

Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht

VON ALFRED FÜHRBÖTER UND JÜRGEN JENSEN

Zusammenfassung

Aus der Auswertung von Zeitreihen von 10 Pegeln an der deutschen Nordseeküste wird gezeigt, daß im Verlauf der letzten 100 Jahre

- sich der Säkularanstieg der mittleren Tidehochwasser MThw beschleunigt,
- die mittleren Tideniedrigwasser MTnw sich nur unwesentlich verändert haben und
- der mittlere Tidehub MThb deutlich zugenommen hat.

Obwohl von unregelmäßigen Schwankungen begleitet, haben sich diese Tendenzen in den letzten Jahrzehnten verstärkt, wobei hier eine Absenkung der Tideniedrigwasser MTnw hinzukommt. Mögliche Gründe und Folgerungen werden erwogen.

Summary

An analysis of data from 10 tidal gauges in the German North Sea coastal zone has shown that during the last 100 years:

- *the rate of rise of mean high water, MHW, is increasing*
- *mean low water, MLW, has remained nearly constant and*
- *the mean tidal range is increasing.*

Although these trends are accompanied by irregular fluctuations, it is apparent that an acceleration has occurred during the last ten years; a decrease in MLW has also been observed. Possible causes and consequences are discussed.

Inhalt

1. Einleitung	78
2. Die Pegel und die Auswerteverfahren	79
3. Zeitliche Änderungen der Säkularrends	82
3.1 Mittleres Tidehochwasser MThw	82
3.2 Mittleres Tideniedrigwasser MTnw	87
3.3 Mittlerer Tidehub MThb	91
4. Vergleich der mittleren Tidewasserstände der Nordsee mit dem Mittelwasserstand der Ostsee	91
5. Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	97
6. Schriftenverzeichnis	99

1. Einleitung

Es werden in der vorliegenden Arbeit Pegelaufzeichnungen an der deutschen Nordseeküste behandelt, die Auskunft über diejenigen langfristigen Meeresspiegeländerungen geben, die als sog. eustatische Veränderungen des globalen Meeresspiegels von denjenigen Veränderungen der Trennlinie Meer-Land zu unterscheiden sind, die durch örtlich-tektonische Bewegungen aus geologischen Prozessen entstehen. Es sei hier vorweggenommen, daß diese letzten Vorgänge an der deutschen Nordseeküste – im Gegensatz etwa zu Großbritannien oder Skandinavien – eine untergeordnete Rolle spielen.

Einigkeit besteht darüber, daß die eustatischen Änderungen des Weltmeeresspiegels, die sich derzeit als sog. *Säkularanstieg* äußern, Folgen von globalen Klimaänderungen sind, die im wesentlichen noch Folgeerscheinungen der letzten Eiszeit sind; die Einzelheiten dieser Entwicklungen sind aber quantitativ schwer darzustellen (vgl. z. B. LISITZIN, 1974). Besondere Bedeutung erhält dabei die Frage, in welchem Maße die natürlichen Entwicklungen bereits von anthropogenen Einflüssen überlagert werden.

Eine globale Erwärmung der Erdoberflächentemperatur und entsprechend der Ozeane, z. B. verursacht durch den Treibhauseffekt infolge der CO₂-Emissionen, Aerosole oder anthropogene Spurengase, kann durch die thermische Ausdehnung der Wassermassen und Abschmelzen bzw. Aufschwimmen landgebundener Eismassen, hier besonders im Bereich der Westantarktis, zu einem Anstieg der Meeresspiegellagen führen (vgl. z. B. KEELING, 1973; FLOHN, 1977 und 1980; BACH, 1982 und 1985; BREITERBAUER, 1982; THOMAS et al., 1983; HANSEN et al., 1983).

Erste Untersuchungen zum eustatischen Meeresspiegelanstieg wurden von THORARINSON (1940), GUTENBERG (1941) und KUENEN (1950) angestellt. Berechnungen des globalen und lokalen eustatischen Anstiegs wurden u. a. von LISITZIN (1958), WEXLER (1961), FAIRBRIDGE (1961), HICKS (1978 und 1983), EMERY (1980), GORNITZ et al. (1982), BARNETT (1983) und GALVIN (1983) durchgeführt.

Für den Bereich der deutschen Nordseeküste kann eine Veränderung der Wasserspiegellage bis in das 16. Jahrhundert zurückverfolgt werden (vgl. ROHDE, 1977).

Nachdem das physikalische Phänomen einer Relativbewegung zwischen dem Land- und Wasserniveau von SCHÜTTE (1908) richtig erkannt, aber als neuzeitliche Senkungserscheinung interpretiert wurde und RIETSCHEL (1933) „Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung“ anschloß, wurde von LÜDERS (1936) in einer Untersuchung „Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste“ erstmalig ein Anstieg der Wasserspiegellage der Nordsee festgestellt. Der eustatische bzw. säkulare Meeresspiegelanstieg, als die Veränderung der Wasserspiegellage über einen Zeitraum von 100 Jahren, wurde für den Bereich der Nordsee bzw. an einzelnen Pegeln u. a. von GAYE (1951), HUNDT (1955), ROHDE (1964, 1968 und 1977), HABICH (1970), PURUCKHERR (1973) und LIESE (1979) behandelt (s. auch JENSEN, 1984).

Die Schwankungen der Meeresspiegellagen sind dabei nicht über die jeweilige Beobachtungslänge stationär; diese zeitlichen Veränderungen der mittleren Tidewasserstände MT_{nw}, MTh_w und des mittleren Tidehubes MTh_b sind Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

2. Die Pegel und die Auswerteverfahren

Für die Auswertung der mittleren Tidewasserstände sind nur solche Pegel geeignet,

- a) die genügend lange Zeitreihen aufweisen und
- b) von denen angenommen werden kann, daß an den Pegelorten die Wasserstände nicht wesentlich durch Baumaßnahmen (Baggerungen, Eindämmungen usw.) oder durch das Oberwasser (bei Tideästuaren) gestört wurden.

Nach diesen Gesichtspunkten wurden 10 Pegel an der deutschen Nordseeküste ausgesucht, von denen drei auf Inseln gelegen sind (Borkum, Norderney und List auf Sylt), vier an den Mündungen großer Tideflüsse (Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven) und drei an kleinen Hafenenorten an der Festlandküste (Büsum, Husum und Dagebüll). Auf Abb. 1 ist die Lage der Pegel dargestellt.

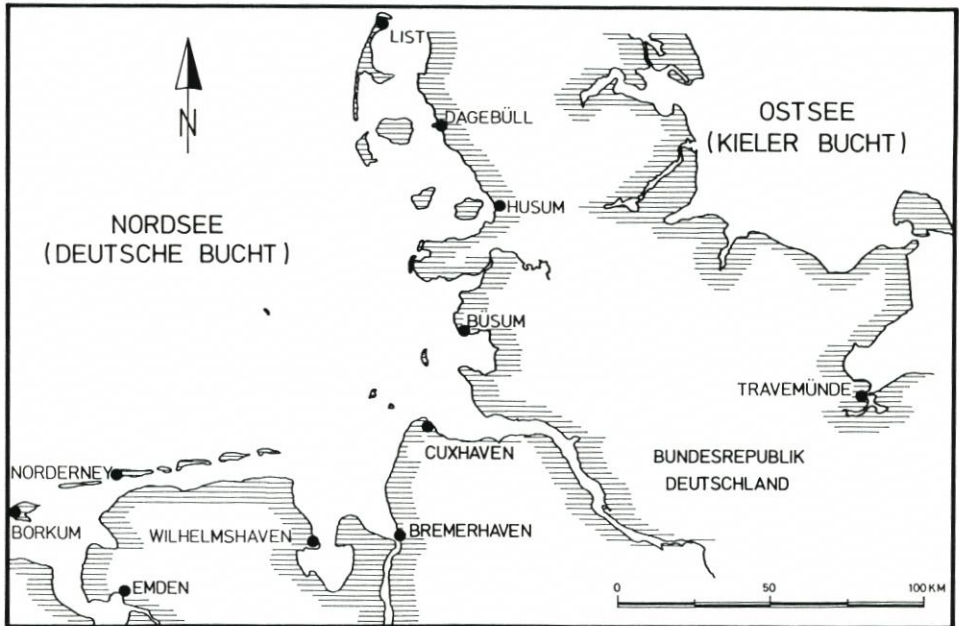


Abb. 1. Lage der verwendeten Pegel

Von diesen Pegeln wurden die Zeitreihen für die mittleren Tidehochwasser MThw und die mittleren Tideniedrigwasser MTnw als die arithmetischen Mittelwerte aller eingetretenen Tiden des jeweiligen hydrologischen Jahres (vom 1. November des Vorjahres bis zum 31. Oktober) verwendet; aus der Differenz MThw-MTnw wird zugleich der mittlere Tidehub MThb des jeweiligen Jahres erhalten. Eine ausführliche Beschreibung dieser Zeitreihen findet sich bei JENSEN (1984).

Wie bekannt, können sich die Mittelwerte selbst benachbarter Jahre um mehrere Dezimeter unterscheiden, was im wesentlichen durch die meteorologischen Zufallsprozesse bedingt ist, die sich den astronomischen (= deterministischen) Partialtiden überlagern (vgl. z. B. LAUKART, 1981). Die letzteren können, wie Voruntersuchungen gezeigt haben, bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt werden.

Abb. 2 oben zeigt als Beispiel die Zeitreihe für das MThw am Pegel Husum. Diese Zeitreihe reicht von 1868 bis 1983 und weist außer den jährlichen Schwankungen einen deutlichen mittleren Anstieg auf, der durch eine Ausgleichsgerade

$$H = H(t) = H_0 + s_T \cdot t$$

beschrieben werden kann; s_T bedeutet dabei die Steigung der Ausgleichsgeraden, die für den Gesamtzeitraum von 1868 bis 1983 einen auf 100 Jahre bezogenen sog. Säkularanstieg von

$$s_T = 0,29 \text{ m/100 Jahre}$$

liefert.

Genauere Betrachtungen zeigen, daß diese Steigungen s_T nicht konstant über die untersuchten Zeiträume verteilt, sondern als Funktionen $s_T(t)$ zeitlichen Schwankungen unterworfen sind. Diese könnten z. B. dadurch sichtbar gemacht werden, daß in der Zeitreihe (vgl.

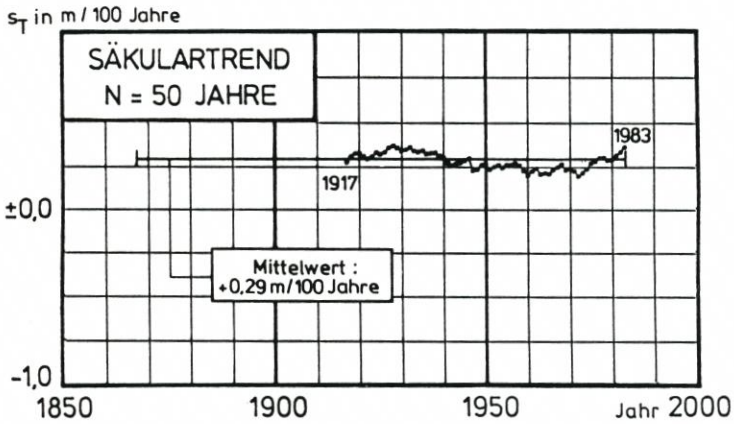
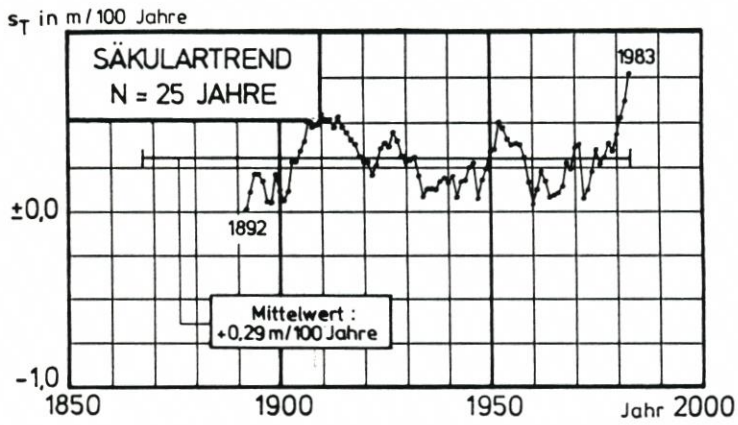
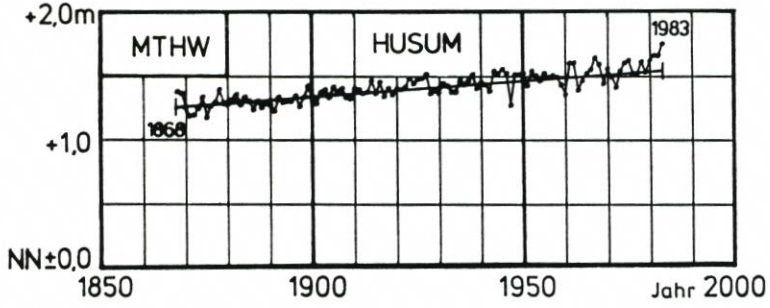


Abb. 2. Beispiel für die Auswertverfahren $s_T(t)$ (MThw Husum)

Abb. 2 oben) überschneidende Mittelungen oder Mittelwertbildungen (für 5, 10 oder 19 Jahre) angewendet werden; empfindlicher aber zeigt solche Schwankungen ein Verfahren auf, in dem die Schwankungen der Anstiegsfunktion $s_T(t)$ selbst sichtbar gemacht werden, indem diese für einen bestimmten Zeitpunkt t aus der davorliegenden Zeitreihe von $N = 25$ Jahren oder $N = 50$ Jahren (nach der Methode der kleinsten Quadrate) berechnet und als Zeitfunktion $s_T(t)$ aufgetragen wird (ähnlich den Auswertungen bei FÜHRBÖTER, 1976).

Nur um einen besseren Vergleich mit dem auf 100 Jahre bezogenen Mittelwert zu erhalten, werden dabei diese Zeitfunktionen ebenfalls auf einen Zeitraum von 100 Jahren bezogen; dieses ist eine formale *Extrapolation*, die nicht mit einer Prognose verwechselt werden darf. So bedeutet z. B. der Wert $s_T(t = 1983)$ mit $N = 25$ Jahren für das MThw Husum von 0,773 m/100 Jahre lediglich, daß der festgestellte Anstieg der 25 Jahre von 1959 bis 1983 einen Säkularanstieg von 0,773 m ergeben würde, wenn auf 100 Jahre extrapoliert wird. Wie gezeigt werden wird, sind diese Werte vor allem als Relativwerte zu verwenden.

Es wird damit eine hohe Empfindlichkeit, besonders bei der Auswertung mit $N = 25$ Jahren erreicht, wie auf Abb. 2 für das Beispiel des MThw Husum gezeigt wird (Abb. 2, Mitte); die Funktion $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre weist dagegen einen wesentlich ausgeglicheneren Verlauf auf (Abb. 2, unten). Unvermeidlich ist daher, daß die Funktionen $s_T(t)$ ebenfalls sehr empfindlich auf solche Diskontinuitäten reagieren, die z. B. in einer sprunghaften Veränderung des Pegelnulls bestehen. Abb. 3 zeigt die Auswertung einer gedachten synthetischen Zeitreihe mit einem mittleren Anstieg von 0,25 m/100 Jahre und einem positiven Sprung, der hier willkürlich auf das Jahr 1925 gelegt wurde. Die Funktionen $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre und $N = 50$ Jahre zeigen dabei kennzeichnende Störungen, die durch die konsequente Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate bedingt sind.

Solche Diskontinuitäten können z. B. dann entstehen, wenn durch ein Umsetzen des Pegels, durch Umstellung von Latten- auf Schreibpegel oder durch Neueinmessungen der Nullpunkt des Pegels verändert wird, ohne daß dabei die vorhergegangenen Aufzeichnungen entsprechend beschickt werden. Diese Änderungen können auch allmählich erfolgen, z. B. durch Setzungen. Sie sind aus verständlichen Gründen um so schwieriger zu erfassen, je länger die Zeitreihen in die Vergangenheit zurückreichen.

Hier bietet aber die synoptische Betrachtung von 10 voneinander unabhängigen Pegeln die wertvolle Möglichkeit, solche speziellen Störungen an bestimmten Pegeln aus den gegenseitigen Vergleichen erkennen zu können. Dies gilt übrigens auch für Veränderungen der Wasserstände durch örtliche Baumaßnahmen. In den folgenden Auswertungen werden daher die Zeitreihen und -funktionen stets für alle 10 Pegel gemeinsam zu betrachten sein.

3. Zeitliche Änderungen der Säkularrends

3.1 Mittleres Tidehochwasser MThw

Auf Abb. 4 sind die Zeitreihen, auf Abb. 5 die Zeitfunktionen $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre und auf Abb. 6 die für $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre der untersuchten 10 Nordseepegel dargestellt; zu jedem Pegel ist dabei zugleich der mittlere Säkularanstieg s_T in m/100 Jahre verzeichnet, der sich als Mittelwert der gesamten Zeitreihe ergibt.

Die Zeitreihen selbst (die beim Pegel Cuxhaven bis in das Jahr 1855 zurückreichen) zeigen zunächst bei allgemein ansteigender Tendenz die kennzeichnenden jährlichen Schwankungen, die sich aber für jedes Jahr an allen Pegeln gleichsinnig einstellen; dies ist besonders an dem extrem niedrigen Wert für das Jahr 1947 zu erkennen (Abb. 4). Daraus geht hervor,

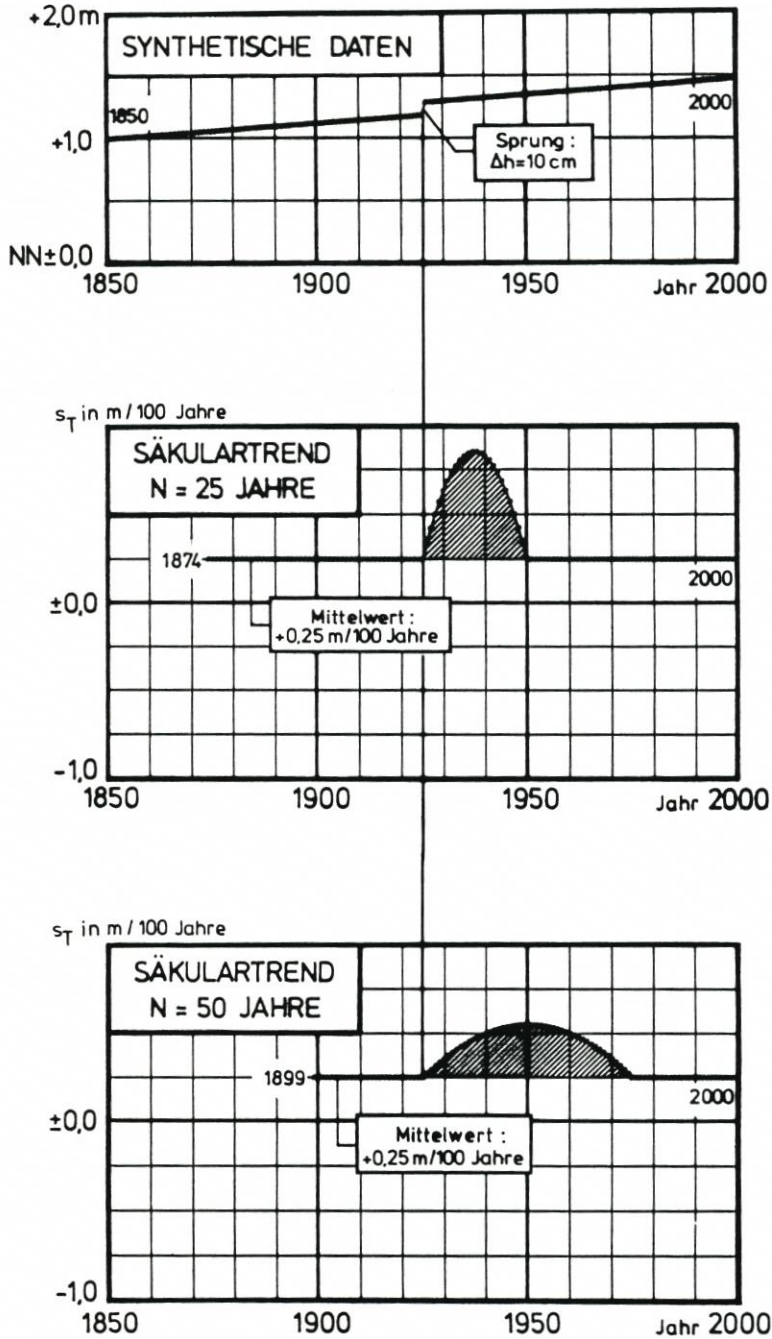


Abb. 3. Störungen der Zeitfunktionen $s_T(t)$ durch eine Diskontinuität (hier: Sprung) (schematisch)

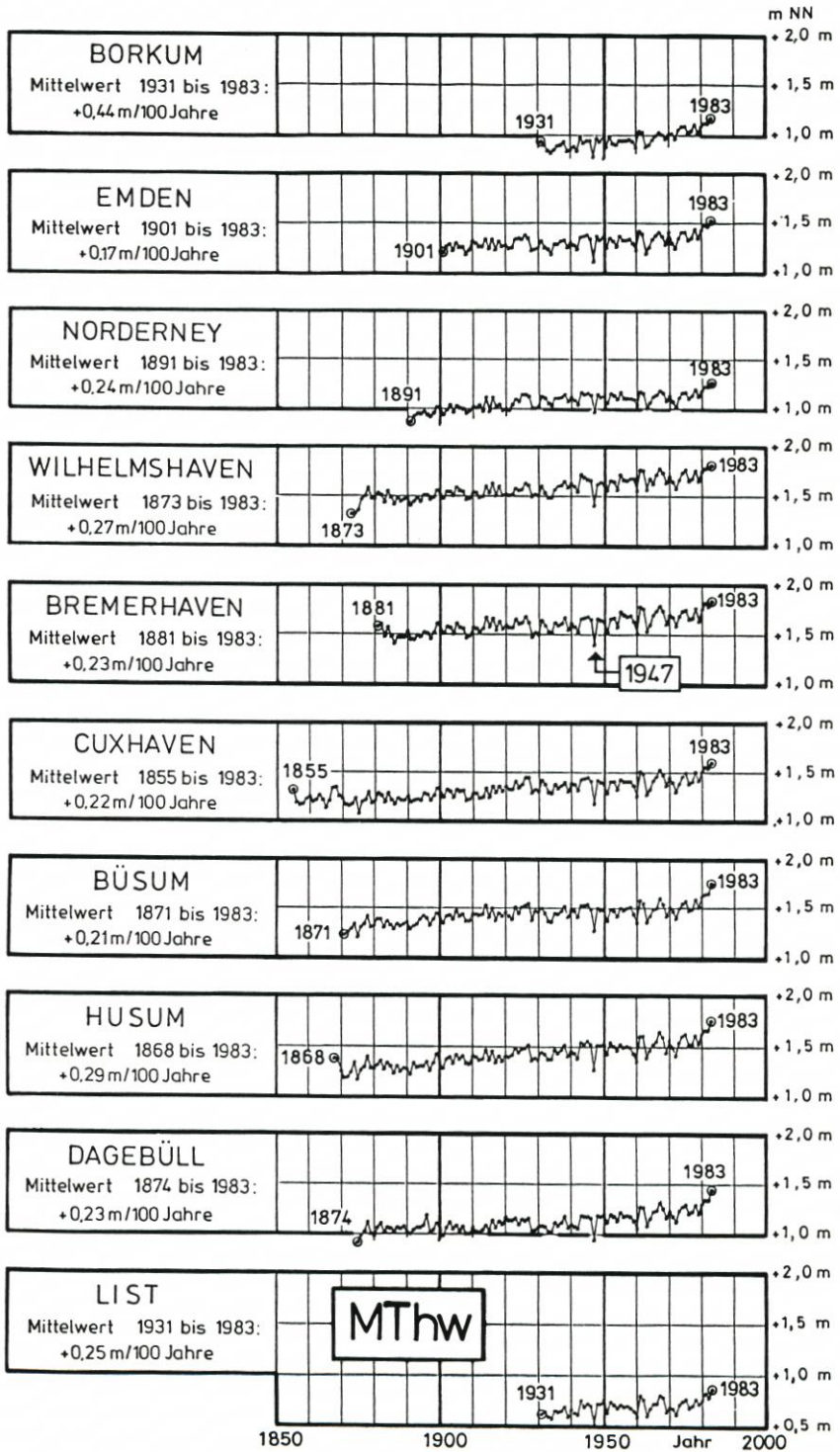


Abb. 4. Zeitreihen der mittleren Tidehochwasser (MThw) an den 10 Pegelstationen

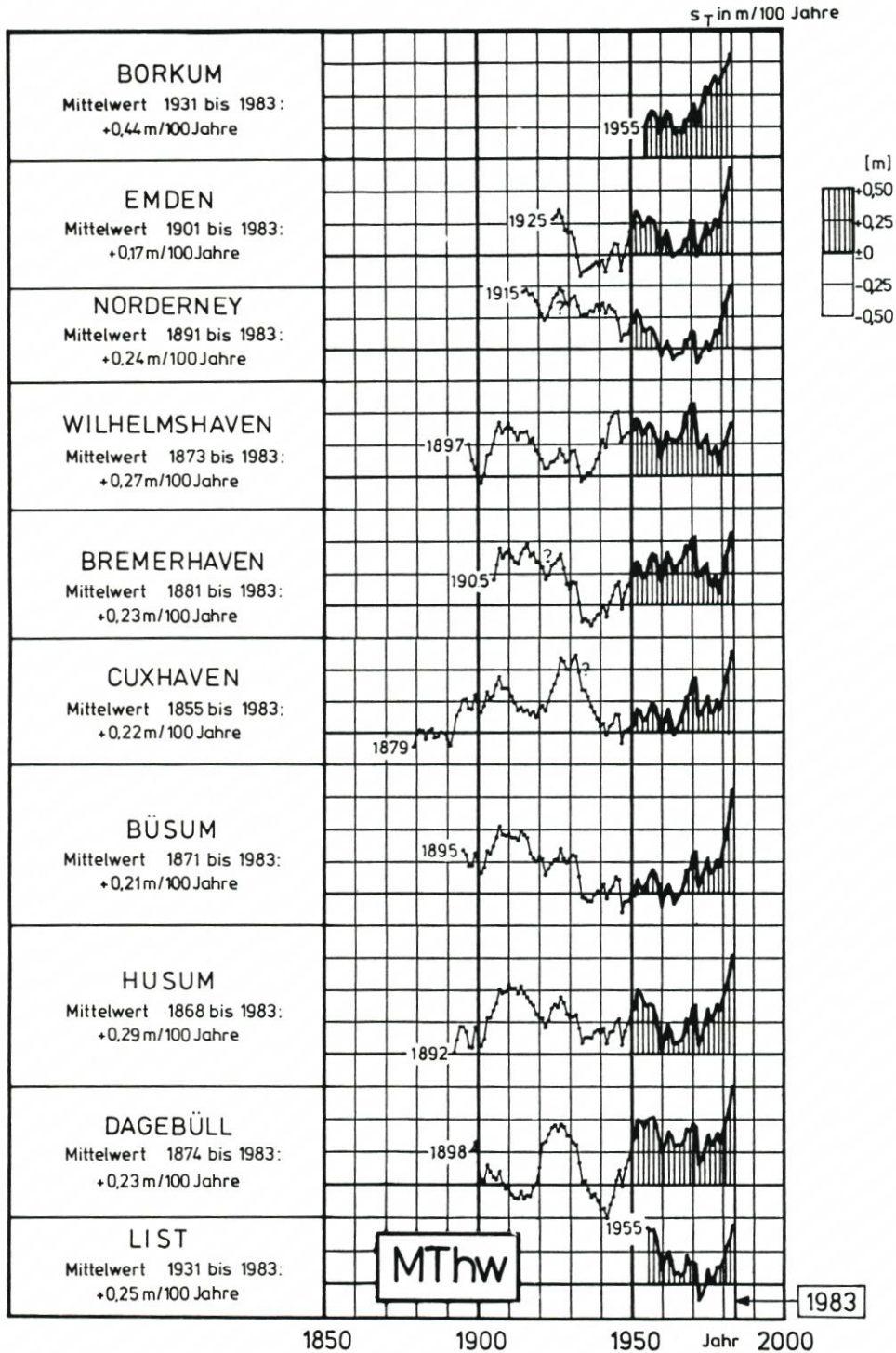


Abb. 5. Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre (Extrapolation von 25 auf 100 Jahre) für die mittleren Tidehochwasser (MThw)

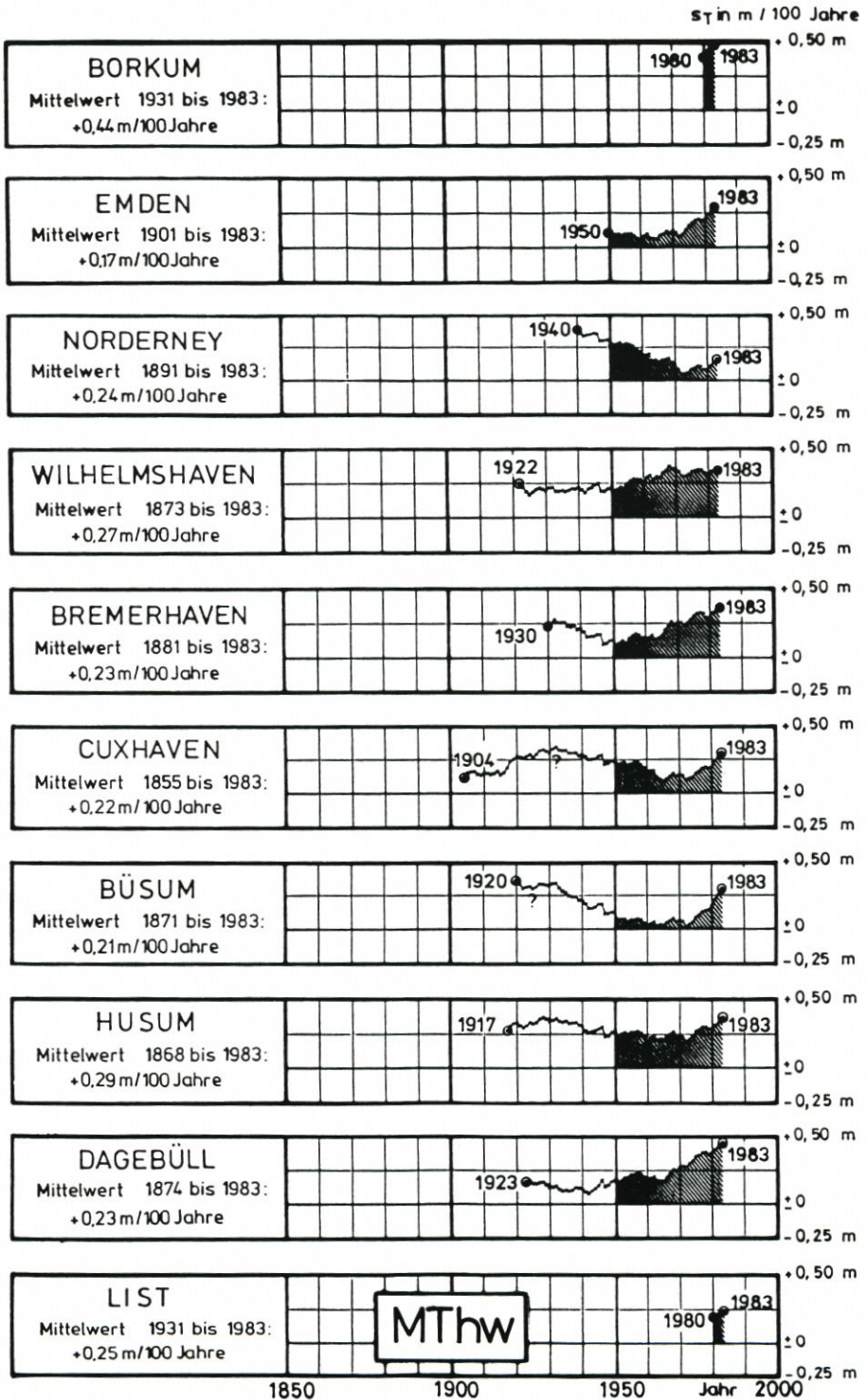


Abb. 6. Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre (Extrapolation von 50 auf 100 Jahre) für die mittleren Tidehochwasser (MThw)

daß es sich bei den jährlichen MThw um großräumige Wasserspiegeländerungen handelt, von denen das gesamte Gebiet der Deutschen Bucht betroffen wird.

Bereits eine genaue Betrachtung der Zeitreihen auf Abb. 4 läßt erkennen, daß ab etwa 1960 ein steilerer Anstieg erfolgt. Dies wird durch die Zeitfunktionen $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre bestätigt, die für fast alle Pegel Höchstwerte am Ende der Auswertzeit für das Jahr 1983 aufweisen (Abb. 5).

Wie weiterhin Abb. 5 zeigt, wird die Übereinstimmung der Funktionen $s_T(t)$ für die einzelnen Pegel i. a. immer schlechter, je weiter sie in die Vergangenheit zu verfolgen sind. Zwar kann bei mehreren Pegeln ein schwaches Maximum um das Jahr 1910 festgestellt werden, im übrigen Verlauf zwischen 1910 und 1950 verhalten sich die Funktionen aber uneinheitlich und manchmal sogar gegenläufig wie die für Bremerhaven und Cuxhaven um 1930. Diese Vorgänge können durch solche Effekte wie auf Abb. 3 erklärt werden und sollen hier nicht im einzelnen behandelt werden; wichtig ist nur, daß ab etwa 1950 fast alle Pegel ein nahezu gleichartiges Verhalten mit unregelmäßigen Schwankungen zwischen 1950 und 1970 und einem allgemeinen Anstieg im letzten Jahrzehnt vor 1983 aufweisen.

Was Abb. 5 weiterhin deutlich machen soll, ist das Fehlen kennzeichnender Zyklen oder gar Perioden. Selbst wenn es solche geben würde, sind die vorhandenen Zeitreihen für ihren Nachweis zu kurz. Es können lediglich unregelmäßige Schwankungen mit einzelnen Maxima und Minima festgestellt werden, die allerdings an den meisten Pegeln in den letzten Jahren mit Größtwerten enden.

Auf Abb. 6 ($s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre) werden die gleichen Vorgänge in geglätteter Form gezeigt. Auch hier laufen vor etwa 1950 die einzelnen Funktionen uneinheitlich; nach 1950 aber ist, von einer Ausnahme abgesehen, ein allmählicher Anstieg mit Höchstwerten bei 1983 festzustellen, der eine Beschleunigung des Säkularanstieges in den vergangenen 50 Jahren ausdrückt.

3.2 Mittleres Tideniedrigwasser MTnw

Hier zeigen Abb. 7 die Zeitreihen und Abb. 8 und 9 die Zeitfunktionen $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre und $N = 50$ Jahre. Auch hier sind zu jedem Pegel die Mittelwerte für die Veränderungen der Niedrigwasser während der gesamten jeweiligen Zeitreihe eingetragen.

Hier fällt bereits bei diesen Mittelwerten auf, daß sie bei fast der Hälfte der betrachteten Pegel mit negativen Vorzeichen auftreten, also einen Abfall anstatt eines Anstieges anzeigen. Die Zeitreihen der MTnw auf Abb. 7 zeigen zwar auch für die einzelnen Jahre gleichsinniges Verhalten wie auf Abb. 5 für das MThw auf (vgl. z. B. das Minimum für das Jahr 1947), im allgemeinen Trend aber weichen die Zeitreihen für die MTnw wesentlich mehr voneinander ab als die für die MThw.

Dies wird durch die Zeitfunktionen $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre auf Abb. 8 bestätigt. Auch hier sind, wie auf Abb. 5 für die MThw, die Verläufe der Funktionen vor 1950 uneinheitlich, wobei der Vergleich hier zusätzlich dadurch erschwert wird, daß die Zeitreihen für die MTnw bei den meisten Pegeln kürzer als die der MThw sind (Abb. 8). Nach 1950 tritt aber bei fast allen Pegeln ein deutliches Maximum auf, dem dann ein steiler Abfall zu der Zeit folgt, in der ein starker Anstieg der MThw eintritt (vgl. Abb. 5). Im letzten Jahrzehnt ist dann bei den meisten Pegeln eine rückläufige Tendenz festzustellen, wobei die Kurven aber immer noch im Negativbereich verlaufen, der Abfall der MTnw also noch weiter anhält.

Einen allmählichen Abfall der MTnw zeigt auch die Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre auf Abb. 9 für die Jahre nach etwa 1950 an; hier liegen die Endwerte meist etwas unter Null

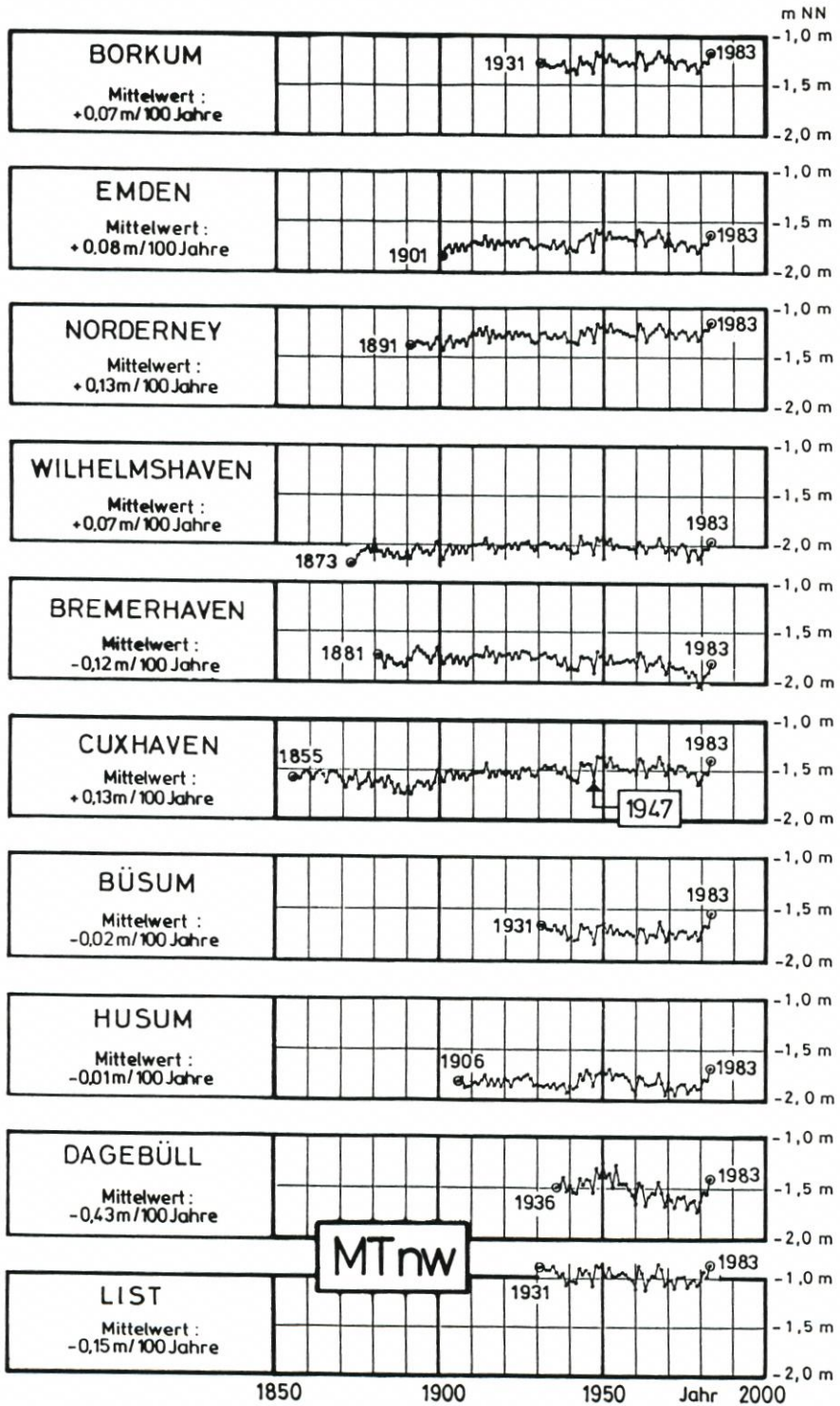


Abb. 7. Zeitreihen der mittleren Tideniedrigwasser (MTnw) an den 10 Pegelstationen

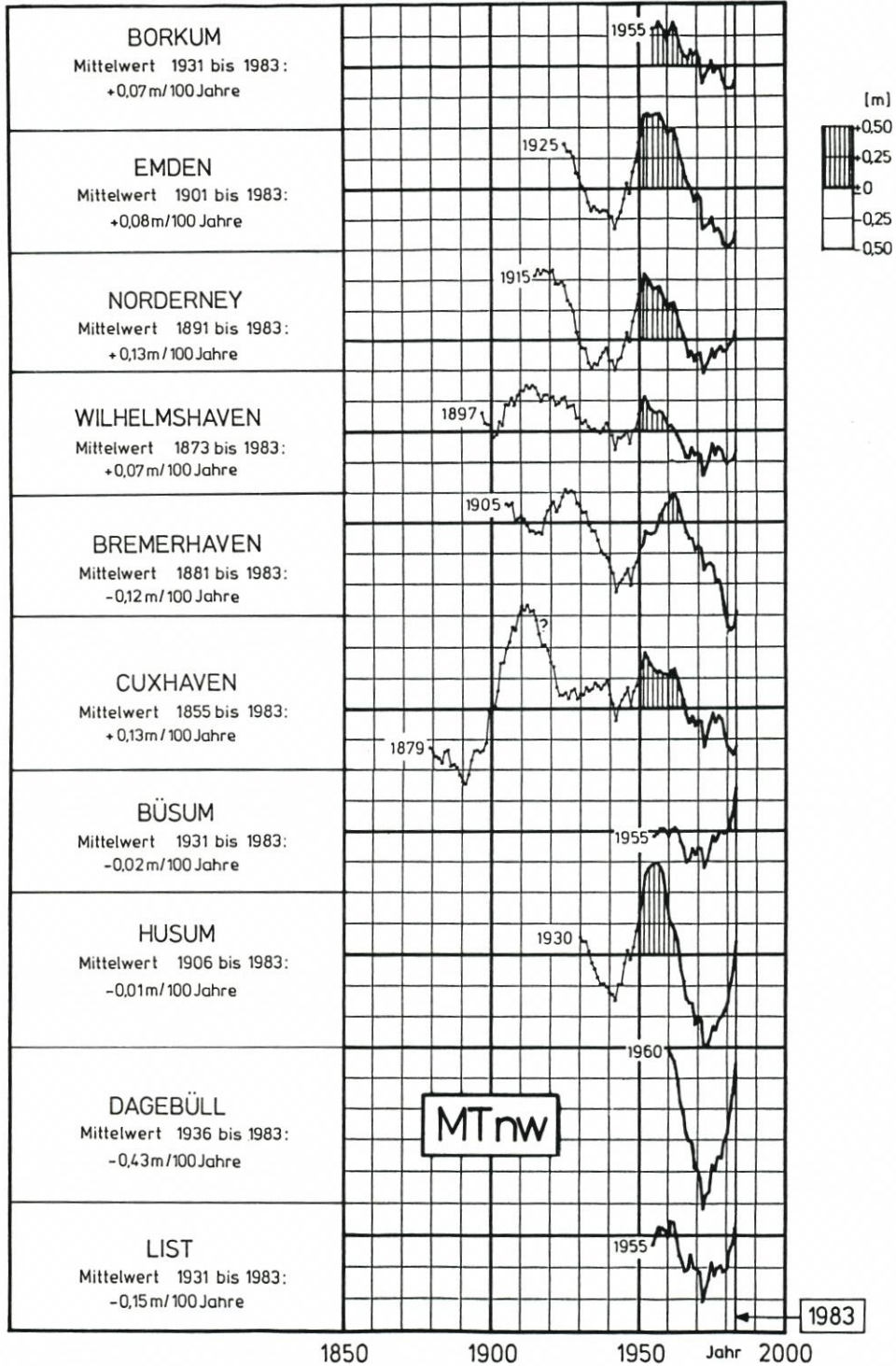


Abb. 8. Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre (Extrapolation von 25 auf 100 Jahre) für die mittleren Tideniedrigwasser (MTnw)

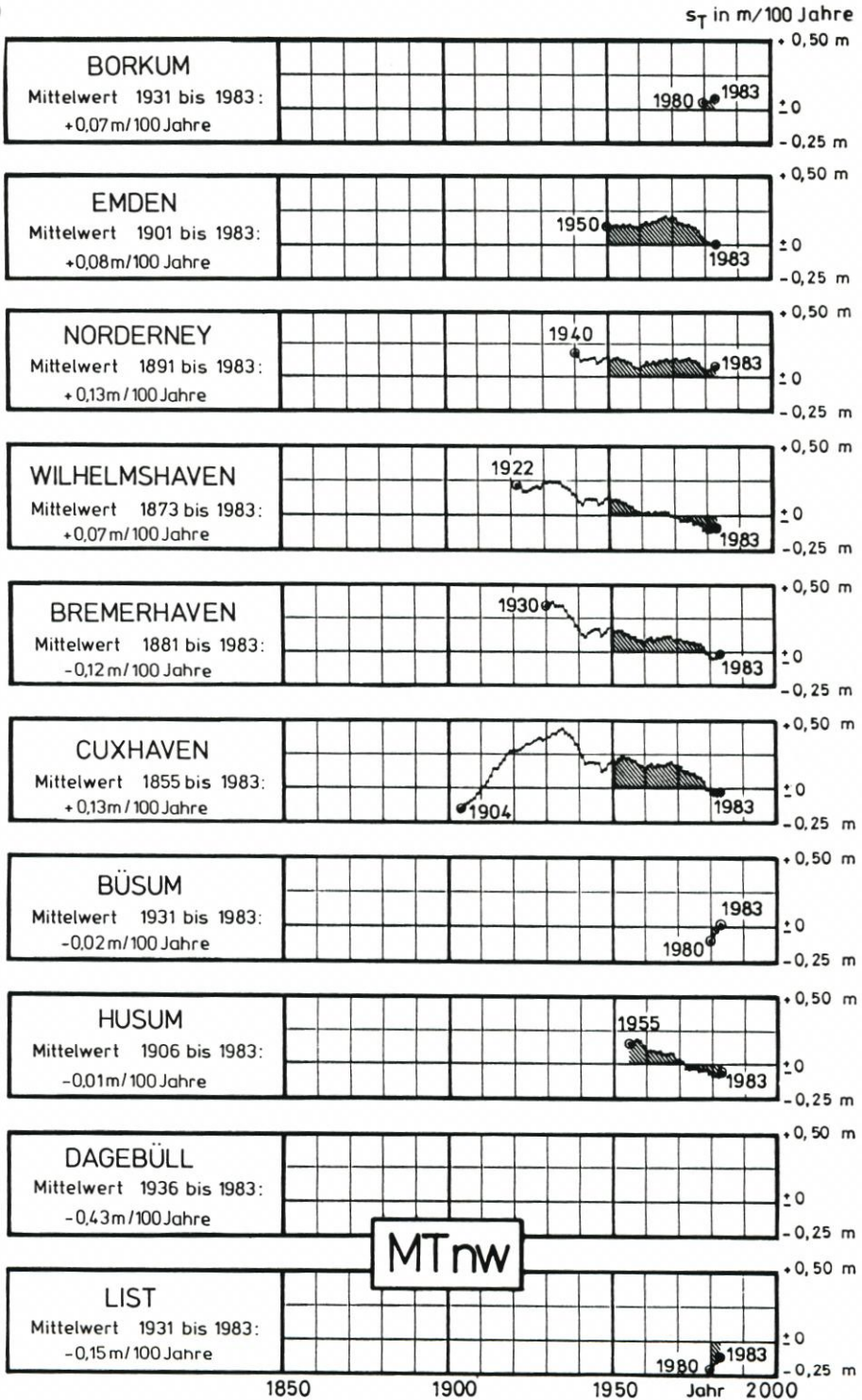


Abb. 9. Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre (Extrapolation von 50 auf 100 Jahre) für die mittleren Tideniedrigwasser (MTnw)

und deuten damit an, daß sich die Höhen der MTnw als Mittelwert der letzten 50 Jahre so gut wie nicht geändert haben.

Da die Pegel fast durchweg an Rinnen oder Strömen inmitten ausgedehnter Wattengebiete liegen und außerdem konstruktiv oft so beschaffen sind, daß sie die tiefsten Niedrigwasser nicht mehr registrieren können, dürften die wirklichen MTnw in den umgebenden Seegebieten eher noch niedriger als nach den untersuchten Zeitreihen sein. Deshalb machen sich örtliche morphologische Besonderheiten an den Pegeln eher bei den Registrierungen der Tnw als bei denen der Thw bemerkbar.

3.3 Mittlerer Tidehub MThb

Im allgemeinen weist ein Jahr mit einem höheren MThw auch ein höheres MTnw entsprechend den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen auf. Es sollte daher angenommen werden, daß der mittlere Tidehub als die Differenz von MThw und MTnw frei von den jährlichen Schwankungen ist, wie Abb. 4 für das MThw und Abb. 7 für das MTnw zeigen. Weiterhin sollte erwartet werden, daß der Tidehub weitgehend konstant bleibt. Die Zeitreihen für den MThb auf Abb. 10 zeigen zwar geringere jährliche Schwankungen als die MThw und MTnw, aber dafür eine deutlich zunehmende Tendenz auf, was durch Abb. 11 ($s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre) und Abb. 12 ($s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre) bestätigt wird.

Nach unregelmäßigen und uneinheitlichen Schwankungen um die Nullachse zeigen die mittleren Tidehübe in der Funktion $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre für fast alle Pegel ab etwa 1960 eine starke Zunahme (Abb. 11), die durch die Beschleunigung des Anstieges der Thw bei gleichzeitiger Absenkung der Tnw bedingt sind. Auch die Funktionen $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre treten ab etwa 1960 als monoton steigend auf (Abb. 12).

4. Vergleich der mittleren Tidewasserstände der Nordsee mit dem Mittelwasserstand der Ostsee

Die Ostsee kann mit ihren mittleren Wasserständen MW, in denen nur noch ein geringer Tideanteil enthalten ist, wie ein stark gedämpftes Pegelbecken angesehen werden, das durch die schmalen Meerengen von Skagerrak und Kattegat mit der nördlichen Nordsee verbunden ist. Da aus physikalischen Gründen Windstau und Windsunk an der Nord- und Ostsee gegensinnig verlaufen – anhaltende Westwinde erzeugen in der Deutschen Bucht erhöhte, an der deutschen Ostseeküste abgesenkte Wasserstände –, sollte erwartet werden, daß Jahre mit hohen mittleren Tidewasserständen an der Nordsee an der deutschen Ostseeküste solche mit niedrigem MW und umgekehrt aufweisen. Der Vergleich der jährlichen Tidewasserstände des Pegels Husum mit den Mittelwasserständen des Pegels Travemünde zeigt aber, daß eher das Gegenteil der Fall ist (Abb. 13 und 14).

Bei den Zeitreihen auf Abb. 13 fällt auf, daß sich das MThw am Pegel Husum und das MW am Pegel Travemünde in den einzelnen Jahren etwa gleichsinnig verhalten; Jahre mit hohem MThw in Husum sind i. a. auch Jahre mit hohem MW in Travemünde und umgekehrt, wie es auch hier wieder der besonders niedrige Wert für das Jahr 1947 zeigt (Abb. 13). Bei den MThw in Husum und dem MW in Travemünde tritt auch die langfristige Tendenz eines allmählichen Anstieges gemeinsam auf, während die Übereinstimmung mit den MTnw in Husum wesentlich schlechter ist (Abb. 13). Das wird durch die Korrelation auf Abb. 14 bestätigt, wo sich für die Korrelationsgerade der MThw-Werte von Husum über den MW-

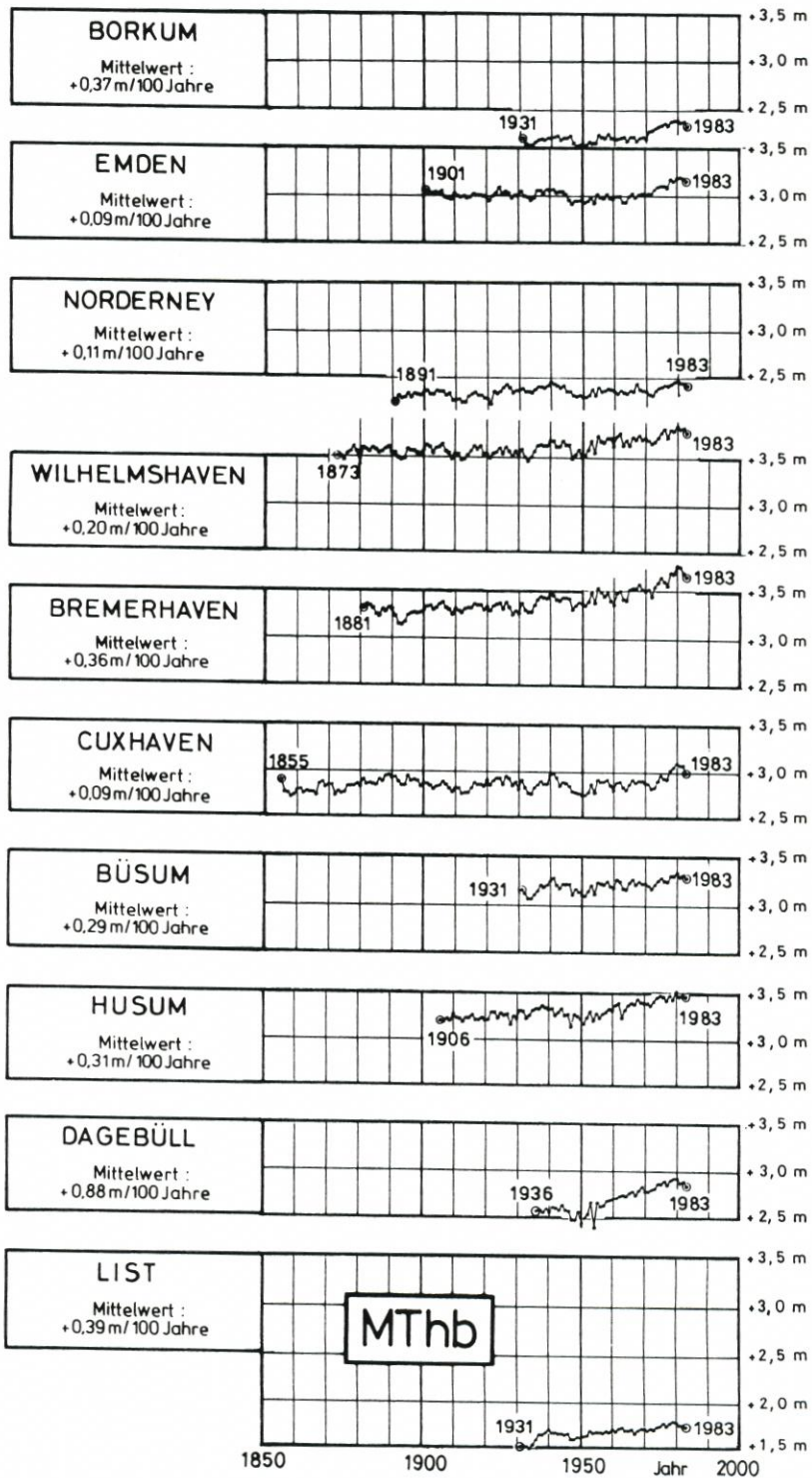


Abb. 10. Zeitreihen für den mittleren Tidehub (MThb) an den 10 Pegelstationen

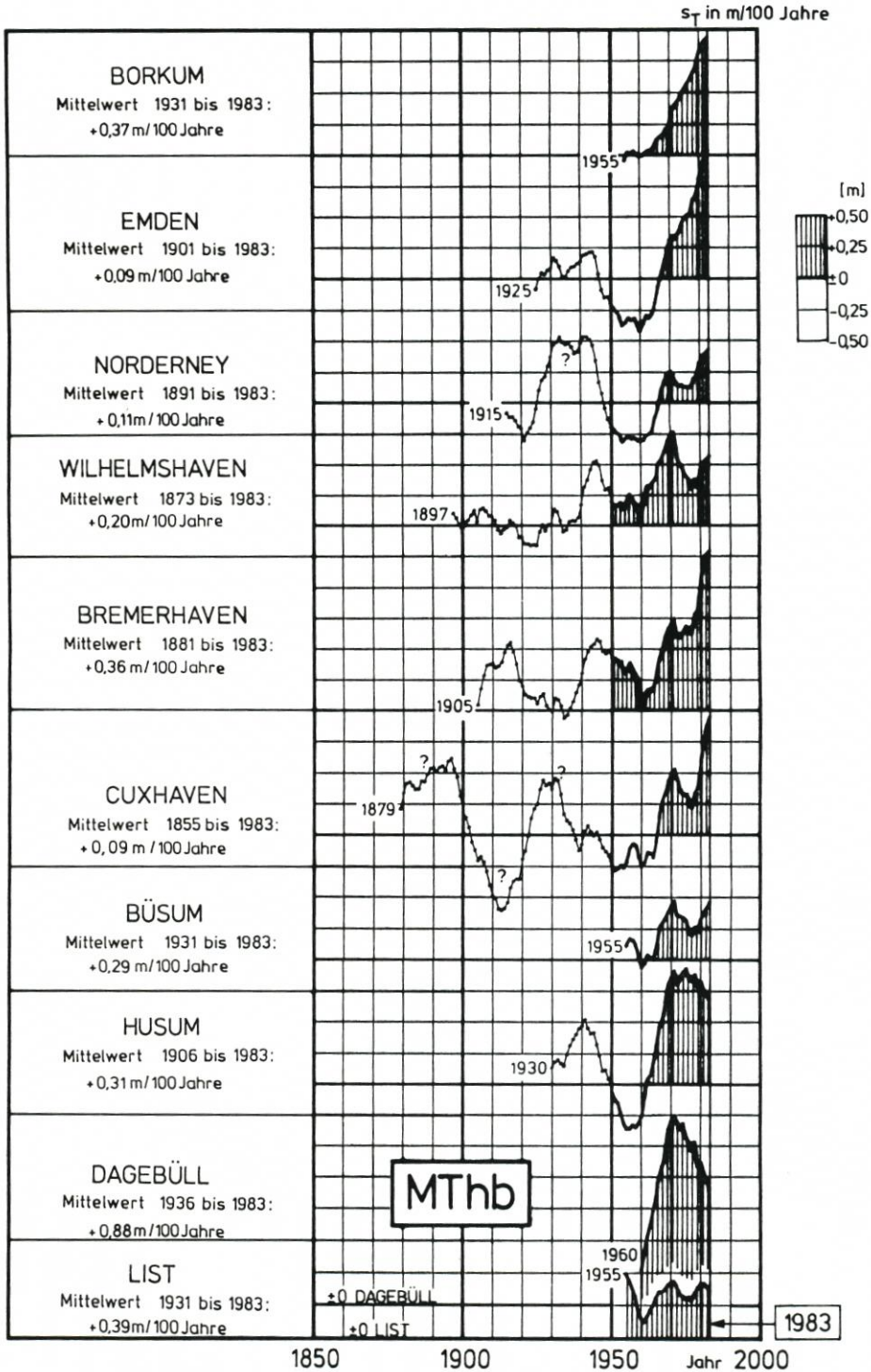


Abb. 11. Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 25$ Jahre (Extrapolation von 25 auf 100 Jahre) für den mittleren Tidehub (MThb)

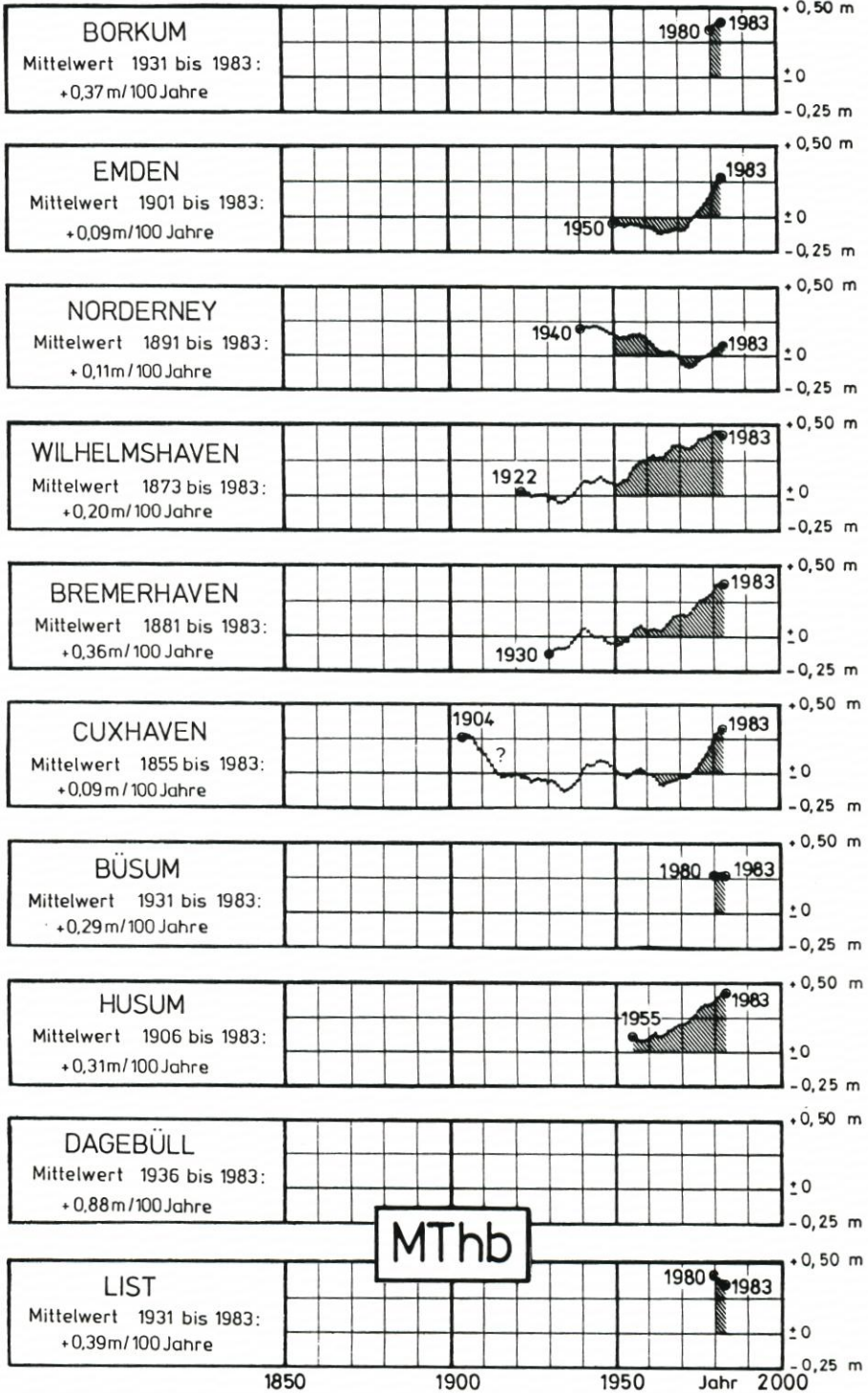


Abb. 12. Zeitfunktion $s_T(t)$ für $N = 50$ Jahre (Extrapolation von 50 auf 100 Jahre) für den mittleren Tidehub (MThb)

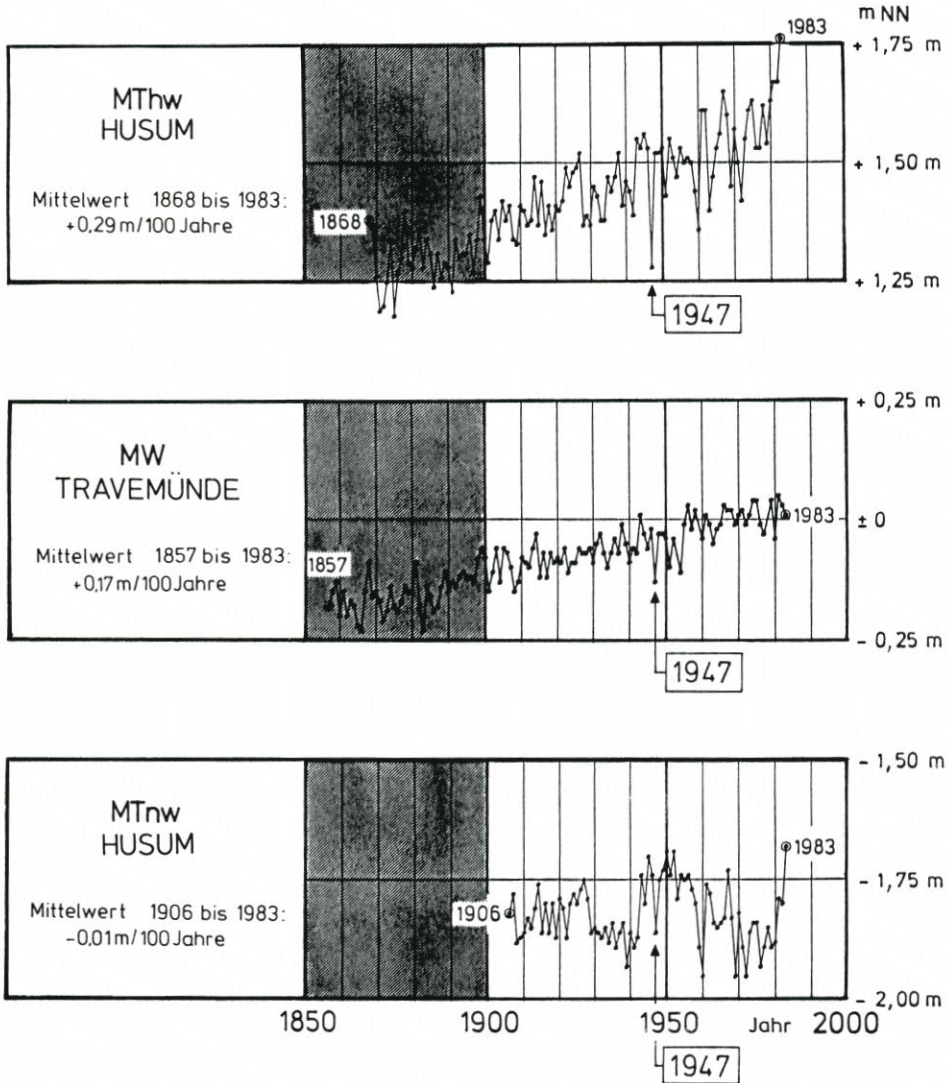


Abb. 13. Vergleich der Zeitreihen für das MThw und das MTnw des Pegels Husum mit der Zeitreihe für das MW des Pegels Travemünde

Werten von Travemünde der relativ hohe Korrelationsfaktor von $r = 0,86$ ergibt, während er bei den MTnw-Werten nur bei $r = 0,09$ liegt. Die Pegel Husum und Travemünde stehen dabei nur als Beispiele; auch die Korrelationen anderer Pegelpaare liefern ähnliche Ergebnisse.

Es soll hiermit gezeigt werden, daß die langfristigen Änderungen der mittleren Wasserstände an der Nordsee nicht allein den Raum der Deutschen Bucht erfassen, sondern großräumig über Skagerrak und Kattegat bis in die Ostsee hinein wirken. Sie sind nicht durch kurzfristige meteorologische Windeinflüsse zu erklären, sondern müssen ihre Ursachen in Vorgängen haben, die große Seegebiete gleichermaßen erfassen.

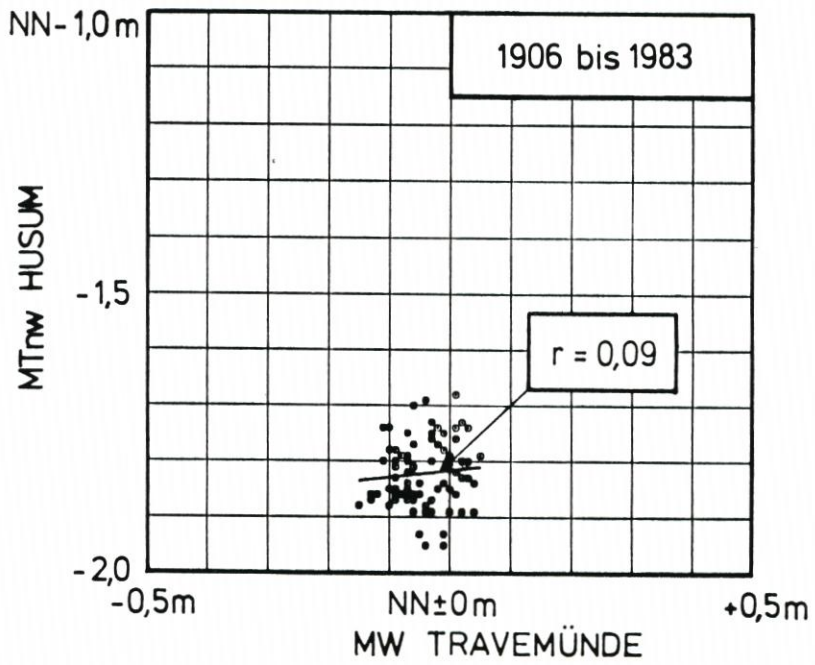
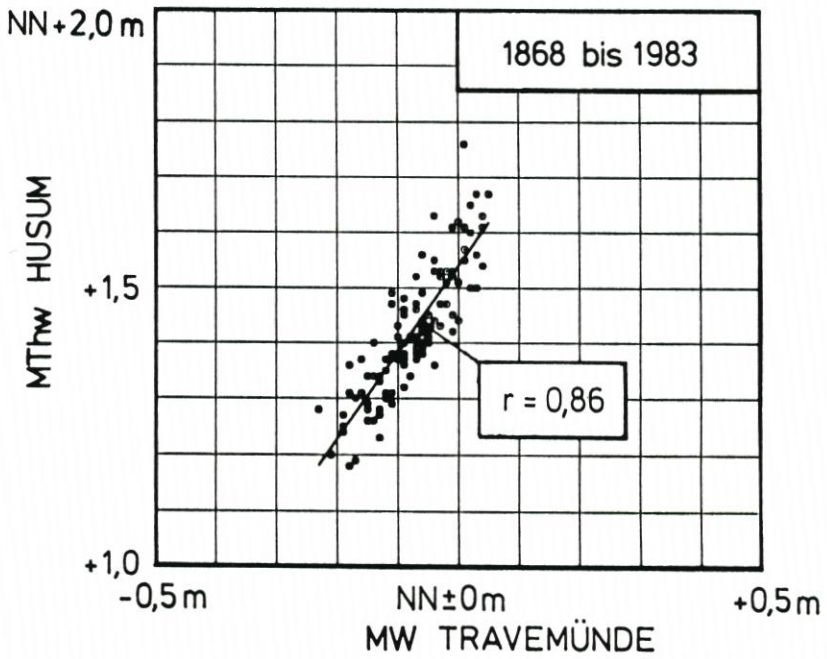


Abb. 14. Korrelationen zwischen dem MW Travemünde und dem MThw Husum (oben) und dem MTnw Husum (unten)

5. Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Als Zusammenfassung der auf den Abb. 4 bis 12 dargestellten Ergebnisse sind auf Tafel 1 für die 10 Nordseepegel nach Abb. 1 die Ergebnisse für MThw, MTnw und MThb dargestellt, die sich für das Jahr 1983 mit der Berechnung aus $N = 100$ Jahren, $N = 50$ Jahren und $N = 25$ Jahren ergeben. Während der Wert aus 100 Jahren den exakten Säkulartrend wiedergibt, handelt es sich bei den Werten aus $N = 50$ Jahren und $N = 25$ Jahren um Extrapolationen, die nicht als Prognosen verstanden werden sollen (vgl. Abschnitt 2).

Weil die 10 Pegel als gleichgewichtig anzusehen sind, kann durch die Bildung der Mittelwerte aus Tafel 1 eine Gesamtübersicht über die Deutsche Bucht erhalten werden, die auf Tafel 2 erscheint. Die Standardabweichungen auf Tafel 2 drücken dabei das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Pegel aus. Sie liegen bezeichnenderweise bei den MThw deutlich niedriger als bei den MTnw und MThb (Tafel 2).

Bei den MThw ist ein Vergleich mit der amerikanischen Ostküste interessant, wo in einer

Tafel 1
Säkulare Änderungen in m/100 Jahre als Extrapolation von $N = 25, 50$ und 100 Jahren
(bezogen auf das Jahr 1983)

N in Jahren	MThw			MTnw			MThb		
	100	50	25	100	50	25	100	50	25
Zeitraum	1884 - 1983	1934 - 1983	1959 - 1983	1884 - 1983	1934 - 1983	1959 - 1983	1884 - 1983	1934 - 1983	1959 - 1983
PEGEL	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.	m/100 J.
Borkum	-	0,475	0,813	-	0,085	-0,125	-	0,391	0,938
Emden	-	0,285	0,67	-	0,007	-0,367	-	0,278	1,037
Norderney	-	0,156	0,499	-	0,081	0,069	-	0,075	0,431
Wilhelmshaven	0,275	0,338	0,406	0,052	-0,090	-0,160	0,224	0,428	0,566
Bremerhaven	0,247	0,359	0,562	-0,133	-0,268	-0,732	0,380	0,627	1,293
Cuxhaven	0,242	0,294	0,640	0,178	-0,028	-0,309	0,065	0,322	0,949
Büsum	0,192	0,290	0,808	-	0,017	0,346	-	0,273	0,462
Husum	0,309	0,364	0,773	-	-0,058	0,104	-	0,427	0,688
Dagebüll	0,240	0,451	0,752	-	-	-0,139	-	-	0,892
List	-	0,239	0,445	-	-0,112	0,059	-	0,346	0,369
Mittelwert	0,250	0,325	0,637	0,032	-0,041	-0,125	0,223	0,352	0,762
Standardabweichung	$\pm 0,038$	$\pm 0,095$	$\pm 0,152$	$\pm 0,156$	$\pm 0,110$	$\pm 0,300$	$\pm 0,158$	$\pm 0,149$	$\pm 0,305$

Tafel 2
Säkularänderungen als Mittelwerte aller 10 Nordseepegel (bezogen auf das Jahr 1983)

Extrapoliert aus:	MThw m/100 Jahre	MTnw m/100 Jahre	Bemerkung
N = 100 Jahre	+ 0,25 \pm 0,04	+ 0,03 \pm 0,16	bezogen auf 1983
N = 50 Jahre	+ 0,32 \pm 0,09	- 0,04 \pm 0,11	
N = 25 Jahre	+ 0,64 \pm 0,15	- 0,12 \pm 0,30	

eingehenden Studie von GALVIN (1983) 14 Pegelstationen mit einer Zeitreihe von 1940 bis 1975 auf die Veränderung des MSL (Mean Sea Level = Tidemittelwasser) untersucht wurden. Der Mittelwert dieser 14 Stationen liefert $s_T = 0,29 \text{ m} \pm 0,09 \text{ m}/100 \text{ Jahre}$. Wird für die gleiche Zeitreihe für die 10 Pegel nach Abb. 1 der Mittelwert für den Anstieg der MThw berechnet, so beträgt dieser $s_T = 0,23 \text{ m} \pm 0,13 \text{ m}/100 \text{ Jahre}$ und ist daher in gleicher Größenordnung für diesen Zeitabschnitt. Es sollte aber angestrebt werden, getrennte Untersuchungen für die MThw und MTnw an einem weltweiten Pegelnetz durchzuführen, weil, wie das Beispiel der Deutschen Bucht zeigt, das Tidemittelwasser oder MSL nicht immer die geeignete Größe ist, mit der Veränderungen erkannt werden können.

Ob sich in dem beschleunigten Anstieg der MThw (vgl. SIEFERT, 1982, und ROHDE, 1984) der letzten Jahrzehnte bereits eine Klimaveränderung bemerkbar macht (vgl. z. B. BACH, 1982 und 1985), kann hier nicht gesagt werden. Wie insbesondere Abb. 5 zeigt, hat es größere Fluktuationen auch schon in der Vergangenheit gegeben, die allerdings nicht die Amplituden der letzten Jahre erreichten. Die Zeitreihen der Wasserstände könnten aber – ähnlich wie die bekannten Gletscherveränderungen – der Klimaforschung wichtige Hinweise geben, weil sie wie ein erdumspannendes Integral die Gesamtklimaentwicklung ausdrücken.

Wesentlich schwieriger als das Verhalten der MThw ist das der Tideniedrigwasser MTnw zu erklären, womit unmittelbar auch das des Tidehubes zusammenhängt. Astronomische Gründe scheiden hier aus. Ebenso wenig sind großräumige morphologische oder tektonische Veränderungen bekannt, die derartige Folgen haben könnten. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß die Absenkung der Niedrigwasser nicht auf einzelne Pegel beschränkt ist; trotz der vorhandenen Streuweiten (vgl. Tafel 1 und 2) handelt es sich um einen Vorgang, der zumindest die gesamte Deutsche Bucht erfaßt (vgl. Abb. 8). Es hat den Anschein, daß sich die Tidewelle hier in Art einer stehenden Welle verhält, bei der durch die Erhöhung der Eingangswelle (= Anstieg des MThw) die Reflexion verstärkt wird. Es sollten hier entsprechende hydronumerische Rechnungen durchgeführt werden, die vielleicht auch Aufschluß darüber geben könnten, wieweit hier ein Einfluß des Wattenmeeres, das ja spezifisch für die gesamte Küstenlinie in der Deutschen Bucht ist, vorliegen könnte. Solche Berechnungen wären auch deshalb von größtem Wert, weil dadurch – wenn eine Übereinstimmung mit der Vergangenheit und der Gegenwart erreicht wird – festgestellt werden könnte, wie sich eine weitere Erhöhung des MThw auf die MTnw und auf den Tidehub auswirken könnte.

Abgesehen aber von den schwierigen Fragen der Prognostik, die an dieser Stelle nicht behandelt werden sollen, kann aus den vorliegenden Untersuchungen und insbesondere aus den zusammenfassenden Darstellungen auf Tafel 1 und 2 eindeutig ersehen werden, welche Folgen diese Säkularänderungen und hier besonders die der letzten $N = 25$ Jahre für die Gegenwart haben. Wird z. B. für $N = 25$ Jahre als Mittelwert für die Deutsche Bucht ein Säkularanstieg von $0,64 \text{ m}/100 \text{ Jahre}$ gefunden (Tafel 2), so bedeutet dies, daß in den 25 Jahren vor 1983 ein mittlerer Anstieg von 16 cm stattgefunden hat. Wird aus Tafel 1 für den Pegel Bremerhaven eine Zunahme des Tidehubes von rd. $1,29 \text{ m}/100 \text{ Jahre}$ aus 25 Jahren extrapoliert, so hat der Tidehub in diesen 25 Jahren effektiv um rd. 32 cm zugenommen usw. So kann für jeden Pegel aus Tafel 1 für die letzten $N = 25, 50$ und 100 Jahre das Verhalten von MThw, MTnw und MThb entnommen werden, während Tafel 2 die entsprechenden Daten für die Mittelwerte der gesamten Deutschen Bucht liefert. Es sollen hier nur einige Konsequenzen angeführt werden:

- a) Dadurch, daß an der Deutschen Bucht das MThw im Mittel um bereits 16 cm in den 25 Jahren vor 1983 gestiegen ist, wird bereits ein wesentlicher Teil der Sicherheitsreserve aufgezehrt, die bei der Bemessung der Deichhöhen für den Säkularanstieg vorgesehen wurde.

- b) Durch die Erhöhung des MThw entstehen auf Watten und Außensänden größere Wassertiefen, worauf sehr empfindlich das Wellenklima reagiert; größere Wellenhöhen und damit höhere Orbitalgeschwindigkeiten und Brandungsenergien sind die unmittelbare Folge; großflächige Erosionen können die mittelbaren Folgen sein.
- c) Durch die erhöhten Tidehübe bei gleichbleibendem oder sogar sinkendem Niedrigwasser treten in allen Tiderinnen – vom kleinsten Priel bis zum Tideästuar – größere Strömungsgeschwindigkeiten auf, die Ausräumungen bewirken können. Diese können selbst wieder durch Rückkopplungsbeziehungen weitere Veränderungen des Tideregimes einleiten.
- d) Durch die erhöhten Tideströmungen treten verstärkte Erosionen an den Inselsockeln auf, die sich in Strandausräumungen fortsetzen können und in Zusammenhang mit der verstärkten Sturmfluthäufigkeit dann zu zunehmenden Dünen- und Kliffabbrüchen führen können usw.

Daß die Absenkung der Niedrigwasser Probleme für die Schifffahrt und die Häfen aufwirft, ist allgemein bekannt; als positiv wirkt sich dagegen die Absenkung der Niedrigwasser für die Wasserwirtschaft in der Sielentwässerung aus.

Die Liste dieser bereits bestehenden Auswirkungen kann beliebig fortgesetzt werden, vor allem dann, wenn auch die ökologischen Aspekte, z. B. des Wattenmeeres, mit einbezogen werden.

Es soll hiermit abschließend festgestellt werden, daß die vorgelegten Untersuchungen nicht nur für die nähere oder fernere Zukunft, sondern auch für die Gegenwart Bedeutung haben.

Anmerkung: Die vorliegenden Untersuchungen wurden zum großen Teil mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen gefördert, wofür an dieser Stelle der Dank ausgesprochen werden soll. Insbesondere aber danken die Verfasser allen Personen und Dienststellen, die bei der Zusammenstellung der Daten wertvollste Hilfe geleistet haben.

6. Schriftenverzeichnis

- BACH, W.: Gefahr für unser Klima. Wege aus der CO₂-Bedrohung durch sinnvollen Energieeinsatz. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, 1982.
- BACH, W.: CO₂. Bild der Wissenschaft, Mai 1985, Deutsche Verlagsanstalt GmbH., 1985.
- BARNETT, T. P.: Global Sea Level Estimating and Explaining Apparent Changes. Coastal Zone '83, Proceedings, Third Symposium on Coastal and Ocean Management, 1983.
- BRETTERBAUER, K.: Eismassenänderungen und eustatisches Meeressniveau. Geowissenschaftliche Mitteilungen, H. 21, 1982.
- EMERY, K. O.: Relative Sealevels from Tide-Gauge Records. Proc. Natl. Acad. Sci., USA, Vol. 77 (12), 1980.
- FAIRBRIDGE, R. W.: Eustatic Changes in Sea Level. Physics and Chemistry of the Earth, 4, 1961.
- FLOHN, H.: Stehen wir vor einer Klimakatastrophe? Die Umschau, 77 (17), 1977.
- FLOHN, H.: Modelle der Klimaentwicklung im 21. Jahrhundert. Das Klima, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Veränderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 51, 1976.
- GALVIN, C.: Sea Level Rise and Shoreline Recession. Coastal Zone '83, Proceedings, Third Symposium on Coastal and Ocean Management, 1983.
- GAYE, J.: Wasserstandsänderungen in der Ostsee und der Nordsee in den letzten 100 Jahren. Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge der Gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg, 1951.
- GORNITZ, V., LEBEDEFF, S. u. HANSEN, J.: Global Sea Level Trend in the Past Century. Science, Vol. 215, 26, March 1982.

- GUTENBERG, B.: Changes in Sea Level, postglacial uplift and mobility of the Earth's interior. Bull. geol. Soc. Amerika 52, New York, 1941.
- HABICH, W.: On Water Levels at the tidal gauge Cuxhaven, 1943 to 1969. Deutsches Hydrogr. Inst. Hamburg, Report on the Symposium on Coastal Goedey, München, 1970.
- HANSEN, J., LACIS, A. u. RIND, D.: Climate Trends due to Increasing Greenhouse Gases. Coastal Zone '83, Proceedings, Third Symposium on Coastal and Ocean Management, 1983.
- HICKS, ST. D.: An Average Geopotential. Sea Level Series for the United States, J. of Geophysical Research, V. 83, No. C 3, 20 Mar. 1978.
- HICKS, ST. D.: Sea Level Variations for the United States 1855-1980. US Department of Commerce, NTIVS. Reproduced by: National Technical Information Service, Springfield, Jan. 1983.
- HUNDT, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Küste, Jg. 3, Doppelheft 1/2, 1955.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. für Wasserbau der Techn. Univ. Braunschweig, H. 83, 1984.
- KEELING, C. D.: Atmospheric Carbon Dioxide Variation from Fossil Fuels and Limestone. Tellus, 25, 1973.
- KUENEN, PH. H.: Marine Geology. Wiley, New York, 1950.
- LAUKART, W.: Ermittlung langfristiger Veränderungen aus Pegelregistrierungen - Diss., Techn. Univ. Hannover, 1981.
- LIESE, R.: Veränderungen von Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub seit 1946. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz der Nieders. Wasserwirtschaftsverw., Jahresbericht 1978, Bd. XXX, 1979.
- LISITZIN, E.: Sea Level Changes. Elsevier Oceanography, Series 8, Elsevier Scientific Publ. Comp., Amsterdam-Oxford-New York, 1974.
- LISITZIN, E.: Le niveau moyen de la mer. Bull. Inf. C.O.E.C., 10, 1958.
- LÜDERS, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Zentralbl. d. Bauverw., H. 50, 1936.
- PURUCKHERR, R.: Säkularvariation und meteorologisch-hydrologische Regressionen im Mittelwasser des Pegels Wilhelmshaven. Dissertation, Univ. Bonn, 1973.
- RIETSCHEL, E.: Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung. Dt. Wasserwirtschaft, H. 5, Berlin, 1933.
- ROHDE, H.: Die Häufigkeit hoher Wasserstände an der Westküste von Schleswig-Holstein. Die Küste, Jg. 12, 1964.
- ROHDE, H.: Wasserstandsänderung und Sturmfluthäufigkeit an der Elbmündung. Die Küste, H. 16, 1968.
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
- ROHDE, H.: New Aspects concerning the increase of the sea level on the German North Sea-coast. Proceedings of the 19th ICCE 1984, Houston, Texas, 1984.
- SCHÜTTE, H.: Neuzzeitliche 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.
- THOMAS, R. H., THOMPSON, D. E., BINDSCHADLER, R. A. u. MACAYEAL, D. R.: Ice-sheet melting and sea level. Coastal Zone '83, Proceedings, Third Symposium on Coastal and Ocean Management, 1983.
- THORARINSSON, S.: Present Glacier shrinkage and eustatic changes in sea level. Geogr. Ann., 12, 1940.
- WEXLER, H.: Icebudget for Antarctica and Changes of Sea Level. Journal of Glaciology, 3, 1961.