

Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen

Von Winfried Siefert

Zusammenfassung

Umfangreiche Analysen der Tide- und Sturmflutverhältnisse in der Deutschen Bucht und ihren Tideästuaren lassen erkennen, daß sich die Entwicklung in den letzten 20 Jahren grundlegend von derjenigen der davorliegenden Jahrzehnte unterscheidet. Bei der Suche nach den Ursachen stellt sich heraus, daß – neben den wahrscheinlichen Folgen baulicher – solche nicht auszuschließen sind, die aus Veränderungen in der Nordsee herrühren. Wege und Ansätze für die zukünftige Arbeit werden aufgezeigt.

Summary

Extensive analyses of tide and storm surge conditions in the German Bight and its estuaries point to a development during the last 20 years that distinctly differs from that of earlier decades. Going in search of the roots it turns out that – beyond influences of artificial changes in the estuaries – such can not be excluded that result of modifications in the North Sea. Hints and possible treatments of future investigations are noted.

Inhalt

1. Veranlassung	2
2. Entwicklung der Tideverhältnisse	2
2.1 Vorbemerkungen	2
2.2 MThw, MTnw an der Küste	6
2.3 MThw, MTnw in den Flüssen	8
2.4 Spring- und Nippanomalien in der Elbe	21
3. Entwicklung der Sturmflutverhältnisse	23
3.1 Erkennbare Trends am Beispiel Elbe	23
3.2 Küste	23
3.3 Flüsse	26
4. Hypothesen zur weiteren Arbeit	32
4.1 Überblick	32
4.2 Erarbeitung weiterer Indizien	33
4.3 Auf der Suche nach den Ursachen	34
5. Liste der verwendeten Pegel-Abkürzungen	36
6. Schriftenverzeichnis	36

1. Veranlassung

In der Bundesrepublik Deutschland leben rd. 10 Mio Menschen so nahe an der Nordseeküste, daß ihr Leben dadurch in irgendeiner Weise beeinflusst wird – sei es durch die Häfen mit Hamburg und Bremen/Bremerhaven an der Spitze, sei es durch den Tourismus auf den Ost- und Nordfriesischen Inseln und an den Küsten, durch die Fischerei, die Schifffahrt, den Sport oder einfach das Klima. Bei 450 km langer Nordseeküste „gehören“ damit jedem dieser Menschen 4,5 cm Küste. Bedenkt man, daß dieser Wert z. B. in Australien etwa bei 150 cm liegt, so wird hierdurch bereits deutlich, welch konzentrierte Aufmerksamkeit bei uns dieser Küste und dem, was vor ihr (und damit eben auch mit ihr) vorgeht, geschenkt werden sollte.

Aber das wird nur bedingt so gehalten, obwohl die Küste immer dichter besiedelt wird und damit z. B. die Frage nach der Deichsicherheit immer wieder neu gestellt werden müßte, zumal wenn weiterführende Beobachtungen und Erkenntnisse vorliegen. Es wird immer schwieriger und kostspieliger, die Zufahrten etwa zu den großen Häfen für tiefergehende Schiffe herzurichten, so daß in diesem Zusammenhang Probleme durch eine ungünstige Tideentwicklung auftreten können. Zudem sind in den letzten Jahren die Inseln und die Küste weiter für den Tourismus erschlossen worden, auch im Hinblick auf Angebote in der verlängerten Vor- und Nachsaison. Das führt zwangsläufig dazu, daß Kureinrichtungen außerhalb der Deichlinie auch noch in Jahreszeiten vorgehalten werden, die schon durch Sturmfluten beeinträchtigt sind. Für den Betrieb von Sturmflutpoldern und -sperrwerken ist es selbstverständlich, aber eben auch für einen reibungslosen und sicheren Kurbetrieb erforderlich, hohe wie auch mittlere (und damit häufiger auftretende) Sturmfluten rechtzeitig vorherzusagen und längerfristige Entwicklungen zu beobachten, um daraus Schlüsse für die Zukunft ziehen zu können.

In den letzten Jahren haben sich Ereignisse und Entwicklungen gezeigt, die in Fachkreisen und vor allem in der Öffentlichkeit Verunsicherung hervorgerufen und zu teilweise interessanten, teils aber auch utopischen Vorstellungen und Vorschlägen geführt haben. Dafür auslösend waren u. a.:

- die Folge hoher Sturmfluten im Nov./Dez. 1973,
- die Sturmfluten vom 03. 01. und 20./21. 01. 1976,
- die Absenkung der T_{nw} in den oberen Tideflüssen.

In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, diese und andere Entwicklungen in einem örtlich und zeitlich größeren Rahmen zu fassen und Gedanken zu möglichen Lösungswegen darzulegen.

2. Entwicklung der Tideverhältnisse

2.1 Vorbemerkungen

Es gibt verschiedene Parameter, die die mittleren Tideverhältnisse charakterisieren. Am häufigsten verwendet – weil am leichtesten auswertbar – werden die mittleren Scheitelhöhen MThw und MT_{nw} als Mittel über bestimmte, willkürlich wählbare Zeiträume. Die Analyse solcher Werte hat in unserer Küstenforschung eine große Tradition. Für viele Fragen ist sie sehr aussagekräftig, für einige Vorgänge jedoch nicht ausreichend. Es bedarf daher weiterer Detailuntersuchungen, etwa folgender Parameter (Abb. 1):

- Form der Tidekurven: Dazu können z. B. entsprechend dem Vorschlag von LÜDERS (1950) 20 geeignete Tiden aus einem möglichst kurzen Zeitraum gemittelt und zu einer mittleren

Tidekurve zusammengefaßt werden. Solche Kurven liegen für einige Orte vor, aber nach verschiedenen Verfahren, unter unterschiedlichen Gesichtspunkten und für nicht immer vergleichbare Zeiträume ausgewertet. Sie gestatten jedoch Einblicke in die Entwicklung von Flut- und Ebbedauer sowie Steilheit und charakteristische Form (und ihre Veränderungen) der Flut- und Ebbeäste.

- Flut- und Ebbestromkenterpunkte: Sie sind strenggenommen keine Zeitpunkte, sondern -räume, nur grob bekannt und teilweise schwer zu bestimmen und festzulegen, besonders an Küstenorten oder in Flußmündungen. Veränderungen der Flutstrom- und Ebbestromdauer geben jedoch wertvolle Hinweise auf Änderungen der Strömungsverhältnisse.
- Strömungsverlauf: Kontinuierliche Strömungsmessungen, aus denen mögliche Veränderungen in den letzten Jahrzehnten abgeleitet werden könnten, sind so spärlich, daß auf sie nur für wenige Gebiete zurückgegriffen werden kann. Hier bleibt heute vor allem die Aufgabe, durch den Beginn kontinuierlicher Messungen für spätere Analysen Material zu schaffen.

Zur Analyse möglicher Anomalien steht also nur eine begrenzte Anzahl von Messungen und Parametern zur Verfügung. So lassen sich Anomalien zwar deutlich an der Entwicklung der Scheitelwasserstände demonstrieren, zu ihrer Erklärung ist man bis heute aber weitgehend auf Indizien angewiesen.

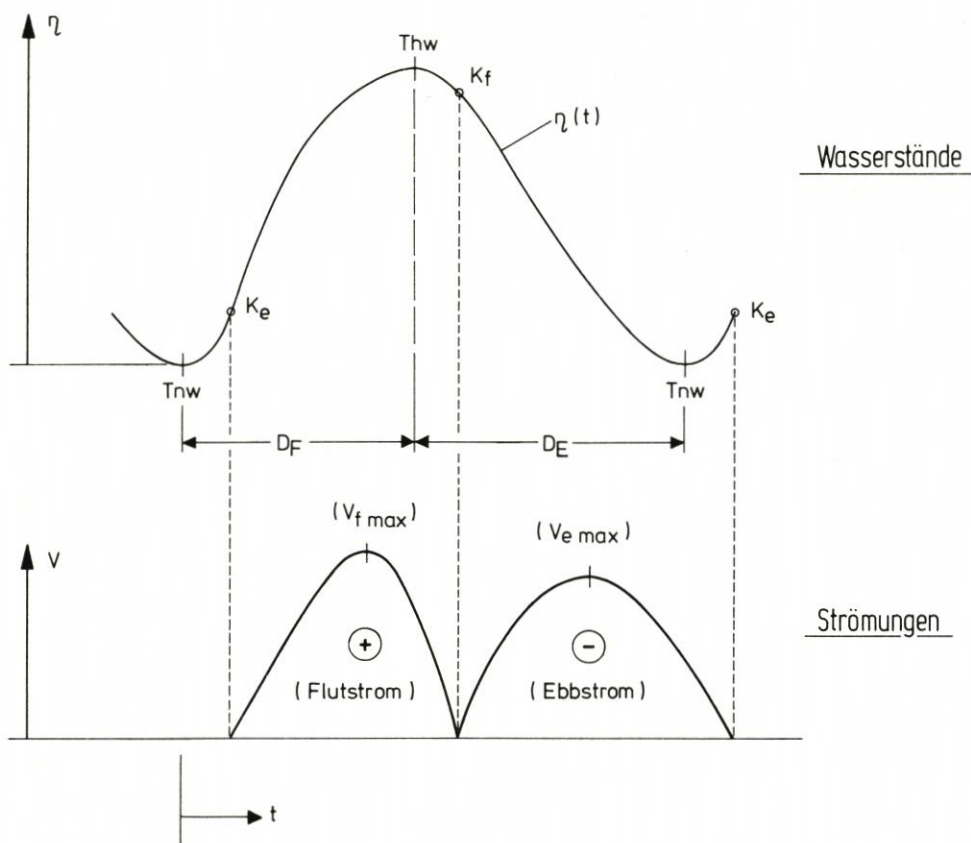


Abb. 1. Tideverhältnisse mit Angabe der meßbaren Parameter (schematisch)

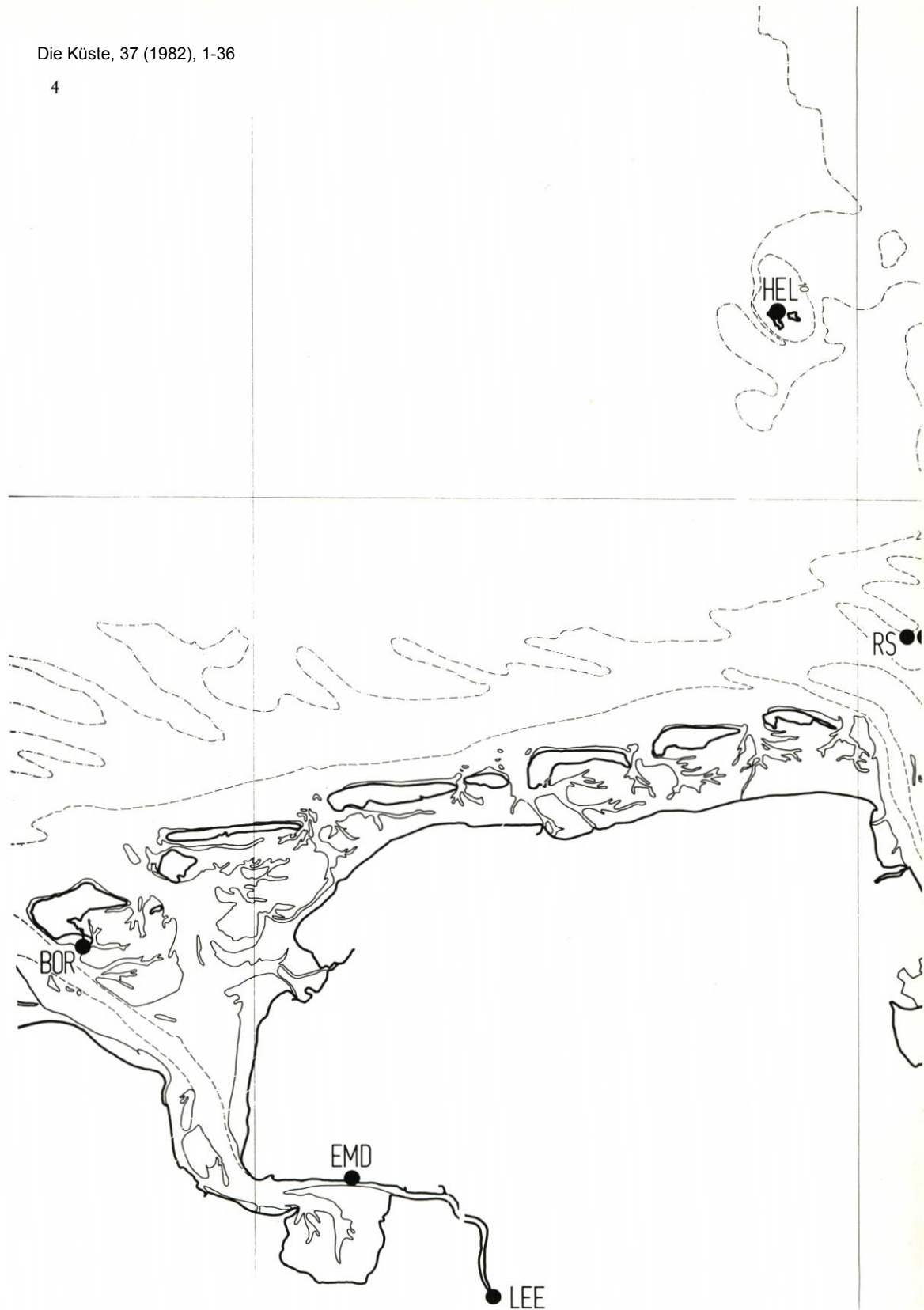
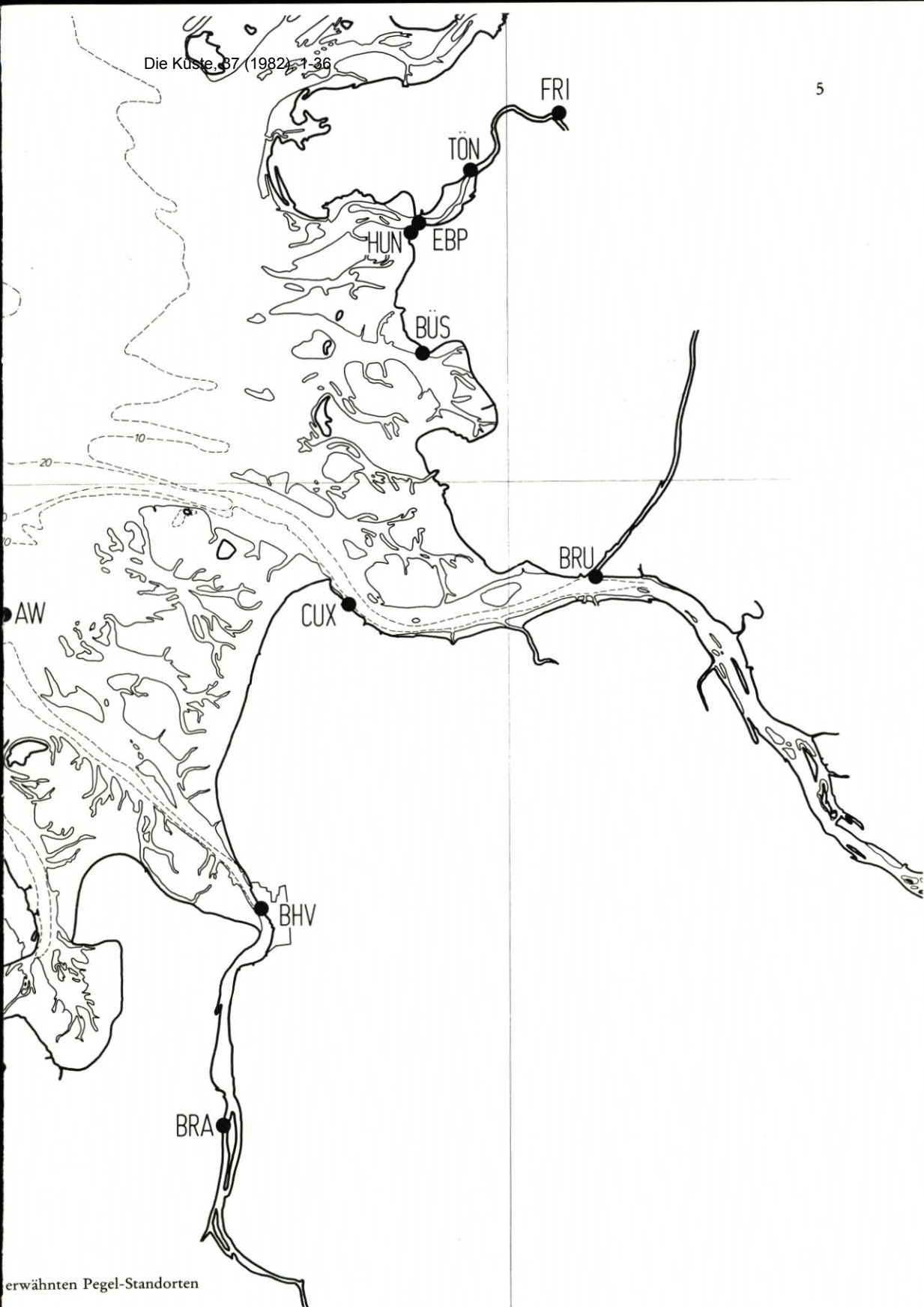


Abb. 2. Deutsche Bucht mit



2.2 MThw, MTnw an der Küste

Mittelwerte über verschieden lange Zeiträume, bis hin zu 19jährigen, liegen von vielen Küstenpegeln veröffentlicht vor. Der dabei verfolgte Sinn besteht häufig in einer möglichst exakten Definition des „säkularen Meeresspiegelanstiegs“. Dieser wird üblicherweise aus der Entwicklung der MThw abgeleitet; die MTnw werden meist als örtlichen Einflüssen unterliegend angesehen und bei solcher Analyse zumindest dann nicht berücksichtigt, wenn sie sich anders als die MThw entwickeln. In diesem Zusammenhang taucht also der Bedarf nach der Auswahl repräsentativer Küstenpegel auf. Dafür kommen auf Abb. 2 z.B. die Standorte Borkum-Südstrand, Wilhelmshaven, Alte Weser, Cuxhaven und Büsum in Frage.

Die Entwicklung der MThw und MTnw verlief in den letzten Jahrzehnten an der Küste nicht überall gleich, aber sehr ähnlich. Das haben u. a. LIESE und LUCK (1978) festgestellt und bedarf hier keiner weiteren Erläuterung. Auf eine interessante Tendenz sei jedoch verwiesen, nämlich den Gang der MTnw-Differenzen zwischen Roter Sand/Alte Weser und Cuxhaven (Abb. 3), dargestellt an 3jährigen übergreifenden Mitteln dieses Jahrhunderts*): Bei Schwankungen mit einer Amplitude um 5 cm ist eine Tendenz dergestalt erkennbar, daß die $Tnw_{RS/AW}$ gegenüber den Tnw_{CUX} leicht fallen, und zwar um rd. 15 cm/100 Jahre. Die auf Abb. 3 ebenfalls dargestellten Differenzen $Tnw_{BOR} - Tnw_{CUX}$ zeigen im Gegensatz dazu einen leichten Anstieg in Borkum.

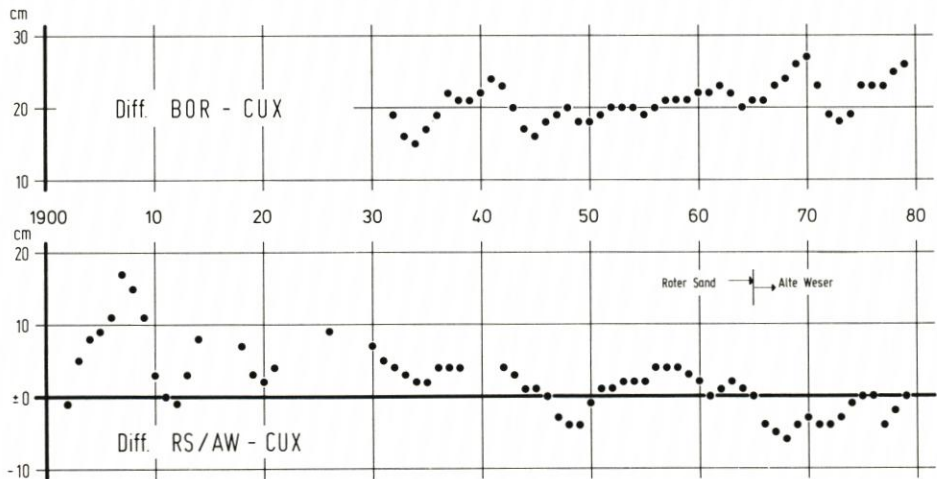


Abb. 3. MTnw-Differenzen 1900 bis 1980 (3jährig, übergreifend)

Die Entwicklung an diesen drei Pegeln (CUX etwa konstant seit 1940, RS/AW leicht fallend, BOR leicht steigend) steht nicht gut im Einklang mit dem Ergebnis von BOWEN (1972), der für die Themsemündung eine Vergrößerung des Tidehubs um rd. 5 cm/Jh. aufgrund des säkularen Meeresspiegelanstiegs vermutet. Solche Vergrößerungen zeigen sich gewöhnlich als Tnw-Absenkungen.

*) Die Wasserstände der Pegel Roter Sand und Alte Weser wurden sämtlich umgerechnet mit den gültigen PN, nämlich 482 cm NN - 5 m (RS) und 494 bzw. 496 cm NN - 5 m (AW)

Eine bisher in diesem Zusammenhang selten verwendete, jedoch instruktive Art der Auftragung zu vergleichender Daten stellt die Doppelsummenkurve dar. In ihr sind die laufenden Summen

$$\sum_t (MTnw_x + MTnw_y)$$

zweier Pegel x und y enthalten. Statistisch erwartete Abweichungen dieser Ergebnisse stochastischer Prozesse führen bei den nur sehr kleinen Differenzen großer Zahlen zu nahezu exakten linearen Summenkurven, wie Abb. 4 für die Summen (BOR+RS/AW), (BOR+CUX) und (BOR+BÜS) zeigt. Wenn Abweichungen von diesen Linien langfristige oder -periodische Veränderungen zugrunde liegen, so wird dies optisch sehr leicht und exakt erkennbar, wie einige folgende Beispiele noch zeigen werden.

Geht man davon aus, daß nur solche Pegel zusammen betrachtet werden, an denen

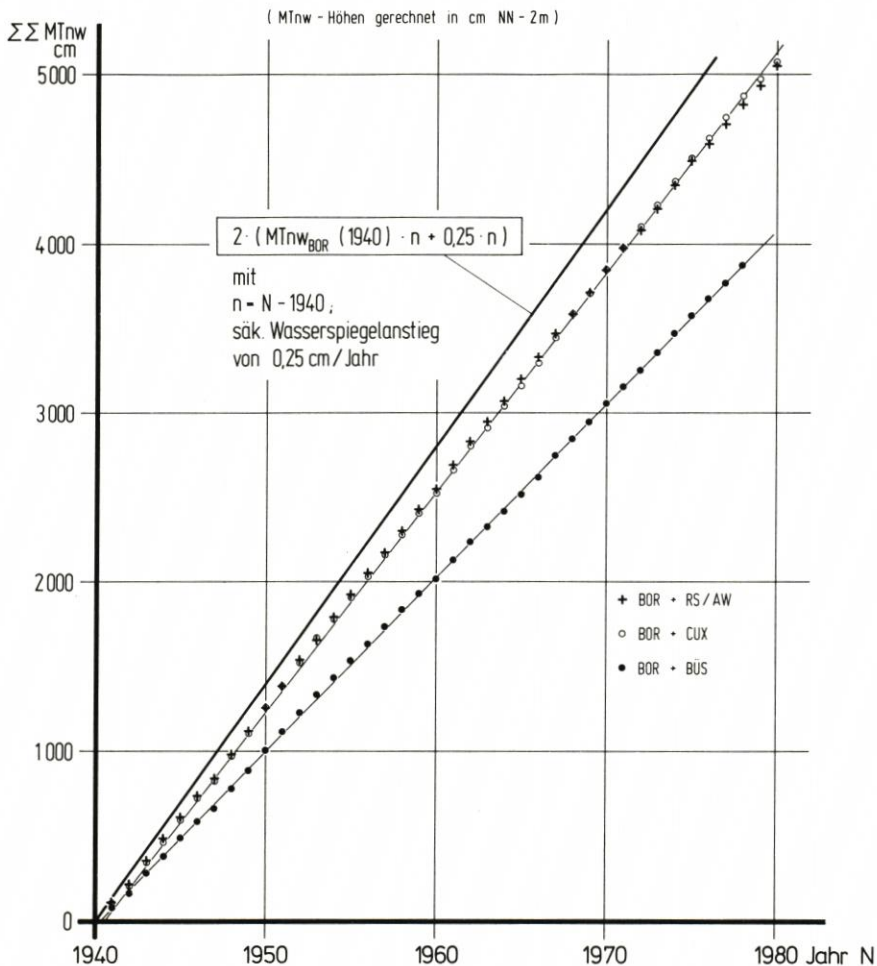


Abb. 4. MTnw-Doppelsummenkurven 1940 bis 1980 für Küstenpegel: BOR + RS/AW, BOR + CUX, BOR + BÜS

gleichsinnige Wechsel zu erwarten sind, so können Knicke in den Summenlinien immer noch auf Veränderungen an einem oder an beiden Pegeln zurückgehen. Die Stärke der individuellen Änderung kann durch Vergleiche mit dritten Pegeln festgestellt werden.

Abb. 4 enthält Doppelsummenkurven von insgesamt vier Küstenpegeln. Alle Beziehungen sind linear, diejenigen für (BOR + RS/AW) und (BOR + CUX) sogar praktisch identisch. Daraus ist nur zu schließen, daß sich die MTnw an diesen Pegeln von 1941 bis 1980 gleichmäßig verändert haben. Denn eine Linearität läßt nicht den Schluß zu, daß die Tideverhältnisse dieselben geblieben sind.

Alle drei Doppelsummenkurven liegen unter der Borkum-Kurve, deren Summenlinie als

$$2 \cdot n \cdot (MTnw_{BOR,1940} + 0,25)$$

mit n = Jahrgang minus 1940

0,25 cm = jährl. säkul. Wasserspiegelanstieg

berechnet worden ist. Die Ursache dafür sind die an den übrigen Pegeln niedriger als in Borkum abfallenden MTnw.

2.3 MThw, MTnw in den Flüssen

Das Tidegeschehen in einem Fluß kann betrachtet werden als Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener Rand- und Eigenwerte eines Systems. Randwerte treten sowohl von unter- wie von oberhalb des Tidebereiches auf. Die wichtigsten Einflußfaktoren auf den Tideablauf sind u. a. von SIEFERT (1978) zusammengestellt und erläutert.

Wenn symptomatische Veränderungen der Tideverhältnisse im Flusse auftreten, so ist zunächst zu prüfen, ob sich die Randwerte merklich geändert haben. Um dies zu untersuchen, sind auf Abb. 4 bis 7 die MThw und MTnw am unteren Rand, also an den Mündungspegeln¹⁾ Borkum (Ems), Roter Sand/Alte Weser (Weser) und Cuxhaven (Elbe) sowie teilweise Büsum, Helgoland²⁾ und Bremerhaven aufgetragen. Für die Eider gibt es nur den Pegel Hundeknöll, dessen Daten leider nicht gleichwertig sind.

Bei den dargestellten dreijährigen übergreifenden MThw auf Abb. 5 sind gewisse, an allen Pegeln etwa gleich große Schwankungen festzustellen, die – da sie auch am Pegel HEL auftreten – als Variationen der MThw aufgrund von Einflüssen aus der Nordsee zu deuten sind. Fast identische MThw-Veränderungen in Bremerhaven weisen ferner darauf hin, daß diese als untere Randwerte in die Flüsse eindringen und nicht etwa Ausdruck von Schwankungen im Oberwasserabfluß sind, zumal sie dann in Bremerhaven z. B. deutlichere Variationen der MThw als in RS/AW erzeugt hätten. Außerdem zeigt ein Vergleich der MThw-Schwankungen an der Seegrenze mit den Q_0 -Schwankungen auf späteren Abbildungen, daß beide keineswegs phasengleich oder -verschoben verlaufen.

Verwendet man dagegen 10jährige Mittel wie auf Abb. 6 oder gar die zur Glättung aller astronomisch bedingten Ungleichheiten (einschl. des Saros-Zyklus von 18 Jahren, 11 Tagen) herangezogenen 19jährigen Mittel, so verbleiben für die unteren Randwertpegel nur mehr die bekannten säkularen Veränderungen, über die anderen Ortes vielfach berichtet worden ist.

Die MTnw-Entwicklung an den oben zitierten Pegeln sieht etwas anders aus (Abb. 7): In

¹⁾ Die aufgeführten Pegel sind als Mündungspegel *gewählt* worden; ob sie tatsächlich nur die unteren Randwerte und keine flußspezifischen Eigenschaften enthalten, müßte Gegenstand einer detaillierten Untersuchung werden.

²⁾ Höhenbezogen auf „Helgoländer Null“; durchgehende Registrierungen ab 1953.

cm NN-5m

9

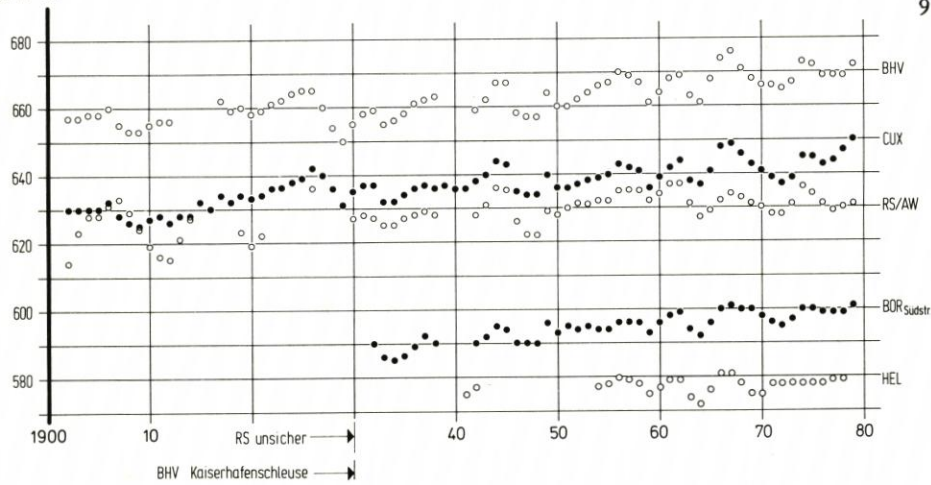


Abb. 5. MThw 1900 bis 1980 für ausgewählte Pegel (3jährig, übergreifend)

cm NN-5m

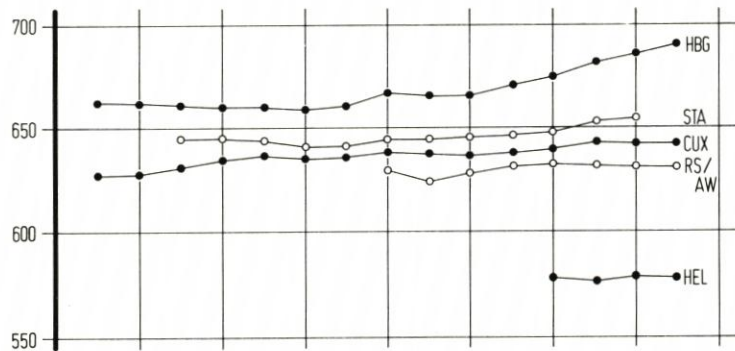
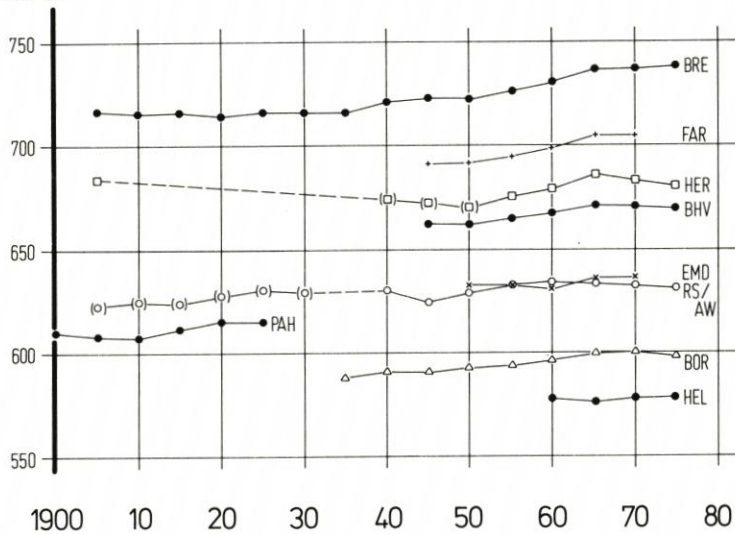


Abb. 6. MThw 1900 bis 1980 für Ems, Weser, Eider (oben), Elbe (unten) und Helgoland (10jährig, übergreifend)

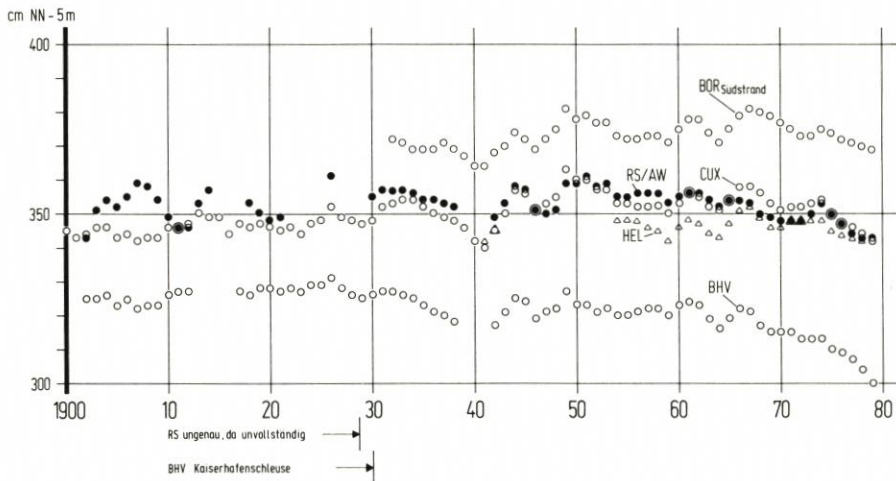


Abb. 7. MTnw 1900 bis 1980 für ausgewählte Pegel (3jährig, übergreifend)

den letzten 30 bis 40 Jahren sind die MTnw in BOR und HEL – mit den bereits diskutierten Schwankungen bei 3jährigen Mitteln – etwa horizontal verlaufen, in RS/AW und CUX dagegen schwach abgefallen. Dazu etwa parallel verlief zunächst die Ganglinie für BHV, bis sie vor rd. 10 Jahren stärker nach unten abbog. Da diese Tendenz an den „Mündungspegeln“ nicht bzw. kaum auftritt, muß davon ausgegangen werden, daß sie in BHV bereits flußspezifischer Art ist.

Wenn deutliche Trendänderungen in der zeitlichen Entwicklung der Tidescheitelwasserstände in den Flüssen festzustellen sind, dann können sie ihre Ursache im Fluß selber durch Veränderung der Eigenwerte haben. Es ist aber auch denkbar, daß sich die unteren Randwerte geändert haben, etwa in der Weise, daß dort ggf. die Strömungsverhältnisse oder die *Tidekurve*, nicht aber die kommentierten mittleren *Scheitelwerte* betroffen sind.

Bei der Analyse von Daten in Tideflüssen muß natürlich auch der obere Randwert berücksichtigt werden: Je weiter stromauf der Beobachtungsort liegt, desto stärker wird die dortige Tide durch den Oberwasserabfluß und natürlich durch den Zustand des Flußbettes beeinträchtigt. Dabei wiederum unterliegen die Thw dem Q_0 -Einfluß in deutlich geringerem Maße als die Tnw:

Pegel	Zeitreihe	Abstand von der oberen Tidegrenze km	MThw-Schwankungen ¹⁾ cm	MTnw-Schwankungen ¹⁾ cm
HER/Ems	1944/76	0,5 bis 1,5 ²⁾	30	70
BRE/Weser	1946/78	4,0	20	50
ELB/Elbe	1961/76	4,1	70	130

¹⁾ Auf der Basis von 3jährigen Mitteln²⁾ Bedingt durch Verlegung des Wehres

Gelingt es heute auch kaum, die Randwerteinflüsse mathematisch oder visuell festzustellen, und betrachtet man einmal einen Flußabschnitt, der von den Schwankungen vermeintlich

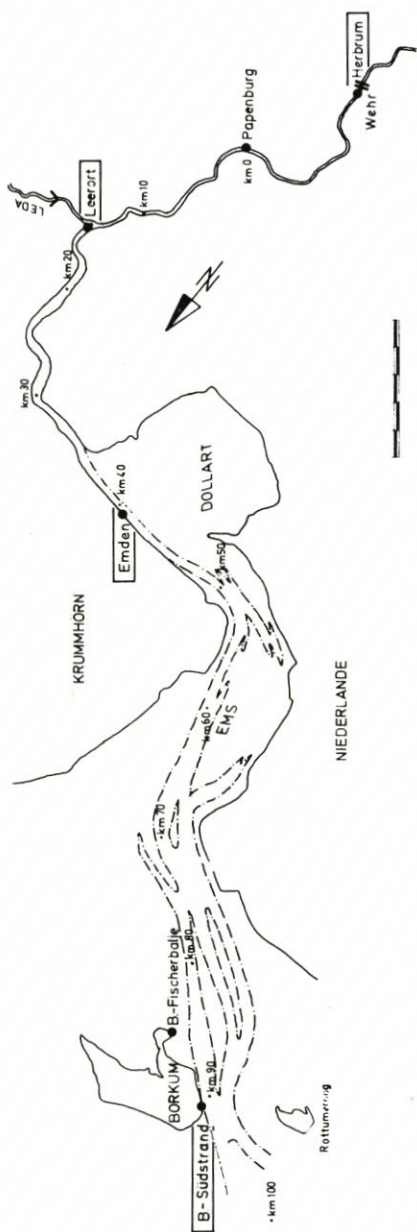


Abb. 8. Lageplan der Ems

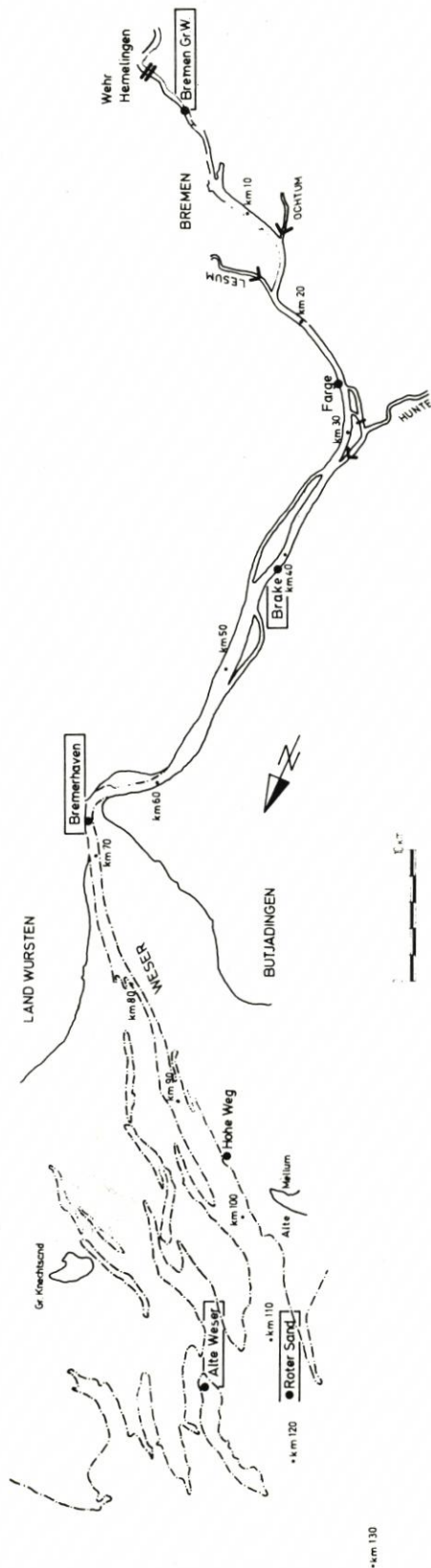
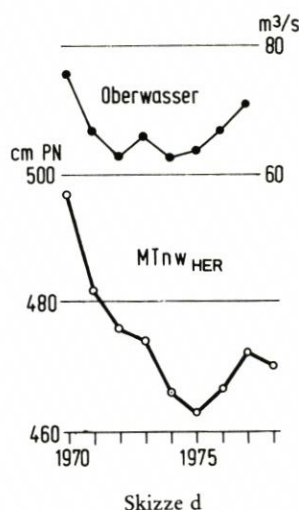
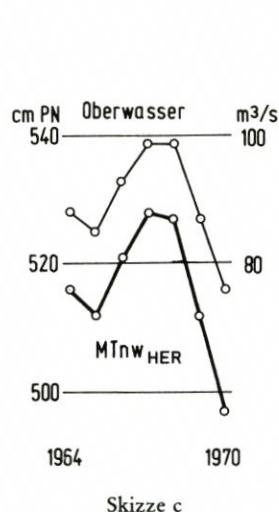
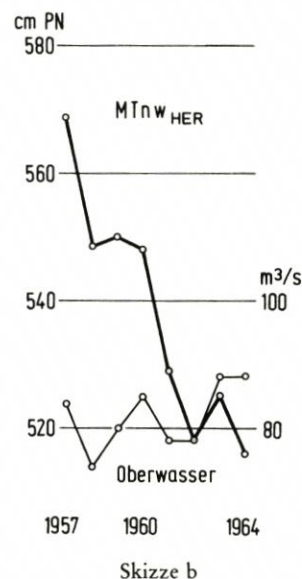
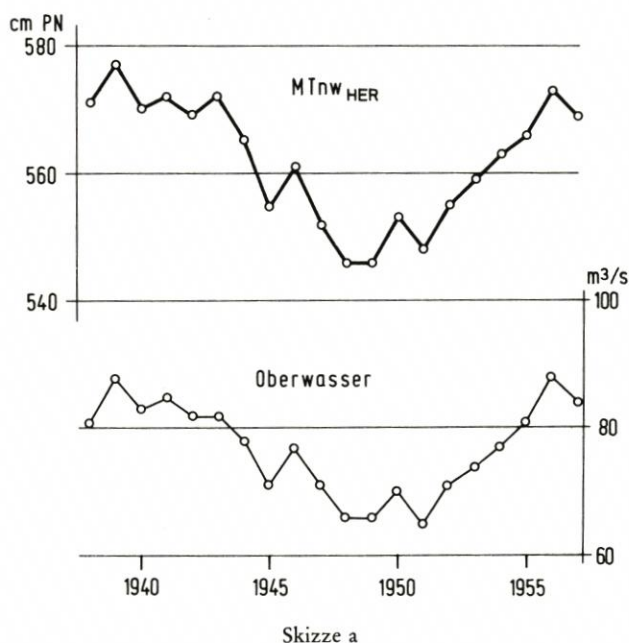


Abb. 9. Lageplan der Weser

relativ gering beeinflusst wird, so verbleiben einige interessante Beispiele für Veränderungen, die einer Klärung bedürfen:

Die Entwicklungen in der oberen Tideeems demonstriert die MTnw-Ganglinie am Pegel Herbrum (Abb. 8), wie sie im folgenden kurz in einigen Skizzen anhand von 5jährigen übergreifenden Mitteln vorgestellt wird:



Skizze a zeigt, daß sich die MTnw am Pegel Herbrum von 1938 bis 1957 in vollkommener Weise jeweils linear mit den Oberwasserabflüssen bei Versen verändern. In diese Zeit fallen der Ausbau des Fahrwassers von See bis Emden auf 7 m KN, die Abnahme der Tiefen während des

Krieges und deren Wiederherstellung bis 1950, ferner Flußregulierungen zwischen Herbrum und Papenburg (ab 1950) und der Ausbau der Unteren Ems (ebenfalls ab 1950).

Der Abschnitt der Jahre 1957 bis 1964 in **Skizze b** zeigt, daß ab 1958 das MT_{nwHER} um (vom Q_0 -Einfluß bereinigte) rd. 55 cm absinkt. Als Ursachen kämen mindestens in Frage: Regulierungen von Herbrum bis Papenburg (bis 1963), Ausbau der Unteren Ems einschl. neuem Wehr Herbrum (bis 1960) oder Vertiefung unterhalb von Emden (seit 1958). Man ist bisher jedoch nicht in der Lage, Ursachen und Wirkungen einander zuzuordnen.

Die MT_{nw} in Borkum und Emden bleiben in dieser Zeit konstant. Die Vertiefungsarbeiten unterhalb von Emden waren 1964 noch nicht abgeschlossen.

Während der fortschreitenden Arbeiten stellt sich ab 1964 bis 1970 ein „Gleichgewichtszustand“ ein, in dem das MT_{nwHER} sich wieder gleichmäßig mit Q_0 ändert (**Skizze c**). Eine ähnliche Entwicklung hatte auch schon in der Weser (etwa ab 1932 in Bremen) stattgefunden (Abb. 9 und 10).

Dieser „Gleichgewichtszustand“ in der Ems ändert sich nach 1970 (**Skizze d**): Das MT_{nwHER} sinkt innerhalb von nur 4 Jahren um weitere (bereinigte) 25 cm ab! Ein direkter Bezug zu Baumaßnahmen scheint zu fehlen.

Es gelingt nicht, die Veränderung der Scheitelwasserstände im oberen Tidebereich mit einer Veränderung der Eigenwerte des Flusses zu erklären. Möglich sind also selbst hier noch Einflüsse vom unteren Rand, wenn man Auswertefehler ausschließt. Das Erstaunliche ist nämlich, daß die seit 1970 in der Ems zu beobachtende Entwicklung in ähnlicher Form auch in Weser und Elbe eintritt: Abb. 11 zeigt dies als zeitgleiche Knicke in den 5jährigen Mitteln ab 1966/70. Bei den 3jährigen Mitteln auf Abb. 12 kommen die Veränderungen differenzierter zum Ausdruck:

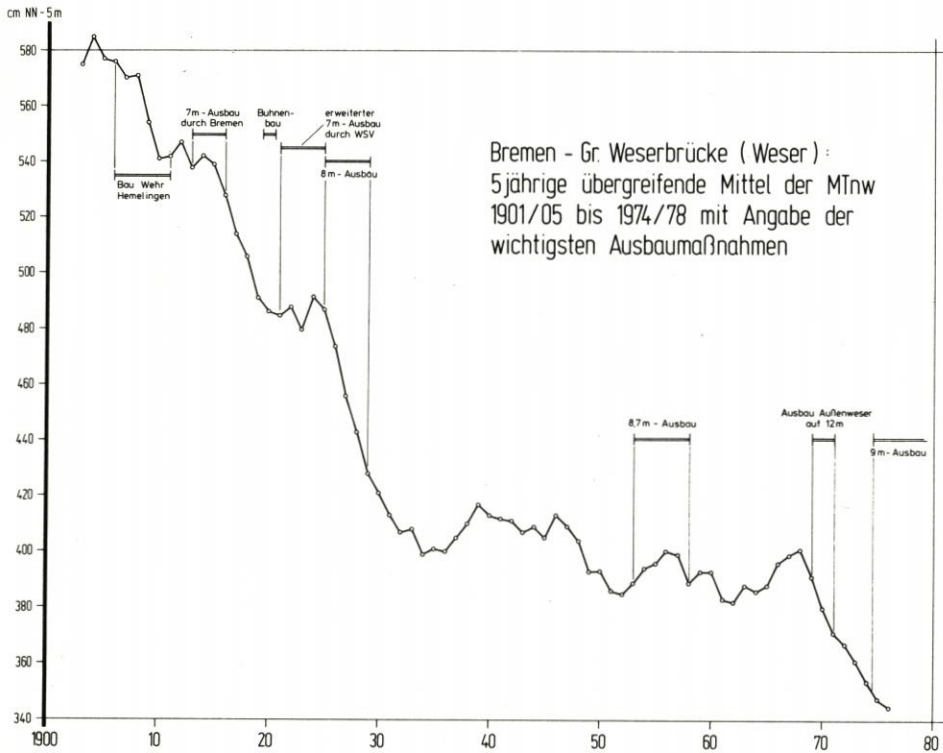


Abb. 10. MT_{nw} 1900 bis 1980 für Bremen (5jährig, übergreifend) mit Angabe der wichtigsten Weser-Ausbaumaßnahmen

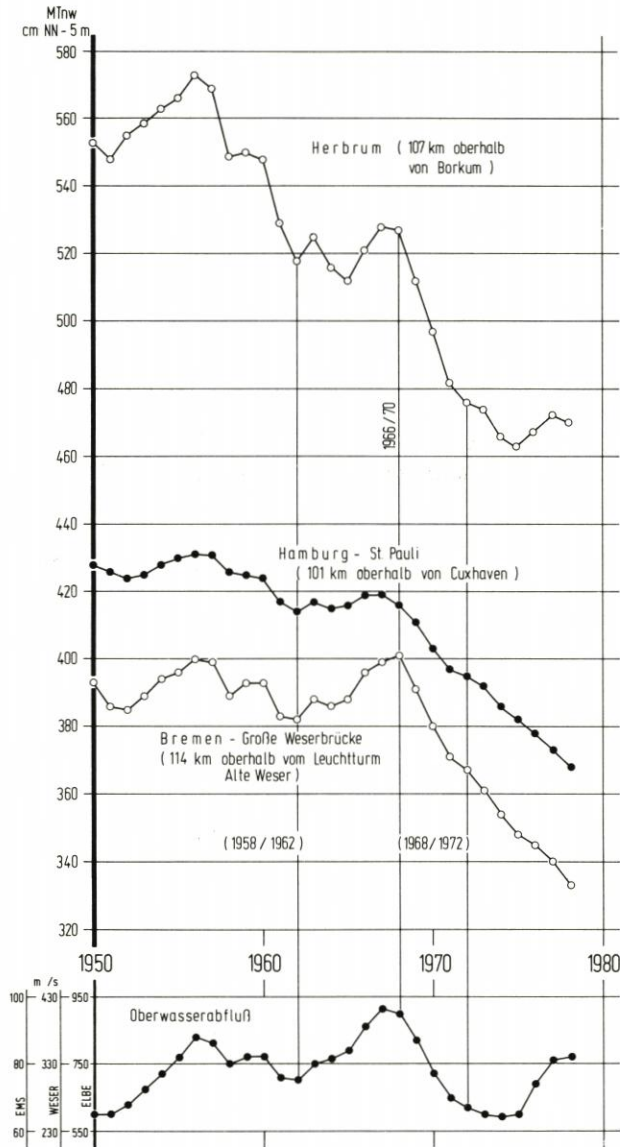


Abb. 11. MTnw und Q_o -Abfluß 1950 bis 1980 für HER, HBG und BRE (5jährig, übergreifend): Markant ist der Knick nach 1968

Die MTnw ab 1900 an den Pegeln HER, BRE und HBG (Abb. 13) zeigen deutlich drei Tendenzen, und zwar

- eine generelle Abnahme der Höhen,
- eine Zunahme der quasi-periodischen, durch den Oberwasserabfluß hervorgerufenen Schwankungsbreite,
- ein fast gleichzeitiges Absacken der Höhen unter die untere (willkürliche) Variationsgrenze ab 1971.

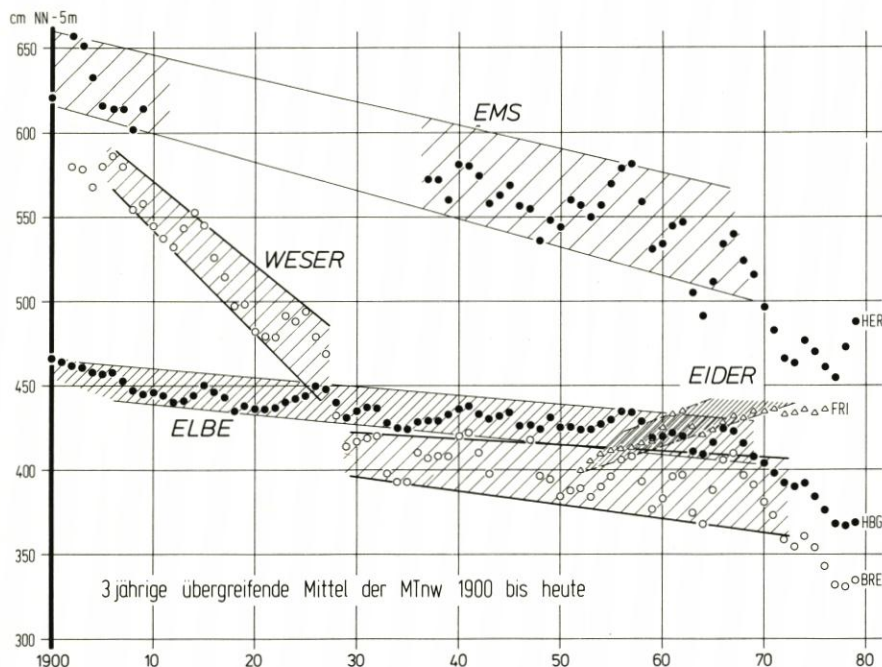


Abb. 12. MTnw 1900 bis 1980 für HER, BRE, HBG und FRI (3jährig, übergreifend): Die Werte fallen etwa ab 1971 unter die untere Variationsgrenze

Das bedeutet also, daß im Oberlauf dieser Flüsse die Tnw nicht nur niedriger geworden sind, sondern auch empfindlicher auf Q_o -Veränderungen reagieren. Das Unterschreiten des Variationsbandes findet gleichzeitig auch in der Eider (Abb. 12 und 14) statt, wo die Tnw am Pegel FRI nicht länger ansteigen, und zwar schon vor Fertigstellung des zweiten Sperrwerkes!

Die Ganglinien dieser vier Pegel zeigen für die MTnw-Mittel folgende Tendenz:

Pegel	Letztes Mittel im Variationsband (Abb. 12)	Tendenz*) der Unterschreitung cm/Jahr
HER/Ems	1969/71	4,0
BRE/Weser	1970/72	5,0
HBG/Elbe	1968/70	3,5
FRI/Eider	1970/72	2,0

*) Für die ersten 5 Dreijahresmittel

Wenn es zutrifft, daß auch diese Anomalien zu einer weiteren Q_o -Empfindlichkeit beitragen, ist noch in den nächsten Jahren mit fortgesetzten Tnw-Absenkungen zu rechnen, da wir in den letzten Jahren sogar relativ hohe Oberwasserabflüsse hatten. Diese Tatsache allein hat wohl zu einem erneuten Anstieg der $MTnw_{HER}$ geführt, der aber nur kurzzeitig sein dürfte.

In diesem Zusammenhang sei die Bemerkung erlaubt, daß hier die Anomalien über drei- und fünfjährige Mittel herausgearbeitet wurden, daß es aber einer Untersuchung wert wäre

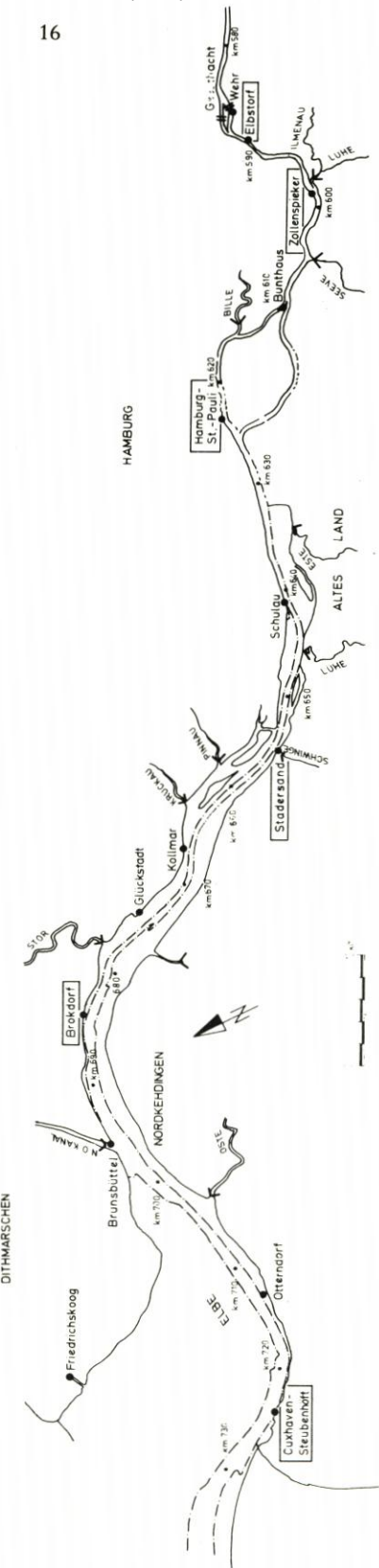


Abb. 13. Lageplan der Elbe

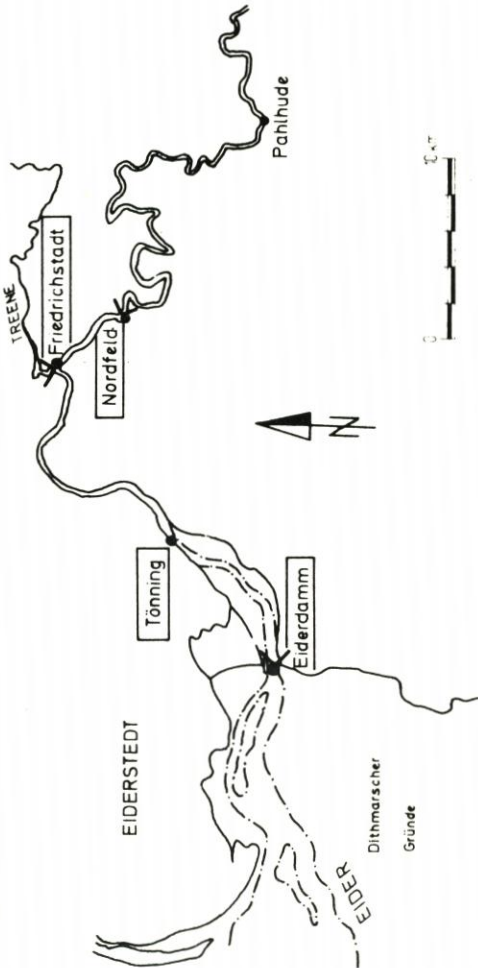


Abb. 14. Lageplan der Eider

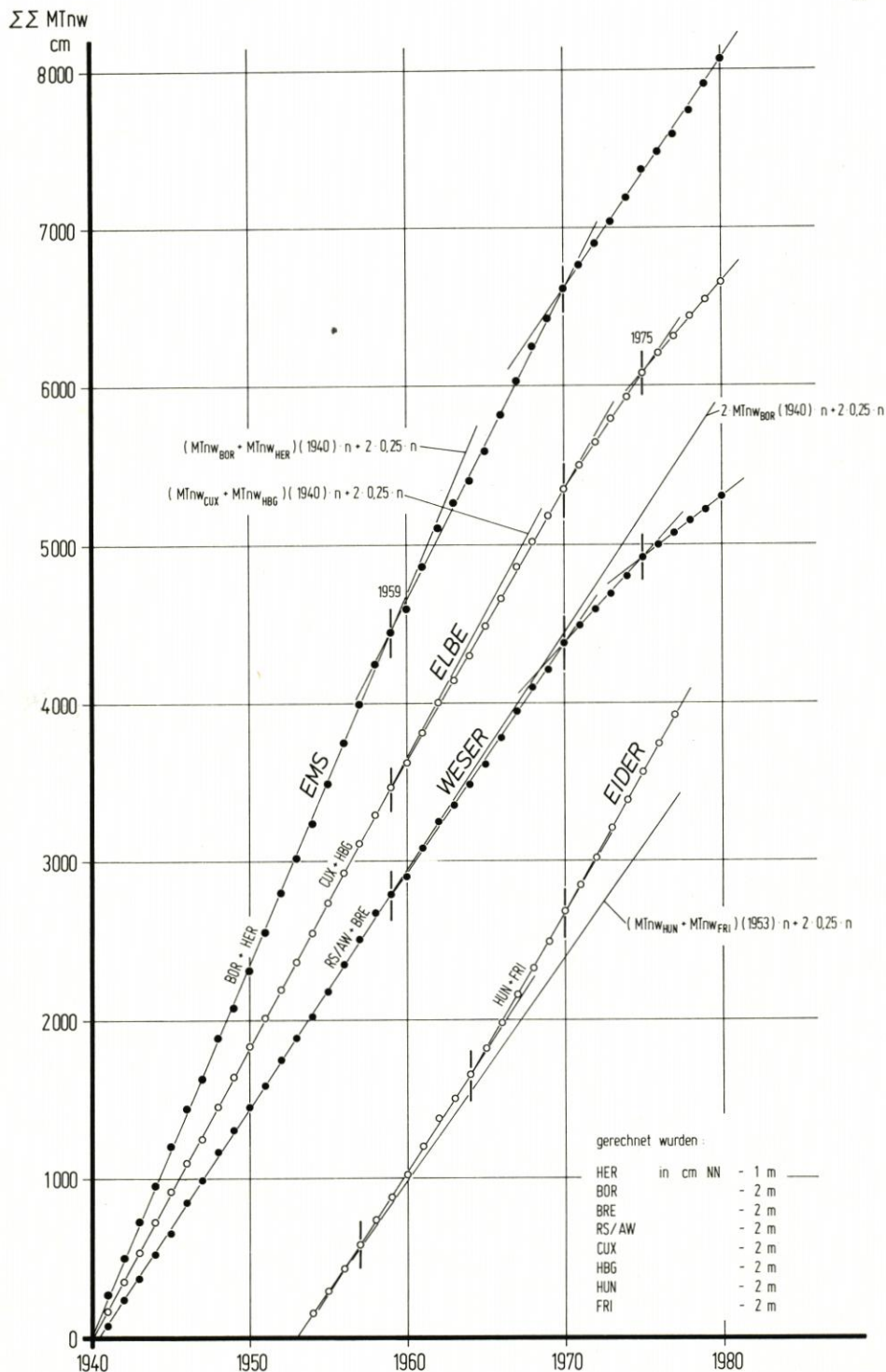


Abb. 15. MTnw-Doppelsummenkurven 1940 bis 1980 für die Ästuarie: gleichzeitige Knicke in 1959, 1970 und 1975

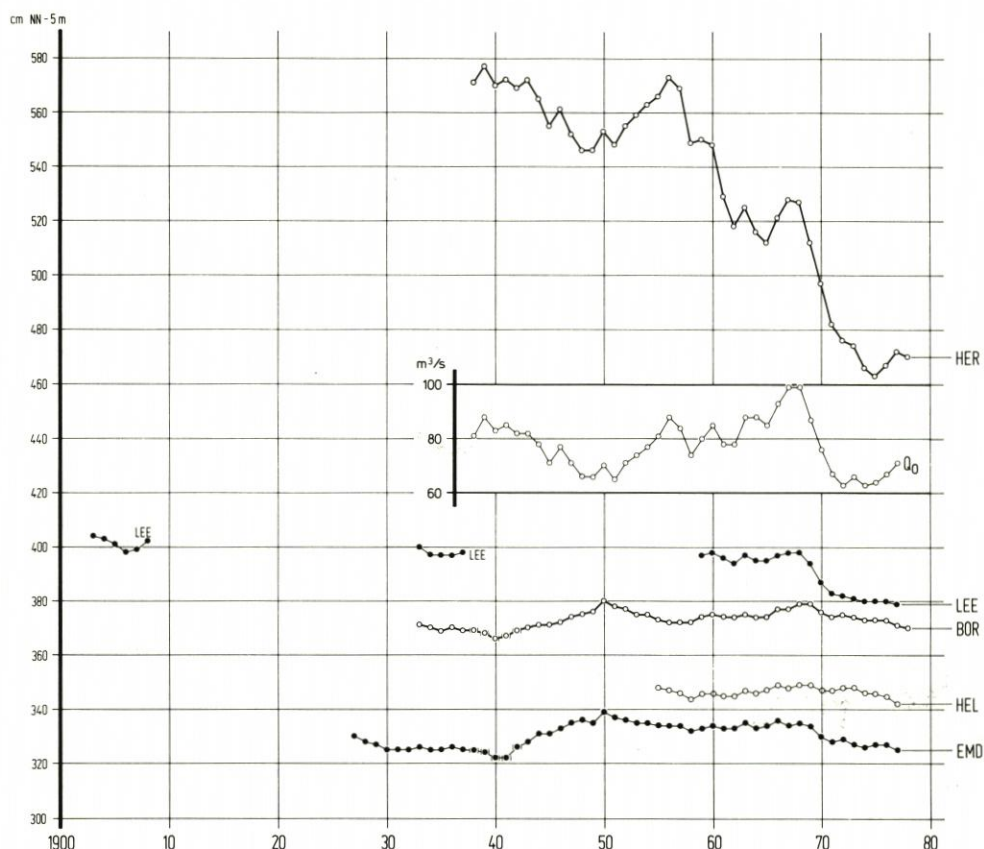


Abb. 16. MTnw 1900 bis 1980 für die Ems (5jährig, übergreifend): Nach 1970 fallen die Werte von Herbrum bis Emden trotz gleichbleibenden Oberwasserabflusses

festzustellen, über welche Zeiträume am sinnvollsten zu mitteln wäre, um die deutlichsten Aussagen zu erhalten.

Eine andere Betrachtungsweise als Abb. 12 erlauben die Doppelsummenkurven auf Abb. 15. Sie bestehen für die vier diskutierten Tideflüsse aus Linienzügen mit charakteristischen Knicken. Da Abb. 4 für die Mündungspegel BOR, RS/AW und CUX keine Knicke zeigt, ist davon auszugehen, daß die Knicke in den Summenkurven (BOR+HER), (RS/AW+BRE), (CUX+HBG) und auch (HUN+FRI) auf Veränderungen an den Flußpegeln HER, BRE, HBG und FRI zurückgehen:

Pegel	Letzter Jahrgang vor Beginn eines charakteristischen Knicks in der Doppelsumme				
HER/Ems	—	1959	—	1970	—
BRE/Weser	—	1959	—	1970	1975
HBG/Elbe	—	1959	—	1970	1975
FRI/Eider	1957	—	1964	1970	—

Interessant sind dabei die Jahrgänge 1959 und 1970, die (teilweise bis auf die Eider) zeitgleiche Knicke in den Tnw-Summen zeigen. Diese einfach auf Ausbaumaßnahmen zurückzuführen, wäre sicherlich oberflächlich. Die Zeitgleichheit kann ebenso auf Einflüsse von außerhalb der Flußmündungen hindeuten. Dasselbe mag für die Knicke ab 1975 in Weser und Elbe gelten.

Über die Veränderungen in der Weser (Abb. 9) schreiben STRÖHMER und WANDER (1979) anhand von Betrachtungen der Differenzhöhen einzelner Pegel zum „Eingangspegel“ Bremerhaven für die Zeit von 1961 bis 1975: „Der Ausbau der Neustädter Häfen 1961/63 führte zu einer Tnw-Hebung unterhalb, während die Schaffung neuer Reedeflächen bei Bremerhaven 1967/68 durch Abbau einer Reflexionsstelle das Einlaufen der Tidewelle erleichterte, was zu

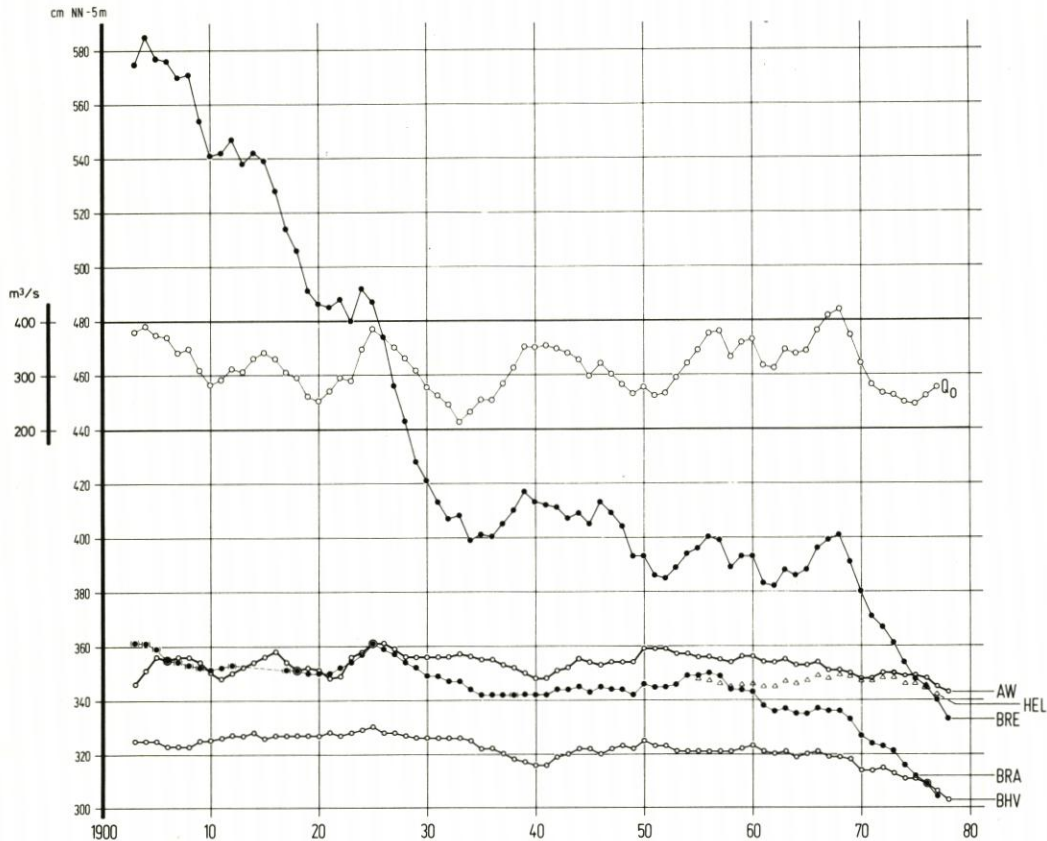


Abb. 17. MTnw 1900 bis 1980 für die Weser (5jährig, übergreifend): Nach 1970 fallen die Werte von Bremen bis Bremerhaven trotz gleichbleibenden Oberwasserabflusses

größerem Tidehub oberhalb führte.“ Ab 1975 stellten die Autoren dann oberhalb von Nordenham deutliche Thw-Erhöhungen und Tnw-Absenkungen fest.

Über die Absenkung des Tnw in der Elbe (Abb. 13) schreibt LAUCHT (1980): „Vorläufig ist festzustellen, daß die Tnw-Jahresmittel in Hamburg seit der ersten Hälfte der 50er Jahre bis jetzt um etwa 5 dm abgesunken sind. Wie groß das Absenkungsmaß im Hamburger Bereich tatsächlich und endgültig sein wird, läßt sich noch nicht sagen.“ Er führt zwei Gründe an: daß

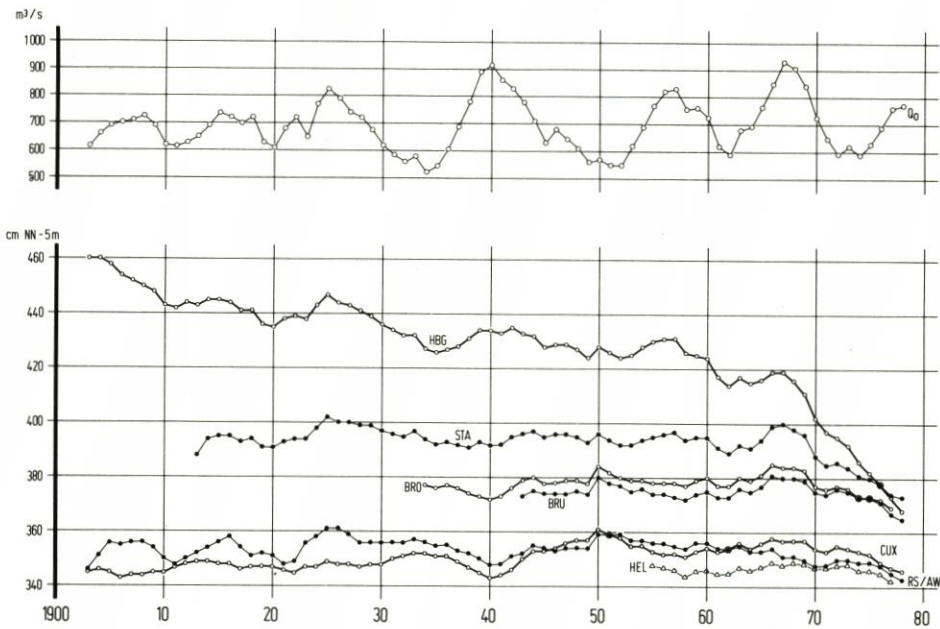


Abb. 18. MTnw 1900 bis 1980 für die Elbe (5jährig, übergreifend): Nach 1970 fallen die Werte von Hamburg bis Brunsbüttel bzw. sogar bis Cuxhaven trotz gleichbleibenden Oberwasserabflusses

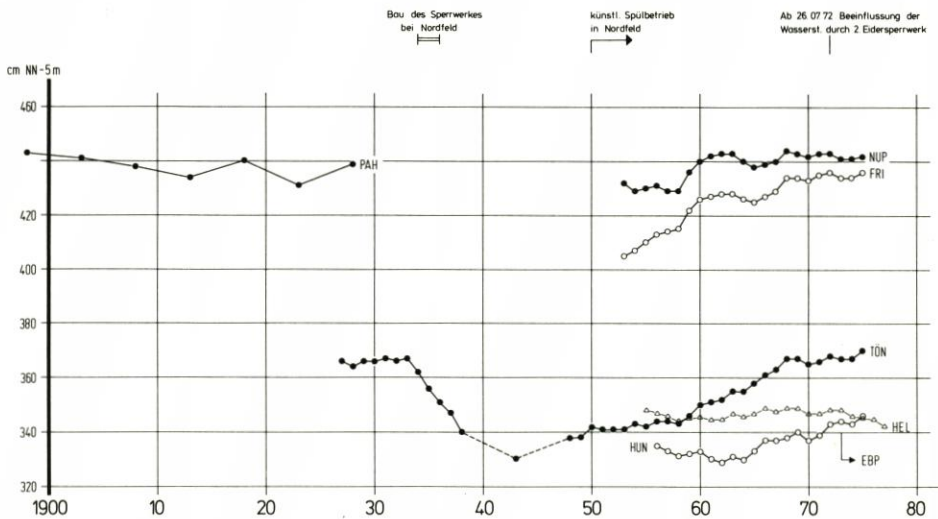


Abb. 19. MTnw 1900 bis 1980 für die Eider (5jährig, übergreifend): Noch vor Beginn der Beeinflussung durch das 2. Sperrwerk steigen die Werte von Nordfeld bis Tönning nicht weiter an

sich die Verhältnisse noch nicht vollkommen auf die 13,5 m-Vertiefung (etwa 1978 abgeschlossen) eingestellt haben und daß man mehr als ein einzelnes Jahresmittel zur Beurteilung benötigt, denn „es handelt sich bei jeder Veränderung der Tidewelle um zahlreiche nicht linear wirkende Faktoren“.

Welchen Veränderungen die MTnw in den drei größten deutschen Tideflüssen unterliegen, zeigen Abb. 16 bis 18. Dabei wird auf Abb. 16 deutlich, daß der für Herbrum nach 1968 (d. h. dem Fünfjahresmittel 1966/70) nachgewiesene Knick nach unterstrom bis Emden erkennbar ist. Ein Knick gleicher Größenordnung ist in der Weser (Abb. 17) zur selben Zeit von Bremen bis Bremerhaven auszumachen, und in der Elbe (Abb. 18) ist die zeitgleiche Entwicklung von Hamburg bis Brunsbüttel – mit einer gewissen Einschränkung sogar bis Cuxhaven – vorhanden. Selbst in der Eider, die bis 1970 ständig steigende MTnw aufwies, taucht dieser Knick in den Ganglinien auf, und zwar gleichsinnig und vor einer möglichen Beeinflussung durch das zweite Sturmflutsperrwerk (Abb. 19).

Bei einer umfassenden Untersuchung müßten die gleichzeitigen Veränderungen der Tnw- und Thw-„Laufzeiten“ in den Tideflüssen ebenfalls analysiert werden. Sie sind schon früher diskutiert worden (SIEFERT, 1978), so daß hier der eingangs gegebene Hinweis wiederholt sein mag, daß die Beurteilung allein von Tnw- und Thw-Höhen nur zum Teil Aufschluß über die Tideverhältnisse gibt. Befriedigende Lösungen wären erst bei Deutungen des Wasserstands- wie des Strömungsverlaufes möglich.

2.4 Spring- und Nippanomalien in der Elbe

Es gibt kaum Untersuchungen über Spring- und Nipptiden in den deutschen Tideflüssen. Einige zitierte Arbeiten und sporadische eigene Auswertungen können allenfalls zeigen, wie notwendig es ist, hier weiter tätig zu werden.

In seiner Arbeit, die dann Grundlage aller Tidevorausberechnungen für die Deutsche Bucht wurde, hat LENTZ (1879) sich auch mit astronomisch bedingten Thw- und Tnw-Variationen in der Elbe beschäftigt und ist dabei u. a. zu folgenden Ergebnissen gekommen: In Cuxhaven dauert die Flut 5.25 h bei Spring- und 5.49 h bei Nippzeit. Die halbmonatliche Ungleichheit betrug dort rd. 0,5 m beim Thw und rd. 0,4 m beim Tnw. LENTZ beschrieb gleichzeitig aber auch das Phänomen, daß – im Gegensatz zur allgemeinen Erwartung – in Hamburg die NpThw höher als die SpThw und die NpTnw niedriger als die SpTnw aufliefen.

SCHULTZE (1935) stellte bei ausführlichen statistischen Untersuchungen für die Zeit 1920/30 fest, daß in der Elbe die SpThw höher als die NpThw, die SpTnw etwa gleichhoch wie die NpTnw aufliefen.

HENSEN (1955) erwähnt zu demselben Thema lediglich die größeren Wasserspiegelgefälle der Spring- gegenüber den Nipptiden, woraus zu schließen ist, daß seinerzeit in der Elbe bereits zu beiden Mondphasen analoge Verhältnisse zu Cuxhaven herrschten.

Die neuere Entwicklung der Spring- und Nipptidewasserstände in der Elbe kann hier bisher nur nach unvollständigen Auswertungen für den Pegel Hamburg-St. Pauli skizziert werden. Dazu wurde folgendermaßen vorgegangen: Von 1941 bis 1979 wurden aus jedem Juni – dem erfahrungsgemäß sehr wenig durch Wind und Oberwasser beeinflussten Monat – zwei Spring- und Nippzeiträume ausgewertet, und zwar entsprechend den Definitionen in den Gezeitentafeln. Es wurden jeweils 6 Thw und 6 Tnw gemittelt, die ab dem astronomischen Spring- bzw. Nippdatum in den nächsten drei Tagen auftraten. Bei dieser vorläufigen Auswertung wurden diese Junimittel zunächst als repräsentativ für das jeweilige Jahr angenommen. Abb. 20 zeigt die Ganglinien der 5jährigen übergreifenden Mittel dieser Juniwerte für Hamburg-St. Pauli, dazu die 5jährigen mittleren Wasserstände (als echte Jahresmittel). Um die bei Auswertung nur von Junidaten möglichen Schwankungen auszugleichen, wurden zuvor in einem weiteren Auswertegang die Spring- und Nippwerte des Juni auf das Jahr beschickt über die Differenzen

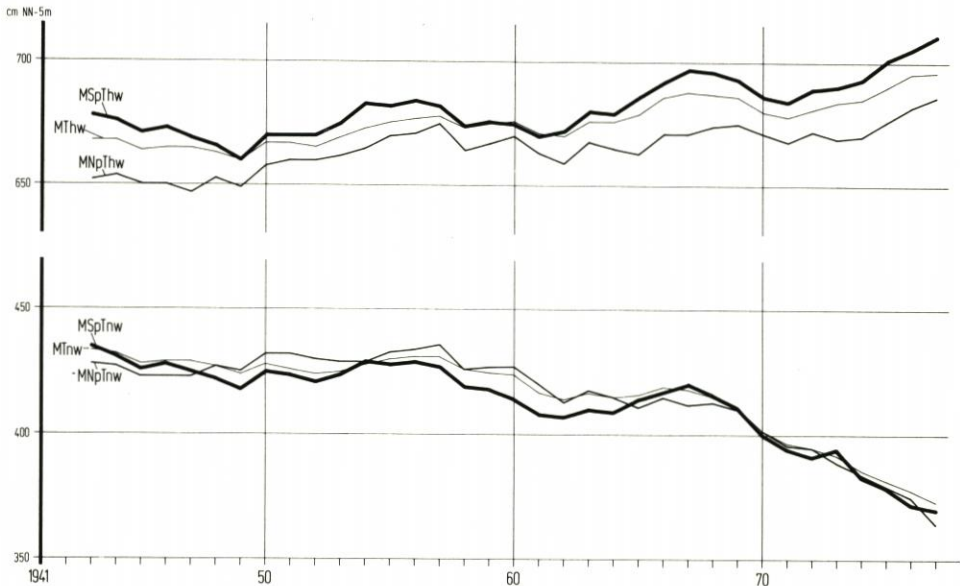


Abb. 20. Spring- und Nipp-Thw und -Tnw 1941 bis 1980 für Hamburg (5jährig, übergreifend; Junimittel beschriftet auf Jahreswerte): Spring- und Nippscheitel haben sich unterschiedlich verändert

$$MThw_{\text{Jahr}} - MThw_{\text{Juni}} = SpThw_{\text{Jahr}} - SpThw_{\text{Juni}}$$

und entsprechend dann auch die Tnw- und die Nippwerte. Auf Abb. 20 ergibt sich das interessante Resultat, daß sich in den letzten vier Jahrzehnten die Spring- und die Nipp tide wasserstände nicht gleich verändert haben:

- MSpThw schwankte bis Mitte der 1960er Jahre um 675 cm PN und stieg danach in 10 Jahren um 20 cm an;
- MNpThw stieg bis Mitte der 1950er Jahre um 20 cm auf 670 cm PN an und blieb seitdem etwa konstant, so daß es heute rd. 25 cm tiefer als das MSpThw liegt;

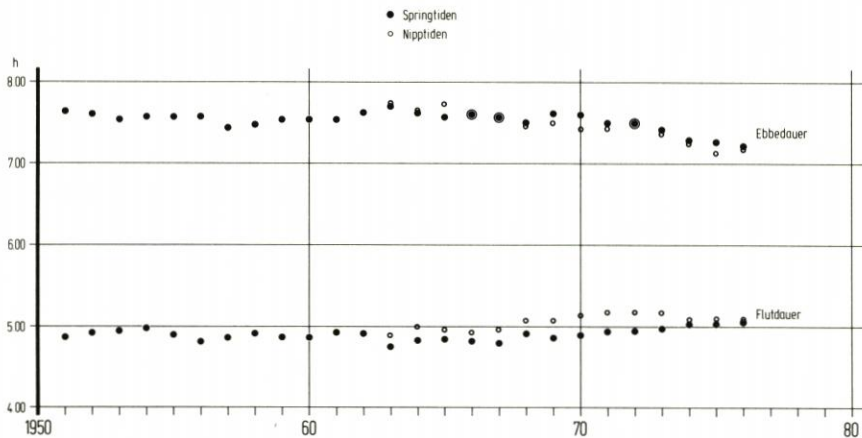


Abb. 21. Flut- und Ebbedauer bei Spring- und Nipptiden 1950 bis 1980 für Hamburg (5jährig, übergreifend): Die Ebbedauer wird nach 1970 kürzer

- MSpTnw scheint in den 1940er Jahren noch etwas über dem MNpTnw gelegen zu haben, blieb dann bis Mitte der 1950er Jahre etwa konstant auf 425 cm PN und fiel seitdem in 2 Wellen zunächst auf 410 und dann auf 370 cm PN ab;
- MNpTnw lag bis Ende der 1950er Jahre etwa bei 430 cm PN und fiel dann zunächst langsam und etwa ab 1970 genauso schnell wie das MSpTnw ab. Seitdem zeigen sich keine Unterschiede mehr zwischen MSpTnw und MNpTnw.

Eine entsprechend, wenn auch nicht ganz so umfangreich, für die Flut- und Ebbedauer in Hamburg durchgeführte Analyse zeigt auf Abb. 21, daß die Flutdauer bei Springtiden in den letzten Jahrzehnten stets etwa 10 Min. kürzer war als diejenige bei Nipptiden. Beider Dauer hat in den letzten Jahren leicht zugenommen, wohl als Folge des vergrößerten Tidehubs. Die Ebbedauer war bei Spring- und Nipptiden stets etwa gleich, hat aber in den letzten Jahren deutlich (um etwa 20 Min.) abgenommen.

Insgesamt verbleibt – trotz der Vorbehalte bei dem Stand der bisherigen Auswertung – der Eindruck, daß sich in der Elbe die Spring- und Nipptideverhältnisse in den letzten Jahrzehnten unterschiedlich entwickelt haben. Eine schlüssige Erklärung kann dafür z. Zt. nicht gegeben werden. Daß diese Auswertung dennoch hier aufgeführt wird, dient dem Zweck, ein weiteres Indiz für mögliche Veränderungen unterhalb der Flußmündungen zu finden, wenn man unterstellt, daß antropogene Einflüsse aus dem Tidefluß selbst auf Tiden in beiden Mondphasen gleiche Auswirkungen hätten.

3. Entwicklung der Sturmflutverhältnisse

3.1 Erkennbare Trends am Beispiel Elbe

Wie einleitend bereits erwähnt, häuften sich in den letzten drei Jahrzehnten bemerkenswerte Sturmflutereignisse an der deutschen Nordseeküste, die meistens zu besonders hohen Wasserständen in der Elbe führten. Da allein diese Tatsache bei Fachleuten wie bei Außenstehenden zu einer Reihe von Überlegungen Anlaß gab und gibt, seien hier – schon als Vorgriff auf die Ergebnisse in Kap. 3.3 – einige wichtige Entwicklungen im Sturmflutgeschehen der Elbe skizziert und kurz erläutert. Dazu werden zunächst nur Daten der Pegel Cuxhaven und Hamburg-St. Pauli verwendet:

- Die Anzahl hoher Sturmfluten nach 1950 ist außergewöhnlich.
- Der mittlere Scheitelwasserstand hoher Sturmfluten in Cuxhaven und auch die Scheitelhöhendifferenz zu Hamburg zeigen eine bemerkenswerte Tendenz, wenn man sie mit den Verhältnissen aus der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts vergleicht: Beide steigen seit einigen Jahren stark an.

So steht die Frage im Raum, ob es sich hier um eine zufällige Häufung ungünstiger Ergebnisse, um eine elbespezifische Entwicklung oder um eine großräumige Erscheinung handelt. Im folgenden wird versucht, einer Antwort näherzukommen.

3.2 Küste

Jede Sturmflut stellt ein individuelles Ereignis dar. Sie läuft je nach Wind- und anderen Einflüssen unterschiedlich ab. Keine Sturmflut wird einen identischen Nachfolger finden. Dennoch kann man natürlich Kollektive bilden und Mittelwerte bestimmen. Dabei ist folgender Gedankengang von grundsätzlicher Bedeutung:

Setzt man voraus, daß sich die äußeren Kräfte W , die zur Entwicklung eines vorgegebenen Sturmflutkriteriums – z. B. einer Mindesthöhe $H_{Thw} = M_{Thw} + 2\text{ m}$ – führen, über die Zeit nicht verändert haben, also

$$\begin{aligned} H_{Thw} (\Sigma W) &= \text{const} \\ \text{wenn } \Sigma W &= \text{const} \end{aligned}$$

und setzt man ferner voraus, daß sich bei einem genügend großen Kollektiv bzw. über einen genügend langen Zeitraum gewisse Kombinationen der äußeren Kräfte und diese mit der Tide wiederholen, so bedingt dies für $\Sigma W = \text{const}$:

$$\frac{\sum_m H_{Thw}}{m} = \text{const}$$

mit m = Anzahl der Sturmflutereignisse

Wenn sich markante Abweichungen von dieser Konstanz einstellen, so kann dies drei Gründe haben:

- Es wirken veränderliche äußere Kräfte mit, die in W nicht enthalten sind (also ausgelöst durch anthropogene Einflüsse);
- ΣW hat sich verändert aufgrund geogener Einflüsse und des atmosphärischen Geschehens;
- Die Wechselwirkung zwischen auslösenden Kräften, dem Medium Wasser und den reagierenden Kräften hat sich geändert.

Wenn „Küstenorte“ betrachtet werden, scheidet der erstgenannte Grund i. d. R. aus. In der Gleichung, die PUGH und VASSIE (1979) bei der Entwicklung einer Methode zur Ableitung der Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Sturmfluten durch Kombination der Wahrscheinlichkeitsfunktionen von Stau und Tide aufgestellt haben, nämlich

$$\begin{aligned} h_o &= h_p + h_w + h_r \\ \text{mit } h_p &= \text{astron. bedingt} \\ h_w &= \text{durch Wettereffekte hervorgerufen} \\ h_r &= \text{andere als Tide- und Wettereffekte} \end{aligned}$$

wird damit $h_r = 0$ sein. Es verbleibt als Ursache für h_o -Schwankungen lediglich eine Veränderung der auslösenden Kräfte, durch Tide und Wetter entstehend. Damit hängen unmittelbar – und bisher weder theoretisch noch empirisch davon trennbar – die Wechselwirkungen zwischen den sich entwickelnden Tide- und Windstaukurven zusammen. Diese Wechselwirkungen selbst können außerdem weiteren Veränderungen unterworfen sein, so daß hier äußerst komplexe Verhältnisse angenommen werden müssen.

Die tatsächliche Entwicklung vor der Küste der inneren Deutschen Bucht zeigt Abb. 22 für die letzten Jahrzehnte an den Pegeln der Küste und der Tideflüsse für Sturmfluten nach verschiedenen Auswertungen. Außer der Kurve von LIESE und LUCK (1978) für einen durch Mittelung mehrerer Küstenpegelaufzeichnungen gebildeten „mittleren Küstenpegel“ haben alle anderen Kurven gemeinsam während der letzten beiden Jahrzehnte einen deutlichen Trend zu höheren H_{Thw} . Die Entwicklungen in Herbrum, Bremen und Hamburg unterstreichen dies besonders, da die für diese Orte verwendeten Kollektive nach den Höhen an der Mündung des jeweiligen Flusses und nicht am Ort ausgewählt wurden. Zwar läßt sich dieser deutlich erkennbare Trend je nach Auswerteart verschieden darstellen, aber er wird

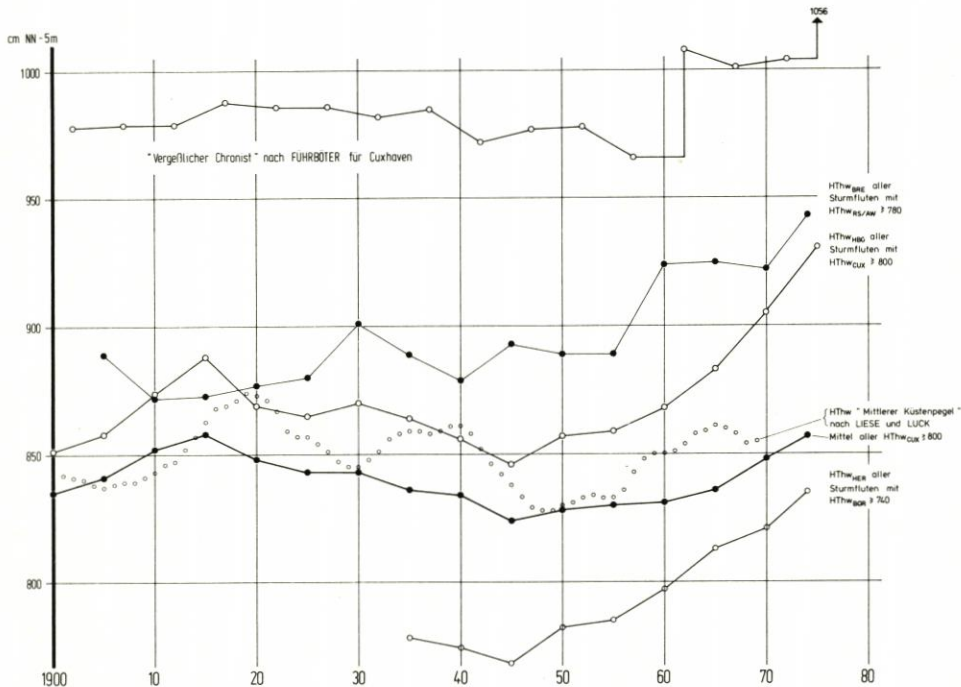


Abb. 22. Entwicklung gemittelter Sturmflutwasserstände 1900 bis 1980 für Ems, Weser und Elbe sowie die Ergebnisse von FÜHRBÖTER (1976) und LIESE und LUCK (1978)

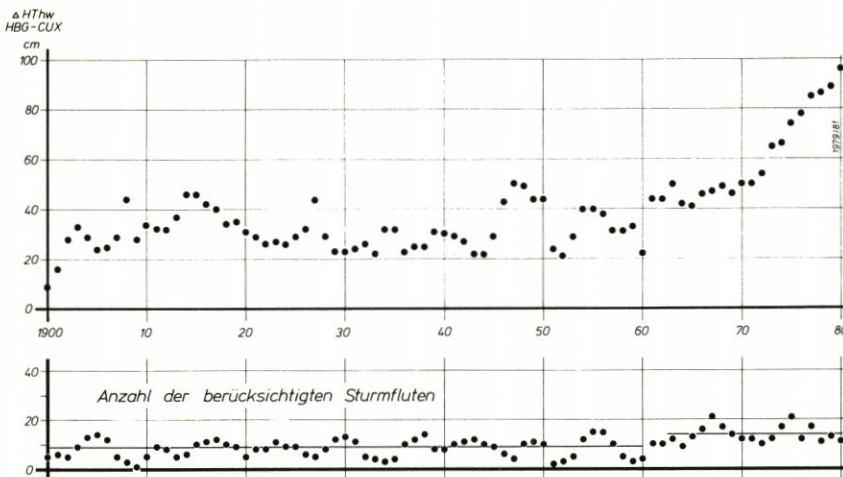


Abb. 23. Höhendifferenzen der Sturmflutscheitel $\Delta HTW_{HBG-CUX}$ 1900 bis 1980 sowie die Anzahl dieser Sturmfluten (3jährig, übergreifend; $HTW_{CUX} \geq 800$ cm NN - 5m oder max. Windstau_{CUX} ≥ 200 cm): deutliche Differenz- und Häufigkeitszunahmen nach 1960

damit quantitativ im Sinne obiger Gleichung von PUGH und VASSIE noch nicht faßbar. Um hier einen Schritt weiterzukommen, wurden auf Abb. 23 die HTW -Differenzen $HBG-CUX$ sowie die zur Berechnung verwendete Sturmflutanzahl dargestellt. Die Auswahl erfolgte wiederum nach den Daten an der Mündung, und zwar wurden nur solche Ereignisse berücksichtigt, die

- in CUX ein HThw ≥ 800 cm NN - 5 m oder
- in CUX einen Windstau ≥ 200 cm

erreichten.

Man erkennt, daß sich nicht nur die HThw-Differenzen zwischen HBG und CUX seit etwa 1955 von rd. 30 cm auf fast 100 cm vergrößert haben, sondern daß sich in derselben Zeit - genauer gesagt sogar innerhalb von rd. 10 Jahren - auch die Anzahl dieser Sturmfluten um rd. 50 % erhöht hat!

Mit

$$h_o(1980) = 1,5 h_o(1955)$$

für den „Mündungspegel“ Cuxhaven sind dermaßen große Veränderungen zu verzeichnen, daß es lohnenswert ist, der Frage nachzugehen, ob dies allein durch Wettereffekte möglich ist oder ob nicht auch - wie in Kap. 2 insbesondere bezüglich der Tnw bereits angedeutet - nordseespezifische Veränderungen eine Rolle spielen.

Es gibt hierzu allerdings auch scheinbar widersprüchliche Aussagen. So bringt die Arbeit von ROHDE (1977) eine Entwicklung für die Küste, die bei Sturmfluten etwa gleich der bei mittleren Tiden ist. Allerdings zieht ROHDE nur die höchsten Sturmfluten im Laufe der letzten Jahrhunderte heran. LIESE und LUCK (1978) ermittelten für einen „mittleren Küstenpegel“ durch mehrfache Mittelung mehrerer Aufzeichnungen gewisse Schwebungserscheinungen (Abb. 22). Wie die Darstellung zeigt, ist dabei der Trend gerade des letzten Jahrzehnts nicht gut repräsentiert. Dagegen brachte die Ermittlung der Sturmfluten mit der Auftretenswahrscheinlichkeit 1:100 Jahre durch FÜHRBÖTER (1976) deutliche Sprünge, hin zu höheren möglichen Sturmfluten (Abb. 22).

Nach GRAFF und BLACKMAN (1979) zeigen die jährlichen HThw für die englische Südküste denselben Trend wie der mittlere Meeresspiegel; allerdings deutet - wie bei uns - eine Häufung hoher Sturmfluten in letzter Zeit auf eine Zunahme von deren Eintrittswahrscheinlichkeit. So ergaben ihre dadurch ausgelösten Untersuchungen, daß in der Periode 1819/1970 in Sheerness (Themsemündung) eine generelle Zunahme des Auftretens extremer HThw zu verzeichnen ist, erkennbar an dem Trend der - ähnlich wie bei FÜHRBÖTER - ausgewerteten Höhen mit der Wahrscheinlichkeit 1:100 Jahren. Ferner wird dies durch eine Erhöhung der Auftretenswahrscheinlichkeit für alle Sturmflutklassen in Hoek van Holland unterstrichen.

3.3 Flüsse

Bei der Betrachtung der Sturmflutentwicklung in allen deutschen Tideflüssen darf das letzte Glied der Gleichung von PUGH und VASSIE nicht vernachlässigt werden, denn es spielt hier eine wesentliche Rolle. Das wird im vorigen Kapitel an der Diskussion von Abb. 23 bereits deutlich.

Nun ist eine solche isolierte Betrachtung natürlich nicht erschöpfend. So zeigt Abb. 24 für zwei weitere HThw-Kollektive in Ems und Weser seit 1900 bei einem Vergleich der Ganglinien an den oberen Pegeln mit denen an den „Mündungspegeln“, daß ein Großteil der Entwicklung an den oberen Tidepegeln - etwa der deutliche Anstieg in den letzten drei Jahrzehnten - schon an den Mündungspegeln - allerdings in schwächerer Form - aufgetreten ist und entsprechend nach oberstrom wirkt. Dennoch werden Zäsuren deutlich (Abb. 25): Trotz der groben Darstellung zeigen die Doppelsummenkurven in beiden Flüssen übereinstimmend ab 1960 den Beginn zu höheren Sturmfluten. Daß diese Tendenz stärker auf Kosten

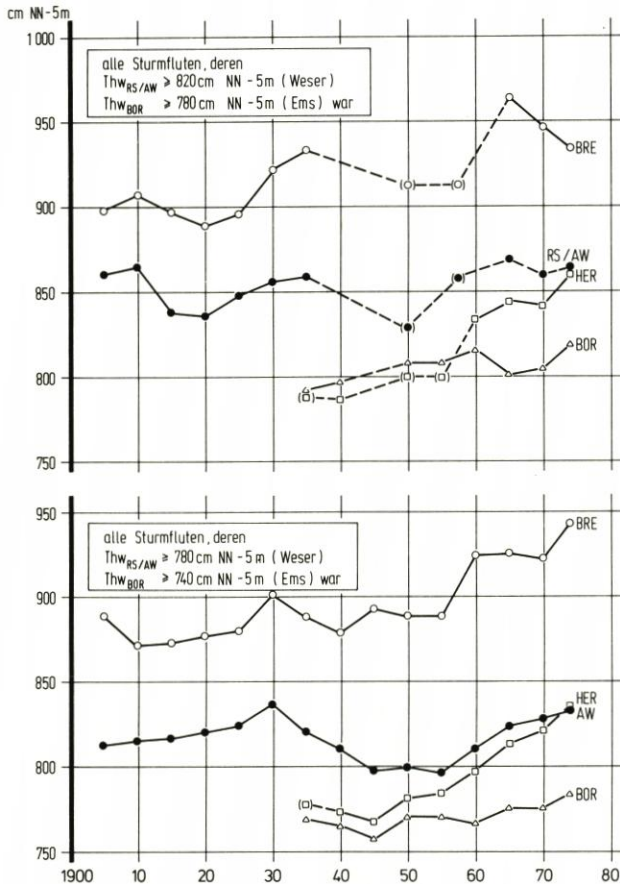


Abb. 24. HThw 1900 bis 1980 für Ems und Weser (als 10jährige übergreifende Mittel der gen. Sturmflut-Scheitelhöhen) nach SIEFERT, 1978: nach 1960 deutlich zunehmende Differenzen HER-BOR und BRE-RS/AW

des oberen gewählten Pegels geht, zeigte Abb. 24. Die Ursache dafür ist so nicht erkennbar; dazu bedarf es weiterer Analysen.

Für vier verschiedene HThw-Kollektive in der Elbe weisen Abb. 26a und b auf entsprechende Tendenzen, wie sie oben für Ems und Weser festgestellt wurden. Nur wird hier durch das bis in das 18. Jahrhundert zurückreichende Datenmaterial andererseits auch nachgewiesen, daß in Cuxhaven und in Hamburg die Sturmflutscheitel früher bereits ganz ähnliche Höhen wie in den letzten Jahren erreichten. Das deutet zum einen darauf hin, daß – Tide- und Wettereffekte betreffend – ähnliche Verhältnisse wie heute zwischen 1800 und 1850 schon einmal geherrscht haben müssen. Dann muß sich die Entwicklung ab 1960 auch anders als mit anthropogenen Effekten erklären lassen! Aber darauf ist früher schon ausführlich hingewiesen worden (SIEFERT, 1978). Inzwischen ist es LINKE (1981) sogar gelungen, Wechsel in der Sturmflutintensität während der letzten 6.000 Jahre nachzuweisen.

Für alle Kollektive wird allerdings die Aussage von Abb. 23 über die deutliche Zunahme der Sturmfluthöhen in den letzten Jahren bestätigt. Die Doppelsummenkurven auf Abb. 27 weisen ergänzend auf eine mögliche weitere Nuancierung: Die Sturmfluten aus dem Kollektiv HThw_{CUX} > 767 cm NN - 5 m beginnen nach 1965 von der Norm abweichend zu steigen, und

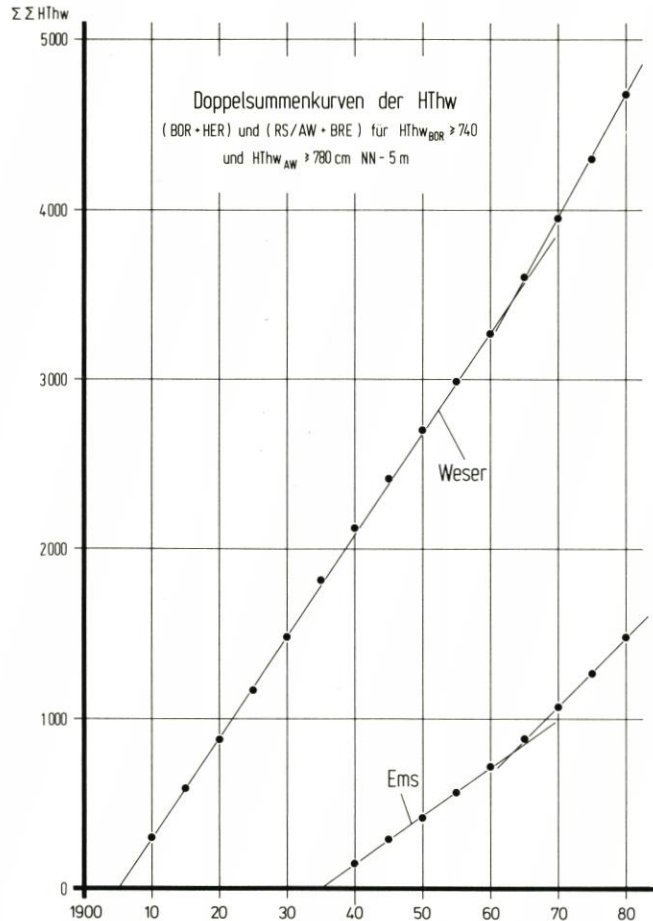


Abb. 25. Doppelsummenkurven der HThw 1900 bis 1980 für Ems und Weser (nach den Daten von Abb. 24): Knicke nach 1960 zum steileren Anstieg

zwar schneller als noch bis 1930. Diejenigen Sturmfluten, die ≥ 800 cm NN - 5 m erreichten, zeigen einen temporär und qualitativ gleichen Knick. Wenn man diesen mit Eindeichungs- und Absperrungsmaßnahmen im Flußgebiet erklären wollte, so müßten dafür besonders die höchsten Sturmfluten (≥ 850 cm NN - 5 m) aus dem Kollektiv geeignet sein, auf die die Wirkung durch Verringerung des „Flutraumes“ am größten wäre. Bei diesen jedoch setzt der Knick schon knapp 10 Jahre eher und v o r diesen Baumaßnahmen ein!

Ein anderer Gesichtspunkt, der a. a. O. auch schon diskutiert worden ist, muß in diesem Zusammenhang noch erwähnt werden, nämlich die Entwicklung der HThw-Eintrittszeit-Differenzen (Abb. 28 und 29), wie sie sich parallel zu den Höhenveränderungen abgespielt hat. Für die Elbe liegt eine detaillierte Auswertung vor (Abb. 28). Danach ist bis Mitte der 1960er Jahre eine deutliche „Sortierung“ nach Höhenstufen auszumachen. Später treten vornehmlich solche Sturmfluten auf, deren „Laufzeiten“ absolut und gegen die Jahresmittel wesentlich kürzer sind. Die Tendenz ist zwar in allen drei Flüssen unterschiedlich verlaufen, jedoch logisch zueinander passend (SIEFERT, 1978), werden daran doch Verschiebungen in der Phasenlage von Windstau- und Tidemaximum deutlich. So wird bei der weiteren Analyse, wie

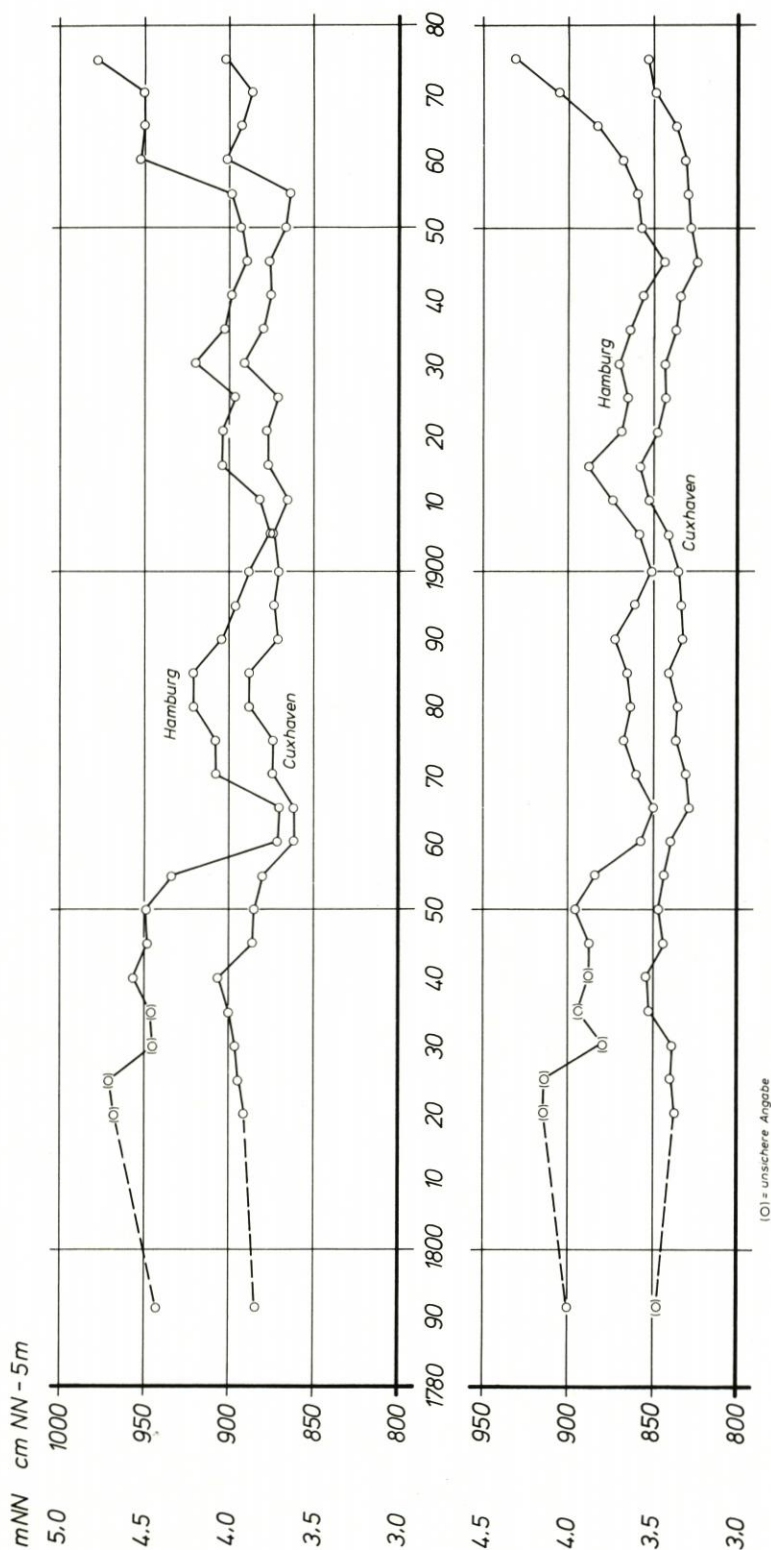


Abb. 26a. HThw 1780 bis 1980 für die Elbe (10jährig, übergreifend) nach SIEFERT, 1978 (ergänzt): nach 1960 deutlich zunehmende Differenzen HBG-CUX, die aber sowohl bei $HThw_{CUX} \geq 850$ (oben) wie bei $HThw_{CUX} \geq 800$ cm NN – 5 m (unten) auch schon in der Zeit 1800 bis 1850 eingetreten waren!

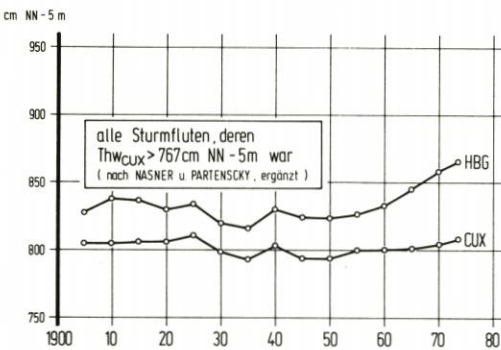
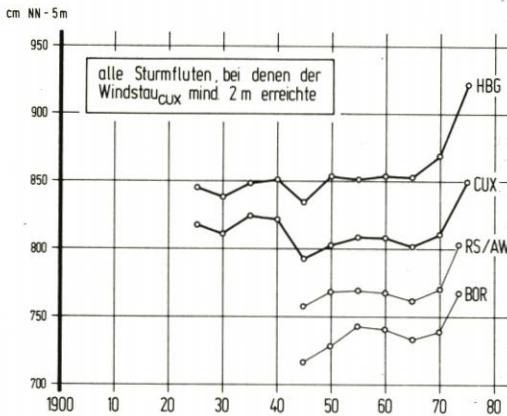


Abb. 26b

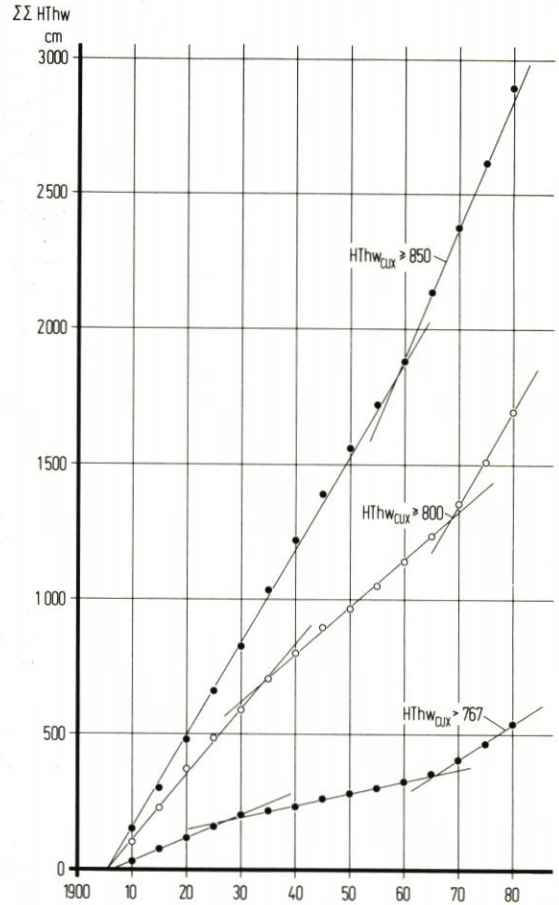


Abb. 27

Abb. 26b. HThw 1900 bis 1980 für die Elbe (10jährig, übergreifend) nach SIEFERT, 1978 (ergänzt): nach 1960 deutlich zunehmende Differenzen HBG-CUX auch für das Kollektiv $HThw_{CUX} > 767$ cm NN - 5 m (unten), dagegen erst nach 1970 starker Anstieg der Absolutwerte der nach dem Windstau ausgewählten Tiden (oben)

Abb. 27. Doppelsummenkurven der HThw 1900 bis 1980 für die Elbe (nach den Daten von Abb. 26a,b): Der Knick zum steileren Anstieg der Kurve liegt für die höchsten Sturmfluten 5 bis 10 Jahre früher als für die mittleren

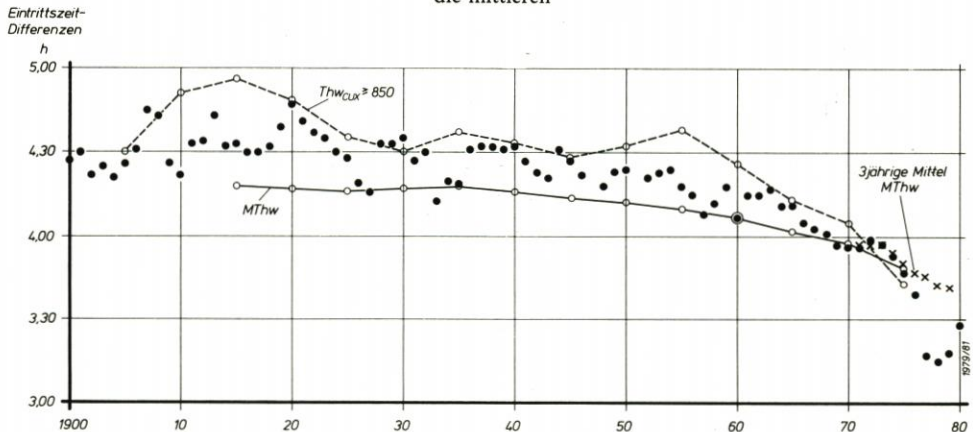


Abb. 28. HThw-Entrittszeit-Differenzen HBG-CUX 1900 bis 1980 (3jährig, übergreifend für $HThw_{CUX} \geq 800$ cm NN - 5 m oder max. Windstau $CUX \geq 200$ cm; 10jährig, übergreifend für MThw und $HThw_{CUX} \geq 850$ cm NN - 5 m): deutliche Abnahme der Differenzen nach 1960

auch PUGH und VASSIE (1979) schreiben, die Hauptschwierigkeit in der Berücksichtigung der Wechselwirkung (Interaction) zwischen diesen Wellen liegen, wie sie in der südlichen Nordsee üblich ist. Sie gehen z. B. auf das Phänomen ein, daß das Windstaumaximum in der Themse überwiegend im Flutast auftritt (Abb. 30) und „irgendwie davon abgehalten wird, mit dem astronomischen Thw zusammenzufallen“ (PUGH und VASSIE, 1979). Man will dort jetzt versuchen, eine Funktion für die Wechselwirkung zu finden, so daß dann Windstau und Tide korrekt kombiniert werden können.

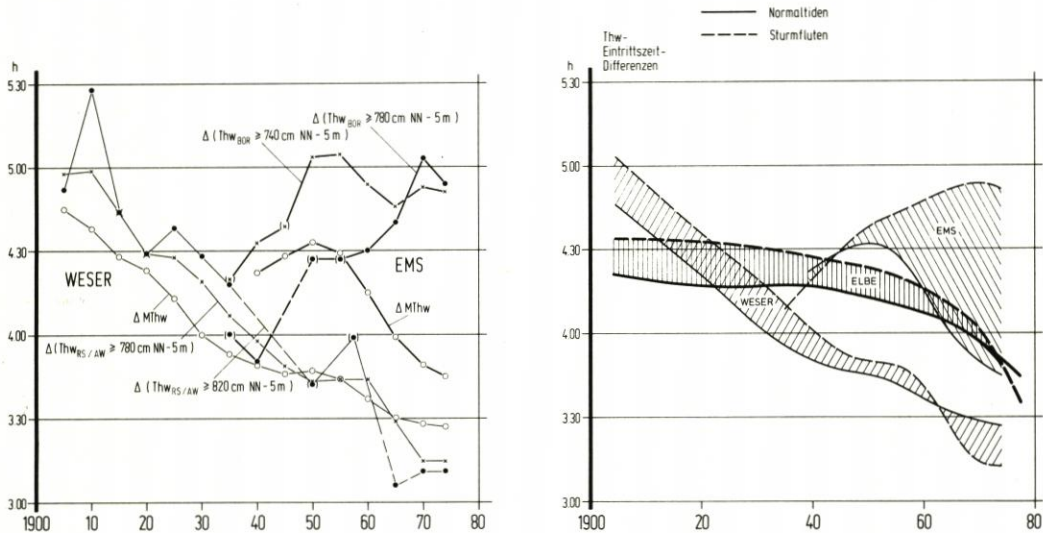


Abb. 29. HThw-Entrittszeit-Differenzen BRE-RS/AW und HER-BOR 1900 bis 1980 (links; 10jährig, übergreifend) sowie eine generalisierte Darstellung aus dieser und Abb. 28 (rechts) für HER-BOR (107 km), BRE-RS/AW (114 km) und HBG-CUX (101 km); SIEFERT, 1978 (ergänzt)

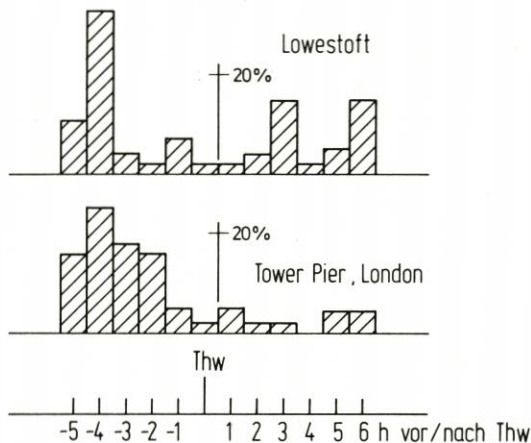


Abb. 30. Verteilung der Windstaumaxima an der englischen Ostküste und in der Themse (nach PRANDLE und WOLF, 1978)

4. Hypothesen zur weiteren Arbeit

4.1 Überblick

Die Nordsee ist ein Randmeer des Atlantischen Ozeans. Die hier durch die astronomischen Verhältnisse entstehenden Tiden laufen von Norden und durch die Straße von Dover in das Randmeer ein. Die Tiden setzen sich entspr. der unterschiedlichen Wirkung der einzelnen Gestirne auf die Bewegung des Wassers auf der Erde aus mehreren Partialtiden zusammen. In

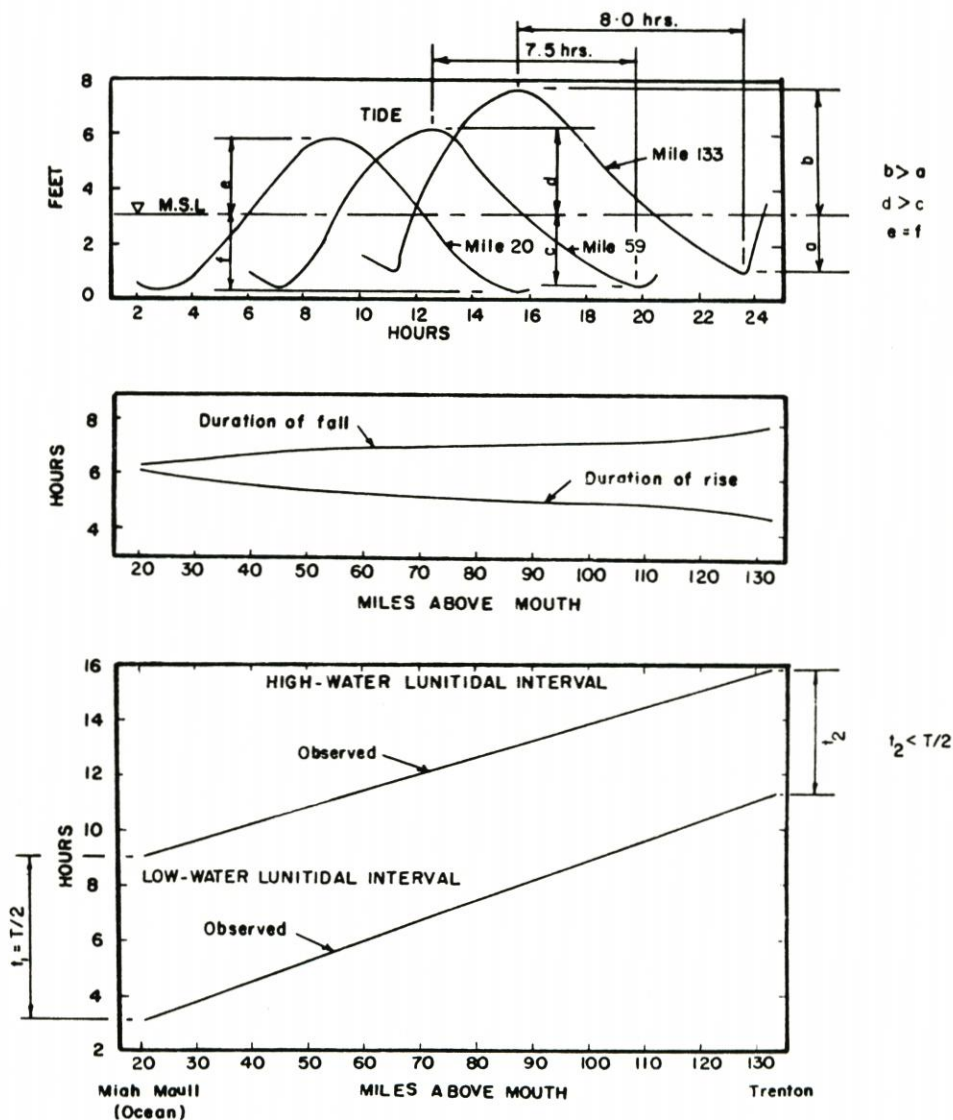


Fig.1 Tidal Data on the Delaware Estuary

Abb. 31. Grunddaten zur Beurteilung der Tideverhältnisse (nach HARLEMAN und LEE, 1969)

der Nordsee werden diese Wellen umgeformt, und zwar durch die Beckenform, die Tiefenverhältnisse und die Coriolisbeschleunigung. Die Nordseetiden dringen dann über das Küstenvorfeld in die Tideflüsse ein. Die in dieser Arbeit diskutierten Daten geben nun Veranlassung zu der Annahme, daß hierbei in den letzten Jahren Veränderungen stattgefunden haben, während gleichzeitig die Flüsse ausgebaut wurden.

Bevor einige Arbeitshypothesen erläutert werden, sollen noch einmal die Indizien zusammengestellt werden:

- Die MTnw in den Tideflüssen Ems, Weser, Elbe und Eider haben sich in den letzten vier Jahrzehnten zeitgleich und gleichsinnig verändert, ohne daß etwa alle Flüsse in derselben Zeit gleichartig künstlich verändert wurden.
- Eine vorläufige Auswertung für die Elbe scheint zu bestätigen, daß sich das Verhältnis der Spring- zu den Nipptiden verändert hat.
- Es gibt Hinweise, daß sich die Strömungsgeschwindigkeiten in Flußmündungen erhöht haben.
- Die Sturmfluten haben an der Küste der Deutschen Bucht wie auch an der englischen und niederländischen Küste an Zahl und Höhe zugenommen.
- Die „Aufsteilung“ der Sturmfluten bei ihrem Lauf ems-, weser- wie elbaufwärts ist in den letzten Jahren markant.
- Untersuchungen mit verschiedenen Sturmflutklassen in der Elbe zeigen, daß deren Höhenentwicklung nicht schlüssig mit Baumaßnahmen erklärt werden kann.
- Die Höhen hoher Sturmfluten erreichten vor rd. 150 Jahren, als die Elbe noch ganz anders aussah, in Cuxhaven und in Hamburg fast dieselben Werte wie heute.
- Die Sturmfluten sind in den letzten Jahren absolut (wie auch relativ zur mittleren Tide) „schneller“ geworden.

Die Sturmflutentwicklungen enthalten klimatische und anthropogene Einflüsse. Dennoch verbleiben ungeklärte Tendenzen, und sicherlich ließen sich weitere Indizien dafür finden, daß wir in den letzten 20 Jahren in den Tideflüssen Veränderungen feststellen, deren Ursachen an, in und über der Nordsee zu suchen sind.

Somit erhebt sich die Frage, welche Möglichkeiten wir haben, einerseits diese Indizien zu erhärten oder fallenzulassen und andererseits Ursachen aufzuspüren.

4.2 Erarbeitung weiterer Indizien

Wie eingangs bereits vermerkt, wurden hier nur wenige Parameter diskutiert. Abb. 1 ebenso wie Abb. 31 geben Hinweise auf dem weiteren Weg:

- a) Wesentlich stärker als bisher muß möglichen Veränderungen in den Tidekurven nachgegangen werden. Daten sind vorhanden; das geeignetste Auswerteverfahren muß bestimmt werden. Bisher ist unbekannt, ob mit der Tnw-Absenkung im Oberlauf etwa eine Veränderung der Kurvenform an der Mündung einhergeht (erste Untersuchungen für die Elbe deuten das an; die Entwicklung in Helgoland wird untersucht).
- b) Der Entwicklung der Flut- und Ebbedauer ebenso wie der Spring- und Nipptideentwicklung muß erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Daten sind vorhanden; die Auswertung ist einfach, aber umfangreich. In welcher Hinsicht die Ergebnisse hilfreich sein können, zeigen Abb. 20, 21 und 31.
- c) Die Flut- und Ebbewassermengen sämtlicher Tideflüsse sollten an ihren Mündungen möglichst exakt gemessen werden; bisher liegen nur sporadische Messungen an unterschiedlichen Stellen in wenigen Punkten oder auch Meßlotrechten vor, die nicht immer für

die Mündung repräsentativ sind. Die Meßdurchführung ist schwierig und aufwendig; Messungen sollten regelmäßig wiederholt werden, da die Durchflusssmengen wie auch ihre zeitlichen Schwankungen möglichst exakt erfaßt werden müssen. Es ist zu prüfen, ob durch Kubizierungen bzw. mathematische Flußmodelle das Ziel vielleicht einfacher zu erreichen wäre.

- d) Wasserstände werden an einigen Stellen bereits seit Jahrhunderten gemessen – es ist an der Zeit, nun auch dasselbe mit den Strömungen zu tun. Die Auswahl repräsentativer Meßorte ist sehr schwierig; Aufbereitungs- und Analysenmethoden müssen erarbeitet werden, damit heutige vage Hinweise auf die Zunahme von Strömungsgeschwindigkeiten erhärtet werden können.
- e) Dem Ablauf von Sturmfluten an der Küste und in den Tideflüssen muß erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Daten sind vorhanden, allerdings sollte sich die Analyse nicht nur auf die Scheitelhöhen beschränken. Die Windstauverhältnisse müssen nach bestimmten Verfahren ausgewertet, die Wechselwirkungen zwischen Tide- und Windstauwellen herausgearbeitet werden.
- f) Vergleiche zwischen verschiedenen Tideflüssen und verschiedenen Zeiträumen müssen intensiviert werden, um theoretisch wie empirisch (und evtl. über begleitende Modelluntersuchungen) die Einflüsse flußspezifischer Eigenschaften und Veränderungen festzustellen. Wenn so die Palette der Indizien verändert oder erweitert wird, dann sollte gleichzeitig oder anschließend nach den Ursachen für die Veränderungen gesucht werden.

4.3 Auf der Suche nach den Ursachen

Die Ursachen für die Veränderungen der Tide- und Sturmflutverhältnisse sind in den bekannten Veränderungen in den Flüssen selbst (Vertiefungen, Eindeichungen, Absperrung von Nebenflüssen u. ä.), aber eben wohl auch in den unterhalb der Mündungen maßgebenden hydrologischen und meteorologischen Vorgängen zu suchen. Aus dem zuvor Diskutierten ergeben sich für die letztere folgende Anhaltspunkte.

- a) Änderung der windunbeeinflussten Tideverhältnisse im Küstenvorfeld können ein Hinweis auf langfristige Variationen im Tidegeschehen der Nordsee sein, etwa durch Verlagerung oder Veränderung der Amphidromie in der südlichen Nordsee (Abb. 32). Diese wiederum könnte Folge einer anders aus dem Atlantik angeregten Nordseezeit sein.
- b) Die Zunahme der Sturmflut-Scheitelwasserstände, z. B. in Hamburg, deutet an, daß wir uns in einer zum Zeitraum 1800 bis 1850 vergleichbaren Phase meteorologischer Verhältnisse befinden, bei der häufiger stauwirksame Starkwindlagen auftreten. Es bedarf also des Versuches, aus älteren meteorologischen Unterlagen (etwa über „kleine Eiszeiten“) auf solche wiederkehrenden Bedingungen zu schließen.
- c) Die Erscheinung, daß heute die Phasen von Windstaukurven und astronomischen Tiden in der Deutschen Bucht häufiger dicht beieinanderliegen als vor einigen Jahrzehnten und dadurch über Wechselwirkungen zu ungünstigeren Überlagerungen, d. h. höheren Scheitelwasserständen in den Flüssen, führen (SIEFERT, 1978), deutet auf Zufallseffekte hin, die als solche bisher keineswegs nachgewiesen sind.

Um hier voranzukommen, ist interdisziplinäre Forschung von Physikern, Ozeanographen, Meteorologen und Küsteningenieuren erforderlich. Das erfordert Zeit, Geld und eine Menge unkonventioneller Ansätze. In Kap. 4.2 ist aufgezeigt, wie wir durch intensive Meß- und Auswertekampagnen bei entsprechendem Einsatz innerhalb weniger Jahre unsere Kenntnisse verbessern und den Blick für die zukünftige Entwicklung schärfen können.

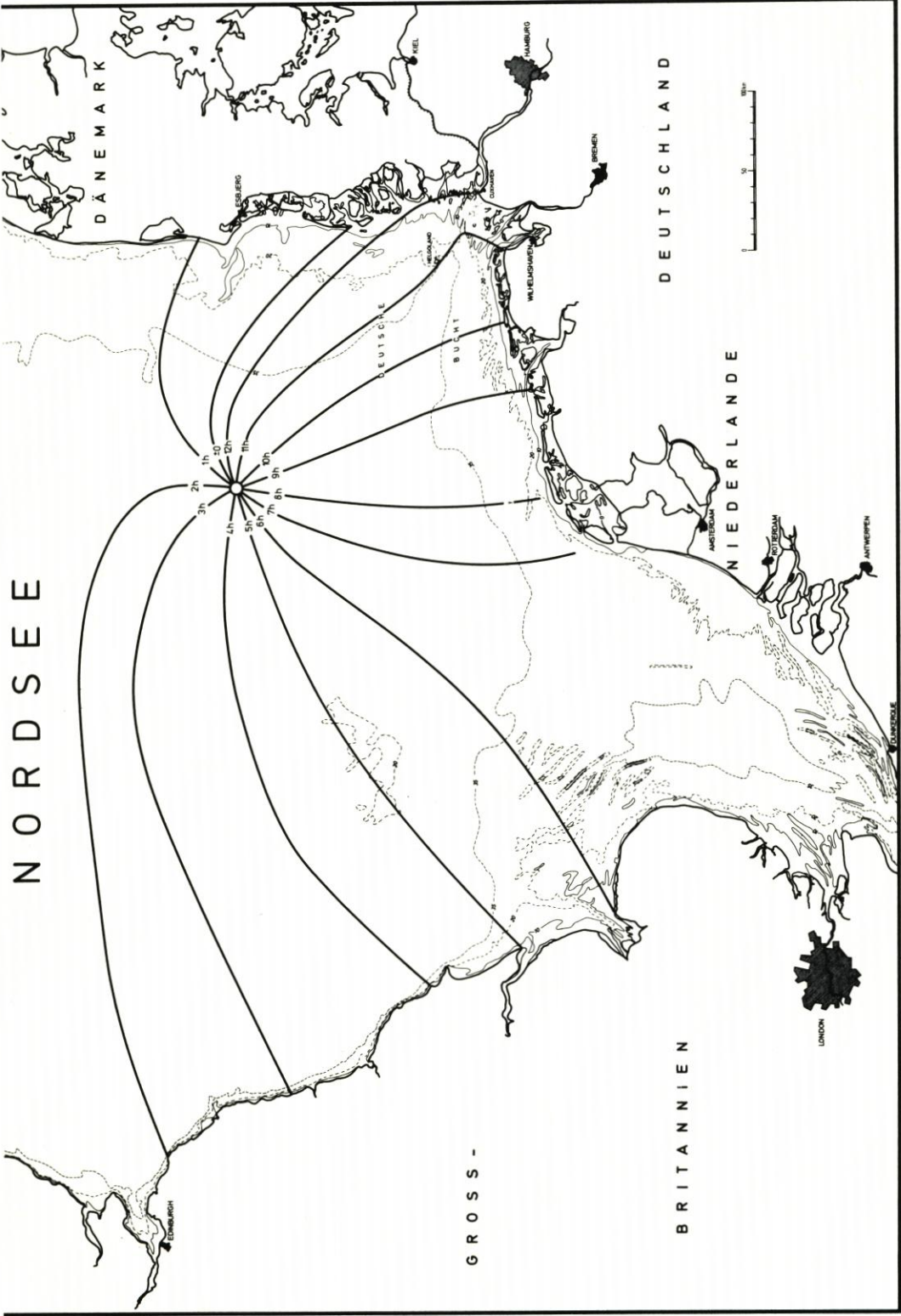


Abb. 32. Die Amphidromie in der südöstlichen Nordsee (aus SIEFERT, 1978)

5. Liste der verwendeten Pegel-Abkürzungen

AW	Alte Weser		FAR	Farge	Weser
BHV	Bremerhaven-Doppelschleuse	Weser	FRI	Friedrichstadt-Straßenbrücke	Eider
BOR	Borkum-Südstrand		HBG	Hamburg-St. Pauli	Elbe
BRA	Brake	Weser	HEL	Helgoland	
BRE	Bremen-Gr. Weserbrücke	Weser	HER	Herbrum-Hafendamm	Ems
BRO	Brokdorf	Elbe	HUN	Hundeknöll	
BRU	Brunsbüttel	Elbe	LEE	Leerort	Ems
BÜS	Büsum		NUP	Nordfeld UP	Eider
CUX	Cuxhaven-Steubenhöft		PAH	Pahlhude	Eider
EBP	Eidersperrwerk BP	Eider	RS	Roter Sand	
ELB	Elbstorf	Elbe	STA	Stadersand	Elbe
EMD	Emden-Neue Schleuse	Ems	TÖN	Tönning	Eider

6. Schriftenverzeichnis

- BOWEN, A. J.: The Tidal Regime of the River Thames; Long-Term Trends and Their Possible Causes. Phil. Trans. R. Soc., A 272, London, 1972.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 51, 1976.
- GRAFF, J. u. BLACKMAN, D. L.: Analysis of Maximum Sea Levels in Southern England. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, 1978; ASCE, New York, 1979.
- HARLEMAN, D. R. F. u. LEE, C. H.: The Computation of Tides and Currents in Estuaries and Canals. Mass. Inst. of Techn., Hydrodyn. Lab., Techn. Bull. No. 16, Cambridge Mass., 1969.
- HENSEN, W.: Stromregelungen, Hafenbauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf. Festschr. 30. Dt. Geographentag, Hamburg, Verlag F. Hirt, Kiel, 1955.
- LAUCHT, H.: Kann das Fahrwasser der Unterelbe noch weiter vertieft werden? Schiff und Hafen, H. 2, 1980.
- LENTZ, H.: Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel. Verl. Otto Meissner, Hamburg, 1879.
- LIESE, R. u. LUCK, G.: Verfahren zum Nachweis von Veränderungen der Tidehochwasserstände in der Deutschen Bucht. Dt. Gew. Mitt., H. 5, 1978.
- LINKE, G.: Ergebnisse und Aspekte zur Klimaentwicklung im Holozän. Geol. Rundschau, Bd. 70/2, 1981.
- LÜDERS, K.: Über die Genauigkeit verschiedener Verfahren zum Entwerfen der „mittleren Tidekurven“. Neues Archiv für Nds., H. 19, 1950.
- NASNER, H. u. PARTENSKY, H. W.: Sturmfluten in der Elbe und an der deutschen Nordseeküste von 1901 bis zum Januar 1976. Mitt. des Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 45, 1977.
- PUGH, D. T. u. VASSIF, J. M.: Extreme Sea Levels from Tide and Surge Probability. Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., Hamburg, 1978; ASCE, New York, 1979.
- ROHDE, H.: Sturmfluten und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
- SIEFERT, W.: Über das Sturmflutgeschehen in Tideflüssen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, Heft 63, 1978.
- SCHULTZE, E.: Die nichtperiodischen Einflüsse auf die Gezeiten der Elbe bei Hamburg. Archiv der Dt. Seewarte, Nr. 53, 1935.
- STRÖHMER, P. u. WANDER, K.: Ermittlung der nach Ausbaumaßnahmen in Tideflüssen eingetretenen Wasserstandsänderungen. Dt. Gew. Mitt., H. 6, 1979.