

Zum säkularen Verhalten der mittleren Watthöhen an ausgewählten Beispielen

VON WINFRIED SIEFERT UND HORST LASSEN

Zusammenfassung

Für den Küstenschutz der nächsten Jahrzehnte ist von großer Bedeutung, ob bei weiterem (schnellerem?) Anstieg der Tidewasserstände die Wattgebiete „mitwachsen“ oder nicht.

Nach einem im KFKI-Projekt „Morphologische Analysen Nordseeküste“ (MORAN) entwickelten Ansatz wurden Nivellements auf kleinen Wattflächen und auf den Trassen des Wattweges von Cuxhaven nach Neuwerk daraufhin untersucht. Als Ergebnis ist festzuhalten, daß das Watt in den letzten 120 Jahren keine nennenswerten Höhenänderungen zeigt, während das MThw um gut 20 cm gestiegen ist. Für die Zukunft ist Erosion im Watt nicht auszuschließen.

Summary

It is of vital importance for the North Sea coastal zone management, to know whether the extent of the intertidal area will increase as the mean sea level rises.

Certain intertidal areas and especially the reach between Cuxhaven and Neuwerk Island were investigated by a new method recently developed in a project of the German Coastal Engineering Board (KFKI). The results indicate that no significant change in the intertidal height has occurred during the last 120 years, although the mean high water level increased by 20 cm. This does not, however, mean that future erosion will not occur.

Inhalt

1. Einleitung und Veranlassung	59
2. Methode	60
3. Unterlagen und deren Genauigkeit	62
3.1 Nivellements	62
3.2 Genauigkeit	64
4. Ergebnisse	65
4.1 Kleine Einheiten hochliegenden Wattes	65
4.2 Wattweg von Cuxhaven nach Neuwerk	66
5. Schlußfolgerungen	69
6. Schriftenverzeichnis	70
7. Symbolverzeichnis	70

1. Einleitung und Veranlassung

Nachweislich ist der Wasserspiegel der Nordsee in den letzten Tausenden von Jahren angestiegen, wobei die Geschwindigkeit seit etwa 2000 Jahren deutlich abgenommen hat. Über die vergangenen Jahrzehnte aber beobachtet man eine Beschleunigung an allen Küstenpegeln der südlichen und östlichen Nordsee. Dies hat insbesondere in den Niederlanden zu intensiven Untersuchungen über die zukünftige Entwicklung geführt und beschäftigt in zunehmendem Maße auch die deutsche Wissenschaft.

Für den Küstenschutz von besonderer Bedeutung ist neben dem Anstieg des Wasserstandes das säkulare Verhalten der vorgelagerten Wattgebiete. Sie wirken heute als Schutzschild vor der Küste, auf dem der größte Teil der Seegangenergie umgewandelt wird. Die Höhe dieses Schildes ist in den vergangenen Jahrhunderten mit dem Wasserstand angewachsen. Es liegt auf der Hand, daß bei säkular steigenden Wasserständen die Wassertiefen dann größer werden, wenn die Watten nicht mitwachsen.

Sehr schwierig ist es, der Frage, ob Watthöhen zunehmen oder nicht, durch Auswertung von Meßdaten aus früherer Zeit nachzugehen, weil solche weitgehend fehlen. Nach Kenntnis der Autoren gibt es zu diesem Thema folgerichtig keine Literatur, aber die weit verbreitete Meinung: Wenn in Zukunft die Wasserstände schneller steigen, werden die Watten entsprechend schnell mitwachsen.

So wurde die Arbeit zu diesem Thema zum einen veranlaßt durch neue Arbeiten zum säkularen Wasserstandsverhalten (JENSEN, 1984; FÜHRBÖTER, 1986), zum anderen durch Arbeiten zur Morphologie des Küstenvorfeldes (SIEFERT, 1987) und durch interne Auswertungen von Watthöhen auf dem Wattweg von Cuxhaven nach Neuwerk aus alten Nivellements ab 1864.

Wenn von „Wasserspiegelanstieg“ die Rede ist, so muß dieser im Tidegebiet genau definiert werden. Es ist festzustellen, daß sich MThw, MTnw und MT1/2w keineswegs gleich verändert haben. So sind generell vor unserer Küste in den letzten Jahrzehnten

- das MThw stark gestiegen
- das MTnw etwa konstant geblieben bis leicht gefallen
- das MT1/2w gestiegen.

Bei Vergleichen säkularer Wasserstands- und Watthöhenentwicklungen ist dies zu berücksichtigen.

2. Methode

Selbstverständlich kann man topographische Höhen aus verschiedenen Aufnahmen unmittelbar miteinander vergleichen und aus den Differenzen säkulare Entwicklungen berechnen. Auf Grund von Energieeinwirkung unterschiedlicher Intensität wechseln allerdings die Höhen kurz- und mittelfristig in gewissen Grenzen. Diese Streubreite muß erfaßt werden, um nicht falschen Schlüssen zu erliegen.

Aus Untersuchungen über die morphologische Charakteristik des hochliegenden Wattes auf der Basis von Kartenvergleichen ergeben sich Verhältnisse, die auf Abb. 1 dargestellt sind (SIEFERT, 1987). Auf dem Wege zur Analyse der morphologischen Charakteristik werden dabei Umsatz und Bilanz als Funktionen über der Zeit dargestellt. Dazu wird der Zeitparameter a (in Jahren anzugeben) eingeführt*. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß auf diese Weise generelle Aussagen über die Umsatz- und Bilanzhöhen als Funktionen von a möglich sind, wobei gilt:

Umsatz einer kleinen Einheit = Summe aller Höhenveränderungen h'_u (in Zentimetern) der Teilflächen, unabhängig vom Vorzeichen, gegeben als mittlere Höhe h_u für die kleine Einheit.

Bilanz einer kleinen Einheit = Differenz zwischen der Summe der Sedimentationshöhen h'_s

* Dabei soll es sich definitionsgemäß um die Dauer eines Vergleichszeitraumes handeln und nicht um die fortlaufende Zeit. Diese Definition bereitet dem Leser erfahrungsgemäß Verständnisschwierigkeiten, ist aber von großer Wichtigkeit.

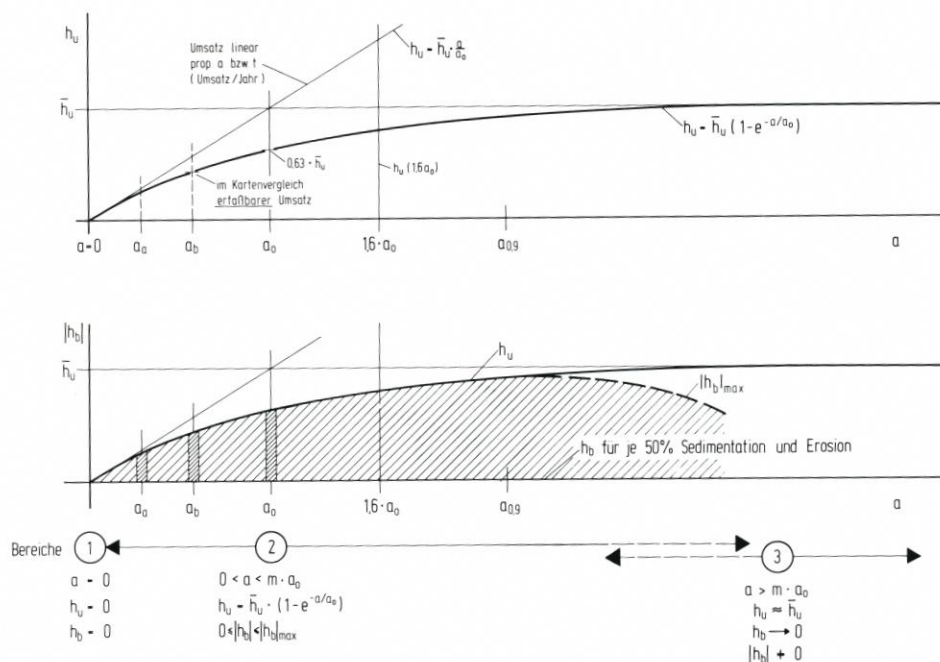


Abb. 1. Generalisierte Darstellung der Umsatzhöhen h_u und der Bilanzhöhen h_b über dem Vergleichszeitraum a zwischen topographischen Aufnahmen

und derjenigen der Erosionshöhen h'_e der einzelnen Teilflächen, gegeben als mittlere Höhe h_b für die kleine Einheit.

Kleine Einheiten sind üblicherweise Quadrate von $A = 1 \text{ km}^2$ Größe, die unterteilt werden in

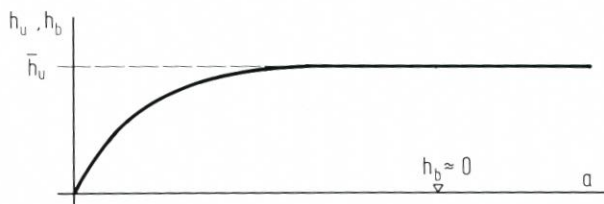
Teilflächen von je 1 ha Größe. Die Angaben für die kleinen Einheiten stellen die Mittelwerte aus den Daten der n Teilflächen dar.

Aus den bisherigen Untersuchungen geht hervor, daß die Umsatzhöhe h_u über den Vergleichszeitraum a durch eine Sättigungsfunktion der Form

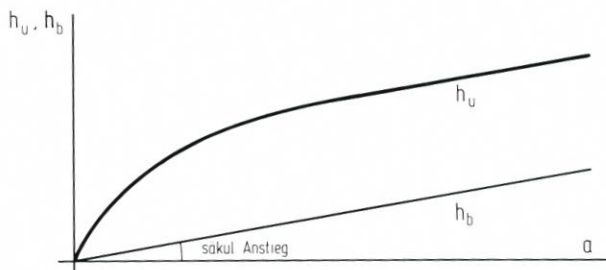
$$h_u = \bar{h}_u \cdot (1 - e^{-a/a_0})$$

dargestellt werden kann. Die Sättigungsfunktion kann nur dann horizontal asymptotisch verlaufen, wenn sich als Mittel über möglichst viele Kartenvergleiche $h_b = 0$ ergibt. Wenn das nicht so ist und die Bilanzsumme etwa mit a auf Grund säkularer Entwicklung wächst, muß sich dies bei den Umsatzhöhen durch steigende Werte bemerkbar machen (Abb. 2). Ohne einen Nachweis dafür zu liefern, daß letzteres nicht ein Regelfall ist, wird ein Beispiel angeführt, bei dem h_u so klein ist, daß sich selbst geringe h_b -Zunahmen in den h_u -Werten niederschlagen müßten.

Um die im KFKI-Projekt „MORAN“ entwickelte Methode auch auf die Watthöhen längs des Wattweges von Cuxhaven nach Neuwerk (Abb. 3 und 4) anwenden zu können, wurde sie folgendermaßen modifiziert: Die etwa 10 km bzw. etwa 8 km langen Strecken der beiden untersuchten Trassen werden als „kleine Einheiten“ definiert und in „Teilflächen“ geteilt, deren Anzahl gleich derjenigen der Nivellementsunkte bei den Erstaufnahmen 1864 bzw. 1913 gesetzt wird.



Sättigungsfunktion mit horizontaler Asymptote;
Bedingung: $h_b \approx 0$ für große a



Sättigungsfunktion mit geneigter Asymptote
bei säkularem Anstieg der Wathöhe,
also $h_b \neq 0$ für große a

Abb. 2. Umsatz- und Bilanzfunktionen bei fehlendem (oben) und vorhandenem (unten) säkularem Anstieg der Wathöhe

3. Unterlagen und deren Genauigkeit

3.1 Nivellements

Die Anwendung der angesprochenen Methode zur morphologischen Charakterisierung des Wattweges zwischen der Insel Neuwerk und dem Festland auf der Basis einer etwa 120jährigen Epoche ist nur mit Verarbeitung von verlässlichen Resultaten älterer geometrischer Höhenmessungen möglich. Leider gibt es nur wenige Nivellements, deren Ergebnisse für diese Untersuchung herangezogen werden können, weil bei vielen Urmessungen u.a. innere Zuverlässigkeit, Meßanordnung, Genauigkeit, Instrumentarium und Bezugsebene schwer überprüfbar sind.

Im Hinblick auf die Zielsetzung wurden aus dem vorhandenen Datenmaterial zwei „Urnivellements“ vom Festland zur Insel Neuwerk, die Informationen über Wathöhen enthalten, für die weitere Bearbeitung verwendet. Daß deren Stabilität als gesichert angesehen werden darf, wird im folgenden erläutert:

Das Nivellement von LENTZ, 1864 (Trasse 1)

Anfang November des Jahres 1864 führte LENTZ – zu dieser Zeit war er als Wasserbauinspektor in Cuxhaven tätig (KÜHN u. SIEFERT, 1979) – sein letztes Nivellement von Cuxhaven (Leuchtturm; eingemeißelte Kerbe) nach Duhnen und dann über das der Küste vorgelagerte Watt zur Insel Neuwerk durch (Abb. 3), um den Nullpunkt des dortigen Pegels sowie Höhen für gußeiserne Schilder am Leuchtturm und an der dortigen massiven Scheune zu bestimmen.

Entsprechend der notwendigen Forderung nach gleichen Stationslängen, um eine Vielzahl von Fehlereinflüssen auf die Höhenbestimmung zu eliminieren, wurden die Abstände der Wechsellpunkte auch auf der Nivellementstrasse längs des 10 km langen Wattweges mit der Meßkette gemessen und durch Holzpfähle vermarkt. Da LENTZ alle Pfahlhöhen über Wattoberfläche im Protokoll notierte, können heute zuverlässige Wathöhen für den damaligen Wattweg „Duhnen – Neuwerk“ angegeben werden.

Um Höhenangaben für die Zukunft zu erhalten, wurden von LENTZ gußeiserne Höhenschilder befestigt. Diese Voraussicht und der Umstand, daß die „königlich preußische Landesaufnahme“ in späteren Jahren diese Höhenmarken in ihre Höhenmessungen einbezogen hatte, ermöglichten eine Interpretation über Genauigkeit und Zuverlässigkeit LENTZ'scher Höhenmessungen auf Grund von gemessenen Höhendifferenzen. Es bestätigt sich für alle LENTZ'schen Nivellements eine nicht vermutete hohe Genauigkeit, die auch für die Höhenmessung zur Insel Neuwerk Gültigkeit hat.

Wegen der im vorhergehenden Abschnitt genannten Höhenverbindungen konnte außerdem die Höhe des „Hamburger Fluthmessers“, des Nullpunktes LENTZ'scher Höhenmessungen, mit der NN-Bezugsfläche der preußischen Landesaufnahme verknüpft werden. Somit gibt es seit 1855 eine NN-Höhe für die Pegelkontrollmarke am Leuchtturm Cuxhaven (LASSEN et al., 1984). Daher war es möglich, das Nivellement von 1864 unter Berücksichtigung der Bewegungstendenz des Leuchtturmes im NN-System auszuwerten.

Das Nivellement von DENGEL, 1913 (Trasse 2)

Mit Beginn der Zeit von „Nivellements höherer Genauigkeit“ (ca. ab 1910) verwirklichte der Landmesser DENGEL seine Höhenmessung von Sahlenburg zum LENTZ'schen Höhenschild an der Scheune auf der Insel Neuwerk (Abb. 3). Die Messung setzte sich aus einem

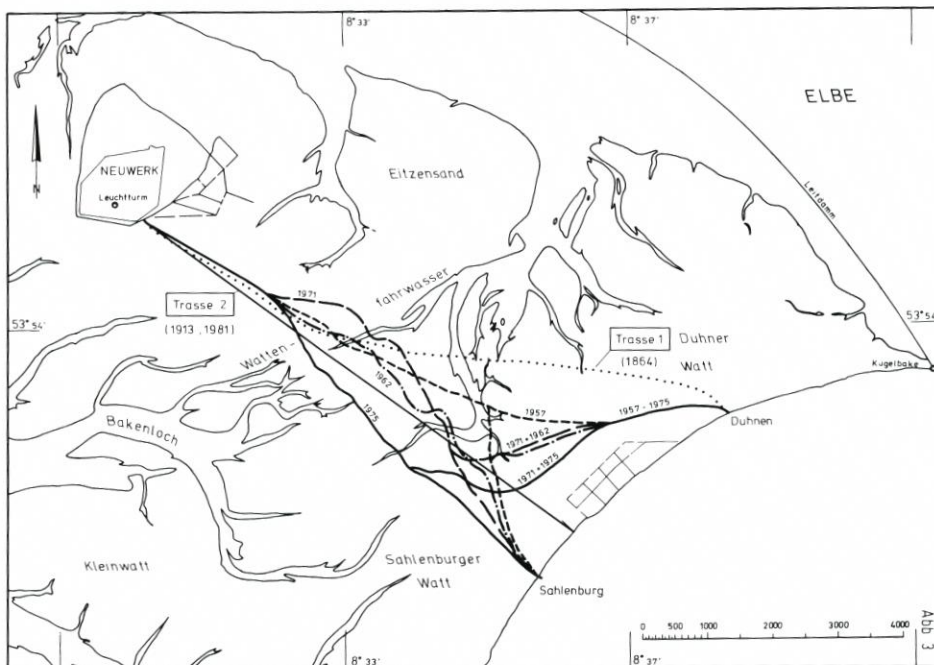


Abb. 3. Wattweg-Trassen zwischen Cuxhaven und Neuwerk

doppelten Hin- und Rücknivellement zusammen. Der Widerspruch beträgt 2,7 mm. Auf der Trasse über das Watt dienten im Abstand von 200 m gesetzte Holzpfähle, deren Höhe über Wattoberfläche protokolliert worden ist, als Wechsellpunkte. Durch zusätzliche Messungen fügte DENGEL seine Nivellementstrasse in das trigonometrische Netz der preußischen Landesaufnahme ein. Damit konnten für jeden Wechsellpunkt Lage sowie Höhe im Gauß-Krüger-Netz berechnet werden. Die Watthöhen wurden auf der Hin- und Rückmessung protokolliert. Die größte Differenz beträgt 0,02 m.

Das Nivellement 1981

Anläßlich eines Präzisionsnivellements von den unterirdischen Festlegungen im Wernerwald (Sahlenburg) zum Rohrfestpunkt der Insel Neuwerk wurde 1981 auf der im Gauß-Krüger-System berechneten und abgesteckten Trasse von 1913 mit identischen Wechsellpunkten nivelliert und gleichzeitig die Watthöhen bestimmt. Dies ermöglicht einen exakten Vergleich zwischen beiden Aufnahmen.

3.2 Genauigkeit

Die Vergleichbarkeit aller Höhenmessungen wurde durch Umrechnungen auf den NN-Bezugshorizont ermöglicht.

So bestimmt sich zum einen die Höhe für das Höhenschild an der Scheune auf Neuwerk zu:

LENTZ	1864	4,706 m	} NN altes System
DENGEL	1913	4,708 m	

(Zwischen 1913 und 1921 ist dieses Höhenschild durch Bauarbeiten verändert worden.)

Die Messung von DENGEL konnte 1981 nur am Ausgangspunkt überprüft werden. Für den Ausgangspunkt ergab sich eine um -0,010 m abweichende Höhe gegen 1913. Die Ergebnisse berechtigen zu der bereits genannten Annahme von innerer Zuverlässigkeit sowie hoher Genauigkeit dieser beiden historischen Höhenmessungen.

Für diese wie für die neueren Wattnivellements (1954/55, 1960/61, 1965, 1970, 1974, 1979) kann eine Genauigkeit der einzelnen Watthöhen von ~2 cm angenommen werden (SIEFERT u. LASSEN, 1968). Für die praktischen Belange dieser Untersuchungen können die Watthöhen der jeweiligen Messung in ihrer Gesamtheit als fehlerfrei betrachtet werden.

Während die Ergebnisse der Messungen von 1913 und 1981 auf einer koordinierten Trasse vorliegen, wurde der Wattweg nach Neuwerk von 1864 aus der Karte 1866 von Andreas MEYER in die heutige Karte übertragen.

Da die Trassen von 1864 und 1913 unterschiedlich verliefen, wurden getrennte Vergleiche mit den neueren Aufnahmen erforderlich.

Die Höhenvergleiche auf den Trassen wurden über die Watthöhen in der Umgebung der Wechsellpunkte von 1864 bzw. 1913, entnommen aus Arbeitskarten 1:10 000, vorgenommen.

An den entsprechenden Stellen werden die Standardabweichung s der Einzelmessung sowie der Vertrauensbereich C des Mittelwertes für die statistische Sicherheit 95 % nach DIN 1319, Blatt 3 angegeben.

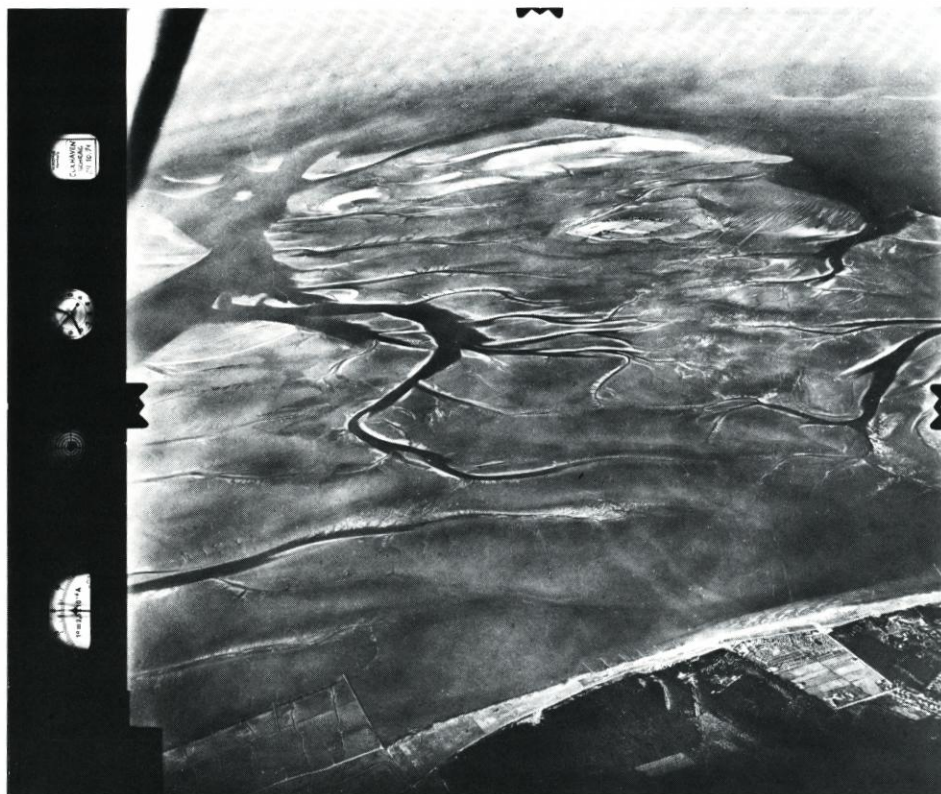


Abb. 4. Luftbild-Schrägaufnahme 1971 vom küstennahen Watt bei Cuxhaven (freigegeben Verm.-Amt Hambg. Nr. 1250/71, Aufnahme Fa. N. Rüpkke)

4. Ergebnisse

4.1 Kleine Einheiten hochliegenden Wattes

Nach Abb. 2 kann man die h_b -Entwicklung über a und damit mögliche säkulare Veränderungen mit dem im KFKI-Projekt „MORAN“ entwickelten Verfahren am einfachsten für solche kleinen Einheiten nachweisen, bei denen die asymptotische Umsatzhöhe $\bar{h}_u$ sehr klein ist. Abb. 5 zeigt dazu ein Ergebnis über ein 1 km^2 großes Quadrat aus dem Wesselburener Watt südlich der Außeneider als willkürliches Beispiel:

Die Sättigungsfunktion der Umsatzhöhen hat bei $a = \text{rd. } 10$ Jahre praktisch den asymptotischen Grenzwert erreicht. Erwartungsgemäß sollte damit über den hier belegbaren Zeitraum von rd. 35 Jahren keine säkulare Höhenänderung nachweisbar sein. Tatsächlich sind die Beträge der Bilanzhöhen – also die mittleren topographischen Höhenänderungen – bei $a = 2$ oder 3 Jahre schon etwa so groß wie bei $a = 31$ oder 34 Jahre. Bei dem Beispiel werden

$$\begin{aligned}\bar{h}_u &= 11 \text{ cm} \\ |h_b|_m &= 3,5 \text{ cm mit } C = \pm 1,0 \text{ cm} \\ &\text{sowie } s = \pm 2,4 \text{ cm}\end{aligned}$$

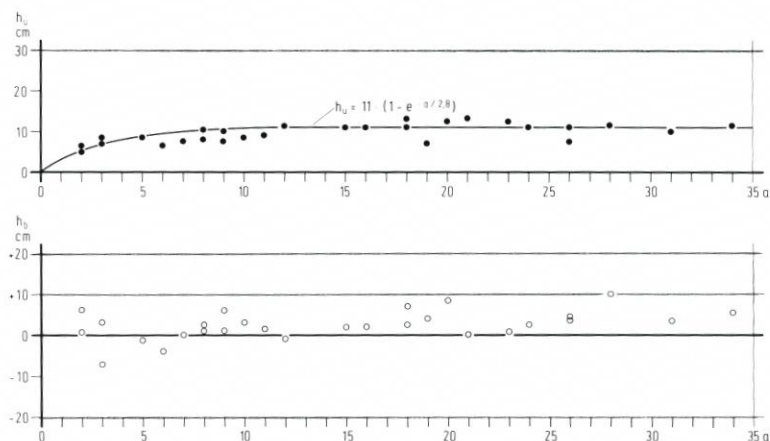


Abb. 5. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b über dem Vergleichszeitraum a für eine 1 km^2 -Fläche auf dem Wesselburener Watt (Feld P3N1)

FÜHRBÖTER (1986) gibt für diesen Zeitraum (35 Jahre) als Veränderungen an der deutschen Nordseeküste die Mittel aus 10 Pegelstationen an:

MThw : rd. 15 cm Anstieg

MT1/2w : rd. 5 cm Anstieg

Daß die Watthöhe in dem Beispiel auf Abb. 5 nicht mit dem MThw, d. h. um 15 cm in 35 Jahren, gewachsen ist, ist ohne nähere Untersuchungen erkennbar. Mit einem (zufälligen) Wert $h_b = 5 \text{ cm}$ für $a = 34$ Jahre ist für den Küstenschutz ausschlaggebend, daß das MThw deutlich schneller als die Watthöhe gestiegen ist.

Die zahlreichen Beispiele in der grundlegenden Arbeit (Abb. 5, 8, 14, 17 bei SIEFERT, 1987), die letztlich $h_b \rightarrow 0$ für Zeiträume über 20 bis 35 Jahre liefern, bestätigen diese Aussagen.

4.2 Wattweg von Cuxhaven nach Neuwerk

Die mittleren Höhen auf den beiden auf Abb. 3 bezeichneten Trassen 1 (ab 1864) und 2 (ab 1913) zeigt Abb. 6 zusammen mit der gleichzeitigen Entwicklung der MThw und der MT1/2w in Cuxhaven. Deutlich wird dabei zunächst der generelle Anstieg der MThw um rd. 20 cm in den letzten 90 Jahren mit den angedeuteten Schwankungen der 3jährigen Mittel sowie – hervorgerufen durch ein Absinken der MTnw – das Verhalten der MT1/2w: Absinken von 1860 bis 1880, Ansteigen um rd. 20 cm von 1890 bis 1955, danach etwa verharrend.

Diese Entwicklung der mittleren Watthöhen scheint bis 1955 ähnlich wie diejenigen der MThw und/oder der MT1/2w zu verlaufen, um sich dann bis 1970 mit gegenläufigem Trend fortzusetzen und bis 1980 etwa ein Niveau zu halten.

Die Behandlung der Daten nach dem im KFKI-Projekt „MORAN“ entwickelten Verfahren erlaubt jedoch eine andere generelle Aussage. Dazu wurden die Umsatzhöhen h_u und die Bilanzhöhen h_b für die Trassen 1 (auf 28 Punkten) und 2 (auf 36 Punkten) für 20 bzw. 21 Kartenvergleiche ermittelt. Für die Ausgangsjahre zeigt die folgende Tabelle die Mittelwerte h_u und h_b sowie die zugehörigen C und s :

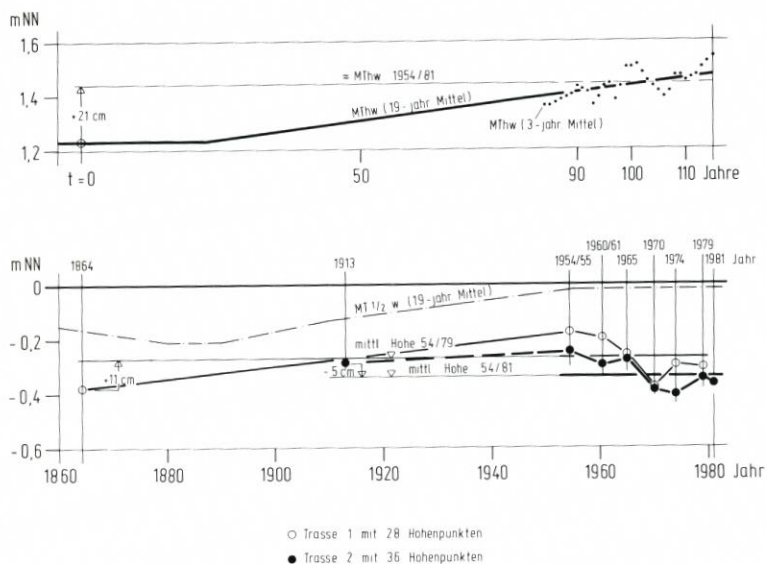


Abb. 6. MThw-, MT1/2w- und Wathhöhenentwicklung zwischen Cuxhaven und Neuwerk (Abb. 3) von 1864 bis 1981

Kartenvergleiche auf Trasse 1 (ab 1864) und Trasse 2 (ab 1913)

von	auf	Jahre	h_u cm	$C \pm$ cm	$s \pm$ cm	h_b cm	$C \pm$ cm	$s \pm$ cm
1864	1954/55	90,5	25,5	7,9	20,2	+ 20,8	8,6	25,2
	1960/61	96,5	30,7	11,0	28,1	+ 18,6	13,0	38,2
	1965	101	37,6	15,4	39,4	+ 12,3	18,5	54,3
	1970	106	37,8	19,4	49,8	+ 0,4	21,4	62,8
	1974	110	32,6	11,7	29,9	+ 8,4	14,8	43,6
	1979	115	32,0	14,3	36,7	+ 7,1	16,7	49,0
1913	1954/55	41,5	34,4	10,2	26,1	+ 4,2	14,8	43,4
	1960/61	47,5	37,3	11,7	29,9	- 1,0	16,4	48,2
	1965	52	29,1	9,4	24,0	- 0,1	12,9	37,9
	1970	57	27,7	7,6	19,6	- 10,4	10,8	31,9
	1974	61	27,8	10,5	26,8	- 11,6	12,6	37,1
	1979	66	23,1	7,3	18,6	- 6,0	9,9	29,0
	1981	68	25,6	9,4	24,0	- 7,8	11,7	34,4

Da es sich um Trassen auf hochliegendem, brandungsfreiem Watt mit Durchquerung von zwei Prielen handelt, war nach der grundlegenden Arbeit eine asymptotische Umsatzhöhe $\bar{h}_u$ zwischen 20 ± 4 cm (für brandungsfr. Watt) und 45 ± 13 cm (für eingeschlossene Priele) zu erwarten, allerdings näher an 20 als an 45 cm. Der Parameter a_0 sollte bei $4,0 \pm 1,0$ Jahre liegen. Abb. 7 enthält die berechnete Sättigungsfunktion

$$h_u = \bar{h}_u \cdot (1 - e^{-a/a_0}) = 30 \cdot (1 - e^{-a/4}) \pm 2,0$$

mit einer Standardabweichung der Einzelwerte von $\pm 5,4$ cm und einer Gültigkeit über 120 Jahre.

Obige Tabelle zeigt auch, daß die auf Abb. 7 verwendeten Mittelwerte Vertrauensbereiche aufweisen, die enger als ± 20 cm sind, dagegen erhebliche Streuungen der Einzelwerte auf den Trassen beinhalten.

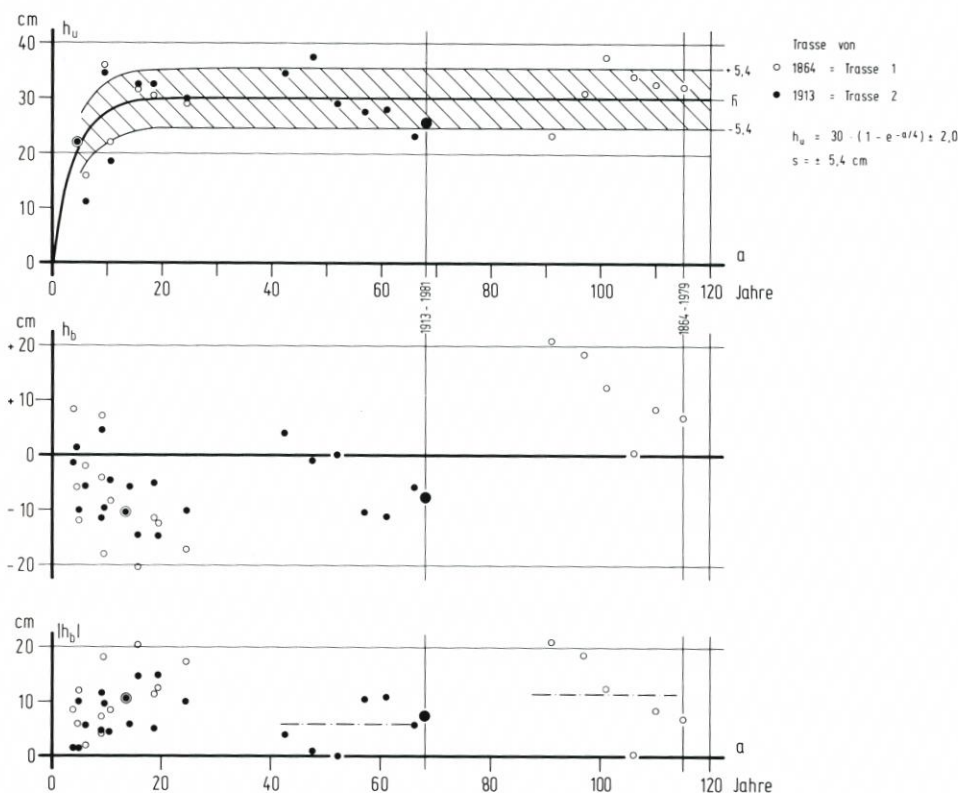


Abb. 7. Umsatzhöhen h_u und Bilanzhöhen h_b im Watt zwischen Cuxhaven und Neuwerk von 1864 bis 1981

Die teilweise hohen Streuungen der Einzelwerte hängen u.a. vom Zeitpunkt der Aufnahme ab. So können durchaus für den gleichen Punkt im Watt zwischen einer Aufnahme gleich nach dem Winter und einer Aufnahme vor dem nächsten Winter Sedimentablagerungen bis zu ~ 20 cm Höhendifferenzen bringen. Daneben bringen Prielverlagerungen auf Teilen der Trasse Höhenänderungen bis zu ± 2 m. Da bei den Auswertungen alle vergleichbaren Meßpunkte benutzt wurden, sind die großen Streuungen eine logische Konsequenz.

Die Tatsache, daß sich die Umsatzhöhen sämtlicher Kartenvergleiche* durch eine Sättigungsfunktion darstellen lassen, die praktisch für über 20 Jahre lange Vergleichszeiträume konstante h_u liefert, ist bemerkenswert. Denn daraus muß nach den Ausführungen in der grundlegenden Arbeit der Schluß gezogen werden, daß für den Datenzeitraum, also rd. 120 Jahre, im Mittel die Bilanzhöhe h_b bei Null liegen muß und damit keine nennenswerten

* einige kurzfristige Vergleiche sind zur Wahrung der Übersicht fortgelassen

säkularen Veränderungen stattgefunden haben können! Dies zeigen dann auch die unteren beiden Graphiken der Abb. 7:

- Es wurden Bilanzhöhen h_b zwischen -20 cm und +20 cm ermittelt, die Höchstwerte bei $a = 15$ und $a = 90$ Jahren;
- die Vergleiche über Zeiträume bis 25 Jahre zeigen meist Erosion, über 40 bis 50 Jahre Stabilität, über 55 bis 70 Jahre Erosion, über 90 bis 115 Jahre meist Sedimentation; daraus ist kein Trend ableitbar; es handelt sich hier lediglich um streuende Werte;
- die Beträge der Bilanzhöhen für $a = 40$ bis 115 Jahre sind nicht größer als diejenigen für Vergleichszeiträume bis 25 Jahre;
- der von allen sicherste Kartenvergleich (weil auf identischen Wechsellpunkten in 1913 und 1981 vorgenommen) fügt sich nahtlos in das Gesamtbild mit

$$h_u = 25,6 \text{ cm}$$

$$h_b = -7,8 \text{ cm}$$

$$a = 68 \text{ Jahre,}$$

ohne daß hieraus etwa auf einen säkularen Abtrag geschlossen werden darf.

5. Schlußfolgerungen

Die Analyse kleiner Einheiten von je 1 km^2 Größe im Rahmen des KFKI-Projektes „MORAN“ sowie ein Beispiel in dieser Arbeit zeigen, daß sich das hochliegende Watt vor der Cuxhavener und Dithmarscher Küste säkular innerhalb der letzten 20 bis 35 Jahre höhenmäßig nicht verändert hat. Gleichzeitig sind jedoch das MThw und großenteils auch das MT1/2w angestiegen.

Auswertungen von Nivellements über das Watt von Cuxhaven nach Neuwerk aus den letzten 120 Jahren erlauben den Schluß, daß sich zumindest in diesem Gebiet die mittlere Watthöhe praktisch nicht geändert hat, während das MThw um gut 20 cm anstieg.

Daraus läßt sich für den Küstenschutz der kommenden Jahrzehnte folgern, daß bei einem weiteren (und möglicherweise schnelleren) MThw-Anstieg nicht von einem „Mitwachsen“ des Wattes ausgegangen werden kann. Dies wiederum könnte ernste Folgen haben, wie auf Abb. 8 skizziert ist:

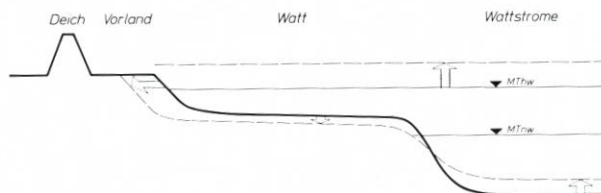


Abb. 8. Denkbare Höhenentwicklung im Küstenvorfeld bei schnell steigendem MThw

Durch MThw-Anstieg wird das Deichvorland stärker als heute belastet, was zu Versalzung und Abbruch führt; zunehmender Energieeintrag durch Seegang und Strömungen führt zu Erosionen im Watt und Veränderungen des Biotops; das erodierte Material lagert sich in Wattströmen und vor dem Wattsockel ab. Eine wichtige Aufgabe der Gegenwart ist es, diese möglichen Entwicklungen durch Meßprogramme zu erfassen und rechtzeitig für Reaktionen gewappnet zu sein.

6. Schriftenverzeichnis

- FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstiegs an der deutschen Nordseeküste. Wasser und Boden, H. 9, 1986.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 83, 1984.
- KÜHN, R. u. SIEFERT, W.: Leben und wissenschaftliches Werk von Hugo Lentz. Hamb. Küstenf., H. 40, 1979.
- LASSEN, H., LINKE, G. u. BRAASCH, G.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste. Zeitschr. f. Vermessungsw. und Raumordng., H. 2, 1984.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanz-Analysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht – Grundlagen und erste Auswertungen. Die Küste, H. 45, 1987.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Vermessungsarbeiten im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 2, 1968.

7. Symbolverzeichnis

a	Vergleichszeitraum (Zeitdiff. zwischen zwei topogr. Aufnahmen)	Jahr
a_0	Zeitraum, in dem $\bar{h}_u$ bei gleichsinniger, linearer Veränderung der Topographie der Teilflächen einer Einheit erreicht würde	Jahr
h_b	mittlere Bilanzhöhe einer Fläche	m
h_u	mittlere Umsatzhöhe einer Fläche	m
$\bar{h}_u$	asymptotischer Grenzwert von h_u	m
h'	Höhenänderung einer Teilfläche von 1 ha Größe	m
m	Vielfaches von a_0 , bei dem $h_b = 0$ angenommen werden kann (s. Abb. 1)	–
s	Standardabweichung (des Einzelwertes)	m
C	Vertrauensbereich (des Mittelwertes)	m