

Stabilitätskriterien für Tidebecken

Von Eberhard Renger und Hans-Werner Partenscky

Inhalt

1. Einführung und Problemstellung	63
2. Die morphologische Struktur der Tidebecken	64
3. Mathematisch-empirische Formenanalyse der Wattenmorphologie	65
4. Anwendung der Untersuchungsergebnisse auf den geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn	67
4.1. Geplanter Entwurf der Hafen- und Dammanlagen	67
4.2. Morphologische Änderungen nördlich der Dämme	68
4.3. Morphologische Änderungen südlich der Dämme	70
5. Schlußbetrachtung	72
6. Schriftenverzeichnis	73

Summary

A semi-empirical method has been employed to describe the morphologic structure of tidal basins observed in the German Bight/North Sea. The objective of the study was to determine the vertical distribution of the volume of a tidal basin by analytical expressions.

It could be shown that a well defined relationship exists between the different parameters such as reference area by MLW-contour (O_{MLW}), reference gully-volume (V_{MLW}), characteristic parameter (\bar{a}) of the relative volume-function (V/V_{MLW}) and the area of the tidal basin (E).

The results enable the coastal engineer to predict morphological changes in the tidal basins which must be expected by the construction of greater offshore structures such as dikes and causeways. By comparing the volumes of the tidal basins before and after the construction (new equilibrium), the sand eroded or accreted can be calculated.

The stability criteria obtained by means of the semi-empiric approach were applied to predict morphologic changes to be expected due to a proposed dam to the deep-water harbor Neuwerk/Scharhörn of the city of Hamburg which is to be constructed in the tidal flats of the Elbe estuary.

1. Einführung und Problemstellung

Größere bauliche Eingriffe im Tidegebiet mit überwiegend alluvialen Oberflächensedimenten führen i. a. zu Veränderungen des Tideregimes. Die unmittelbar nach Errichtung eines Bauwerkes, z. B. eines Dammes, veränderten hydrologisch-hydrodynamischen Verhältnisse haben zwangsläufig eine Veränderung der Morphologie zur Folge. Dabei beeinflussen sich die Bewegungsgrößen und die Formzustände so lange gegenseitig, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand eingestellt hat.

Die den Küsteningenieur betreffenden Fragestellungen beziehen sich somit im wesentlichen einmal auf die Abschätzung der hydraulischen Veränderungen unmittelbar nach der Errichtung des Bauwerkes und zum anderen auf die Prognose über den zu erwartenden neuen Gleichgewichtszustand. Für die speziellen Verhältnisse in der inneren Deutschen Bucht der südöstlichen Nordsee mit ihren besonders ausgeprägten, breiten Wattengebieten sind die morphologischen Veränderungen von besonderer Bedeutung. Hier interessiert aber neben den Veränderungen der Rinnenquerschnitte vor allem auch die zu erwartende

Materialbilanz der durch den baulichen Eingriff veränderten Wattengebiete. Es handelt sich dabei um diejenige Menge an Sand, die sich durch Erosion oder Sedimentation bis zum Erreichen des zukünftigen Gleichgewichtszustandes voraussichtlich umlagern wird.

Die vorliegende Abhandlung befaßt sich im wesentlichen mit einer mathematisch-empirischen Beschreibung des morphologischen Gleichgewichtszustandes von Tidebecken, wie sie in der Deutschen Bucht zwischen Holland und Dänemark anzutreffen sind. Diese ersten ermittelten Gleichgewichtsbeziehungen werden dann am Beispiel des geplanten Tiefwasserhafens Neuwerk/Scharhörn der Freien und Hansestadt Hamburg zur Berechnung von Sandbilanzen herangezogen.

Im Unterschied zu den Ansätzen, die auf der Sedimentbewegung aufbauen, werden hier die Vertikalstrukturen der Volumina zweier Gleichgewichtszustände miteinander verglichen und die zu erwartende Volumenänderung (gemessen in m^3) berechnet.

2. Die morphologische Struktur der Tidebecken

Die Wattengebiete sind durch die Gesamtheit aller hydraulischen Einwirkungen auf natürliche Weise verhältnismäßig stark gegliedert. Sie werden für morphologische Untersuchungen derart in Wateinzugsgebiete/Tidebecken unterteilt, daß jeder Wattwasserlinie die umgebenden Fluträume bis zur Uferlinie oder bis zur topographischen Watthöhenscheide zugeordnet werden. Diese Begrenzungen können in fast allen Fällen eindeutig aus der Wattgrundkarte abgelesen werden. Die Begriffe Wateinzugsgebiet und Tidebecken werden hier nebeneinander benutzt.

Es wird angenommen, daß die topographische Watthöhenscheide im Mittel gesehen näherungsweise mit der hydraulischen Wattwasserscheide identisch ist. Aus diesem Grunde können aus der so berechneten Volumenstruktur in erster Näherung auch das Tidevolumen und die Tidewassermenge innerhalb einer geringen Fehlergrenze von nur wenigen Prozenten ermittelt werden.

Neben der Höhenlage charakteristischer Tidewasserstände (z. B. des MThw und des MTnw) ist die Größe des Tidevolumens in den Wattengebieten kennzeichnend für ein Tidebecken. Übereinstimmend haben verschiedene Untersuchungen von Gleichgewichtszuständen im Tidegebiet gezeigt, daß eine eindeutige, empirische Beziehung zwischen einem charakteristischen Durchflußquerschnitt und dem zugehörigen, stromaufwärts gelegenen Tidevolumen bzw. der Größe des Wateinzugsgebietes besteht (BRUNN u. GERRITSEN, 1958, HENSEN, 1971, O'BRIEN, 1969, RODLOFF, 1970, WALTHER, 1972).

Die stark zergliederte Morphologie der Wattengebiete erfordert für die Bestimmung charakteristischer Formgrößen (z. B. Volumina, vertikale und horizontale Schnittflächen, charakteristische Längen, Breiten und Tiefen) jedoch eine Abkehr von der im Fluß- und Kanalbau üblichen Querschnittsbetrachtung. Erste Voruntersuchungen zeigten, daß die Bestimmung der Volumina durch numerische Integration der Querschnitte verfahrensmäßig nicht ohne größere Fehler durchführbar ist. Die Hauptursache ist in dem verhältnismäßig starken Richtungswechsel und den Verzweigungen der Priele und Wattströme zu suchen (verschwenkte Durchflußquerschnitte, gekrümmte Volumensegmente).

Aus diesem Grunde wurde für die Wahl der morphologischen Eingangsgrößen vom bisher üblichen Verfahren der vertikalen Querschnittsflächen zum Verfahren der horizontalen Schichtflächen übergegangen. Damit entfällt vor allen Dingen auch der subjektive Spielraum bei der Bestimmung der Eingangsgrößen für die Formenanalyse. Die Verfahrensgenauigkeit wird somit hauptsächlich nur noch von der Planimetriergenauigkeit beeinflusst.

3. Mathematisch-empirische Formenanalyse der Wattenmorphologie

Nach Abgrenzung der Tidebecken in den Wattgrundkarten (Arbeitsmaßstab i. a. 1:10 000) wurden die durch die geodätischen Höhenlinien und die oben definierten Grenzen des Tidebeckens umrissenen „Niveaulächen“ planimetrisch ermittelt. Sie unterliegen einer charakteristischen Vertikalverteilung innerhalb des Tidebeckens (s. Abb. 1 a) und dienen der im Mittelpunkt des Verfahrens stehenden Ermittlung der Volumen-Summenkurve (RENGER, 1974).

Die Volumen-Summenkurve auf Abbildung 1 b wird durch numerische Integration der als Eingangsgrößen verwendeten Niveaulächen ermittelt. Sie wird für eine mathema-

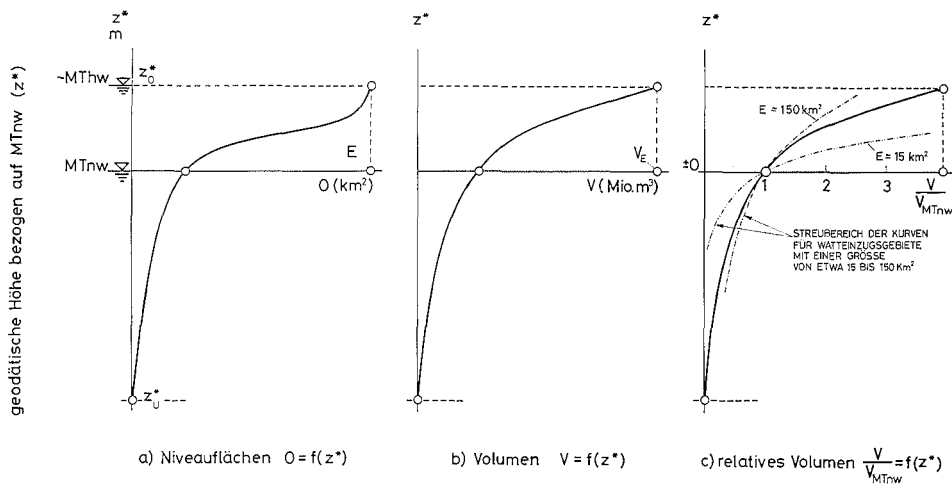


Abb. 1. Typisches Beispiel der morphologischen Vertikalstruktur von Tidebecken in der Deutschen Bucht

tische Approximation zweckmäßigerweise dadurch normiert, daß sie nach Bezug auf das Referenzvolumen bei MTnw ($z^* = 0$) in dimensionslose Form gebracht wird (Abb. 1 c).

Diese relative Volumenstruktur eines Tidebeckens streut für unterschiedlich große Gebiete etwa innerhalb den auf Abbildung 1 c angegebenen Begrenzungslinien. Als kennzeichnender Kurvenparameter wurde zunächst die Flächengröße des Watteinzugsgebietes/Tidebeckens (E in km^2) ausgewählt. Diese Einflußgröße kann den Charakter einer Randbedingung annehmen, wenn nämlich – wie im nachfolgenden Anwendungsbeispiel – die Begrenzungen eines Tidebeckens durch bauliche Eingriffe (wie z. B. durch Dämme) teilweise durch Menschenhand künstlich und damit fest vorgegeben werden.

Als charakteristische hydrologische Kennwerte wurden die Mittelwerte der Tideniedrigwasserstände (MTnw) jeweils am Prielanfang an der seeseitigen Begrenzung der Watteinzugsgebiete/Tidebecken mit in die Untersuchungen einbezogen.

Durch die Festlegung des Bezugsniveaus bei MTnw wird die Untersuchung der Abhängigkeit der morphologischen Bezugsgrößen (Niveauläche O_{MTnw} und Referenzvolumen V_{MTnw}) von der Größe des Watteinzugsgebietes/Tidebeckens (E) erforderlich. Die Niveauläche (O_{MTnw}) ergibt sich als Funktion der Gesamtgröße des Tidebeckens (E) zu (s. Abb. 2)

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

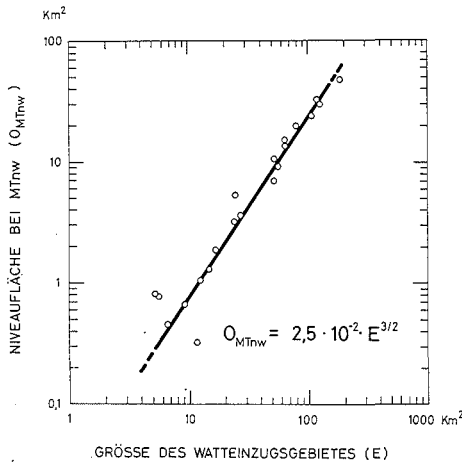


Abb. 2

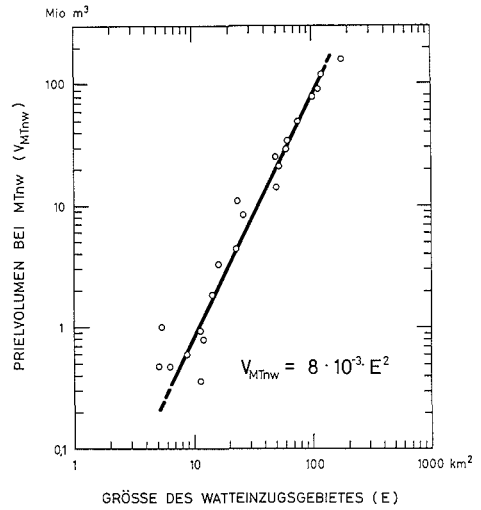


Abb. 3

Desgleichen können die Werte für das Referenzvolumen ($V_{M_{Tnw}}$) (Prielvolumen) in Abhängigkeit von der Größe des Tidebeckens (E) durch eine Potenzfunktion der folgenden Form angenähert werden (s. Abb. 3)

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

(alle Volumina in 10^6 m^3 , alle Flächenwerte in 10^6 m^2).

Als mathematische Näherungsfunktion für die relative Volumenkurve (vgl. Abb. 1 c) wurde in erster Näherung ein Ansatz durch die allgemeine logarithmische Funktion

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

gewählt, die sich besonders gut im Bereich $z^* \geq 0$, also im Bereich des Tidehubes, den ermittelten Volumenfunktionen anpaßt. Für jedes Wattenzugsgebiet/Tidebecken ergibt sich entsprechend dem Kurvenverlauf eine unterschiedliche logarithmische Basis (\bar{a}) für die Approximation nach Gleichung (3), die ihrerseits als kennzeichnender Kurvenparameter wiederum eine Funktion der Größe des Tidebeckens (E) ist (Abb. 4).

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

Die Ergebnisse der Abbildung 4 und teilweise auch Abbildung 3 zeigen, daß die Zu-

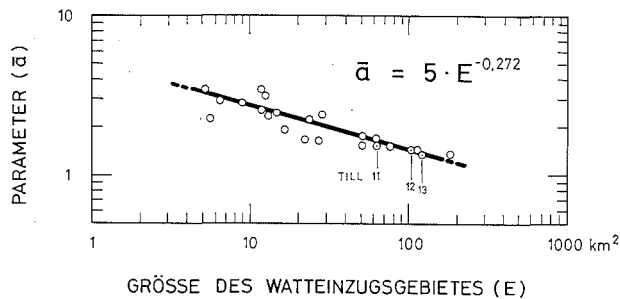


Abb. 4

nahme des Volumens (V) mit der Tiefe (z^*) eine eindeutige Funktion der Größe des Tidebeckens ist. Bei Verwendung der Gleichungen (2), (3) und (4) läßt sich die vertikale Volumenverteilung auch wie folgt darstellen:

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

$$\text{d. h.} \quad V = f(E, z^*) \quad (6)$$

Damit ist die Möglichkeit gegeben, bei Veränderung der Größe eines Tidebeckens (E) durch bauliche Maßnahmen zu einer Abschätzung der morphologischen Veränderungen (Volumenänderung) in diesem Wattbereich zu kommen. Eine quantitative Voraussage über die zu erwartenden Sandumlagerungen läßt sich dann durch Gegenüberstellung der Volumina des heute bestehenden Zustandes und des berechneten zukünftigen Gleichgewichtszustandes treffen.

Die Korngrößenverteilung des Bodenmaterials konnte noch nicht mit berücksichtigt werden. Dabei kann allerdings vorausgesetzt werden, daß die Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials in den untersuchten Tidebecken der inneren Deutschen Bucht annähernd die gleiche ist. Das gleiche gilt auch für den Tidehub, der im Bereich der untersuchten Wattengebiete die annähernd gleiche Größenordnung von i. M. 3 m ($\pm 0,5$ m) aufwies. Ein direkter Einfluß des Tidehubes konnte bei dem hier angewendeten Verfahren deshalb bisher noch nicht nachgewiesen werden.

4. Anwendung der Untersuchungsergebnisse auf den geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn

4.1. Geplanter Entwurf der Hafen- und Dammanlagen

Im nachfolgenden Abschnitt sollen die generellen Untersuchungsergebnisse über die Stabilität von Wattenzugsgebieten bzw. Tidebecken auf die betreffenden Probleme beim geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn der Freien und Hansestadt Hamburg angewendet werden.

Dieser Hafen soll in den südlichen Wattenflächen des Elbeästuars bei den Nordseeinseln Neuwerk und Scharhörn errichtet werden (Abb. 5) (PARTENSKY und RENGER, 1974).

Das umliegende Industriegelände von etwa 12 km² Größe soll durch einen Damm mit dem Festland an der niedersächsischen Küste verbunden werden. Abbildung 6 zeigt den generellen Entwurf für den geplanten Hafen mit verschiedenen Alternativen für die Linienführung der Dämme. Darüber hinaus vermittelt diese Abbildung einen Eindruck von der Morphologie der Wattengebiete im heute bestehenden Zustand.

Dieses Projekt wurde in einem hydraulischen Tidemodell mit fester Sohle im FRANZIUS-INSTITUT der Technischen Universität Hannover untersucht. Damit sollten vor allem die zu erwartenden Änderungen der Tidecharakteristik infolge der geplanten Baumaßnahmen ermittelt werden (Modellgrenze auf Abb. 5).

Die sehr wesentliche Frage nach den zu erwartenden morphologischen Veränderungen der Wattengebiete beiderseits der geplanten Dämme von insgesamt etwa 200 km² Größe konnte erwartungsgemäß anhand der Modelluntersuchungen nicht beantwortet werden. Demgegenüber ermöglichte jedoch die Anwendung der morphologischen Untersuchungsergebnisse eine Abschätzung der Sandbilanzen als Volumendifferenz zwischen dem bestehenden und dem zu erwartenden Gleichgewichtszustand. Dabei wird voraus-

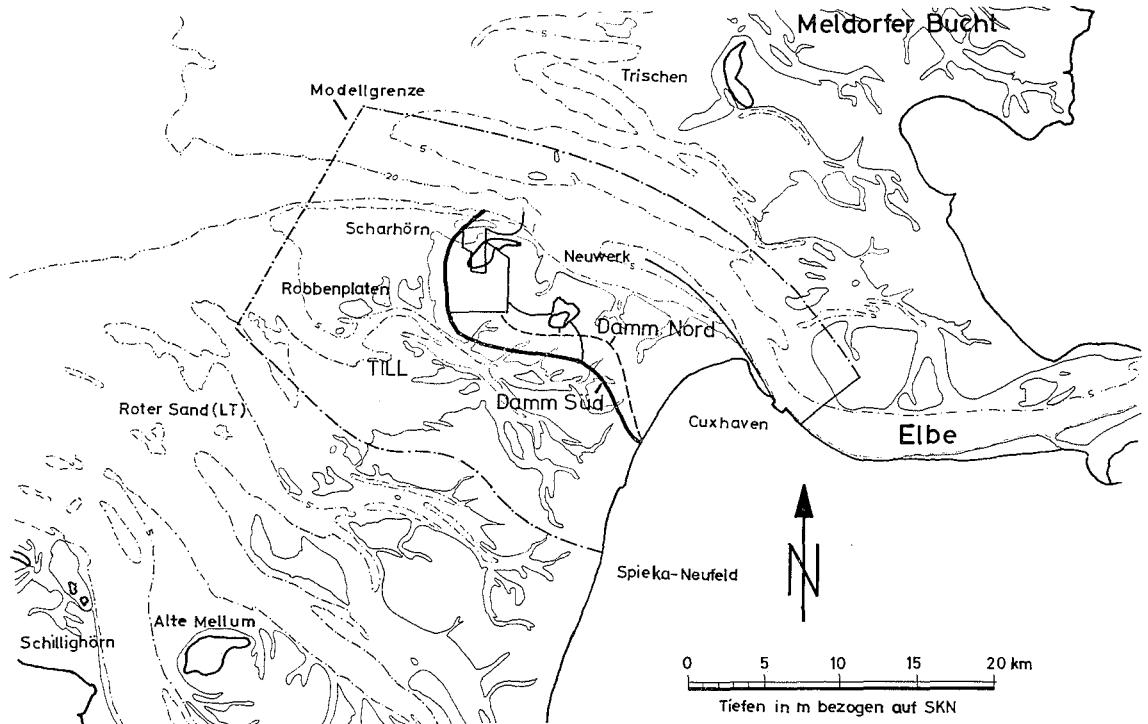


Abb. 5. Watteinzugsgebiete und Wattstromsysteme in der Deutschen Bucht. Genereller Entwurf des Tiefwasserhafens Neuwerk/Scharhörner der Freien und Hansestadt Hamburg

gesetzt, daß ein bestehender Gleichgewichtszustand infolge der Baumaßnahmen gestört wird und einem neuen Gleichgewichtszustand zustrebt.

4.2. Morphologische Änderungen nördlich der Dämme

Aus verschiedenen Gründen wurde die südliche Dammtrasse (Abb. 6, Variante C) für den endgültigen Entwurf ausgewählt.

Durch den Hauptdamm werden die drei nördlich gelegenen Watteinzugsgebiete Buchtloch, Eitzenbalje und Hundebalje um etwa 50 % ihrer bisherigen Fläche vergrößert. Das hat zwangsläufig auch eine der neuen Gebietsgröße entsprechende Vergrößerung des Volumens und damit Erosionstätigkeit zur Folge. Man darf schließlich sogar annehmen, daß ein gewisser Teil dieser Sandmengen mit den Tidedrömungen über die seeseitigen Begrenzungslinien der Watteinzugsgebiete hinaus in die bedeutende Schiffsstraße Elbe transportiert wird.

Um dies zu verhindern, wurden einige Nebendämme in der Nähe der heute bestehenden Wattwasserscheide vorgesehen. Auf diese Weise kann die Gefahr zusätzlicher Sandeintreibungen aus den nördlichen Wattengebieten in die Elbe infolge der Gleichgewichtsumbildungen so gering wie möglich gehalten werden.

Abb. 6. Topographie des Neuwerker Watts (1966). Watteinzugsgebiete mit 4 Varianten der Dammtrassen zum geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörner



Die Tiefenlinien der Elbe wurden aus dem alten Plan entnommen.

Legende:
 ABCD 4 Varianten
 (A) Wattenzugsgebiete
 I, II, III Teilbereiche
 I = (1)+(2)
 II = (3)+(4)
 III = (5)

0 1 2 3 km
 Höhen bezogen auf SKN = NN + 760m

Abb. 6

4.3. Morphologische Änderungen südlich der Dämme

Infolge der geplanten Dämme der Variante C (Abb. 6) wird die Fläche des Watteinzugsgebietes Till südlich des Dammes beträchtlich verkleinert. Abbildung 7 zeigt eine vereinfachte Systemskizze des Neuwerker Watts. Das Watteinzugsgebiet der Till wird durch die strichpunktierte Linie umrissen. Dabei geben die gepunkteten Linien die verschiedenen untersuchten seeseitigen Begrenzungen wieder (bezeichnet mit [11], [12] und [13]). Der Verlauf der Rinnen und Priele wird durch die SKN-Linie (entspricht etwa MTnw) angedeutet.

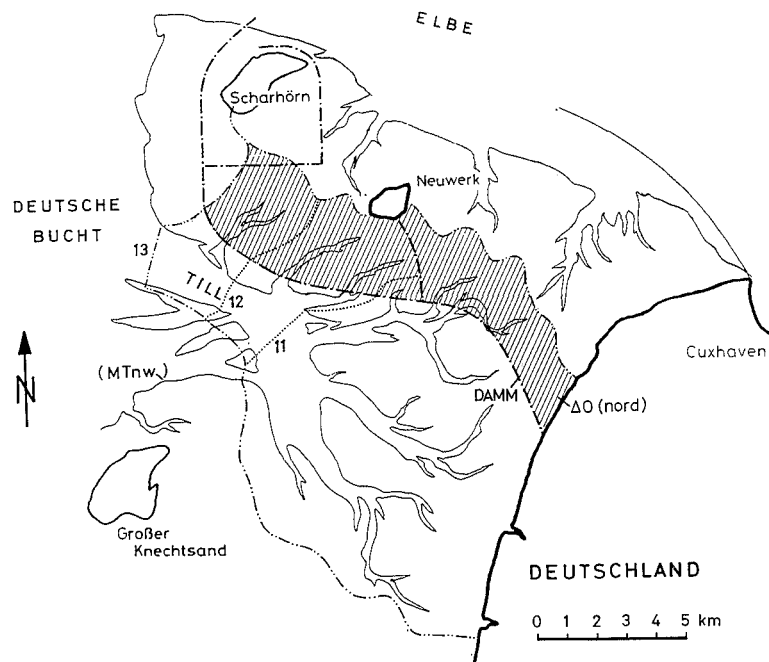


Abb. 7. Vereinfachte Skizze des Neuwerker Watts. (Die Fläche des Watteinzugsgebietes Till wird durch die strichpunktierte Linie umrissen)

Das Gebiet des Tidebeckens Till wird um einen Teil seiner nördlichen Prielausläufer von etwa 120 km² auf rund 90 km² verkleinert (schraffierte Fläche auf Abb. 8 d). Eine solche Gebietsverkleinerung hat erwartungsgemäß eine Schrumpfung des Volumens zur Folge. Das bedeutet, daß mit Sedimentation in den betreffenden Priele gerechnet werden muß.

Die Diagramme auf Abbildung 8 zeigen in der Vertikalen jeweils lagegetreu die geodätische Höhe (z^*), bezogen auf das Referenzniveau bei MTnw. Auf der rechten Seite (Abb. 8 c) ist die relative Volumenverteilung für drei oben erwähnte unterschiedliche seeseitige Begrenzungen (11), (12) und (13) wiedergegeben. Die zugehörigen kennzeichnenden Parameter (\bar{a}) der logarithmischen Näherungsfunktion sind durch die entsprechenden Zahlen auf Abbildung 4 gekennzeichnet. Die betreffenden Punkte (11), (12) und (13) folgen der allgemeinen Tendenz der Ausgleichsfunktion auch für unterschiedliche seeseitige Begrenzungen recht gut. Diese gute Übereinstimmung ermöglicht eine verhältnismäßig freie Wahl der seeseitigen Begrenzung für den Berechnungsfall innerhalb der gefundenen Gesetzmäßigkeiten.

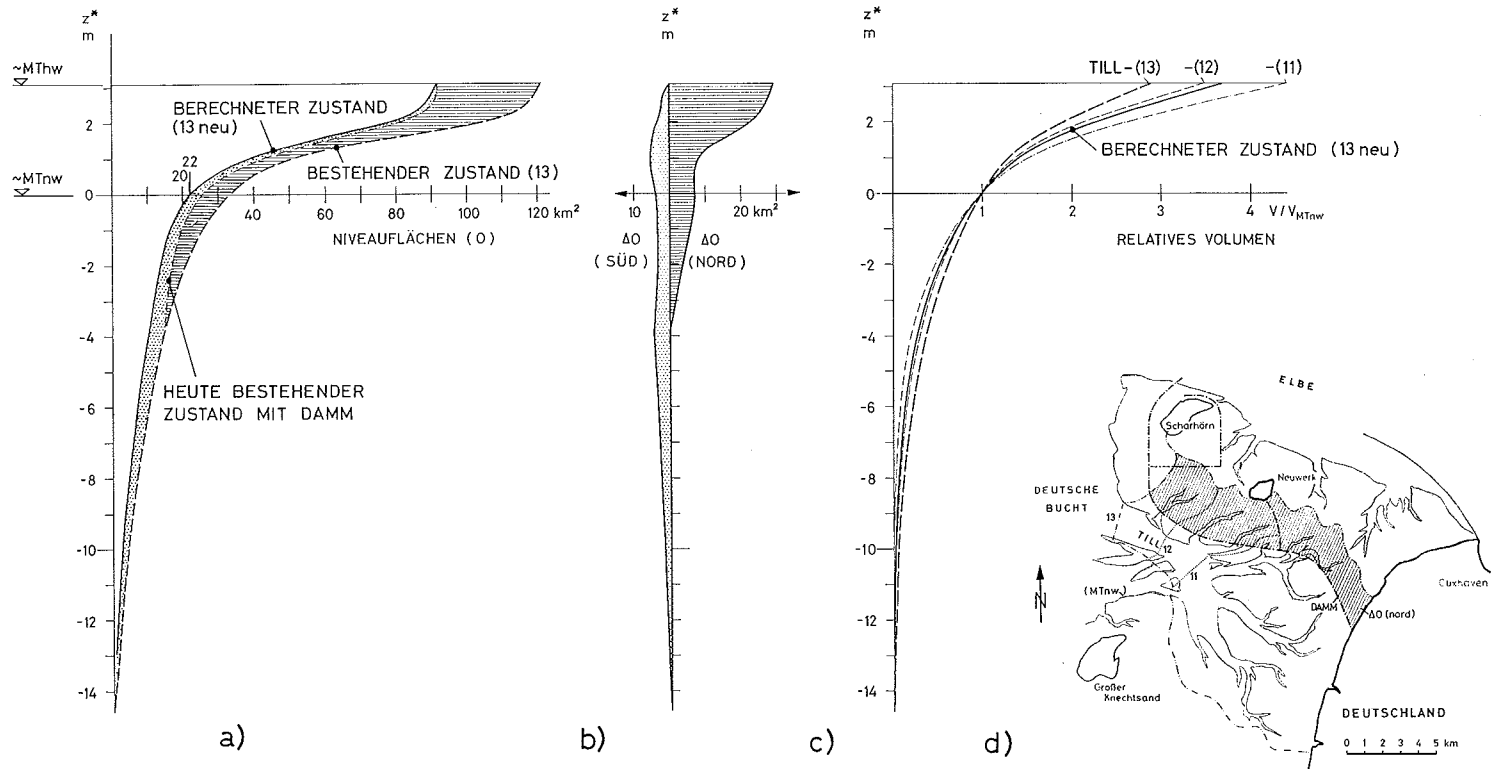


Abb. 8. Berechnungsergebnisse für die zu erwartenden morphologischen Veränderungen des Watteinzugsgebietes TILL in der Deutschen Bucht infolge der geplanten Dammbauten

Für die reduzierte Till innerhalb der Grenze (13) läßt sich anhand der abgeleiteten Gleichungen und durch Interpolation zwischen den Kurven (11), (12) und (13) die Verteilungskurve (13 neu) des relativen Volumens ermitteln (Abb. 8 c). Die zugehörige Niveauflächenverteilung für den zu erwartenden Gleichgewichtszustand der reduzierten Till gibt die Kurve (13 neu) auf Abbildung 8 a wieder. Diejenige des heute bestehenden Zustandes ist mit (13) gekennzeichnet.

Der mittlere Teil der Graphik (Abb. 8 b) zeigt nach rechts aufgetragen die Verteilung der Niveauflächen $\Delta 0$ (Nord) des durch den Damm abgetrennten Teiles des Tidebeckens Till. Diese Schichtflächen wurden den nördlichen Watteinzugsgebieten zugeschlagen und mußten daher von den südlichen des heute bestehenden Zustandes der Till subtrahiert werden. Die verbleibende Ausgangsverteilung der Niveauflächen unmittelbar nach Errichtung der Dämme ist durch die Kurve „Heute bestehender Zustand mit Damm“ gegeben (Abb. 8 a).

Die Vertikalverteilung der Niveauflächen-Schrumpfung ist durch die gepunktete Fläche dargestellt (Abb. 8 b, $\Delta 0$ [Süd]).

Diese Verteilung wurde durch Subtraktion der Niveauflächenverteilung des „berechneten Zustandes (13 neu)“ von derjenigen des „bestehenden Zustandes mit Damm“ ermittelt. Die gepunktete Fläche auf Abbildung 8 a bzw. Abbildung 8 b stellt ein Maß für die berechnete Schrumpfung des Tidebeckens Till dar. Innerhalb der angegebenen Begrenzung (13) des reduzierten Tidebeckens Till wird mit einer Versandung von etwa 38 Mio. m³ gerechnet. Dabei wird der Hauptanteil der Sandablagerung voraussichtlich in den tieferen Bereichen unmittelbar südlich des geplanten Dammes zu erwarten sein.

5. Schlußbetrachtung

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

Von der bisher weitgehend üblichen zweidimensionalen Erfassung des Prieles (Querschnittsflächen) wurde zu einer dreidimensionalen Erfassung des Tidebeckens übergegangen.

Für die formbeschreibenden Größen der Niveauflächen und des Volumens bei Mitteltideniedrigwasser und die Vertikalverteilung des 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 des heute bestehenden Zustandes und den nach dem baulichen Eingriff zu erwartenden Volumina des neuen Gleichgewichtszustandes lassen sich quantitative Aussagen über die zu erwartenden Sandumlagerungen in einem bestimmten Gebiet 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 Oberflächensedimentes sowie den Einfluß des Tideverlaufes beschreiben.

6. Schriftenverzeichnis

1. BRUUN, P. and GERRITSEN, F.: "Stability of Coastal Inlets". J. Waterways Harbors Division, ASCE, 84, WW3, Paper No. 1644 (May 1958).
2. HENSEN, W.: „Ausbau der seewärtigen Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen. A. Die wissenschaftlichen Aspekte.“ HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen. 108. Jahrgang, 1971, Nr. 15.
3. O'BRIEN, M. P.: "Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts." Journal of the Waterways and Harbours Division. Proc. of the American Society of Civil Engineers. Vol. 96, No. WW1, 1969.
4. PARTENSKY, H.-W. und RENGER, E.: „Modelluntersuchungen für den geplanten Tiefwasserhafen Neuwerk/Scharhörn.“ Schiff & Hafen, Heft 5/1974, 26. Jahrgang, S. 447 bis 456.
5. RENGER, E. und PARTENSKY, H.-W.: „Stabilitätsverhalten von Wateinzugsgebieten.“ Die Küste, H. 25, 1974.
6. RENGER, E.: „Untersuchungen von Wateinzugsgebieten.“ Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, Heft 40, 1974.
7. RENGER, E. and PARTENSKY, H.-W.: "Stability Criteria for Tidal Basins." Proc. of the 14th Coastal Engineering Conf. 1974.
8. RODLOFF, W.: „Über Wattwasserläufe.“ Mitteilungen des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 34, 1970.
9. WALTHER, Fr.: „Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie den Gezeiten und Strömungen.“ Jahresbericht 1971. Bd. XXIII der Forschungsstelle Norderney der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung. 1972.