle

Gleichzeitig mit der Auswahl der Pegel ist die Frage der Datenherkunft und Archivierung zu klären. Dafür steht zum einen das „Deutsche Gewässerkundliche Jahrbuch“ mit einem gesonderten Band „Küstengebiet der Nord- und Ostsee“ zur Verfügung, in dem die täglichen Scheitelwerte der Hoch- und Niedrigwasserstände und deren Eintrittszeiten veröffentlicht werden. Zum anderen verfügt das Deutsche Hydrographische Institut (DHI) in Hamburg über umfangreiche Datenbestände auf Datenträger, ebenso die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe.

Leider gibt es von weiter zurückliegenden Zeitreihen (etwa vor 1935) mit Ausnahme des Pegels Cuxhaven kaum noch Daten, die ohne manuelle Zwischenschritte mit der Elektronischen Datenverarbeitung (EDV) erfassbar sind. In diesem Fall müssen von den betreffenden Ämtern die Originalpegelbögen oder -listen angefordert und nachträglich durch Handeingabe der Werte die Reihen ergänzt, verlängert und auf Datenträgern abgelegt werden. Aus Gründen der Datensicherheit werden alle erhaltenen Daten mit entsprechenden Prüfprogrammen in Zusammenarbeit mit den zuständigen Ämtern verifiziert.

Für eine detaillierte Analyse der komplexen Zusammenhänge der Wasserstandsentwicklung an der Nordseeküste ist ein qualitativ hochwertiger Datenbestand zwingend notwendig.

Aus diesem Grund wird dieser Aufgabenstellung eine große Bedeutung beigemessen. Darüber hinaus wird durch die Zusammenstellung zuverlässiger Datenreihen die wesentliche Voraussetzung für weitere Untersuchungen zu diesem Themenkomplex geschaffen.

Das Umsetzen und die Kontrolle der Pegeldaten erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand. Obwohl die Schließung kürzerer Lücken mit errechneten Werten auf die statistischen Parameter kaum Einfluß hat, sollten alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die Originalwerte in die Untersuchung einfließen zu lassen. Für erste Kontrollen der digital erfaßten Zeitreihen sind EDV-Programme erstellt worden, die nach bestimmten Kriterien (Grenzwertüberschreitung) sowohl die Eintrittszeiten der Tidehochwasser (Thw) und Tide-niedrigwasser (Tnw) als auch deren Scheitelwerte überprüfen.

So lassen sich Eingabefehler, die beim Digitalisieren entstanden sind, relativ leicht ermitteln, da diese in der Regel erheblich aus der Kontinuität der Reihe herausfallen. Fehlerhafte Werte, die innerhalb des natürlichen Streubereichs liegen, lassen sich durch solche Kontrollprogramme nur schwer herausfinden. Eine Differenzenbildung zu Nachbarpegeln kann hier noch weitere Unstetigkeiten aufzeigen, wie z.B. eine fehlerhaft angebrachte Korrektur des Höhenbezugs.

Da die Bezugshöhen der Pegelnullpunkte häufig verändert wurden, sind die Dateien auf ein einheitliches Bezugsniveau zu bringen. Dieses Niveau wird auf NN - 5,00 m nS (neues System der Landesaufnahme) entsprechend den amtlichen Vorschriften festgelegt.

Neben den Nullpunktveränderungen müssen auch Lageveränderungen der Pegel berücksichtigt werden. Der Pegel Büsum ist beispielsweise zwischen 1915 und 1953 4mal versetzt worden. In derartigen Fällen muß sichergestellt sein, daß durch die Standortverlegung der Meßeinrichtung - oft infolge Baumaßnahmen - eine eindeutige Beziehung zwischen alten und neuen Pegelmeßdaten besteht. Nur wenn an beiden Standorten noch eine ausreichende Zeit parallel aufgezeichnet wird, ist eine gute Zuordnung möglich. Dabei können die Beziehungen 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 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:

$$\begin{aligned} \text{Thw}_{\text{AW}} &= \text{Thw}_{\text{RS}} - 10 \text{ cm und} \\ \text{Tnw}_{\text{AW}} &= \text{Tnw}_{\text{RS}} - 8 \text{ cm} \end{aligned}$$

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 eine relativ homogene Datenreihe vor. Abb. 2 zeigt anhand der Differenzen zu den beiden Nachbarpegeln Norderney und Wilhelmshaven die mit einem Tiefpaß gefilterten Thw vor und nach der Anpassung.

Mit Hilfe der EDV lassen sich zahlreiche zusätzliche Korrekturen anbringen, die bisher von den Ämtern nicht bearbeitet werden konnten. Durch die Verwendung von Einzelwerten

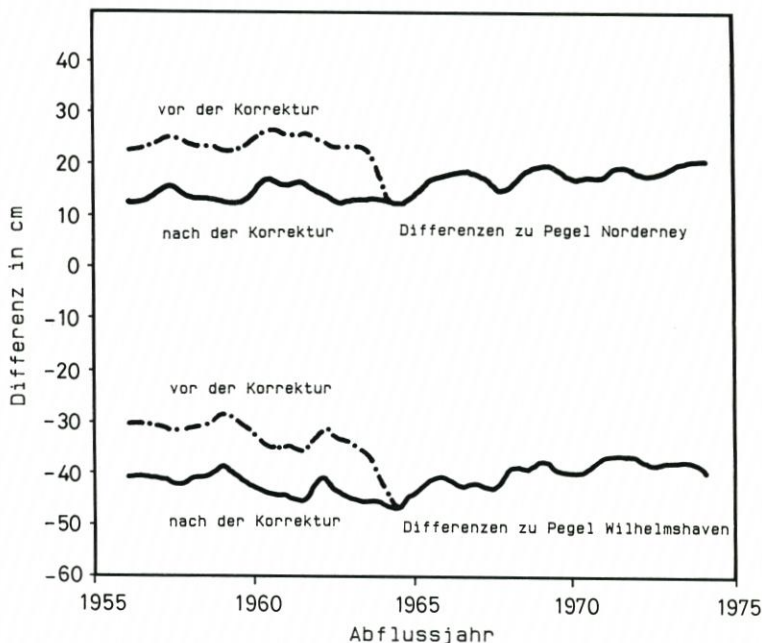


Abb. 2: Höhenangleichung der Thw des Pegels Lt. Roter Sand an den Pegel Lt. Alte Weser, Differenzkurven zu Pegel Norderney und Wilhelmshaven aus gefilterten Einzelwerten, Tiefpaß ab Periode 1024

ist sichergestellt, daß ein „Herausmitteln“ von Fehlern, wie es bei Monats- oder Jahreswerten geschehen kann, nicht erfolgt. Diese Vorgehensweise läßt bisher verborgene Fehler erkennen. Veränderungen, z. B. verursacht durch ein allmähliches Versanden des Pegelverbindungsrohres zum Gewässer, stellen sich in der Regel erst bei der eigentlichen Analyse der Daten heraus und zwingen so zu erneuter Korrektur und zu wiederholten Untersuchungen.

Die Datenreihe des Pegels Borkum Südstrand wurde ab 1981 durch Werte des Pegels Fischerbalje ersetzt, da Störungen und Unregelmäßigkeiten 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 werden die Auswertungen für den Pegelstandort Borkum bis zur Klärung dieses Sachverhalts nur bis zum Abflußjahre 1980 durchgeführt.

Ein Beispiel für eine Fehlererkennung als Nebenprodukt einer Datenanalyse zeigt sich bei der gefilterten Zeitreihe der Flut- und Ebbedauern des Pegels Norderney. Eine kontinuierliche Verkürzung der Flutdauer ab 1960 um ca. 20 Minuten und ein anschließendes Ansteigen auf das vorherige Niveau bis 1963 (vgl. Abb. 20) konnte durch die üblichen Datenkontrollen nicht erfaßt werden, da es sich um einen stetigen Vorgang handelt.

Für den Pegel Cuxhaven wird von SIEFERT und LASSEN (1985) eine Höhenänderung von +10 cm auf -2,7 cm für den Zeitraum von 1855 bis 1900 angegeben. Diese Korrektur wurde jedoch nicht angebracht, da sie ohne weitere Prüfung nicht auf Einzelwerte übertragbar ist.

Derartige Analysen erweisen sich als ein geeignetes zusätzliches Hilfsmittel, qualitativ hochwertige Zeitreihen zusammenzustellen. Ziel dieser aufwendigen Aufarbeitung der Einzelwertreihen ist es, homogene Datensätze zu schaffen, die eine Gewähr dafür bieten, daß die eigentliche Analyse zu möglichst zuverlässigen Ergebnissen führt. An dieser Stelle sei darauf

hingewiesen, daß die Ergebnisse den derzeitigen Stand der Datenaufarbeitung wiedergeben und sich u.U. noch zusätzliche Korrekturen bei der weiteren Bearbeitung als notwendig herausstellen.

4. Angewandte Verfahren bei der Zeitreihenanalyse

Nach Abschluß der Datenerfassung und -korrektur wird das Datenkollektiv der eigentlichen Analyse zugeführt. In der ersten Phase werden die aufbereiteten Daten als Häufigkeitsverteilung dargestellt, um eventuell vorhandene Besonderheiten der Verteilungen zu erkennen. Bei den untersuchten Pegelreihen zeigen sich jedoch keine signifikanten Abweichungen. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Häufigkeitsverteilung der Thw- und Tnw-Werte des Pegels Cuxhaven. Auf der Abszisse ist die Höhe über NN -500 cm mit einer Klassenbreite von 10 cm aufgetragen, auf der Ordinate die Häufigkeiten. Insgesamt werden für die Verteilung des Pegels Cuxhaven jeweils etwa 68 000 Werte verwendet. Gut zu erkennen ist die Normalverteilung der Thw, während die Glockenkurve der Tnw leicht linksschief verläuft.

4.1 Lineare Regression

Als erstes Verfahren der Zeitreihenanalyse bietet sich die lineare Regression an. Das Ergebnis ist die Steigung der Ausgleichsgeraden, die als Maß für die Veränderung der Thw-, Tnw- und Thb-Zeitreihen in dem betrachteten Zeitraum angesehen werden kann. Allerdings

Pegel Cuxhaven Häufigkeitsverteilung

Zeitraum 1890 bis 1986

Häufigkeiten in Tausend
(Klassenbreite 10 cm)

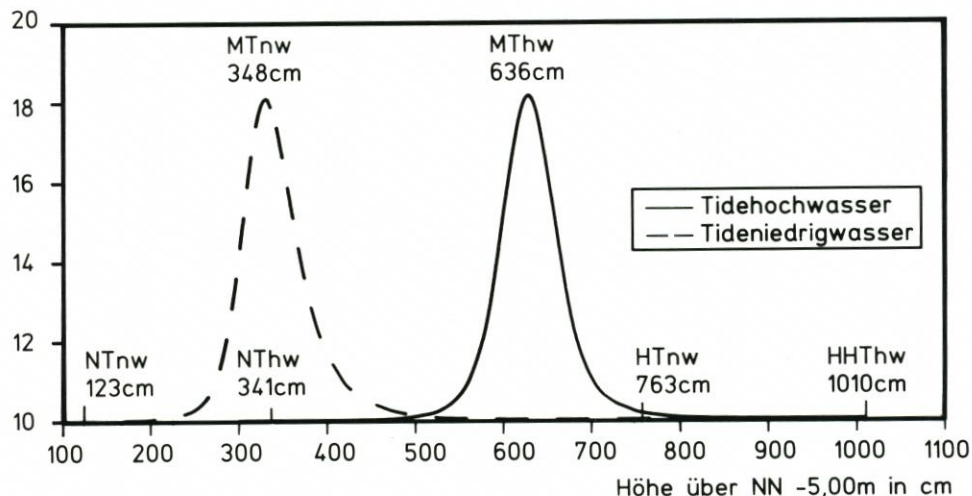


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Thw und Tnw des Pegels Cuxhaven für den Zeitraum von 1890 bis 1986

unterliegen die Wasserstandszeitreihen verhältnismäßig großen Schwankungen, so daß die Steigung der Ausgleichsgeraden (Trend) stark davon abhängt, welcher Zeitraum und welche Zeitspanne der Untersuchung zugrunde liegt. Dabei ist zu beachten, daß dieser Trend die Summe aller eustatischen, isostatischen, tektonischen, meteorologischen und astronomischen Einflüsse sowie anthropogene Wirkungen wie z. B. Baumaßnahmen und einen möglichen Treibhauseffekt beinhaltet. Durch die Möglichkeit, Extremwerte von den Daten zu trennen oder durch Verwendung eines gleitenden Zeitfensters (vgl. z. B. Methode „Vergeßlicher Chronist“ nach FÜHRBÖTER, 1976) kann die zeitliche Entwicklung detaillierter beschrieben werden.

4.2 Fast-Fourier-Transform

Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung von Einzelwerten liegt, wie eingangs erwähnt, in der Möglichkeit der Analyse von periodischen Vorgängen. Als eines unter mehreren geeigneten Verfahren wird hier die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) angewandt; im besonderen eine schnelle Variante, die von COOLEY und TURKEY (1965) publiziert und als Fast-Fourier-Transform (FFT) bezeichnet wurde. Dieser Algorithmus reduziert den erforderlichen Rechenaufwand erheblich, ist jedoch auf eine bestimmte Anzahl (2^n) von Stützstellen (z. B. Tidescheitelwerte) beschränkt. Die FFT ermöglicht damit noch die Berechnung von 2^{16} Werten bei einem vertretbaren Zeitaufwand.

Mit Hilfe der Fourier-Analyse kann die Transformation einer Zeitfunktion (Pegeldatenreihe) vom Zeitbereich in den Frequenzbereich durchgeführt werden. 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. Die Erfassung der einzelnen Frequenzen ist um so genauer, je größer die Anzahl der Stützstellen gewählt wird. 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.

Eine weitere Möglichkeit bietet das Verfahren der Inversen Fourier-Transformation (IFFT), das einer Umkehrung der FFT entspricht. Die Rücktransformation des Frequenzbildes in den Zeitbereich ergibt wieder den vollständigen Datensatz bei Verwendung des gesamten Spektrums. Werden jedoch einzelne Frequenzen oder Frequenzbereiche vor der Berechnung ausgeschlossen, erhält man eine mit einem Digital-Filter bereinigte Datenreihe zurück. Allerdings hat dieses Verfahren zwangsläufig den Nachteil, daß auch hier nur eine bestimmte Anzahl von Daten und damit genau festgelegte Zeiträume gerechnet werden können, z. B. 2^{14} Werte entsprechend ca. 23 Jahren.

4.3 Butterworth-Filter

Im Gegensatz zur Inversen FFT besteht bei dem zusätzlich verwendeten Butterworth-Filter eine Beschränkung der Werteanzahl nicht. Auch hier sind alle Filterungsarten durch Umrechnung der Koeffizienten möglich, wie Tief-, Hoch-, Bandpaß und die Bandsperre (Abb. 4). Der Butterworth-Filter zeichnet sich durch eine sehr glatte Leistungsverstärkungscharakteristik aus, die eine maximale Flachheit im Durchlaß- und Sperrbereich zusammen mit vernünftig scharfen Begrenzungen aufweist (STEARNS, 1987). Daraus resultiert eine geringe Beeinflussung der gefilterten Werte infolge eines spezifischen Filterverhaltens. Lediglich am Anfang und Ende der bearbeiteten Datenreihe tritt ein leichtes Überschwingen auf, das jedoch

sehr schnell abklingt. Diese Bereiche sind in den Ergebnissen nicht dargestellt, um sie nicht zu verfälschen.

Der Butterworth-Filter zählt zu den rekursiv arbeitenden Filtern, d. h., das Ergebnis

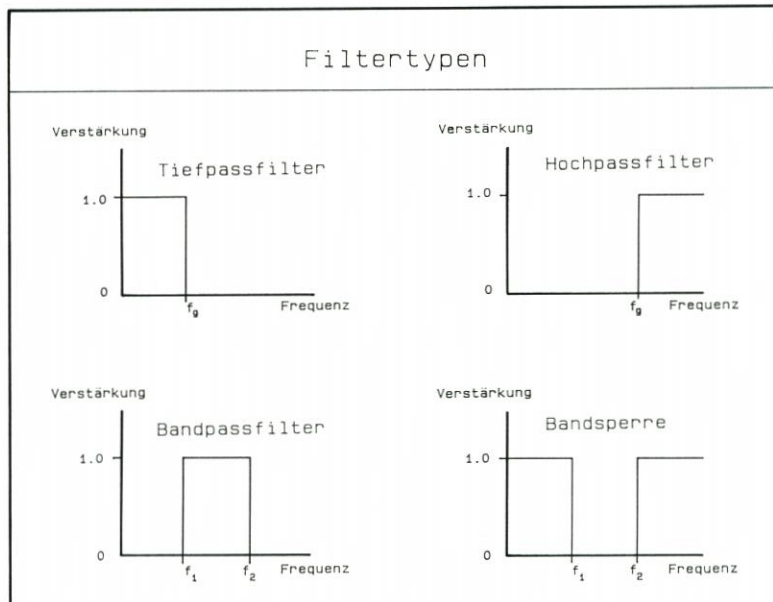


Abb. 4: Verschiedene Möglichkeiten der Datenfilterung

(gefilterte Datenreihe) wird sowohl aus den Eingangswerten als auch mit den schon ermittelten Ausgangswerten errechnet. Die nichtrekursiven Filter, zu denen die Inverse FFT gehört, bilden die Ergebnisfunktion nur aus den Eingangswerten.

5. Ergebnisse der Zeitreihenanalysen

5.1 Lineare Regression

Die nachfolgende Tabelle (Abb. 5) zeigt für die einzelnen Pegel die Steigung der Ausgleichsgeraden für die beiden 33jährigen Thw- und Tnw-Zeitreihen von 1936 bis 1968 und von 1954 bis 1986 in cm pro 100 Jahren. Dabei ist die bisher in entsprechenden Veröffentlichungen übliche Angabe der Steigung in cm/100 Jahre als Steiggeschwindigkeit in dem betrachteten Zeitraum zu verstehen.

Die Ergebnisse der Trendberechnung für Thw- und Tnw-Zeitreihen weisen im Vergleich der Pegel untereinander erwartungsgemäß starke Unterschiede auf. Zum einen liegt das an der relativ kurzen Zeitspanne von 33 Jahren, zum anderen beeinflussen der jeweilige Standort des Pegels sowie die eventuell erfolgten Baumaßnahmen im Umfeld die Auswertungen. Auch die Wahl des betrachteten Zeitraums ist von entscheidender Bedeutung.

Für die Beschreibung der Güte der linearen Regression wird ein Konfidenzintervall (= 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

Lineare Regression				
Pegel- Standort	Zeitraum 1936 bis 1968		Zeitraum 1954 bis 1986	
	Thw	Tnw	Thw	Tnw
	cm/100 Jahre		cm/100 Jahre	
Emden			46	-30
Borkum	33	27	44	3
Norderney	12	29	43	-7
Lt. Alte Weser	36	25	41	3
Wilhelmshaven	34	5	28	-14
Cuxhaven	25	26	38	-21
Büsum			46	18
Husum			48	-13
Wittdün			45	-14
Dagebüll			54	-35
List			27	-7
Helgoland			13	-14

Abb. 5: Trend der Thw und Tnw aus 33jährigen Zeitreihen, Konfidenzintervall: ± 2 cm bei einem Signifikanzniveau von 99%

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 Gerade nach YEVJEVICH (1972) herangezogen. Als Prüfverteilung wird die Student-t-Verteilung gewählt. Auf einem Signifikanzniveau von 99% beträgt die maximale Abweichung der für die verschiedenen Pegel berechneten Trendgeraden maximal ± 2 cm.

Der Unterschied in den Trendwerten beider Zeitbereiche ist ein erster Hinweis auf eine mögliche Veränderung der Wasserstände in den letzten 30 Jahren (SIEFERT, 1982). Während der positive Trend des Thw sich sogar noch verstärkt, zeigt die Tendenz der Tnw ein Absinken. Das hat ein starkes Ansteigen des Tidehubs zur Folge. Die Zunahme des Tidehubs (1954 bis 1986) schwankt zwischen 89 cm/100 Jahre in Dagebüll und 27 cm/100 Jahre in Helgoland. Die Filterungen der Tidehub-Zeitserien verdeutlichen ebenfalls die starke Zunahme der Werte in den letzten Jahren (vgl. Abschn. 5.2.3).

5.1.1 Lineare Regression mit Schrankensetzung

Um Aussagen über den Einfluß der extremen Wasserstände auf die zeitliche Entwicklung zu ermöglichen, werden durch Schrankensetzung extreme Hoch- und Niedrigwasser aus dem Datenkollektiv herausgenommen. Die Schranken werden zunächst in parallelem Abstand oberhalb und unterhalb der Trendgeraden gesetzt, die aus allen Werten berechnet wurde, und in Schritten von jeweils 25 cm enger gefaßt. Dieses Verfahren wird getrennt für Tidehochwasser und Tideniedrigwasser durchgeführt, wobei die in Abschnitt 5.1 angeführten unterschiedlichen Zeiträume untersucht werden.

Für die Zeitreihen 1936 bis 1968 (Abb. 6) zeigt sich bei Thw und Tnw ein ähnlicher Trend. Bis zu einer Schranke von ± 100 cm wird der Trend durch das Abtrennen der außerhalb liegenden extremen Ereignisse kaum beeinflusst. Die Anzahl der berücksichtigten Werte liegt hier durchschnittlich noch bei 98 %, bei einer Schranke von ± 50 cm verbleiben noch ca. 86 % und bei ± 25 cm noch ca. 58 % aller Werte. Der Prozentanteil der in die Berechnung eingehenden Werte des Tnw ist in der Regel etwas geringer.

Trendberechnung 1936 bis 1968

Schranken nach lin. Trendgerade

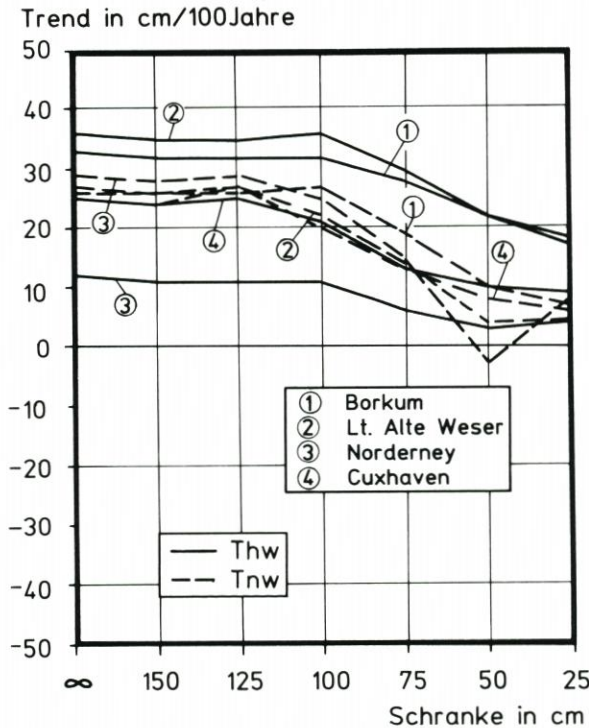


Abb. 6: Trend der Thw und Tnw ausgewählter Pegel aus 33jährigen Zeitreihen, Extremwerte durch Schrankensetzung eliminiert, Konfidenzintervall: ± 2 cm bei einem Signifikanzniveau von 99 %

Im Vergleich zur Datenreihe 1936 bis 1968 fällt auf, daß im Zeitraum 1954 bis 1986 (Abb. 7) bei insgesamt gestiegenem Trend der Thw die Eliminierung der Extremwerte erst ab einer Schranke von ± 50 cm Einfluß auf den Trend nimmt, obwohl der prozentuale Anteil der verbliebenen Werte bei den einzelnen Schranken mit dem vorher betrachteten Zeitraum übereinstimmt. Das kann als ein Hinweis dafür angesehen werden, daß sich die Zusammensetzung des Datenkollektivs verändert hat. Besonders deutlich wird dies am Verhalten der Trendwerte der Tnw, deren Anstieg sich vom positiven Bereich (Abb. 6) auf Null reduziert und bei eng gesetzten Schranken zum Teil sogar negativ wird (Abb. 7). Für den Pegel Cuxhaven erreicht der negative Trend der Tnw eine Größenordnung von ca. 2 dm/100 Jahre.

Trendberechnung 1954 bis 1986

Schranken nach lin. Trendgerade

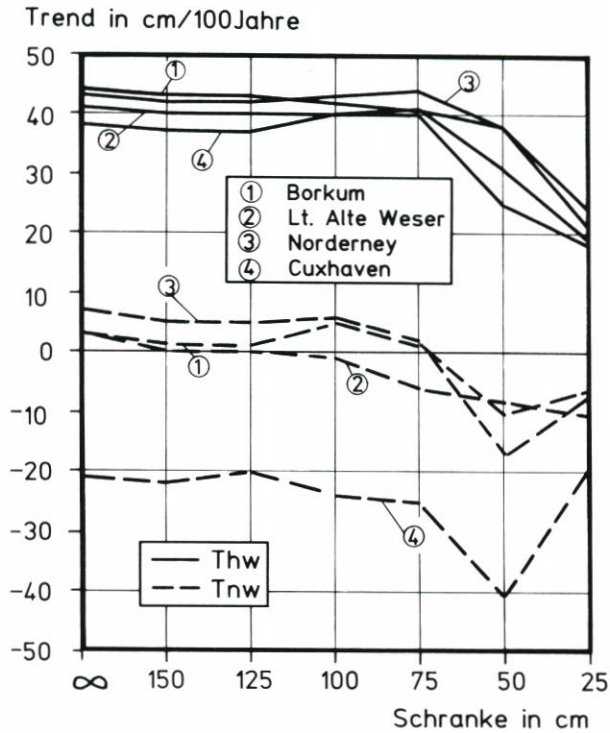


Abb. 7: Trend der Thw und Tnw ausgewählter Pegel aus 33jährigen Zeitreihen, Extremwerte durch Schrankensetzung eliminiert, Konfidenzintervall: ± 2 cm bei einem Signifikanzniveau von 99 %

5.1.2 Lineare Regression mit 25jährigem Zeitfenster

Um die zeitliche Entwicklung der einzelnen Zeitreihen zu verdeutlichen, wird das von FÜHRBÖTER (1976) eingeführte Gedankenmodell „Vergeßlicher Chronist“ angewandt. Für ein Zeitfenster von 25 Jahren wird eine Ausgleichsgerade ermittelt und deren Steigungskoeffizient berechnet. Anschließend wird das Zeitfenster in Schritten von jeweils einem Jahr verschoben. In Abb. 8 sind die Ergebnisse für den Pegel Cuxhaven dargestellt. Der erste Wert bezieht sich auf die Analyse des Zeitraumes 1890 bis 1914. Der Trend des Thw erreicht seinen Maximalwert für den Zeitraum von 1959 bis 1983 mit 64 cm/100 Jahre. Dieser Wert bestätigt damit den von JENSEN (1984) auf der Grundlage der jährlichen MThw errechneten Wert von 64 cm/100 Jahren. Ähnliche, zum Teil sogar höhere Werte wurden allerdings bereits für die Zeitfenster zwischen 1903 bis 1927 und 1908 bis 1932 erreicht.

Beim Tnw zeigt sich ein völlig abweichendes Verhalten ab 1952. Bei einer anfänglichen Steigung von +50 cm/100 Jahre fallen die Werte bis 1983 dann auf -30 cm/100 Jahre ab, bis 1986 sogar auf -37 cm/100 Jahre. Auch dieses Ergebnis zeigt Übereinstimmung mit dem von JENSEN (1984) angegebenen Wert für das MTnw von -31 cm/100 Jahre für die Jahresreihe 1959 bis 1983.

Pegel Cuxhaven Trendänderung

Zeitraum 1890 bis 1986

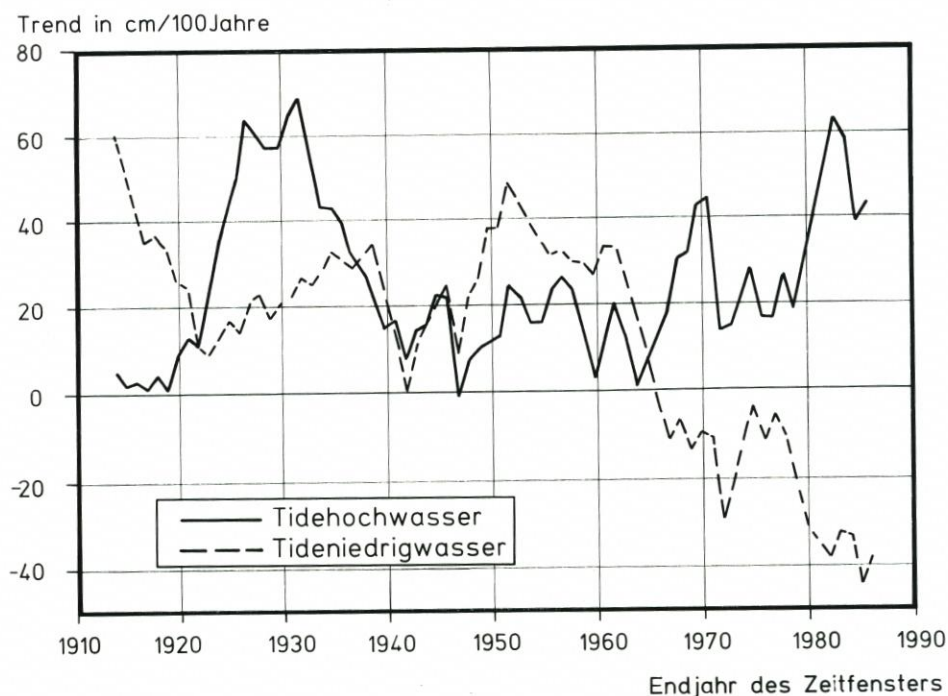


Abb. 8: Veränderung des Trends $H_{100}(t)$ der Thw und Tnw des Pegels Cuxhaven für den Zeitraum 1890 bis 1986, ermittelt aus 25jährigen Zeitfenstern

Solange sich die zeitliche Entwicklung des Thw und Tnw gleich darstellt, bleibt dies ohne Einfluß auf den Tidehub. Ab Mitte der 60er Jahre jedoch nimmt der Trend für das Tideniedrigwasser negative Werte an, wohingegen der Trend für das Tidehochwasser im positiven Bereich liegt und in den 80er Jahren bis auf über 6 dm/100 Jahre ansteigt. Damit ergibt sich für die Veränderung des Tidehubs ein maximaler Wert von ca. 9 dm/100 Jahre.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, daß es sich bei der Berechnungsmethode um eine Extrapolation von 25 auf 100 Jahre handelt. Daher können schon wenige Daten die Rechnung stark beeinflussen. Die angegebenen Trendwerte auf der Basis von 25 Jahren sollten keineswegs als Prognose verstanden werden, sondern vielmehr die Veränderungen innerhalb der Zeitreihe verdeutlichen.

5.2 Fourier-Analyse und Filterung

5.2.1 Untersuchung der Tidehochwasser

Am Beispiel der Tidehochwasser des Pegels Cuxhaven wird das durch eine Fourier-Transformation erzeugte Frequenzbild für die Jahresreihe 1894 bis 1986 gezeigt (Abb. 9). 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 ist der 14täglichen 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. Allerdings ist bei der Jahresschwingung noch ein zusätzlicher meteorologischer Anteil vorhanden.

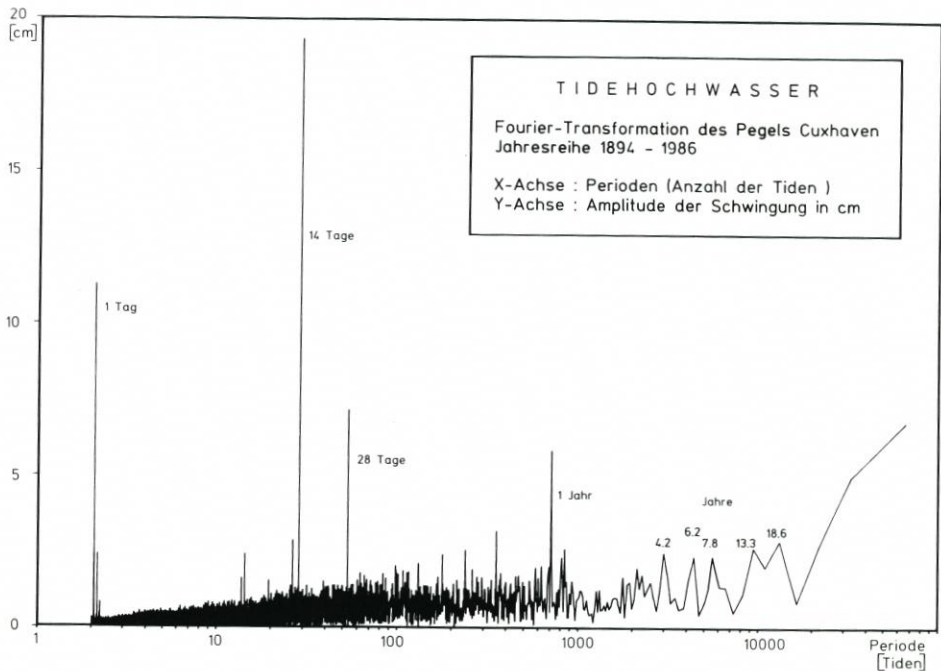


Abb. 9: Frequenzbild der Thw des Pegels Cuxhaven für die Jahresreihe 1894 bis 1986 als Ergebnis der FFT

Für die vorliegende Untersuchung sind jedoch die kurzperiodischen Schwingungen nicht so relevant, vielmehr sind die längerperiodischen Vorgänge von Interesse. Dabei liegt das Augenmerk besonders auf etwaigen Veränderungen innerhalb der Untersuchungszeiträume. Der längste Untersuchungszeitraum erstreckt sich für den Pegel Cuxhaven über 92 Jahre, was $2^{16} = 65\,536$ Meßwerten entspricht. Als längere, besonders markant herausragende Perioden sind in Abb. 9 die 1jährige, die 4,2-, 6,2- und 7,8jährige sowie die 13,3- und 18,6jährige Periode markiert. Noch längere Schwingungen sind aufgrund der begrenzten Zeitreihen mathematisch zu unsicher und können daher nicht ausgewertet werden (STEARNS, 1987).

Um einen direkten Vergleich zu den Pegeln mit kürzerer Beobachtungsdauer zu ermöglichen, wird die FFT-Analyse der langen Pegelreihe Cuxhaven auch für die kürzeren Zeiträume (2^{15} bzw. 2^{14} Werte) durchgeführt, wie sie bis jetzt nur für die anderen Pegel vorhanden sind.

Die Auswertung der Ergebnisse der Periodenanalyse von 12 Tidepegeln in der Deutschen Bucht mit der Fast-Fourier-Transformation für das Tidehochwasser wird in der folgenden 3-dimensionalen Darstellung (Abb. 10) gezeigt.

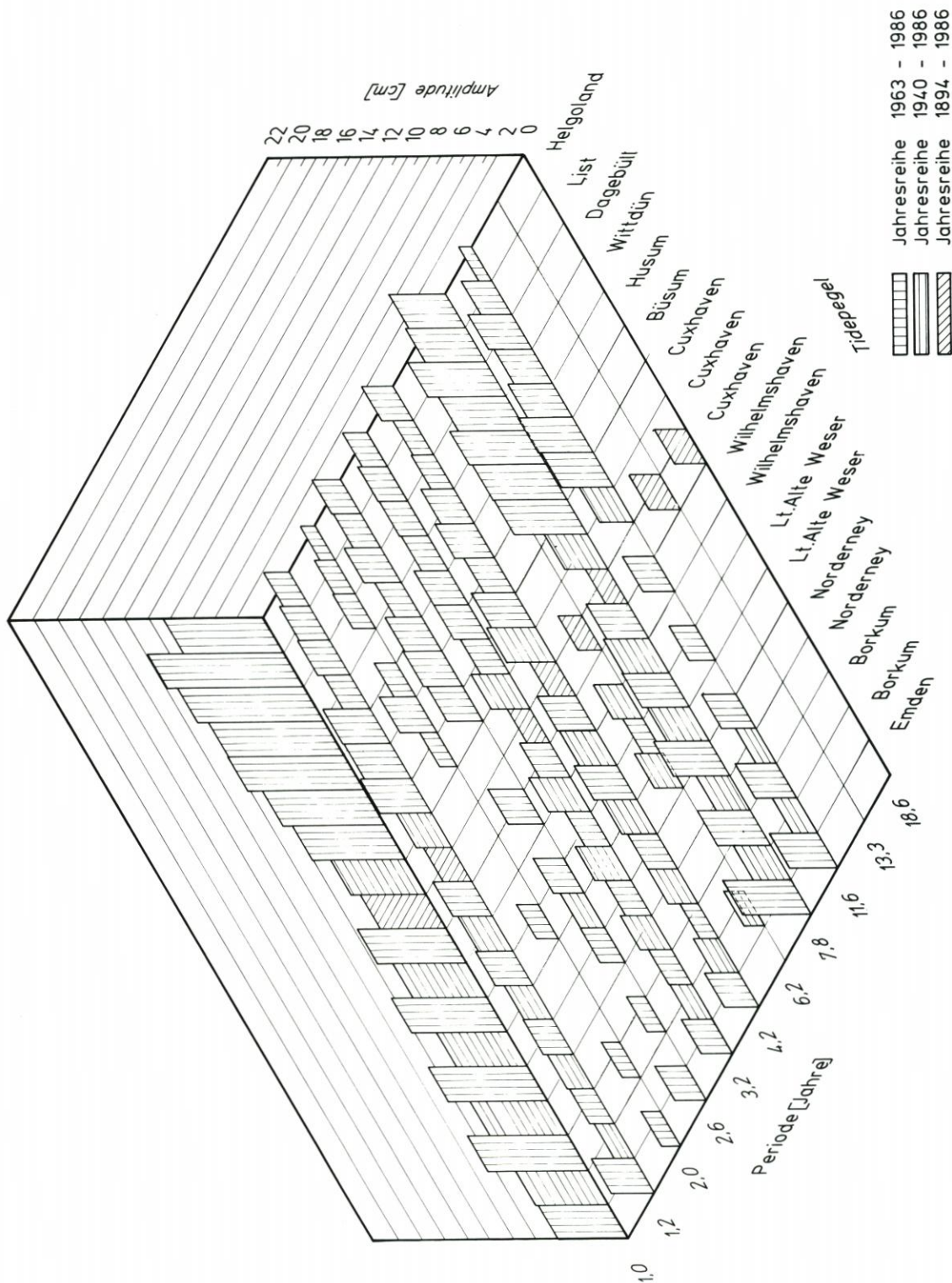


Abb. 10: Ergebnisse der Periodenanalyse (FFT) des Thw von 12 Tidepegeln in der Deutschen Bucht

Nach vorn sind ausgewählte Perioden in Jahren aufgetragen, deren Amplituden einen Grenzwert von 2 cm überschreiten; nach rechts hinten sind die in die Auswertung einbezogenen Tidepegel – mit Ausnahme von Emden und Helgoland von West nach Ost geordnet – angeordnet entsprechend der Numerierung im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch.

Die unterschiedliche Schraffur kennzeichnet dabei die Länge der Jahresreihe: senkrecht schraffiert 1962 bis 1986 \triangleq 23,3 Jahre, waagrecht schraffiert 1939 bis 1986 \triangleq 46,6 Jahre, schräg schraffiert 1893 bis 1986 \triangleq 93 Jahre. Die Höhenniveau der Flächen gibt die Amplitude in cm an.

Als gemeinsames Ergebnis der Auswertung der Periodenanalyse ist festzustellen, daß die 1jährige Periode grundsätzlich die größte Amplitude aufweist. Daneben treten die 7,8jährige und die 11,6jährige Periode – abhängig von der Länge der Jahresreihe – deutlich hervor. Es fällt weiterhin auf, daß in der Regel die Pegel an der schleswig-holsteinischen Westküste insbesondere bei den o. a. Perioden größere Amplituden als die übrigen Pegel haben (vgl. JENSEN, 1985). Die Ursachen hierfür sollten noch geklärt werden, besonders durch Einbeziehung meteorologischer Daten in die Untersuchungen. Auch Veränderungen in der Topographie können dabei eine Rolle spielen.

An den Ergebnissen für die unterschiedlich langen Reihen des Pegels Cuxhaven wird deutlich, daß bestimmte Perioden sich in kürzeren Reihen stärker hervorheben als in längeren. Betrachtet man beim Tidehochwasser die 1jährige oder die 7,8jährige Periode, so ist die Amplitude um so stärker, je kürzer die untersuchte Zeitreihe ist. Dies läßt auf eine Veränderung des Tidegeschehens schließen. Erste Nachprüfungen, bei denen eine FFT nur für den ersten Teil (ab 1893) der langen Reihe gerechnet wird, bestätigen, daß bestimmte Perioden in jüngerer Zeit verstärkt auftreten. Hier sollen noch weitere Untersuchungen erfolgen.

Einen weiteren Schritt in der Datenanalyse der Tidehochwasser bildet die Rücktransformation mit Tiefpaßfiltern. Die so bereinigte Datenreihe enthält keine hochfrequenten Anteile mehr, wie z. B. die 14tägliche 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.

In der Rücktransformation der Thw-Werte des Pegels Cuxhaven (Abb. 11) der Zeitreihe von 1894 bis 1986 mit einem Tiefpaßfilter, der alle Perioden, die kürzer als 2,7 Jahre sind, aus der Datenreihe herausfiltert, zeigt sich ein deutlicher Aufwärtstrend von ca. 2–3 dm/100 Jahren. Die Abbildung veranschaulicht im weiteren, daß offenbar in den letzten 30 bis 40 Jahren die Amplituden der hier untersuchten langen Perioden betragsmäßig zugenommen haben.

Um den oben bereits erwähnten Nachteil der Filterung der Daten mit der Inversen FFT auszuschalten (nur Werteanzahl von 2^n möglich), werden die Thw-Einzelwerte mit dem Butterworth-Filter untersucht. Ein Tiefpaß ab einer Periode von 1,45 Jahren erweist sich hierbei als zweckmäßig. Bei dieser Filterung ist die Jahresschwingung aufgrund der Filtercharakteristik zwar nicht vollständig herausgefiltert, trotzdem treten die längerperiodischen Anteile deutlich hervor (Abb. 12 u. Abb. 13).

Über der Zeitachse sind die in der beschriebenen Weise gefilterten Werte in cm aufgetragen. Wegen einer übersichtlichen Darstellung ist der Nullpunkt variabel gehalten. Deutlich ist zu erkennen, daß die Schwingungen auch an weiter voneinander entfernt liegenden Pegeln sehr ähnlich verlaufen. Besonders wird dies bei der tiefen Absenkung der Kurven 1947 und auch bei entgegengesetzt gerichtetem Kurvenverlauf z. B. 1962 und 1976 sichtbar. Der allgemein ansteigende Trend, der sich ab ca. 1970 noch verstärkt, ist ebenso wie bei der Inversen FFT zu erkennen. Im Detail zeigen allerdings die Ergebnisse der Trendberechnungen für die einzelnen Pegel durchaus ein unterschiedliches Verhalten.

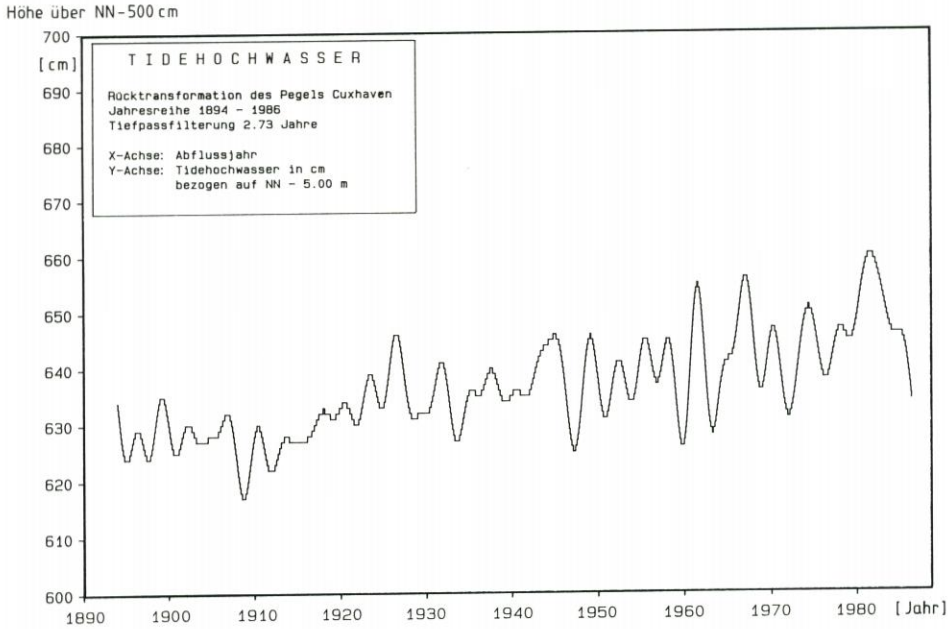


Abb. 11: Rücktransformation der Thw des Pegels Cuxhaven (Jahresreihe 1894 bis 1986) mit einer Tiefpaßfilterung von 2,73 Jahren

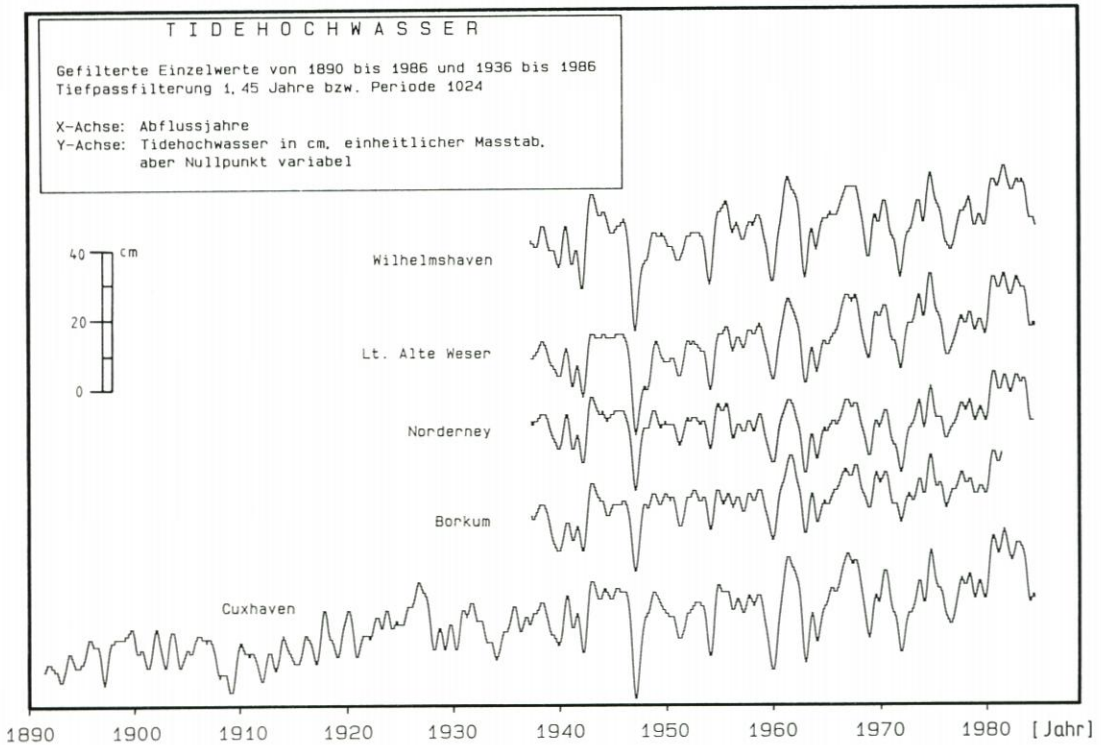


Abb. 12: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) des Thw der Jahresreihen 1890 bis 1986 und 1936 bis 1986

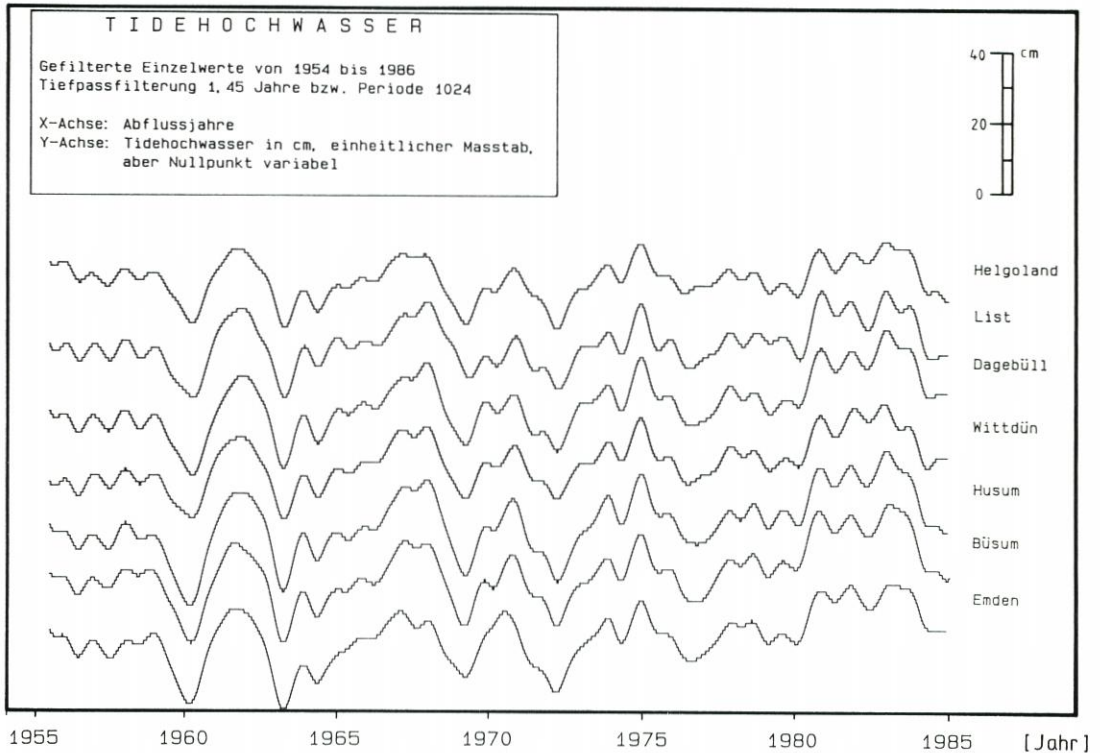


Abb. 13: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) des Thw der Jahresreihen 1954 bis 1986

5.2.2 Untersuchung der Tideniedrigwasser

Die Ergebnisse der Periodenanalyse (FFT) der Tnw sind in Abb. 14 dargestellt. Sie bestätigen im wesentlichen die Resultate der Thw-Untersuchung. Auch hier hat erwartungsgemäß die 1jährige Periode die höchste Amplitude; sie ist im Mittel sogar doppelt so groß wie die Jahresperiode des Thw. Die Ursachen hierfür dürften vermutlich überwiegend im Bereich der meteorologischen Randbedingungen zu finden sein. Daneben fällt auch hier die 7,8jährige Periode durch signifikante Amplituden auf. Bei der z. Zt. längsten untersuchten Zeitreihe des Pegels Cuxhaven tritt ebenso wie beim Thw die 18,6jährige Periode (Nodaltide) hervor (vgl. LAUKART, 1981).

Die Auswertung der Tnw-Daten mit der Butterworth-Filterung (Abb. 15 und Abb. 16) zeigt beim Vergleich der Kurvenverläufe ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Pegeln. Insgesamt verlaufen die Kurven etwas „unruhiger“ als beim Thw, was eindeutig auf die verstärkte Amplitude der Jahresschwingung zurückzuführen ist, da bei einer Filterung von 1,45 Jahren aufgrund der spezifischen Flankensteilheit noch geringe Anteile der Jahresperiode enthalten sind. Bei den Tnw-Zeitreihen ist überwiegend ein fallender Trend zu verzeichnen, der jedoch bei den einzelnen Pegeln unterschiedlich stark ausgeprägt ist. So ist beim Pegel Norderney praktisch kein Trend zu beobachten, während die Werte von Cuxhaven stark fallen. Besonders bei dieser Pegelreihe erlaubt die Tiefpaßfilterung über den relativ langen Zeitraum eine deutliche Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Tideniedrigwassers, ohne daß die kurzperiodischen Anteile die Kurvenform stark überlagern.

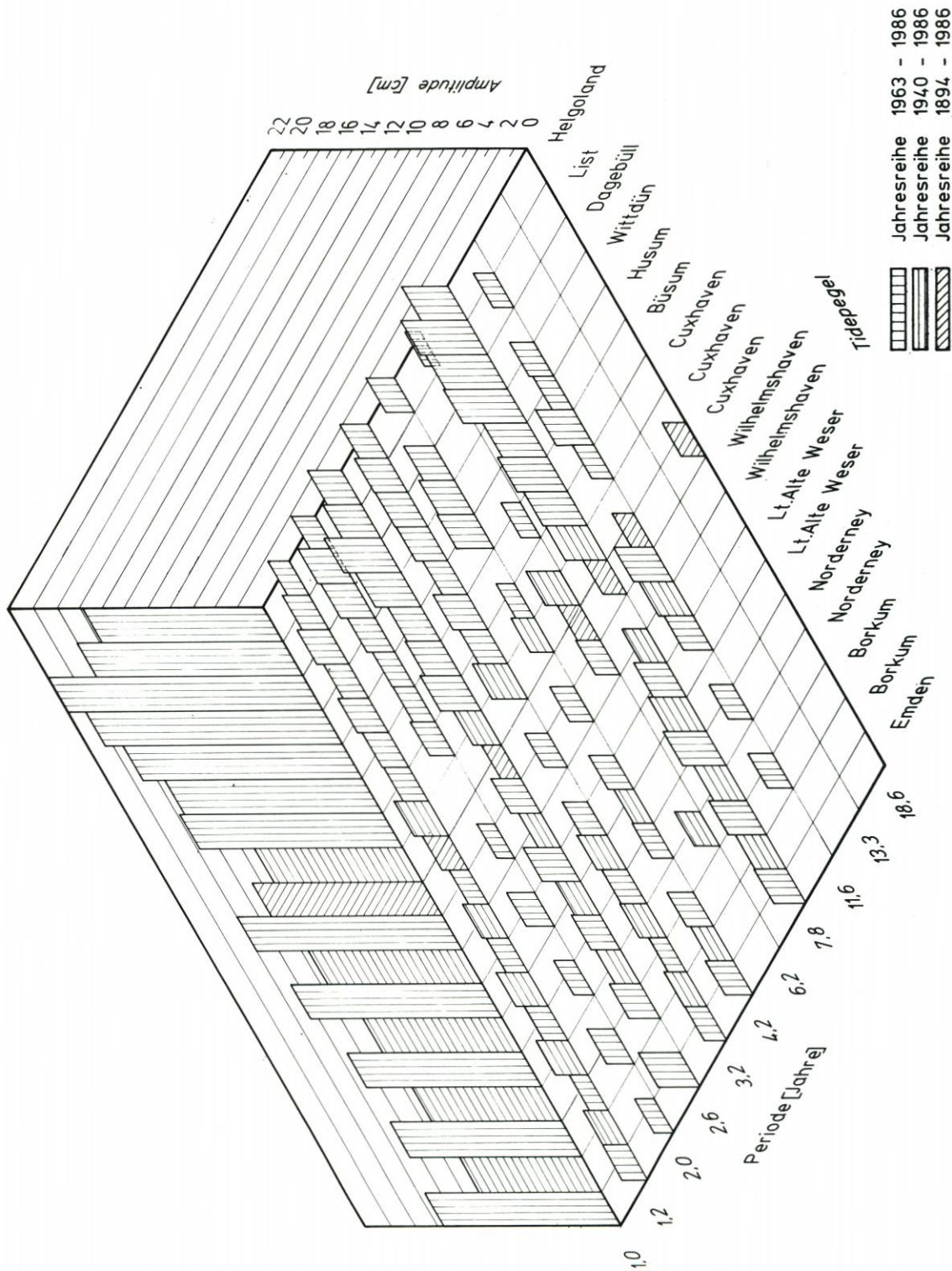


Abb. 14: Ergebnisse der Periodenanalyse (FFT) des Tnw von 12 Tidepegeln in der Deutschen Bucht

Anhand solcher Darstellungen wird außerdem deutlich, daß die lineare Regression über kürzere Zeitdauern zu sehr unterschiedlichen, zum Teil gegenläufigen Trends führen kann, je nachdem wo Beginn und Ende einer solchen Berechnung festgelegt werden. Daher sind Extrapolationen aus kurzen Zeiträumen heraus für eine Analyse der zeitlichen Entwicklung problematisch.

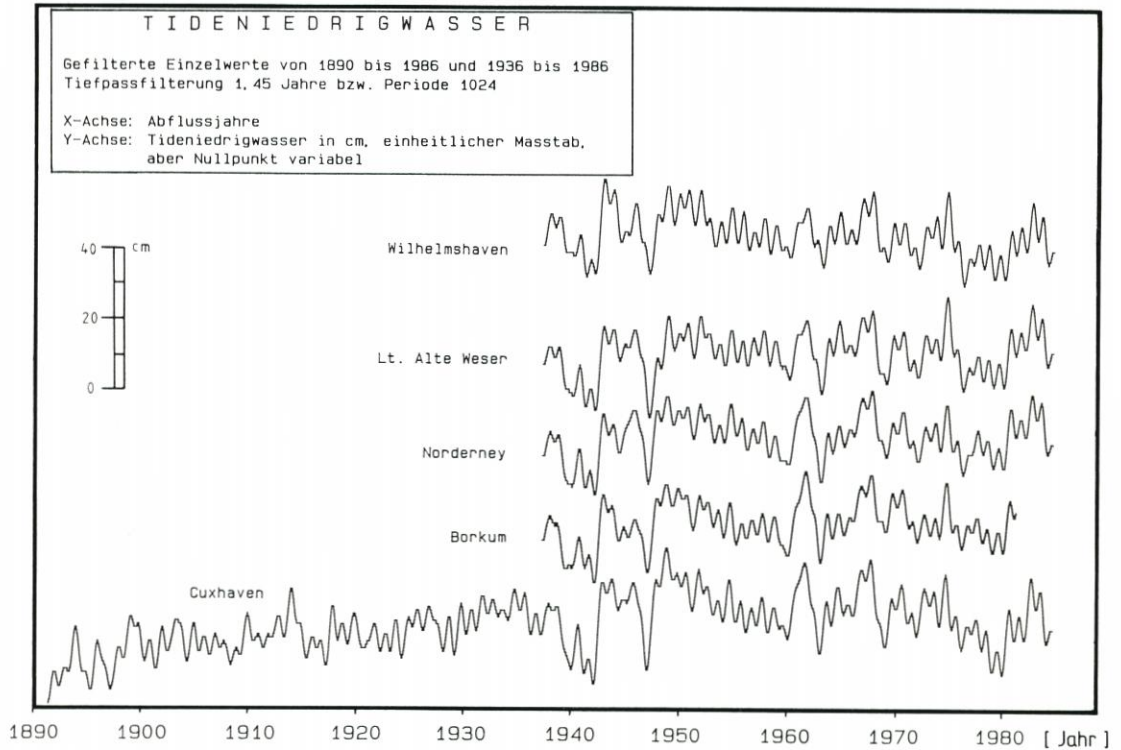


Abb. 15: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) des Tnw der Jahresreihen 1890 bis 1986 und 1936 bis 1986

5.2.3 Untersuchung des Tidehubs

Anhand einer Darstellung der FFT-Auswertung (Abb. 17) wird anschaulich, daß beim Tidehub die Perioden, abgesehen von der 1jährigen, weniger hervortreten. Daneben ist nur noch die 11,6jährige Periode bei fast allen Pegeln mit Ausnahme von List und Helgoland nachzuweisen. Die Amplituden der meisten Perioden sind deutlich niedriger als beim Thw und Tnw oder liegen sogar unter dem hier vorgegebenen Schwellenwert von 1 cm. Dies läßt sich damit erklären, daß der Tidehub als berechnete Differenz zwischen Tidehochwasser und Tideniedrigwasser bei gleichartigen Schwingungen, sofern sie dieselbe Größenordnung haben, sich nicht wesentlich verändert. Besonders markant, als zweitgrößter Wert, tritt bei der 92jährigen Reihe die 18,6jährige Periode hervor.

Die Filterkurven des Tidehubs (Abb. 18) zeigen ein sehr viel differenzierteres Bild als die der Thw und Tnw. Beim Tidehub addieren sich die Abweichungen, d.h. verschiedene Steigungen im Kurvenverlauf für Thw und Tnw, derart, daß die Kurven unterschiedlich stark

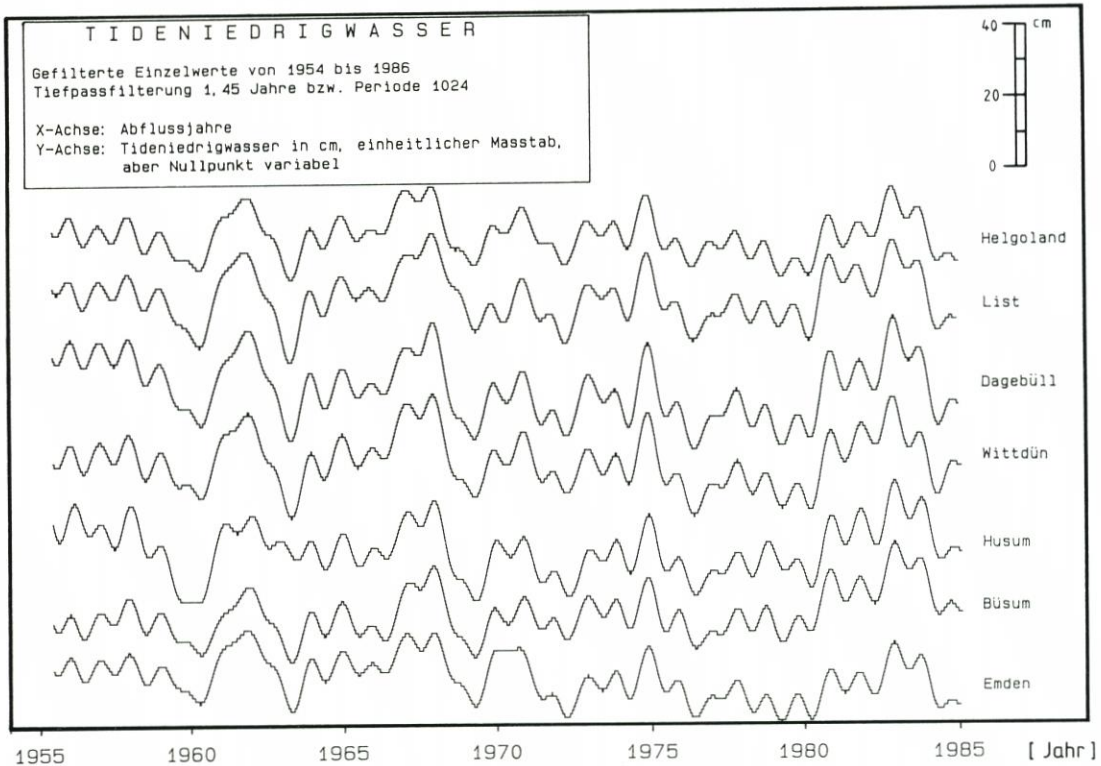


Abb. 16: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) des Tnw der Jahresreihen 1954 bis 1986

ansteigen. Ende der 60er Jahre ist ein signifikanter Anstieg des Tidehubs zu verzeichnen, der sich jedoch ab ca. 1980 auf einem höheren Niveau (Pegel Cuxhaven ca. 20 cm) einpendelt. Gut zu erkennen in der Datenreihe des Pegels Cuxhaven ist bis in die Mitte dieses Jahrhunderts die Periode von 18,6 Jahren, die im weiteren Verlauf durch Überlagerungen anderer Perioden undeutlicher wird und verschwimmt.

Der Anstieg des Tidehubs ist von großer Bedeutung, da sich damit auch die Tidedynamik verändert. Die Erhöhung der eingetragenen Energie hat durch die Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeiten und dem damit verbundenen Feststofftransport erhebliche Auswirkungen auf die Küste.

5.2.4 Untersuchung der Flutdauer

Die Flutdauer ist der Zeitraum zwischen der Eintrittszeit eines Tideniedrigwassers und dem darauffolgenden Hochwasser. Eine Veränderung dieses Parameters hat damit Einfluß auf die Form der Tidekurve. Ein Verkürzen der Flutdauer bedeutet bei gleichbleibendem Tidehub ein größeres Strömungsgefälle bei Flut und damit höhere Strömungsgeschwindigkeiten.

Bei der Untersuchung der Flutdauer auf periodische Anteile mit Hilfe der FFT heben sich nur wenige Perioden aus dem Grundrauschen heraus. Dazu kommt, daß die Amplitude, die hier in Minuten angegeben wird, kaum 2 min erreicht. Beim Pegel Cuxhaven (vgl. Abb. 19) z. B. ragen Perioden bei 4,2, 7,8 und 11,6 Jahren nur wenig hervor. Auch signifikante Trends, wie sie bei Thw, Tnw und Thb ermittelt werden, sind bei diesem Parameter nicht vorhanden.

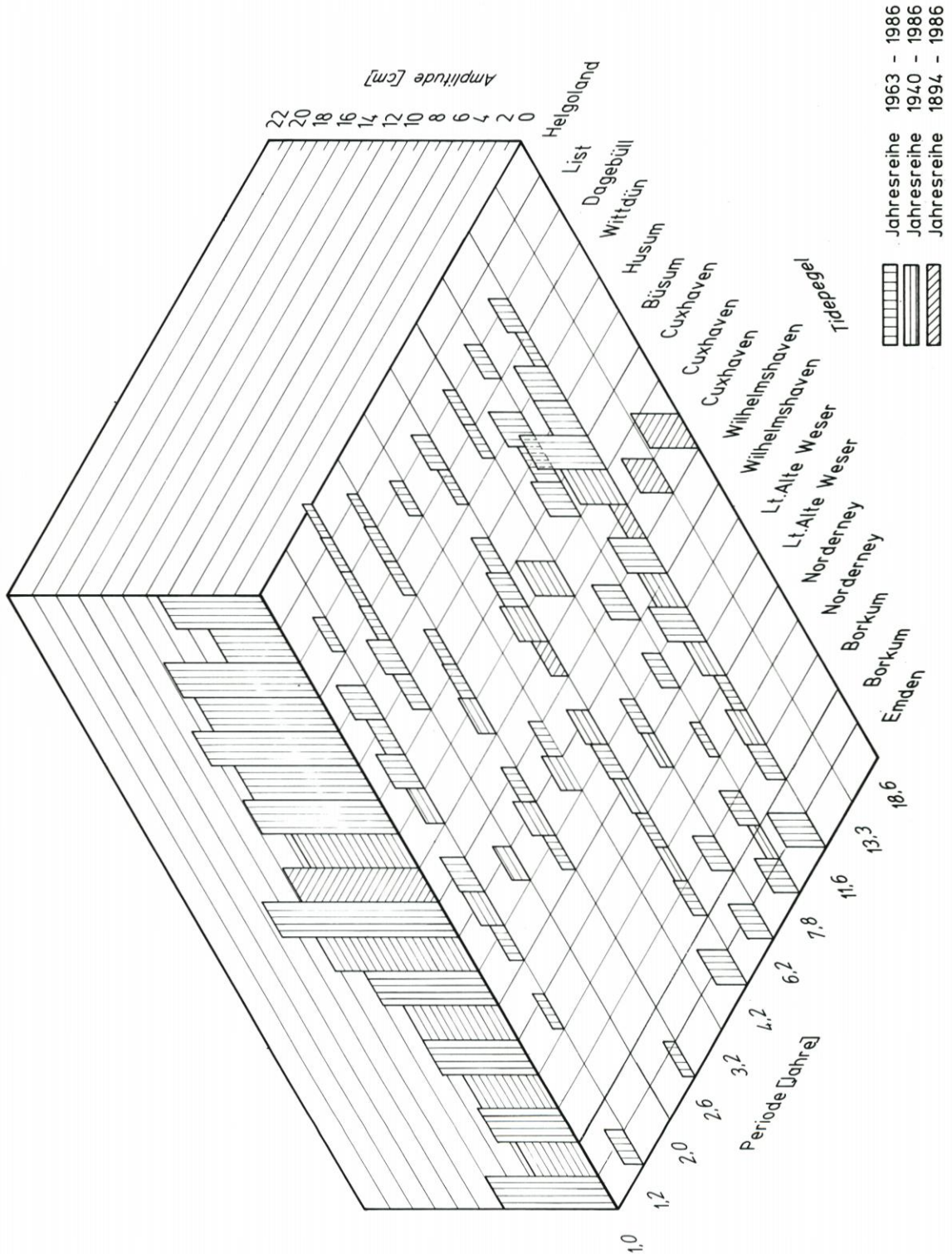


Abb. 17: Ergebnisse der Periodenanalyse (FFT) des Tbb von 12 Tidepegeln in der Deutschen Bucht

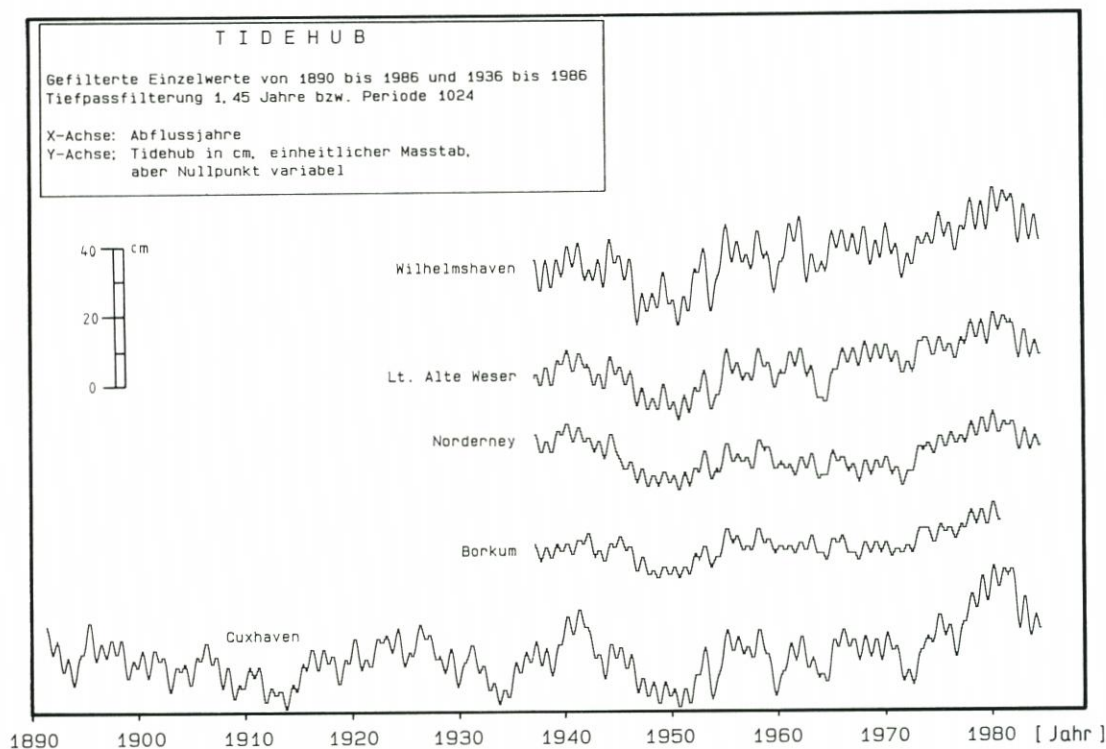


Abb. 18: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) des Thb der Jahresreihen 1890 bis 1986 und 1936 bis 1986

Die Filterung der Daten der Flutdauer mit dem Butterworth-Filter (Abb. 20) wird mit einer etwas höher angesetzten Tiefpaßfilterung von 0,85 Jahren vorgenommen, da die Jahresschwingung in den Frequenzbildern nur eine geringe Amplitude aufweist. Aus diesem Grund ist die Jahresschwingung deutlich zu erkennen. Auffällig ist das Verhalten der Kurven der Pegel Husum und Büsum, deren Jahres-Amplituden im Mittel ca. 2–3mal so groß wie die der übrigen Pegel sind. Welche Einflüsse hier wirksam werden, sollte noch untersucht werden. Es kann vermutet werden, daß sich die Form der Tidekurven verändert hat.

Die Schwankungsbreite der übrigen Kurven differiert im Jahresrhythmus nur um wenige Minuten, d. h., die Tidekurven verformen sich nur unwesentlich. Eine Ausnahme bildet der Pegel Norderney, wo sich ab 1960 die Flutdauer kontinuierlich um ca. 20 min verkürzt und anschließend wieder auf das vorherige Niveau ansteigt. Da sich dieser Vorgang bei Nachbarpegeln nicht feststellen läßt und auch kein Fehler bei der Dateneingabe vorliegt, handelt es sich offensichtlich um fehlerhafte Wasserstandsaufzeichnungen.

5.2.5 Untersuchung der Tidelaufzeiten

Vom Pegel Lt. Roter Sand bzw. Lt. Alte Weser als Bezugspegel wird die Laufzeit des Tidehochwasserscheitels zu den übrigen Pegeln berechnet. Dieser Standort wurde gewählt, da eine eventuelle Beeinflussung der Tidelaufzeiten, wie sie bei anderen Pegeln durch Baumaßnahmen möglich sind, hier weniger wahrscheinlich ist. Der Pegel Borkum, der von seiner

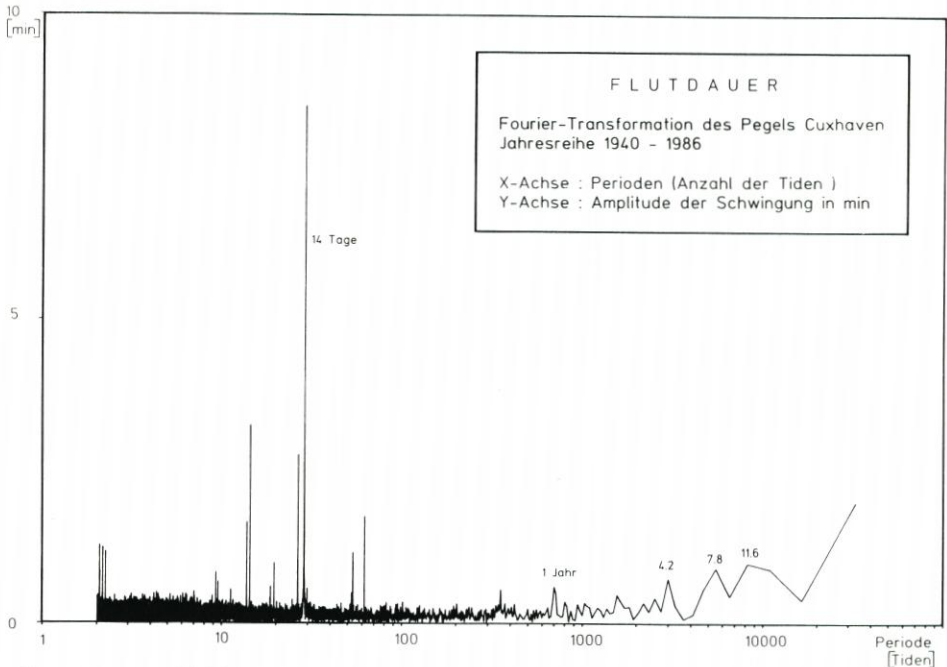


Abb. 19: Frequenzbild der Flutdauer des Pegels Cuxhaven für die Jahresreihe 1940 bis 1986 als Ergebnis der FFT

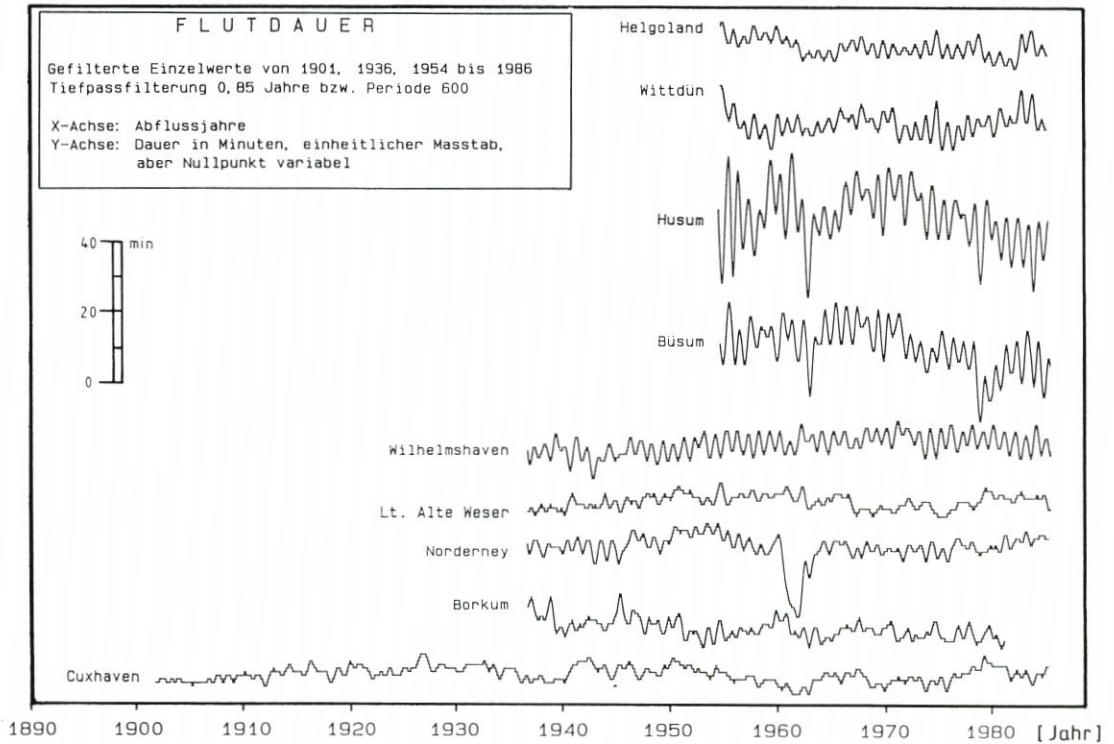


Abb. 20: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) der Flutdauer der Jahresreihen 1901 bis 1986, 1936 bis 1986 und 1954 bis 1986

geographischen Lage als westlichster Meßpunkt zunächst am geeignetsten erschien, weist einige bislang noch nicht geklärte Unregelmäßigkeiten auf.

Bei der Darstellung der mit Hilfe des Butterworth-Filters geglätteten Zeitreihen (Abb. 21) zeigt sich überwiegend ein leicht fallender Trend, d. h. eine Verkürzung der Laufzeiten, die abhängig vom betrachteten Pegel zwischen wenigen Minuten und mehr als einer Viertelstunde beträgt. Besonders deutlich ist diese Verkürzung beim Pegel Wilhelmshaven, dessen Laufzeiten der Tidehochwasserscheitel sich innerhalb des Zeitraumes vom Ende der 50er Jahre bis 1986 um ca. 20 Minuten verkürzen. Da sich dieser Trend gleichmäßig über den gesamten Zeitraum erstreckt, können die Ursachen im Ausbau der Jade liegen. Die Ursache für die sehr starke Verkürzung der Tidelaufzeiten zum Pegel Büsum am Ende der 70er Jahre könnte in den dort erfolgten Eindeichungsmaßnahmen liegen.

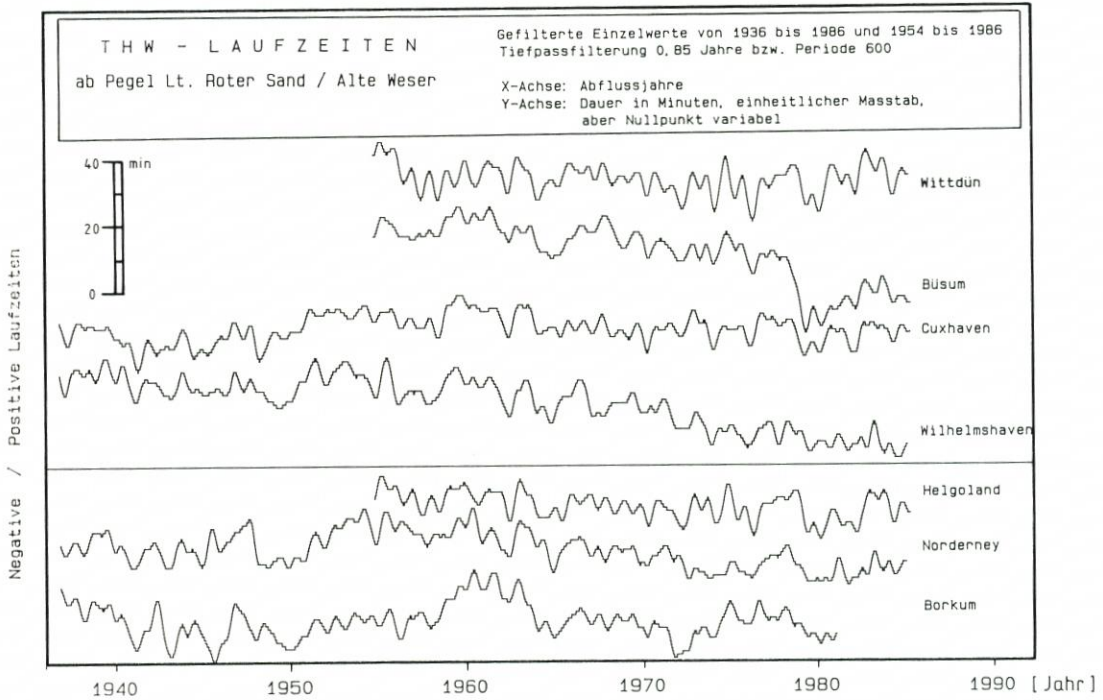


Abb. 21: Gefilterte Einzelwerte (Butterworth-Filter) der Tidelaufzeiten ab Pegel Lt. Roter Sand bzw. Lt. Alte Weser der Jahresreihen 1936 bis 1986 und 1954 bis 1986

Die Höhe der Verkürzung der Tidelaufzeiten ist jedoch nicht als absolutes Maß anzusehen, da nur die relative Zeitdauer zwischen der Eintrittszeit des Tidehochwasserscheitels beim Bezugspegel Lt. Roter Sand bzw. Lt. Alte Weser und beim jeweiligen Pegel betrachtet wird.

In Abb. 21 sind unterhalb der waagerechten Nullachse die gefilterten Laufzeiten der drei Pegel aufgetragen, deren Hochwassereintrittszeiten vor denen vom Bezugspegel liegen. Hier bedeutet ein fallender Trend, wie er bei den Datenreihen der Pegel Helgoland und Norderney zu finden ist, daß die Laufzeit sich vergrößert hat.

6. Ausblick

Die wesentliche Voraussetzung für die Analyse der Wasserstandsentwicklung sind möglichst lange und zuverlässige Datenreihen. Bei der Weiterführung des Projektes wird daher auf die Verlängerung einzelner Pegelreihen großer Wert zu legen sein. Dabei ist die Beschaffung und Kontrolle älterer Daten sehr zeitaufwendig. Oft ist die Höhen- und Zeitanpassung älterer Daten an die bereits vorhandene Zeitreihe nicht einfach durchzuführen, da örtliche Veränderungen des Pegels zu berücksichtigen sind.

Ein großes Problem stellen Meßlücken in vorhandenen Datenreihen dar. Es ist geplant, eine Methode zum Schließen von Datenlücken zu erarbeiten. Wegen der Verwendung von Einzelwerten soll ein dynamisches Verfahren entwickelt werden, das örtliche Gegebenheiten sowie Periodizitäten und Schwingungen berücksichtigt.

Die Untersuchungen insbesondere der zeitlichen Entwicklung periodischer Vorgänge in den Datenreihen werden noch weitergeführt. Daneben werden in Zusammenarbeit mit dem DHI und dem Seewetteramt in Hamburg meteorologische Zeitreihen in ähnlicher Form untersucht. Mit einer FFT-Analyse von täglichen Daten des geostrophischen Windes ist bereits begonnen worden.

Parallel dazu ist eine Zusammenarbeit mit niederländischen Dienststellen beschlossen worden. Ein erster Datentransfer hat inzwischen stattgefunden; dabei sollen auch Analyseverfahren ausgetauscht werden.

7. Schriftenverzeichnis

- BARTH, M. C. u. TITUS, J. G.: Greenhouse Effect an Sea Level Rise: A Challenge for this Generation. Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
- COOLEY, J. W. u. TURKEY, J. U.: An Algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. of Comput.* 1965.
- 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. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht, *Die Küste*, H. 42, 1985.
- FÜHRBÖTER, A.: Veränderung des Säkularanstiegs an der deutschen Nordseeküste, *Wasser und Boden*, H. 9, 1986.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittl. 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.
- LAUKART, W.: Ermittlung langfristiger Wasserstandsänderungen aus Pegelregistrierungen, *Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, Nr. 104, 1981.
- LIETZ, U.: Zum Nullpunkt der Pegel Roter Sand und Alte Weser, *DGM 30*, H. 2/3, 1986.
- 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 H. 1*, 1980.
- LUCK, G.: Beschleunigung des Spiegelanstiegs der Weltmeere und Folgen. *Mitt. aus dem Nieders. Landesamt f. Wasserwirtschaft*, H. 5, 1987.
- LÜDEKERS, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste, *Zentralbl. der Bauverw.*, H. 50, 1936.
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, H. 30, 1977.
- 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.
- STEARNS, S.: Digitale Verarbeitung analoger Signale, 3. Aufl., 1987.
- WSD NORDWEST: Zur Vergleichbarkeit der Nordseepegel „Roter Sand“ mit „L. T. Alte Weser“, Bericht, 1986.
- YEVJEVICH, V.: Probability and Statistics in Hydrology, Water Resources Publications, Fort Collins Colorado, USA, 1972.