

Stabilitätsverhalten von Watteinzugsgebieten

Von Eberhard Renger und Hans-Werner Partenscky

Inhalt

I. Einleitung und Problemstellung	73
II. Das Watteinzugsgebiet	75
III. Berechnungsverfahren für die Vertikalstruktur der Morphologie eines Watt-einzugsgebietes	
1. Voraussetzungen	76
2. Niveaulächen-Verteilung	77
3. Volumen-Verteilung	79
4. Mathematische Ausgleichsfunktion für die vertikale Volumen-Struktur	81
5. Beispiel für die Berechnung des Volumens eines Watteinzugsgebietes	82
IV. Berechnung der Watteinzugsgebiete nach Einbau der Dämme und Hafenanlagen für den geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn	
1. Vorbemerkungen	82
2. Berechnungsverfahren	83
V. Schlußbetrachtung	84
VI. Schriftenverzeichnis	84

Summary

This contribution deals with the morphologic examinations and calculations for a deep-water harbour which is to be constructed in the tidal flats of the Elbe estuary near the North Sea islands of Scharhörn and Neuwerk. An attempt is made to examine the stability of tidal channels (gullies) and tidal flats which may be disturbed to a greater or lesser extent by the various proposals for the connecting dike between the industrial area near the harbour and the coastline.

The underlying logic for the determination of the equilibrium of the flats and the quantitative solution for the sand-balance is as follows:

It has been shown in several empirical investigations that the increase of the relative volume of the tidal basin (V/V_{MLW}), referenced to the gully volume for MLW, can be determined as a simple function to the base (a) logarithm of the geodetic elevation (z^) between MLW and any higher contour level up to MHW. Furthermore it can be shown that (V_{MLW}) is also a function of the area of the tidal basin (E).*

The base (a) has been related to the size of the tidal area (E), because this area is subject to considerable modification by offshore structures such as dikes and causeways.

A comparison of the volumes for the situation before and after construction can then be made. This in turn leads to the sand balance which can be applied to the given and expected volumes of the tidal basin, so that the sand removed or added can be predicted.

I. Einleitung und Problemstellung

Das Problem des Sand- und Schwebstofftransportes im Tidegebiet gehört zu den komplexesten Vorgängen in der Strömungsmechanik und im Küsten-Ingenieurwesen, weil in ihm die nicht-stationären und ungleichförmigen Bewegungen des Wassers in ihrer Wechselwirkung auf eine bewegliche Sohle verschiedener Korndurchmesser erfaßt und möglichst in geschlossener Form behandelt werden müssen. Gerade bei aktuellen Anlässen, wie etwa

den Planungsarbeiten für den Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn der FREIEN UND HANSESTADT HAMBURG, stellt sich diese Frage in aller Deutlichkeit, wenn es darum geht, die hydrologischen und morphologischen Veränderungen im Wattengebiet zu beurteilen, die infolge baulicher Eingriffe in den bestehenden Zustand zu erwarten sind.

Bei Durchsicht des vorhandenen Schrifttums kann festgestellt werden, daß zur Ermittlung des hydrodynamisch-morphologischen Gleichgewichts eines Wateinzugsgebietes bislang keine geeigneten Ansätze vorliegen. Hydraulische Modelle mit fester Sohle als bewährte Hilfsmittel des wasserbaulichen Versuchswesens geben nur Auskunft über die hydraulischen Veränderungen unmittelbar nach einem baulichen Eingriff in den bestehenden Gleichgewichtszustand und werden demzufolge mit einer annähernd „richtigen“ Morphologie gefahren. Die morphologischen Änderungen während der relativ kurzen Bauzeit sind i. a. nur örtlicher Natur im Vergleich zu den über Jahre und Jahrzehnte andauernden großräumigen Veränderungen bis zum Erreichen des neuen Gleichgewichtszustandes.

Demgegenüber weisen hydraulische Modelle mit beweglicher Sohle und erst recht mathematische Ansätze für den Feststofftransport z. Z. noch keine hinreichende Naturähnlichkeit auf, um zuverlässige quantitative Voraussagen über die zukünftige Entwicklung von Wattengebieten treffen zu können.

Da es bisher nicht gelang, physikalisch exakte Gesetzmäßigkeiten allein aus den hydrodynamischen Kraftwirkungen für die Wechselbeziehungen zwischen dem instationär strömenden Wasser und dem Bodenrelief der Wattgebiete abzuleiten, muß auf empirische Methoden zurückgegriffen werden. Diese letzteren setzen umfangreiche Informationen aus der Natur, insbesondere aber genaues Kartenmaterial voraus, um Gesetzmäßigkeiten der morphologischen Strukturveränderungen erfassen zu können (KNOP, 1963; GÖHREN, 1970).

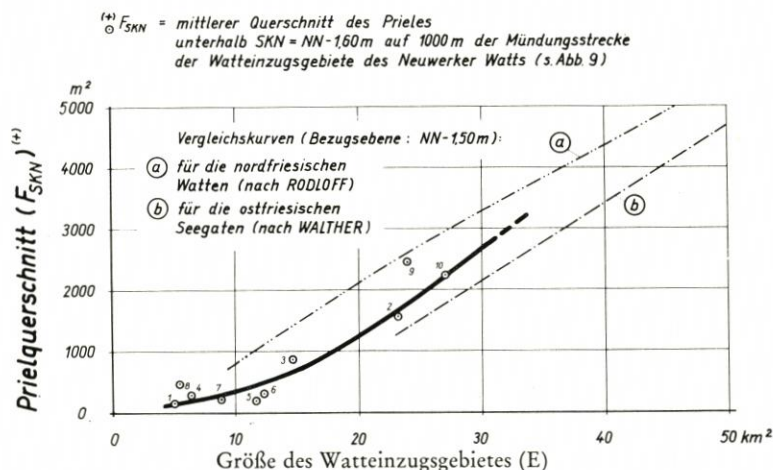


Abb. 1. Durchflußquerschnitte (F) für Bezugsebenen bei etwa MTnw in Abhängigkeit von der Größe des Wateinzugsgebietes (E)

Übereinstimmend haben verschiedene Untersuchungen von Gleichgewichtszuständen im Tidegebiet gezeigt, daß eine eindeutige Beziehung (Abb. 1) zwischen einem charakteristischen Durchflußquerschnitt und dem zugehörigen stromaufwärts gelegenen Tidevolumen bzw. der Größe des Wateinzugsgebietes besteht (RODLOFF, 1970; WALTHER, 1972; GIESE, 1971; O'BRIEN, 1969).

Wird also das Wateinzugsgebiet und damit seine Tidewassermenge durch bauliche Eingriffe künstlich vergrößert oder verkleinert, so wird sich auch der Verlauf des Durchflußquerschnittes entlang des Einzugsgebietes entsprechend verändern, d. h. sich dem neuen Gleichgewichtszustand anpassen (PFEIFFER, 1969).

Alle bislang beschriebenen Ansätze gehen von der Vorstellung aus, die hydrodynamisch-morphologischen Wechselbeziehungen als Variante des klassischen Durchflußproblems (Kontinuitätsgesetz) zu erfassen (HENSEN, 1971; O'BRIEN, 1969; RODLOFF, 1970; WALTHER, 1972). Dabei werden brauchbare Ergebnisse erzielt, wenn eindeutige Begrenzungen des Flutraumes und damit auch die Ermittlung der Wassermenge einer Tide (T_f) möglich sind. Die Durchflußquerschnitte werden dabei als reine Flächenwerte ohne Berücksichtigung der mittleren Tiefe und Breite für Bezugshorizonte unter dem Niveau der halben Tide angegeben. Die Verhältnisse in den höher gelegenen Bereichen des jeweiligen Wateinzugsgebietes blieben dabei unberücksichtigt.

II. Das Wateinzugsgebiet

An der zunächst rein morphologischen Betrachtungsweise und dem Bezug ihrer Kenngrößen auf die Größe des Wateinzugsgebietes (E) wird in dem im folgenden entwickelten

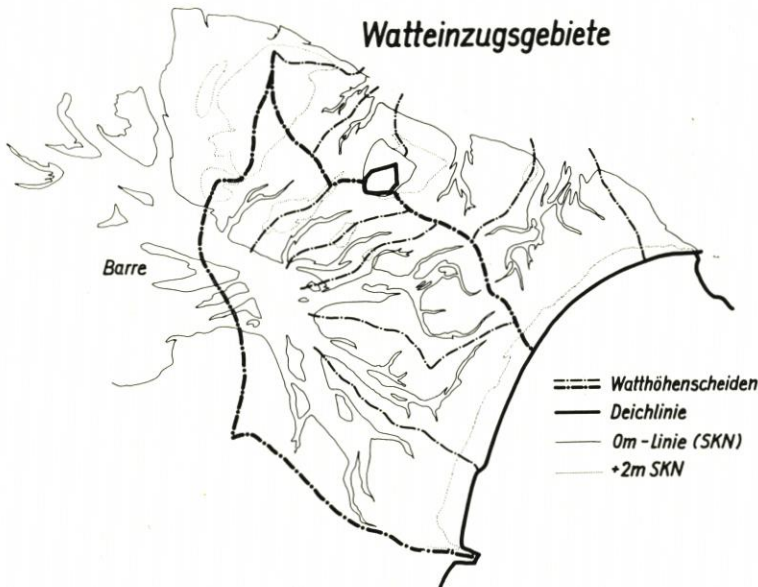


Abb. 2. Morphologische Gliederung der Watten in Wateinzugsgebiete – hier am Beispiel des Neuwerker Watts (s. auch Abb. 9).

Verfahren zweckmäßigerweise festgehalten. Die Watten werden dabei derart in Wateinzugsgebiete (WEG) unterteilt, daß jedem Wasserlauf (Priel oder Wattstrom) die umgebenden Fluträume bis zur Uferlinie oder bis zur topographischen Wathöhenscheide zugeordnet werden (Abb. 2). Diese definierten Grenzen eines Wateinzugsgebietes können in fast allen Fällen aus der Wattgrundkarte abgelesen werden (KNOP, 1963; DOLEZAL, 1972).

Ein gewisser Spielraum verbleibt zunächst für die seeseitige Begrenzung. Insbesondere läßt der zerlappte Verlauf der Tiefenlinien an der Prielmündung oft auf stärkere morphologische Umlagerungen schließen, als es entlang der Wattkante mit ihrem gestreckten Verlauf der Fall ist. Seeseitig wurden die Watteinzugsgebiete bei den Auswertungen mit der SKN-Linie¹⁾ und ihrer geradlinigen Verbindung über die Prielmündung begrenzt.

In Anlehnung an die vorangestellten Ausführungen wird hier nochmals auf die morphologischen Besonderheiten der Wattströme und Priele hingewiesen. Mit ihren zum Teil stark gegliederten Rinnensystemen und sehr unterschiedlichen Durchflußquerschnitten unterscheiden sie sich grundsätzlich von den Verhältnissen in einem Tidefluß mit richtungsstabilen Flut- und Ebbebeströmungen ohne nennenswerte, im Verlauf einer Tide trockenfallende Vorländer (Abb. 3). Bei höheren Wasserständen findet die Ein- und Ausströmung nicht nur durch die Priele statt, sondern auch von der Wattkante her über das Watt. Der Leistungsquerschnitt variiert deshalb im allgemeinen beträchtlich, so daß der Gleichgewichtszustand nach den oben genannten Berechnungsansätzen nicht hinreichend erfaßt werden kann.

Im Vordergrund des nachfolgend beschriebenen Verfahrens stehen die Bemühungen, die von RODLOFF geäußerten Einschränkungen wenigstens teilweise abzubauen. Darüber hinaus war es das Ziel der Untersuchungen, ein Verfahren zu entwickeln, das quantitative Aussagen über die bei Veränderung der Größe des Watteinzugsgebietes zu erwartenden Sandumlagerungen (Sandbilanzen) ermöglicht. Es mußten deshalb die ufernahen Bereiche und die hohen prielfernen Wattengebiete mit in den Untersuchungsbereich einbezogen werden.

III. Berechnungsverfahren für die Vertikalstruktur der Morphologie eines Watteinzugsgebietes

1. Voraussetzungen

Aus der Vielzahl der Parameter (Größe des Watteinzugsgebietes, Tidehub, mittlerer Korndurchmesser, Strömungsgeschwindigkeit, Windeinflüsse, Triftströmungen usw.), die für die hydrodynamisch-morphologischen Wechselbeziehungen in einem Watteinzugsgebiet von Bedeutung sein können, wurden nach sorgfältiger Abschätzung ihres möglichen Einflusses nur diejenigen Größen ausgewählt, die den maßgebenden Einfluß zu haben scheinen. Die Korngrößenverteilung des Wattbodens konnte (wegen des teilweisen Fehlens von Naturmessungen) noch nicht mit berücksichtigt werden. Dabei kann allerdings vorausgesetzt werden, daß die Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials in den untersuchten Watteinzugsgebieten der inneren Deutschen Bucht annähernd die gleiche ist.

Das gleiche gilt auch für den Tidehub, der im Bereich der untersuchten Watteinzugsgebiete die annähernd gleiche Größenordnung aufwies. Ein direkter Einfluß des Tidehubes konnte bei dem hier angewendeten Verfahren deshalb bisher nicht nachgewiesen werden.

Als charakteristische hydrologische Kennwerte wurden die Mittelwerte der Tideniedrigwasserstände (MTnw) am jeweiligen Prielanfang an der seeseitigen Begrenzung der Watteinzugsgebiete mit in die Untersuchung einbezogen.

Zum Nachweis der Allgemeingültigkeit der nachfolgend aufgestellten Beziehungen

¹⁾ SKN = Seckarten-Null.



Abb. 3. Luftbildschrägaufnahme des Neuwerker Watts. Blickrichtung vom Sahlenburger Strand an der niedersächsischen Küste in Richtung Neuwerk und Scharhörn. Nachdruck aus: GÖHREN, H.: Hydrodynamische und küstenmorphologische Probleme bei der Planung des Tiefwasserhafens Neuwerk/Scharhörn. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 33. Band 1972/73, 1973. Mit freundlicher Genehmigung der Schriftleitung der Hafenbautechnischen Gesellschaft und des Verfassers, Herrn Dr.-Ing. H. GÖHREN, Leiter der Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk. – Aufnahme: Vermessungsbüro N. RÜPKE, Hamburg; Freigabe: LAH, 1250/71)

für die Watteinzugsgebiete im norddeutschen Küstenraum wurden insgesamt 22 Wattstrom-Systeme ausgewertet und für die nachfolgenden Diagramme verwendet.

2. Niveauflächen-Verteilung

Nach der Bereichseinteilung der Watteinzugsgebiete in den Wattgrundkarten wurden die durch die geodätischen Höhenlinien und die Grenzen des Watteinzugsgebietes umrissenen „Niveauflächen“ planimetrisch ermittelt. Die mit der Höhe stetig bis auf die Gesamtgröße (E) des Watteinzugsgebietes anwachsenden Niveauflächenwerte (O) und ihre Zuordnung zur geodätischen Höhe als Ordinate wurden zunächst als Eingangswerte für die morphologischen Untersuchungen verwendet. Dabei wurden die jeweiligen Flächen-

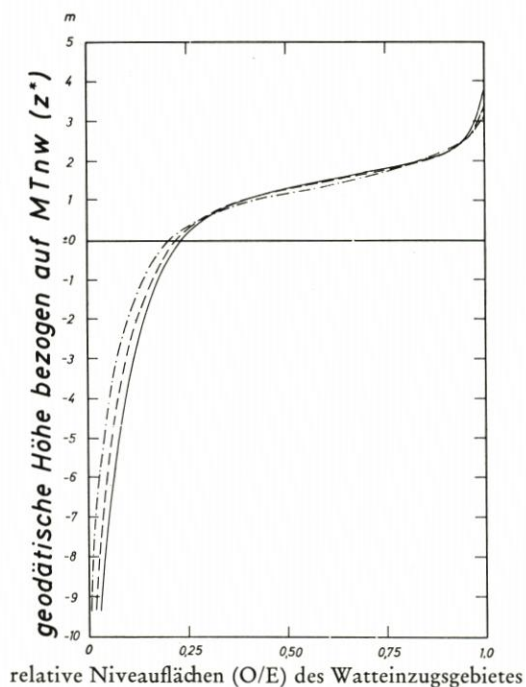


Abb. 4. Relative Darstellung der Niveaulächen $O/E = f(z^*)$ (E = Gesamtgröße des Wateinzugsgebietes) in Abhängigkeit von der geodätischen Höhe (z^*), bezogen auf MTnw am seeseitigen Rand des Wateinzugsgebietes

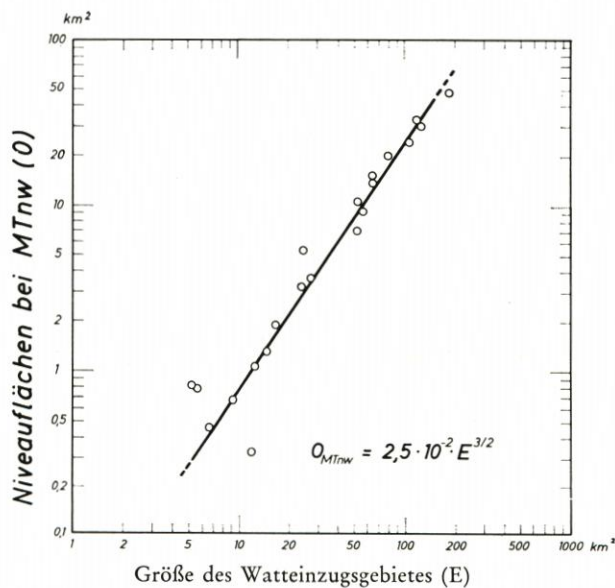


Abb. 5. Niveaulächen (O_{MTnw}) für das Bezugsniveau MTnw in Abhängigkeit von der Größe des Wateinzugsgebietes (E) (O und E in km^2)

werte (O) auf die Gesamtfläche (E) des Watteinzugsgebietes bezogen und als Verhältnisswerte (O/E) in Abhängigkeit von der geodätischen Höhe (Flächenzunahmefunktion) dargestellt (Abb. 4).

Die Gesetzmäßigkeit der Flächenzunahmefunktionen der untersuchten Wattbereiche wird am Beispiel der Niveauläche bei MT_{Nw} nachgewiesen (Abb. 5). Sie ergibt sich in diesem Fall als Funktion der Gesamtgröße des Watteinzugsgebietes (E) zu

$$O_{MTNw} = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot E^{3/2} \quad (1)$$

wobei (O) und (E) in (km²) einzusetzen sind.

Bei Wahl anderer Bezugshorizonte läßt sich eine ähnliche Gesetzmäßigkeit nachweisen.

Bei den Auftragungen der Abbildung 5 (sowie auch bei den Darstellungen auf den nachfolgenden Diagrammen) zeigen einige der Prielsysteme eine Abweichung von der allgemeinen Tendenz der morphologischen Prägung der übrigen Wattströme. Die Ursache hierfür ist in den verschiedenartigen hydrologischen Randbedingungen zu vermuten.

3. Volumen-Verteilung

Bei dem verwendeten Verfahren geht es ferner darum, das Fassungsvermögen des jeweiligen Watteinzugsgebietes quantitativ zu bestimmen. Den dreidimensionalen hydrodynamischen Vorgängen wird dabei durch eine volumenmäßige Erfassung der morphologischen Struktur besser Rechnung getragen, als dies bei einer zwei- oder eindimensionalen

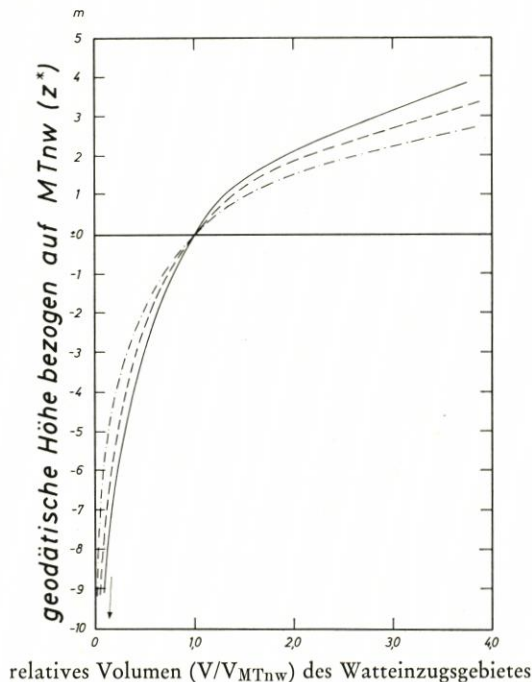


Abb. 6. Relative Darstellung des Volumens $V/V_{MTNw} = f(z^*)$ (V_{MTNw} = Volumen des Watteinzugsgebietes bei MT_{Nw}) in Abhängigkeit von der geodätischen Höhe (z^*), bezogen auf MT_{Nw} am seeseitigen Rand des Watteinzugsgebietes

Betrachtungsweise der Fall wäre. Diese Überlegung deckt sich mit dem bereits von RODLOFF geäußerten Gedanken, durch verschiedene Funktionsscharen in jeder Bezugsebene des Tidehubes zu einer besseren Erfassung der Verhältnisse innerhalb des Watteinzugsgebietes zu gelangen.

Zur Ermittlung des Volumens eines Watteinzugsgebietes wurden die Teilvolumen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Niveauflächen entsprechend ihrem Höhenunterschied bestimmt. Die Teilvolumen wurden dann vom tiefsten Punkt an aufwärts schrittweise aufsummiert und über die Höhe bis MThw als Summenkurve (Füllungskurve) aufgetragen. Für die dimensionslose Darstellung wurde zweckmäßigerweise MTnw am Prielanfang als Bezugshorizont ($z^* = 0$) gewählt (Beispiele Abb. 6).

Bei MTnw ($z^* = 0$) wird $V/V_{MTnw} = 1$. Die Abhängigkeit der Volumengröße der untersuchten Prielsysteme von der Größe des Watteinzugsgebietes (E) ist analog zu den Niveauflächenfunktionen (Abb. 5) für das Volumen bei MTnw in Abbildung 7 dargestellt.

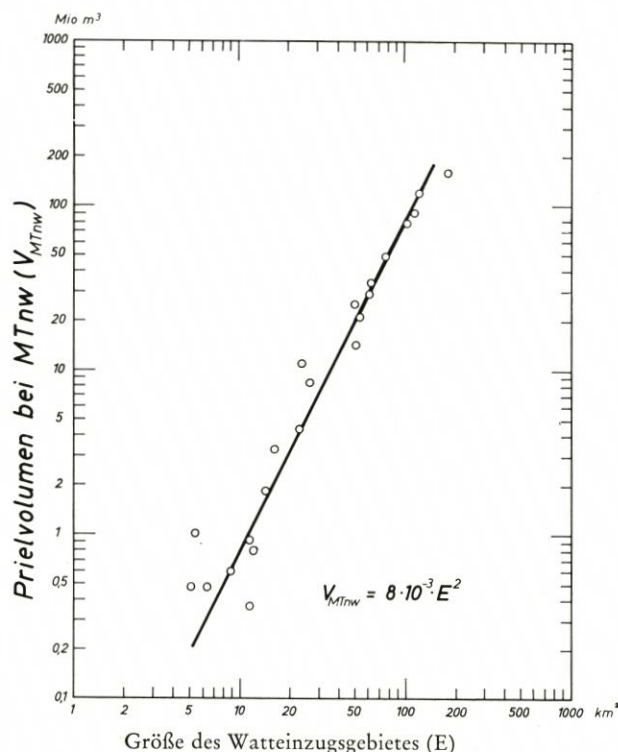


Abb. 7. Prielvolumen (V_{MTnw}) bei MTnw am seeseitigen Rand des Watteinzugsgebietes in Abhängigkeit von der Größe des Watteinzugsgebietes (E) (V_{MTnw} in Mio. m^3 , E in km^2)

Die Streuung der ermittelten Werte ist dabei, ähnlich wie bei der Auftragung der zweidimensionalen Flächenwerte (Abb. 5), relativ gering. Die Tendenz der ermittelten Werte für die Prielvolumen bei MTnw in Abhängigkeit von der Größe des Watteinzugsgebietes (E) kann durch eine Potenzfunktion der folgenden Form angenähert werden:

$$V_{MTnw} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot E^2, \quad (2)$$

wobei (V_{MTnw}) in (Mio. m^3) und (E) in (km^2) einzusetzen sind.

4. Mathematische Ausgleichsfunktion für die vertikale Volumen-Struktur

Unabhängig von der gewählten mathematischen Näherungsfunktion verbleibt die Forderung, die relative Volumenzunahme V/V_{MTnw} in Abhängigkeit von der Gesamtgröße des Watteinzugsgebietes (E) darzustellen. Der Verlauf der untersuchten Einzelkurven (z. B. Abb. 6) wurde in erster Näherung durch eine logarithmische Funktion der folgenden allgemeinen Form beschrieben:

$$z^* = \log_{\bar{a}} (V/V_{MTnw}), \quad (3)$$

die sich besonders gut im Bereich $z^* > 0$ den ermittelten Volumenfunktionen anpaßt. Für negative z^* -Werte ist die gewählte Näherungsfunktion auf Grund ihres asymptotischen Verhaltens weniger gut geeignet. Da es sich bei den Volumen-Funktionen jedoch um eine Summenkurve handelt, kann der Volumenbereich für $z^* \leq 0$ durch das ohnehin nach Gleichung (2) bekannte Prielvolumen für MTnw (Abb. 7) berechnet werden.

Die logarithmische Näherungsfunktion der Gleichung (3) beschreibt somit die Volumenzunahme des Watteinzugsgebietes mit zunehmender Höhe oberhalb MTnw. Indirekt lassen sich daraus auch die zu den verschiedenen Höhenstufen gehörenden Größen der Niveauflächen wieder herleiten.

Für jedes Watteinzugsgebiet ergibt sich entsprechend dem Kurvenverlauf eine unterschiedliche logarithmische Basis ($\bar{a}$) für die Näherung nach Gleichung (3), die ihrerseits wieder eine Funktion der Größe des Watteinzugsgebietes (E) ist.

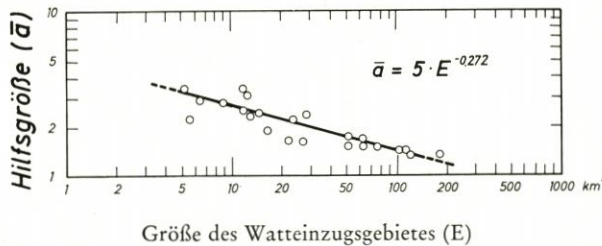


Abb. 8. Hilfsgröße ($\bar{a}$) als dimensionsloser Parameter der logarithmischen Ausgleichsfunktion für das relative Volumen des Watteinzugsgebietes zwischen MTnw und etwa MThw in Abhängigkeit von der Größe des Watteinzugsgebietes (E)

Die ermittelten Hilfsgrößen ($\bar{a}$) wurden in Abhängigkeit von der Gesamtgröße des Watteinzugsgebietes (E) für dieselben Wattstromsysteme, wie bereits vorher verwendet, auf Abbildung 8 aufgetragen. Die Auftragung der funktionellen Abhängigkeit $\bar{a} = f(E)$ zeigt eine eindeutige generelle Tendenz, die sich durch eine Potenzfunktion der folgenden Form annähern läßt (Abb. 8):

$$\bar{a} = 5 \cdot E^{-0,272}, \quad (4)$$

Die Auftragungen der Abbildungen 5, 7 und 8 zeigen, daß die Zunahme des Prielvolumens (V) mit der Tiefe (z^*) eine eindeutige Funktion der Größe des Watteinzugsgebietes (E) ist. Bei Verwendung der Gleichungen (2), (3) und (4) läßt sie sich wie folgt darstellen:

$$V = V_{MTnw} \cdot \bar{a}^{z^*} = 0,008 \cdot E^2 (5 \cdot E^{-0,272})^{z^*} \quad (5)$$

d. h.

$$V = f(E, z^*). \quad (6)$$

Damit ist die Möglichkeit gegeben, bei Veränderung der Größe eines Watteinzugsgebietes (E) durch bauliche Maßnahmen zu einer Abschätzung der morphologischen Veränderungen in diesem Wattbereich und damit auch zu einer quantitativen Voraussage der zu erwartenden Sandumlagerungen zu gelangen.

5. Beispiel für die Berechnung des Volumens eines Watteinzugsgebietes

Um die Anwendung des entwickelten Verfahrens zu veranschaulichen, soll dasselbe auf das Watteinzugsgebiet Buchtloch/Roßhaken des Neuwerker Watts im folgenden angewendet werden (Abb. 9).

Die Gesamtgröße des Watteinzugsgebietes beträgt $E = 23,252 \text{ km}^2$, MT_{nw} am Prielfang = rd. - 1,52 mNN. Nach Gleichung (4) ergibt sich die Hilfsgröße zu

$$\bar{a} = 5 \cdot E^{-0,272} = 2,13$$

und nach Gleichung (2) das Prielvolumen bei MT_{nw} zu

$$V_{MT_{nw}} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot E^2 = 4,33 \text{ Mio m}^3.$$

Bei Rechnung für das Niveau von

$$H = + 3,00 \text{ m SKN} = + 1,40 \text{ mNN}$$

folgt mit

$$z^* = H - MT_{nw} = + 2,92 \text{ m}$$

für das WEG-Volumen

$$V = V_{MT_{nw}} \cdot \bar{a} \cdot z^* = 39,50 \text{ Mio m}^3.$$

Die aus der Planimetrierung des vorhandenen Kartenmaterials exakt ermittelten Werte für das Prielvolumen bei MT_{nw} und + 1,40 mNN betragen:

$$\begin{aligned} V_{MT_{nw}} &= 4,41 \text{ Mio m}^3 \text{ und} \\ V_{+ 1,40 \text{ mNN}} &= 42,11 \text{ Mio m}^3. \end{aligned}$$

Die Fehler bei der Ermittlung der WEG-Volumen nach dem entwickelten Verfahren (s. Gleichungen [2] und [5]) gegenüber dem exakten Wert betragen bei MT_{nw} 1,8 % und bei $H = + 1,40 \text{ mNN}$ 6,2 %. Die Genauigkeit der empirischen Berechnung kann deshalb als ausreichend angesehen werden.

IV. Berechnung der Watteinzugsgebiete nach Einbau der Dämme und Hafenanlagen für den geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn

1. Vorbemerkungen

Bislang wurden die Ergebnisse der Auswertungen von vorhandenen Wattgrundkarten auf ihre Gesetzmäßigkeiten hin untersucht und daraus empirische Beziehungen zwischen den morphologischen Kennwerten ($O_{MT_{nw}}$, $V_{MT_{nw}}$, $\bar{a}$) und der Gesamtgröße eines Watteinzugsgebietes (E) abgeleitet. Im folgenden soll nun mit Hilfe der ermittelten Gesetzmäßigkeiten der Versuch unternommen werden, durch eine Abschätzung der Volumenänderungen der nach Einbau der Dämme und Hafenanlagen des geplanten Tiefwasserhafens Neuwerk/Scharhörn betroffenen Watteinzugsgebiete zu einer Aussage über die zu erwartende *Sandbilanz* zu kommen.



Abb. 9. Wattenzeugsgebiete des Neuerker Watts im heute bestehenden Zustand (Morphologie von 1966) und ihre teilweise neue Begrenzung durch die im FRANZIUS-INSTITUT untersuchten Dammbauten für den durch die FREIE UND HANSESTADT HAMBURG geplanten Tiefwasserhafen Neuerker/Scharhorn

Für die im Grundriß künstlich veränderten Watteinzugsgebiete kann vorausgesetzt werden, daß dieselben wattenbildenden Parameter und Einflüsse auch weiterhin gültig sind. Insbesondere ist ein ausreichender Sandvorrat in der näheren Umgebung der künstlichen Veränderung die Voraussetzung für eine entsprechende morphologische Umbildung des betroffenen Wattbereichs.

Über die Zeitspanne, die erforderlich ist, um einen neuen Gleichgewichtszustand in morphologischer Hinsicht zu erreichen, lassen sich bislang keine Angaben machen. Dergleichen können Übergangsstadien während der Bauzeit nicht abgeschätzt werden.

In der nachfolgenden Berechnung wurde die Morphologie der Wattgrundkarten von 1966 der sich nach Fertigstellung der Bauwerke wieder im hydrodynamisch-morphologischen Gleichgewicht befindlichen, veränderten Watten-Morphologie gegenübergestellt. Aus den Differenzbeträgen der Volumen lassen sich quantitative Aussagen über die zu erwartenden Sandumlagerungen treffen (KNOP, 1963).

2. Berechnungsverfahren

Der Schwerpunkt der Berechnungen liegt in der Ermittlung der Sandbilanzen nach Veränderung des jeweiligen Watteinzugsgebietes.

Nach Vorgabe der Größe des Einzugsgebietes (E) läßt sich sein Volumen nach Gleichung (5) direkt bestimmen. Bei Zugrundelegung der durch die baulichen Maßnahmen veränderten Größe des Einzugsgebietes (E) ergeben sich über eine Bilanz aller gegenüber dem Ausgangszustand veränderten Volumenteile die fehlenden oder überschüssigen Sandmengen, deren Umlagerung erforderlich wird, um einen neuen Gleichgewichtszustand zu erreichen.

Die meisten Niveauflächen-Funktionen haben etwa bei MThw bereits ihren Grenzwert erreicht (s. Abb. 4), der durch die Gesamtgröße des Watteinzugsgebietes (E) bestimmt ist. Für alle darüber liegenden Höhenkoten ist keine Änderung mehr zu erwarten, so daß die Volumenermittlung für ein fest gewähltes Niveau in Höhe des MThw hinreichend genau vorgenommen werden kann.

Die Volumenbestimmung der Watteinzugsgebiete wurde, soweit möglich, nach Gleichung (5) vorgenommen. Abgeschnittene Prielausläufer (z. B. der Till) und aufgespülte Bereiche (Hafenfläche und abgedämmter Bereich südlich des Dammes D, Abb. 9) konnten dagegen nur aus den Ergebnissen der Planimetrierung in die Volumenbilanz einbezogen werden.

Für die Untersuchungen wurden die Priele mit ihren Watteinzugsgebieten zu drei größeren Teilbereichen zusammengefaßt (Abb. 9):

- I. Bereich nordöstlich der Insel Neuwerk und der Dammtrasse A bzw. B;
- II. Bereich nordwestlich der Insel Neuwerk und der Dammtrasse A bzw. B;
- III. Bereich des jeweils um die nördlichen Prielausläufer verminderten Einzugsgebietes der Till.

Es wurden insgesamt vier Varianten für die Trassenführungen in der oben beschriebenen Weise untersucht. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Mit den Varianten C und insbesondere D sind Linienführungen für die Dammtrassen gewählt worden, die in den nördlichen Watteinzugsgebieten, abgesehen von geringfügigen internen Umlagerungen, nahezu unveränderte morphologische Verhältnisse erwarten las-

Tabelle 1

Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse für die Sandbilanzen bei den vier untersuchten Varianten A bis D der Dammtrassenführung

		Teilbereiche		
		I	II	III
Variante A	Fläche	51,581	27,222	87,900
	Sandbilanz	— 7	— 10	+ 43
Variante B	Fläche	43,896	29,702	93,105
	Sandbilanz	— 4	— 12	+ 38
Variante C (= B + C)	Fläche	43,896	7,301	93,105
	Sandbilanz	— 4	+ 3,5	+ 38
Variante D (= B + C + D)	Fläche	40,134	7,301	93,105
	Sandbilanz	+ 1	+ 3,5	+ 38
Flächen in km ²			Erosion:	—
Sandbilanzen in Mio m ³			Sedimentation:	+

sen, da die Größe der Watteinzugsgebiete weitgehend unverändert bleibt. In der Till muß dagegen in jedem Fall mit einer Schrumpfung gerechnet werden.

V. Schlußbetrachtung

In der vorliegenden Abhandlung wurde ein empirisches Verfahren zur näherungsweise Berechnung von Gleichgewichtszuständen der Morphologie von Watteinzugsgebieten entwickelt.

Von der bisher üblichen zweidimensionalen Erfassung des Prieles oder Wattstromes (Querschnittsbetrachtung) wurde zu einer räumlichen (dreidimensionalen) Erfassung des Watteinzugsgebietes übergegangen. Für die formbeschreibenden Größen der Niveauflächen und des Volumens (bei MTnw an der seeseitigen Begrenzung des Watteinzugsgebietes) und des in der Vertikalen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten veränderlichen Volumens konnten bei vorerst recht einheitlichem Tidehub von etwa 3 m empirische Beziehungen zur Größe des Watteinzugsgebietes (E) in Form von Potenzfunktionen hergeleitet werden.

Aus den Differenzbeträgen der Volumina bei den heute bestehenden Verhältnissen und den nach baulichen Eingriffen zu erwartenden Volumina des neuen Gleichgewichtszustandes lassen sich quantitative Aussagen über die zu erwartenden Sandumlagerungen treffen.

Eine Verallgemeinerung der vorliegenden Ergebnisse ist erst dann zulässig, wenn die Einflüsse weiterer wattbildender Parameter noch mit in die Untersuchungen einbezogen werden. Hierzu gehören vor allem charakteristische Größen, die die Beschaffenheit des Oberflächensediments (z. B. mittlerer Korndurchmesser) beschreiben, sowie der Einfluß des Tideverlaufes.

VI. Schriftenverzeichnis

- DOLEZAL, R.: Photogrammetrie der Westküste Schleswig-Holsteins. Die Küste 22, 1972.
 FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HANNOVER: Modellversuche für das Neuwerker Watt. 2. Teilbericht: Morphologische Untersuchungen (unveröffentlicht), 1972.

- GIERLOFF-EMDEN, H. G.: Luftbild und Küstengeographie am Beispiel der deutschen Nordseeküste. Landeskdl. Luftbildauswertung im mitteldeutschen Raum, H. 4, 1961.
- GIESE, E.: Fahrwasserumbildungen in der Außenelbe. Die Wasserwirtschaft 62, Heft 3, 1971.
- GÖHREN, H.: Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. Hamburger Küstenforschung, Heft 14, 1970.
- GÖHREN, H.: Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. Hamburger Küstenforschung, Heft 19, 1971.
- HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außenelbe. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 18. Bd., 1939/40.
- HENSEN, W.: Ausbau der seewärtigen Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen. Hansa, Nr. 15, 1971.
- HOMER, H.: Historisches Kartenwerk 1 : 50 000 der niedersächsischen Küste. Jahresber. Forschungsstelle Norderney, VIII, 1961.
- KNOP, FR.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Mitt. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau u. Grundbau der TH Braunschweig, 1961.
- KNOP, FR.: Küsten- und Wattveränderungen Nordfrieslands – Methoden und Ergebnisse ihrer Überwachung. Die Küste 11, 1963.
- KÖNIG, D.: Vergleichende Bestandsaufnahmen an bodenbewohnenden Watt-Tieren im Gebiet des Sicherungsdammes vor dem Friedrichskoog (Süderdithmarschen) in den Jahren 1935–1939. Westküste 1943.
- KÖNIG, D.: Deutung von Luftbildern des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres, Beispiele und Probleme (mit gesonderter Bildmappe). Die Küste 22, 1972.
- LORENZEN, JOH. M.: Planung und Forschung im Gebiet der schleswig-holsteinischen Westküste. Westküste I, 1, 1938.
- LORENZEN, JOH. M.: 25 Jahre Forschung im Dienst des Küstenschutzes. Die Küste 8, 1960.
- O'BRIEN, M. P.: Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts. Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE, Vol. 95, No. WVN 1, 1969.
- PFEIFFER, H.: Untersuchungen über den Einfluß des geplanten Dammbaus zwischen dem Festlande und der Insel Sylt auf die Wasserverhältnisse am Damm und der anschließenden Festlandküste. Die Küste 17, 1969.
- RODLOFF, W.: Über die Morphologie einiger Wattgebiete der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Küste 20, 1970.
- RODLOFF, W.: Über Wattwasserläufe. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 34, 1970.
- WALTHER, F.: Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie den Gezeiten und Strömungen. Forschungsstelle Norderney der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung, Jahresbericht 1971, Band XXIII, 1972.
- WOHLBERG, E.: Die Grüne Insel in der Eidermündung, eine entwicklungsphysiologische Untersuchung. Arch. Deutsche Seewarte 50, 1931.
- WOHLBERG, E.: Entstehung und Untergang der Insel Trischen. Mitt. Geogr. Ges. Hamburg 49, 1950.
- WOHLBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste, II, 2, 1954.
- WRAGE, W.: Das Wattenmeer zwischen Trischen und Friedrichskoog. Arch. Deutsche Seewarte 48, 1930.
- WRAGE, W.: Luftbild und Wattforschung. Petermanns Geogr. Mitt. 102, 1958.