

Morphologische Charakterisierung der Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres vor dem Hintergrund säkularer Meeresspiegeländerungen

Von FRANK SPIEGEL

Zusammenfassung

Ein wichtiger Bestandteil des Forschungsvorhabens „Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg“ bestand darin, alle Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres hinsichtlich ihrer Morphologie nach einer einheitlichen Methode zu erfassen und diese vergleichend auszuwerten. Dieser Vergleich sollte auch auf die zahlreich vorliegenden Ergebnisse aus anderen Wattgebieten der Erde ausgedehnt werden.

Nachfolgend wird ein Großteil dieser Auswertungen vorgestellt. Des weiteren erfolgt eine Quantifizierung der Verschiebungen der morphologischen Kennwerte im Falle zweier Anstiegsszenarios des Meeresspiegels.

Summary

One of the main topics of the research project "Modelling the morphological stability of the Wadden Sea of Schleswig-Holstein under the conditions of an accelerated sea level rise" was to quantify the morphologic parameters of all the tidal basins of this area applying one common methodology and to compare the results with other tidal basins worldwide. The paper describes most of these evaluations. Moreover, modifications of the morphologic parameters due to a sea level rise are examined.

Inhalt

1. Die Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres.....	116
1.1 Kartengrundlagen und methodisches Vorgehen.....	117
1.2 Bezugsniveaus der Tideparameter.....	119
1.3 Abgrenzung und Morphometrie der Tidebecken.....	122
1.4 Vergleichende Auswertung.....	124
2. Ansätze zur Beurteilung morphologisch-hydrologischer Gleichgewichtszustände.....	128
2.1 Gleichungen zur Beschreibung von Fließgleichgewichten.....	129
2.2 Definition zweier Meeresspiegelszenarios.....	131
2.3 Anwendung.....	132
3. Schlußfolgerungen.....	138
4. Danksagung.....	140
5. Schriftenverzeichnis.....	140

Liste der Abkürzungen:

<i>NN</i>	=	Normalnull
<i>MThw</i>	=	Mittleres Tidehochwasser, zu <i>NN</i> [m]
<i>MTnw</i>	=	Mittleres Tideniedrigwasser, zu <i>NN</i> [m]
<i>MTmw</i>	=	Mittleres Tidemittelwasser, zu <i>NN</i> [m]
<i>MTpmw</i>	=	Mittleres Tideprismamittelwasser, zu <i>NN</i> [m], vgl. Kap. 1.2
<i>MT1/2w</i>	=	Mittleres Tidehalbwasser, zu <i>NN</i> [m]
<i>MThb</i>	=	Mittlerer Tidenhub [m]
<i>Ab_i</i>	=	Fläche des Tidebeckens (area of the basin) unter dem Niveau <i>i</i> (mit <i>i</i> = <i>MThw</i> , <i>MTnw</i> , <i>MTmw</i> oder <i>MT1/2w</i>) [km ²]
<i>Ab_{int}</i>	=	Intertidalfläche (zwischen <i>MThw</i> und <i>MTnw</i>) [km ²]
<i>Ac_i</i>	=	Fläche des Seegatquerschnitts (area of the cross-section) unter dem Niveau <i>i</i> (mit <i>i</i> = <i>MThw</i> , <i>MTnw</i> , <i>MTmw</i> oder <i>MT1/2w</i>) [m ²]
<i>TB</i>	=	Tidebecken (= Wateinzugsgebiet <i>WEG</i>)
<i>TEG</i>	=	Teileinzugsgebiet (= Untereinheit eines <i>TB</i>)
<i>ISV</i>	=	Intertidales Sedimentvolumen [m ³]: Sedimentmaterial innerhalb eines Tidebeckens im Höhenintervall zwischen <i>MThw</i> und <i>MTnw</i>
<i>WV</i>	=	Wasservolumen [Mio m ³]: Füllmenge eines <i>TB</i> bei <i>MThw</i>
<i>P</i>	=	Tideprisma [Mio m ³]: Füllmenge eines <i>TB</i> zwischen <i>MThw</i> und <i>MTnw</i>
<i>EV</i>	=	Ebbvolumen [Mio m ³]
<i>FV</i>	=	Flutvolumen [Mio m ³]
<i>TV</i>	=	Tidevolumen (= <i>EV</i> + <i>FV</i>) [Mio m ³]
<i>PV</i>	=	Prielvolumen [Mio m ³]: Füllmenge eines <i>TB</i> unterhalb von <i>MTnw</i>
<i>d_i</i>	=	Wassertiefe unter <i>i</i> (mit <i>i</i> = <i>MThw</i> , <i>MTnw</i> , <i>MTmw</i> oder <i>MT1/2w</i>) [m]
<i>\bar{d}_i</i>	=	mittlere Wassertiefe unter <i>i</i> [m]

1. Die Tidebecken des schleswig-holsteinischen
Wattenmeeres

Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit der Morphologie des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Inhaltliche Schwerpunkte bildeten hierbei Sedimentuntersuchungen (vgl. z. B. AUSTEN, 1990; BERNER et al., 1986; UNSÖLD, 1974; u. v. m.), Messung und Modellierung der (tidebedingten) Wasserbewegungen (vgl. z. B. GÖHREN, 1968, 1974 a u. b, SIEFERT et al., 1980; STENGEL u. ZIELKE, 1994) und ihres Sedimenttransportes, sowie Karten- und Vermessungsauswertungen (vgl. z. B. GÖHREN, 1975; HIGELKE 1978, 1981, 1988, 1995; SIEFERT, 1987; WIELAND 1972, 1984, 1985).

Einen weiteren Kernpunkt markieren Untersuchungen zur vergleichenden Morphometrie einzelner Wateinzugsgebiete (Tidebecken) mit dem Ziel, Regelmäßigkeiten der Formgebung dieser Becken zu erarbeiten. Hierzu wurden einzelne Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres ebenso ausgewertet (vgl. z. B. DIECKMANN, 1985; PARTENSKY et al., 1979; PARTENSKY u. DIECKMANN, 1981; RENGER, 1976 a u. b; RENGER u. PARTENSKY, 1975) wie zahlreiche andere Wattgebiete weltweit.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es nun, das gesamte schleswig-holsteinische Wattenmeer hinsichtlich der Morphologie aller seiner Tidebecken nach einer einheitlichen Methodik vergleichend zu erfassen und den vorliegenden Ergebnissen aus anderen Wattgebieten gegenüberzustellen.

1.1 Kartengrundlagen und methodisches Vorgehen

Die Arbeiten stützen sich auf drei verschiedene Kartenwerke: An erster Stelle ist hier die Küstenkarte des KURATORIUMS FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) im Maßstab 1:25 000 in ihrer ersten Ausgabe aus den 70er Jahren zu nennen. Angaben zu Konzeption und Erstellung der KFKI-Küstenkarten machen BETTAC et al. (1984).

Als zweite Datenquelle ist die deutsche Wattgrundkarte 1:10 000 zu nennen. Einen Überblick über die Häufigkeit und räumliche Verteilung der Wattvermessung auf der Basis dieser Wattkarten im Maßstab 1:10 000 gibt WIELAND (1985). Angaben zur Vermessungsmethodik und ihrer Genauigkeit finden sich bei WIELAND (1974, 1985), WIELAND u. THIES (1975), DOLEZAL (1974) sowie HAKE et al. (1982). Demnach liegt die Lagegenauigkeit der Punktmessungen auf den Wattflächen bei $\pm 2,5$ m und die vertikale Genauigkeit bei $\pm 3,5$ cm.

Ähnlich wie für die deutschen Wattgrundkarten verhält es sich auch mit den verwendeten dänischen Wattkarten 1:10 000 aus dem Jahr 1976, die den nördlichen Abschluß des Untersuchungsgebietes bis zum Verbindungsdamm zur Insel Rømø bilden. Die Höhenangaben beziehen sich jedoch auf dänisches Normalnull (DNN) und die Koordinatenangaben basieren auf einem vom Gauß-Krüger-Koordinatensystem abweichenden, dänischen System. Dies hat zur Folge, daß auch hier keine Blattkanten bzw. -ecken mit anderen Kartennetzen zusammenfallen, und daß die Höhenangaben ebenso wie die Koordinaten auf deutsches System umgerechnet werden mußten.

Die Originalfolien dieser Wattkarten sowie der Umrechnungsfaktor für den NN-Bezug wurden freundlicherweise vom ALW Husum zur Verfügung gestellt.

Als Vorbereitung zur Erstellung eines digitalen Geländemodells wurden die deutschen Wattgrundkarten digitalisiert, soweit die entsprechenden Gebiete nicht von der KFKI-Karte abgedeckt waren. Die Blätter der KFKI-Küstenkarte wurden freundlicherweise vom KFKI als Originalfolien zur Verfügung gestellt. Diese enthielten ausschließlich Isobathen, so daß dieses Kartenwerk ohne großen Aufwand durch Einscannen in digitale Form überführt werden konnte.

Auf der Basis dieser digitalen Karten wurde nun ein Geländemodell errechnet:

Als Maschenweite für das resultierende Gitternetz wurde 50 m gewählt. Dieses Maß erscheint aufgrund der hohen Paßgenauigkeit der Kartenkoordinaten (max. Abweichung ± 9 m) und der Karten zueinander (max. Abweichung ± 20 m) sowie der durch das Einscannen nahezu fehlerfrei in digitale Form gebrachten Karteninhalte vertretbar. In Zusammenhang hiermit darf allerdings nicht vergessen werden, daß bereits die Erstellung der Kartenvorlage schwer kalkulierbare Ungenauigkeiten besitzt, deren Größe manchenorts die gewählte Auflösung übersteigen dürfte.

Als Interpolationsalgorithmus wurde eine kriging-Interpolation mit folgenden Parametern verwendet:

- maximale Zahl der Inputpunkte pro Gitterzelle: 12
- Radius zur Auswahl der Inputpunkte: max. 1000 m

BURGER u. SKALA (1978) geben einen methodischen Überblick zu üblichen Interpolationsverfahren und eine ausführliche Zusammenstellung der grundlegenden Literatur.

Die folgende Abbildung zeigt das Untersuchungsgebiet im Geländemodell. Zusätzlich sind bereits die Grenzen der einzelnen Tidebecken sowie ihre Seegatverläufe eingetragen:

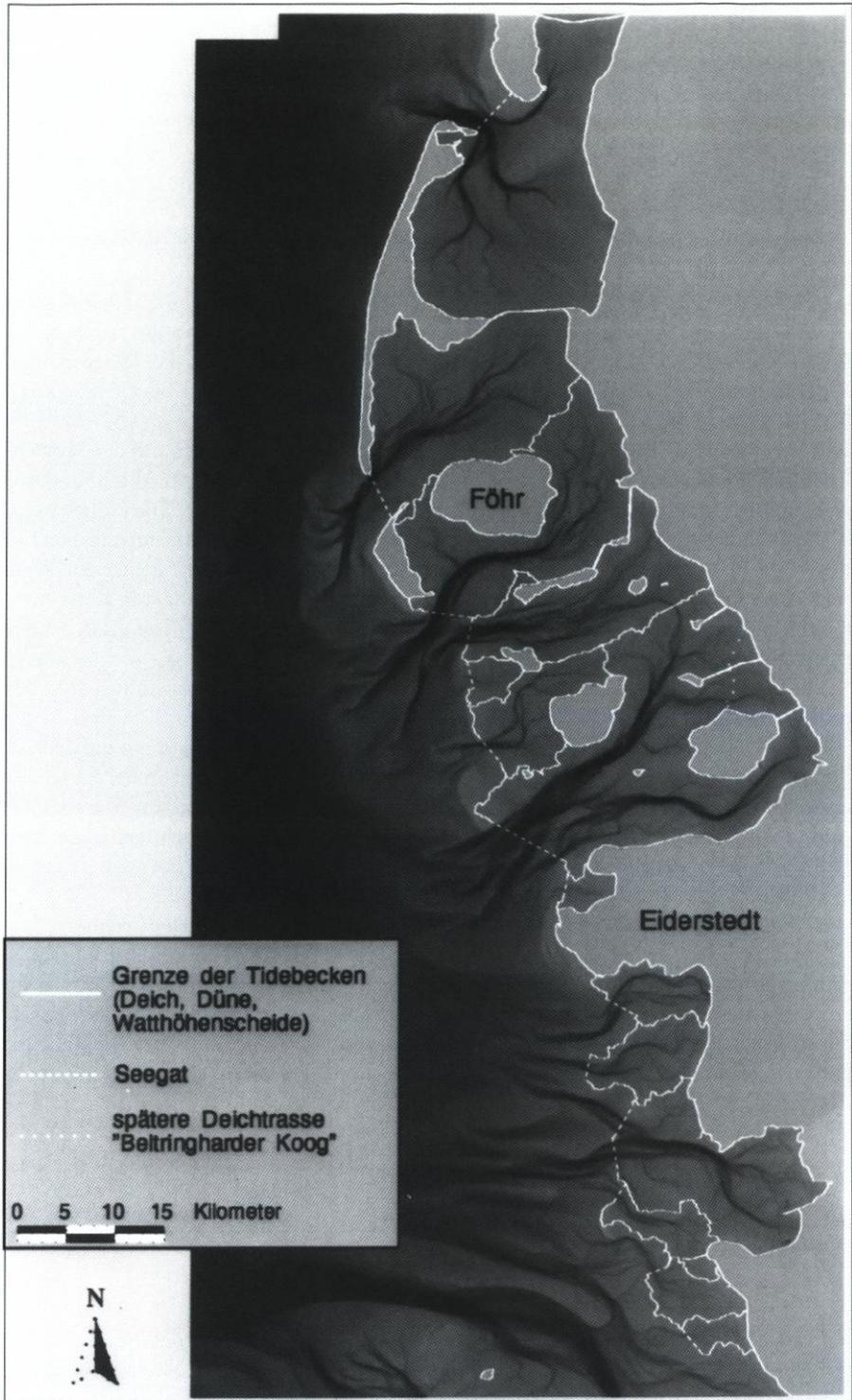


Abb. 1: Das schleswig-holsteinische Wattenmeer und seine Tidebecken im digitalen Geländemodell

1.2 Bezugsniveaus der Tideparameter

Die Frage nach geeigneten Bezugshorizonten für die zu verwendenden Wasserstandsangaben ist keineswegs trivial und wird dennoch nur selten in der notwendigen Ausführlichkeit diskutiert:

Soll eine Bezugnahme erfolgen auf ein terrestrisches Bezugsniveau oder auf ein wasserstandsabhängiges (Tide-)Niveau? Und wenn letzteres gewählt wird: Welche(s) Niveau(s) soll(en) dies sein, und soll dieser Horizont dann für das gesamte Untersuchungsgebiet gleich sein, oder darf er ortsabhängige Unterschiede aufweisen?

Zuerst ist festzustellen, daß auch alle gezeitenabhängigen Horizonte ihre Höhenangabe ableiten von dem jeweils gültigen terrestrischen Nullniveau, in Deutschland also von Normalnull (*NN*). So sind z. B. das mittlere Tidehoch- und Niedrigwasser ebenso auf *NN* bezogen wie die Angabe z. B. des Pegelnullpunktes (*PN*). Dies rechtfertigt jedoch nicht die Entscheidung, alle weiteren Angaben direkt auf *NN* zu beziehen, auch wenn die Höhenangaben der Morphologie als Absolutwerte auf *NN* bezogen sind. Die Begründung der besseren Vergleichbarkeit wäre hier fahrlässig, dies greift nur in wenigen Ausnahmefällen. In allen anderen Fällen muß der Tatsache Rechnung getragen werden, daß die Morphologie, wie sie sich in einem Tidebecken einstellt, gesteuert wird von hydrodynamischen Vorgängen, überwiegend von der Tidebewegung. Diese hält sich in ihrer raum-zeitlichen Verteilung jedoch nicht an *NN*, etwa durch eine Symmetrie der Hoch- und Niedrigwasserhöhen zu *NN*. Dementsprechend paßt sich auch die Morphologie nicht an in Abhängigkeit von *NN*, sondern entsprechend dem Räummuster der Tidebewegung. Um nun Gleiches mit Gleichem in Relation setzen zu können, muß diesem Umstand dadurch Rechnung getragen werden, daß die gezeitenabhängigen Parameter der Morphologie, am Seegat ebenso wie im Tidebecken, auch auf die räumlichen Unterschiede der Gezeitendynamik mit möglichst hoher Auflösung Bezug nehmen. Somit scheidet auch die Anbindung an einen „mean sea level“ aus.

Ein weiteres Argument gegen terrestrische (und somit zumeist nationale) Bezugsniveaus liegt in der fehlenden Vergleichbarkeit auf internationaler Ebene. Bedenkt man, daß allein zwischen dem deutschen und dänischen Normalnull ein Unterschied von rd. 15 cm liegt, so wird dieses Problem schnell einsichtig.

Die Verwendung des mittleren Springtideniedrigwassers (*MSP_{Tnw}* = Seekartennull) als Basisniveau würde zwar die genannten Schwierigkeiten vermeiden. Allerdings bestehen Zweifel, daß die Sprigtideverhältnisse maßgebend sind für die morphologische Gestaltung der Tidebecken und ihrer Seegats, so daß die Bezugnahme auf mittlere Tideverhältnisse angebracht erscheint.

Im folgenden sind zwei als geeignet erscheinende Bezugsniveaus für die Morphologie im Tidebecken und am Seegat erläutert:

Bezugshorizonte im Tidebecken

Auf den ersten Blick interessieren stets drei markante Bezugsniveaus bei der vergleichenden Betrachtung der Morphologie verschiedener Tidebecken: Niedrigwasser, Hochwasser und eine wie auch immer definierte Mitte davon.

Die Ermittlung des *M_{Thw}*- und *M_{Tnw}*-Niveaus ist noch recht unkompliziert, sofern man, wie in diesem Fall, ausreichend Wasserstandsdaten vorliegen hat, noch dazu über mehrere Jahre gemittelt. Eine (räumliche) Mittelung der jeweiligen Werte eines (Teil-)Beckens unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten liefert hierbei brauchbare Werte.

Schwieriger wird da schon die Festlegung eines „Mittel-Niveaus“:

Aus der Pegelstatistik sind die Niveaus des mittleren Tidehalbwassers ($MT1/2w$) und des mittleren Tidemittelwassers ($MTmw$) bekannt. Sie benennen einerseits die mittlere Höhe zwischen $MThw$ und $MTnw$ ($= MT1/2w$), andererseits dasjenige Niveau, das die asymmetrische Pegelkurve horizontal in zwei flächengleiche Hälften teilt ($= MTmw$).

Nun ist die Bestimmung des $MT1/2w$ auch für (Teil-)Becken kein Problem: Oben wurde gesagt, daß das $MThw$ und $MTnw$ als flächengemittelte horizontale Niveaus aus den vorhandenen Wasserstandsdaten errechnet werden. Aus dem vertikalen Abstand folgt unmittelbar der $MThb$ und somit die Höhe des $MT1/2w$, jeweils bezogen auf NN . Die $MT1/2w$ -Niveaus der Teilbecken im schleswig-holsteinischen Wattenmeer liegen durchweg etwas unterhalb von NN , da das $MTnw$ überall das NN -Niveau weiter unterschreitet, als das $MThw$ es überschreitet. Das $MT1/2w$ schwankt zwischen $-0,02$ m NN im landnahen Teil des Hörnum Tief und $-0,21$ m NN in der Tümlauer Bucht. Als „Niveau des halben Tidenhubs“ ist es ein rein hydrologischer Parameter und deshalb wenig aussagekräftig für die Wechselwirkung von Tide und Morphologie.

Das o. g. Niveau des mittleren Tidemittelwassers ($MTmw$) erscheint sehr viel geeigneter, da es – bei der Anwendung auf Pegelaufzeichnungen – abhängt von der Beeinflussung der Tidewelle durch die Morphologie: Je stärker die Abbremsung und damit Verformung der Tidewelle durch die abnehmende Wassertiefe in Küstennähe ist, um so mehr weicht das $MTmw$ vom $MT1/2w$ ab. Für eine reine Sinusschwingung wäre natürlich $MT1/2w$ gleich $MTmw$.

In Anlehnung an die beschriebene Definition des $MTmw$ für Pegeldata sei nun ein mittleres Tideprismamittelwasser ($MTpmw$) für Tidebecken bestimmt:

Bei dem hier definierten $MTpmw$ handelt es sich – abweichend von dem $MTmw$ – um dasjenige Höhenniveau, das das Tideprisma eines (Teil-)Beckens horizontal in zwei Hälften gleichen Wasservolumens teilt. In einem Becken ohne Wattflächen wäre dieses Niveau gleich dem $MT1/2w$ des Beckens, sobald Wattflächen existieren, liegt dieses $MTpmw$ oberhalb des $MT1/2w$.

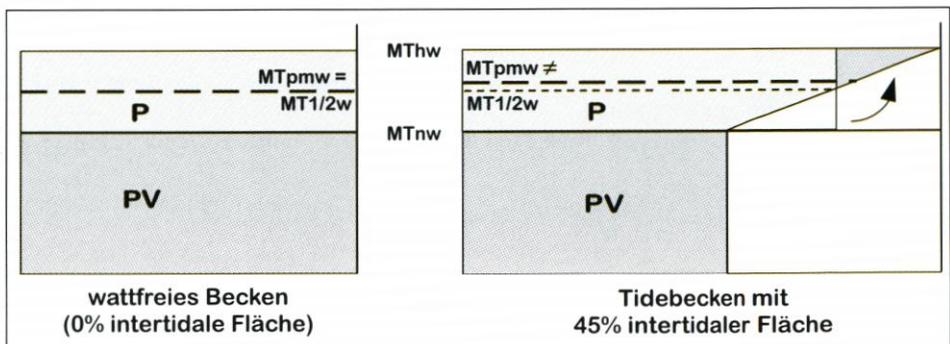


Abb. 2: Die Abweichung von $MTpmw$ und $MT1/2w$ in Tidebecken

Je näher ein betrachtetes Wattgebiet zum Festland und damit im Mittel höher liegt, desto größer wird der Unterschied zwischen $MT1/2w$ und $MTpmw$. Das $MT1/2w$ sinkt ab (wegen des zumeist stark absinkenden $MTnw$ in Landnähe), das $MTpmw$ steigt an wegen der in Landnähe zumeist hochliegenden Wattflächen. Der Höhenunterschied zwischen den beiden Niveaus ist ein Maß für die Ausdehnung und mittlere Höhenlage der Wattflächen:

Je mehr Wattflächen existieren und je höher diese liegen, um so größer ist der Unterschied zwischen $MT1/2w$ und $MTpmw$.

Bezugshorizonte am Seegat

Für das Hoch- und Niedrigwasserniveau am Seegat gilt sinngemäß das oben Gesagte: Als tidedynamisch bestimmte Kennflächen begrenzen sie den intertidalen Bereich der Querschnittsfläche eines Seegats. Daraus folgen so wichtige Informationen wie z. B. die Kenntnis der prozentualen und absoluten Flächenänderung eines Seegatquerschnitts im Verlauf einer Tide. Das zugehörige $MT1/2w$ -Niveau ergibt sich ebenfalls nach obigem Schema und entspricht somit auch dem beckeninternen $MT1/2w$.

Am Seegat kommt diesem „Niveau des halben Tidenhubs“ eine wichtigere Bedeutung zu als bei den Betrachtungen der Beckenhypsometrie: Das $MT1/2w$ bezeichnet am Seegat dasjenige Niveau, das den mittleren Durchflußquerschnitt des Seegats nach oben begrenzt. Dies gilt zumindest für die Prielflächen. Hier kann also für ein beliebiges Segment des Seegatprofils mit der Länge x formuliert werden:

$$Ac_x = [\bar{d}_{MTbw} - (\frac{1}{2} \cdot MThb)] \cdot x = \bar{d}_{MT1/2w} \cdot x \quad [m^2]$$

mit $\bar{d}_i(x)$ als mittlerer Wassertiefe des Segmentes x unterhalb des Tideniveaus i .

Über den seitlich angrenzenden Wattflächen ist das anders: Hier muß über eine Parametrisierung eine Querschnittsfläche gefunden werden, die der Tatsache Rechnung trägt, daß diese Abschnitte des Seegats zeitweise trockenfallen. Berücksichtigt wird dieser Umstand durch folgende Berechnungsgrundlage:

Über den zeitweise trockenfallenden Flächen wird der mittlere Durchflußquerschnitt parametrisiert durch die halbe Wassertiefe bei $MThw$, multipliziert mit dem prozentualen Anteil der $MThw$ -Wassertiefe am mittleren Tidenhub. Als Formel kann dies für ein Segment der Seegatrasse der Länge x geschrieben werden als:

$$Ac_x = \frac{d_{MThw}(x)}{2} \cdot \frac{d_{MThw}(x)}{MThb} \cdot x \quad [m^2]$$

Diese Parametrisierung wird verwendet für die Berechnung des mittleren Durchflußquerschnitts der trockenfallenden Abschnitte eines Seegatprofils. Für die Randbedingungen bei $\bar{d}_{MThw}(x) = MThb$ (Segment im $MTnw$ -Niveau, also am Übergang vom Subtidal zum Intertidal) und bei $\bar{d}_{MThw}(x) = 0$ (Übergang zum Supratidal) ergibt sich:

Für $\bar{d}_{MThw}(x) = MThb$:

$$Ac_x = \frac{d_{MThw}}{2} \cdot \frac{d_{MThw}}{MThb} \cdot x \Rightarrow Ac_x = \frac{MThb}{2} \cdot \frac{MThb}{MThb} \cdot x = \frac{MThb}{2} \cdot x$$

Dies entspricht dem Ergebnis der Berechnung über das $MT1/2w$, wie es oben für die (subtidalen) Prielflächen erfolgte. Es ergibt sich also ein stetiger Übergang vom Sub- zum Intertidal.

Für $\bar{d}_{MThw}(x) = 0$:

$$Ac_x = \frac{\bar{d}_{MThw}(x)}{2} \cdot \frac{\bar{d}_{MThw}(x)}{MThb} \cdot x \Rightarrow Ac_x = 0 \cdot x = 0$$

Auch dieses Ergebnis entspricht den Anforderungen: Am Übergang zum Supratidal, also im *MThw*-Niveau, existiert keine Querschnittsfläche.

Die hier vorgestellte Behandlung der intertidalen Abschnitte eines Seegatprofils berücksichtigt die Tatsache, daß diese Bereiche nicht permanent wasserbedeckt sind und somit nur periodisch als Durchflußquerschnitt für das Tideprisma dienen können. Die Dauer der Überflutung und somit die Dauer der Durchflußfunktion wird über den Anteil der freien Wassersäule am mittleren Tidenhub parametrisiert. Die hierin enthaltene Annahme eines linearen Wasserstandsverlaufes ist zwar vereinfachend, fällt hinsichtlich ihrer verfälschenden Wirkung jedoch nicht ins Gewicht.

Die eingangs gestellte Frage nach geeigneten Bezugshorizonten zur Auswertung der Morphologie eines Tidebeckens in Abhängigkeit der Tideparameter muß also folgendermaßen beantwortet werden:

Die Verwendung terrestrischer Bezugshorizonte wie *NN* als direktem Anknüpfungsniveau ist nicht sinnvoll, da sie starr sind und keinerlei Kausalzusammenhang haben zu morphologisch-hydrologisch markanten Niveaus in den einzelnen Tidebecken. Tideabhängige Niveaus sind wegen ihrer räumlichen Variabilität flexibler und somit genauer. Allerdings sollten sie ihre Definition aus dreidimensionalen (Volumen-)Überlegungen heraus erhalten, um sie für ebensolche Fragestellungen optimal einsetzen zu können. Eine Einbeziehung der trockenfallenden Wattflächen in geeigneter Form ist unbedingt notwendig.

1.3 Abgrenzung und Morphometrie der Tidebecken

Es wurden insgesamt 14 Tidebecken (TBs) sowie die jeweils zugehörigen Seegats ausgewiesen und näher untersucht. Das Eiderästuar seewärts des Sperrwerkes wurde trotz seiner abweichenden Hydrologie (bedeutender Landabfluß, stark anthropogen beeinflusst) für die Flächen- und Volumenberechnungen einbezogen, um Aussagen über den Einfluß des Oberwasserabflusses auf die Beckenmorphologie zu ermöglichen.

Die Bestimmung der Watthöhenscheiden als seitliche Begrenzungen der TBs erfolgte rechnergestützt auf der Basis des Geländemodells. Soweit es sich um natürliche Watthöhenscheiden, also keine Deiche u. ä. handelte, erfolgte die Festlegung der Trasse durch die automatisierte Verbindung der höchstgelegenen Geländepunkte.

Nicht in jedem Fall bildet die (morphologische) Watthöhenscheide auch die (hydrologische) Wattwasserscheide, also die tatsächliche Trennlinie der Tideprismen benachbarter Tidebecken. V. a. im Falle niedriggelegener Höhenscheiden erfolgt regelmäßig ein Wasserübertritt zwischen zwei Tidebecken. DIECKMANN (1985, 199) zeigt schematisch die möglichen Konstellationen. Da jedoch die tatsächlichen Wattwasserscheiden nicht bekannt und noch dazu sehr variabel sind, müssen die morphologischen Höhenscheiden als Annäherung dienen.

Im schleswig-holsteinischen Wattenmeer sind alle Watthöhenscheiden verschleppt in Richtung der tidebedingten Restströme. Durch unterschiedliche Eintrittszeiten der Scheitelwerte in benachbarten Becken und durch Umströmungen von Inseln haben sich die Watthöhenscheiden in Richtung auf die (tatsächlichen) Wattwasserscheiden verlagert, ohne sie allerdings im Einzelfall immer erreicht zu haben, so daß dort mit einer weiteren Verlagerung zu rechnen ist.

Einige Wattwasserscheiden wurden künstlich festgelegt durch den Bau von hochwasserfreien Dämmen (Hindenburgdamm, Rømø-Damm, Verbindungsdämme nach Nordstrand, Oland, Langeneß, Nordstrandischmoor und zur Hamburger Hallig). In diesem Fall

Tab. 1: Übersicht zahlreicher morphologischer Parameter der 14 Tidebecken in Schleswig-Holstein (von Norden nach Süden)

	LT	HT	NA	SA	HL	RW	NH	TB	EM	WL	P	F	N	S
Fläche [km ²]														
Gesamtfläche inkl. Supratidal:	420,4	290,8	249,2	174,3	19,7	87,2	463,5	16,6	53,8	68,4	211,3	47,6	42,0	19,9
Fläche < MThw: Ab _{MThw}	402,3	290,2	245,2	169,3	17,8	83,7	441,8	6,3	49,9	66,1	203,0	45,4	37,3	17,1
Fläche < MTpmw: Ab _{MTpmw}	323,7	271,8	222,9	149,7	14,4	72,7	351,9	3,8	38,0	49,5	162,7	35,3	30,3	14,1
Fläche < MTnw: Ab _{MTnw}	195,2	152,9	94,4	76,1	1,1	17,6	139,9	0,1	15,6	12,9	54,9	8,3	4,5	0,8
Intertidalfläche A _i	207,2	137,3	150,7	93,1	16,7	66,1	301,9	6,2	34,3	53,2	148,1	37,1	32,8	16,3
Tiefen [m]														
mittl. Tiefe zu NN bei MThw	-1,84	-2,23	-2,52	-2,64	-0,08	-1,13	-2,63	+0,34	-1,39	-0,88	-1,86	-0,80	-0,34	+0,14
mittl. Tiefe zu NN bei MTnw	-3,54	-3,78	-5,73	-5,44	-2,73	-4,73	-8,13	-2,71	-4,52	-4,61	-6,77	-4,72	-3,09	-2,33
mittl. Tiefe unter MThw bei MThw	-2,66	-3,23	-3,73	-3,94	-1,28	-2,36	-4,03	-0,96	-2,81	-2,24	-3,39	-2,30	-1,79	-1,32
mittl. Tiefe unter MTnw bei MTnw	-2,51	-2,67	-4,24	-3,90	-1,31	-3,29	-6,43	-0,99	-2,82	-2,88	-5,02	-2,99	-1,43	-0,68
Volumina [Mio m ³]														
Fassungsvolumen bei MThw	1 069,8	936,3	914,0	666,9	22,8	196,6	1 779,8	6,1	140,2	147,8	688,8	104,5	66,7	22,5
Fassungsvolumen bei NN	767,0	654,3	629,7	459,8	6,0	103,8	1 237,9	1,2	79,0	73,1	418,3	48,2	22,4	4,2
Prielvolumen PV	490,4	408,9	400,8	297,0	1,5	54,7	899,4	0,1	43,9	37,0	275,3	24,8	6,4	0,5
Intertidales Sedimentvolumen ISV	165,5	82,7	146,9	115,5	25,4	81,6	504,3	13,1	59,2	93,3	253,0	67,3	55,7	31,1
Tideprisma P	579,4	527,5	513,2	369,9	21,3	141,9	880,4	6,0	96,3	110,8	413,6	79,7	60,3	22,0
Querschnittsfläche des Seegats [m ²]														
unter MTnw: Ac _{MTnw}	35 221	28 637	36 934	22 005	1 115	7 669	54 255	367	8 816	6 497	27 205	4 515	2 689	803
unter MT1/2w: Ac _{MT1/2w}	37 404	33 383	42 082	25 153	2 038	8 996	65 031	673	11 640	8 211	33 831	6 611	4 105	1 825
unter MThw: Ac _{MThw}	37 708	38 456	48 668	28 944	4 061	11 792	77 130	1 828	17 196	12 484	44 679	10 346	7 846	5 123
im Intertidal: Ac _{MThw} - Ac _{MTnw}	4 791	9 819	11 733	6 939	2 946	4 123	22 875	1 461	8 380	5 987	17 474	5 831	5 157	4 320

LT: Lister Tief, HT: Hörnum -Tief, NA: Norderaue, SA: Süderaue, HL: Hoogeloch, RW: Rummeloch West, NH: Norderhever-Heverstrom, TB: Tümlauer Bucht, EM: Eidermündung, WL: Wesselburener Loch, P: Die Piep, F: Flakstrom, N: Neufahrwasser, S: Schatzkammer

ist natürlich auch die Watthöhenscheide identisch mit der Wattwasserscheide mit dem Unterschied, daß diese Höhenscheiden hochwasserfrei sind.

Nun wurden folgende morphologisch-hydrologische Kennwerte für die 14 Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres und ihre Seegats bestimmt:

- Gesamtfläche inkl. Supratidal
- Ab_{MTnw} , Ab_{MTpmw} und Ab_{MThw}
- Intertidalfläche A_{int}
- mittlere Tiefe zu NN (\bar{d}_{NN}) bei $MThw$ und bei $MTnw$
- \bar{d}_{MThw} und \bar{d}_{MTnw}
- Gesamtwasservolumen WV , Wasservolumen unter NN und Prielvolumen PV
- Tideprisma P und intertidales Sedimentvolumen ISV
- Querschnittsfläche des Seegats unter $MTnw$, $MT1/2w$, $MThw$ sowie im Intertidal (Details hierzu s. o.)

Tab. 1 gibt die Ergebnisse wieder.

1.4 Vergleichende Auswertung

Somit stellt sich der Ist-Zustand (KFKI-Karte 1974/76) wie folgt dar:

Das schleswig-holsteinische Wattenmeer gliedert sich in 14 Tidebecken, 8 davon in Nordfriesland und 6 in Dithmarschen. Zusammen umfassen sie eine $MThw$ -Fläche von rd. 2075 km² (Nordfriesland: 1656 km², Dithmarschen: 419 km²). Hinzu kommt eine hochwasserfreie Fläche (Sände, Salzwiesen u. ä.) von rd. 89 km². Eingebettet in das nordfriesische Wattenmeer oder dieses begrenzend finden sich zehn Halligen (rd. 22 km²) sowie fünf Inseln (rd. 278 km², ohne Rømø).

Diese Flächen ergeben in der Summe ein Areal von 2464 km², das ist ungefähr die 4,5fache Fläche des Bodensees.

Die 14 Tidebecken haben bei mittlerem Hochwasser ein Fassungsvermögen von rd. 6763 Mio m³. Von diesem Wasservolumen werden rd. 57 % (3822 Mio m³) zweimal am Tag durch die Mündungen der 14 Prielsysteme ausgetauscht.

Lediglich im Eiderästuar kommt es zu einem nennenswerten Oberwasserabfluß. Die restlichen Festlandsabflüsse durch die zahlreichen Siele entlang der Deichlinie sind für die Wassermassenbilanz unerheblich.

Über alle Becken gemittelt umfaßt der intertidale Bereich (Wattflächen i. e. S., tidal flats) rd. 63 % (1301 km²) der bei mittlerem Hochwasser bedeckten Fläche, wobei der Anteil in Dithmarschen mit rd. 78 % deutlich höher ist als in Nordfriesland mit rd. 59%. Dies liegt an der Morphologie der dortigen Becken sowie an dem in Dithmarschen höheren Tidenhub.

Der tiefste Punkt des gesamten schleswig-holsteinischen Wattenmeeres liegt mit rd. 36 m unter NN im Lister Tief etwas seewärts der in dieser Arbeit festgelegten Seegattrasse (vgl. Abb. 1). Dies überrascht insofern, als das zugehörige Tidebecken nicht das größte der hier untersuchten und noch dazu dasjenige mit dem geringsten Tidenhub ist.

Sortiert man die 14 Tidebecken nach ihrer Größe (Ab_{MThw}) und betrachtet in Abhängigkeit davon den Anteil der Intertidalfläche A_{int} eines Beckens an seiner Gesamtfläche, so ergibt sich ein deutlicher Zusammenhang. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der schleswig-holsteinischen Becken, eingetragen in eine Abbildung von OOST u. DE BOER (1994, 87), in der entsprechende Werte für das niederländische Wattenmeer enthalten sind:

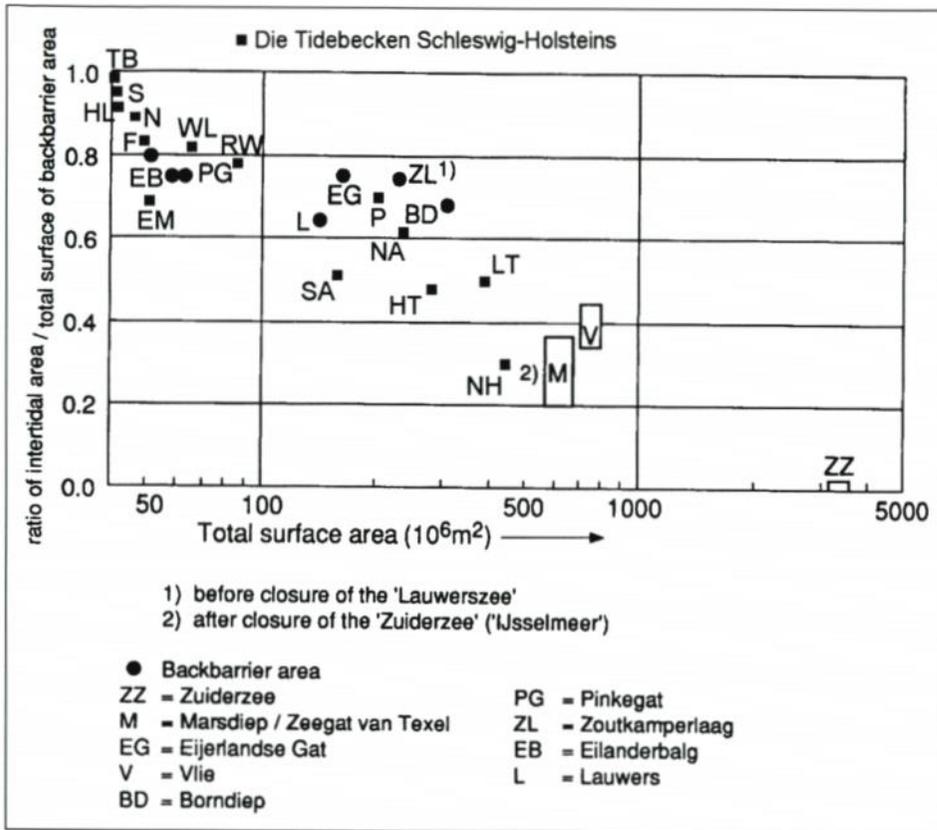


Abb. 3: Anteil der Intertidalfläche A_{int} (= Wattflächen i. e. S.) eines Tidebeckens an seiner Gesamtfläche A_{bMThw} in Abhängigkeit seiner Größe (nach: OOST u. DE BOER, 1994, ergänzt); Abkürzungen s. Tab. 1

Es zeigt sich ein Zusammenhang dergestalt, daß mit wachsender Beckengröße der Anteil der Wattflächen immer geringer wird, also die Prielflächen zunehmen, und zwar auf eine nichtlineare Weise (logarithmische Skalierung). Dies verwundert nicht: In großen Becken muß entsprechend viel Wasser in einer stets konstanten Zeitspanne transportiert werden, noch dazu über einen weiteren Weg als in kleinen Becken. Somit muß v. a. im seewärtigen Teil die Transportkapazität der Priele stark zunehmen, und entsprechend groß, also breit und auch tief, müssen sie sein.

Vergleicht man die Ergebnisse für das niederländische Wattenmeer (●) mit denen des schleswig-holsteinischen, so zeigt sich eine deutliche Streuung der Datenpunkte, allerdings ohne systematische Unterschiede zwischen den beiden Gebieten. Lediglich im Bereich der mittelgroßen Tidebecken (ca. 110 bis 500 Mio m^2) deutet sich ein etwas kleineres Verhältnis bei den schleswig-holsteinischen Becken gegenüber den niederländischen an. Dies mag eine Folge der Exposition und des daraus resultierenden mittleren Seegangs sein, ist jedoch nicht signifikant, zumal bei den kleinen Becken (< 100 Mio m^2) ein gegenteiliger Trend sichtbar wird. Hier wird eine rein statistische Betrachtung keine Kausalzusammenhänge aufzeigen können.

Es liegt die Vermutung nahe, daß mit wachsender Beckengröße auch die Beckentiefe (mittlere und maximale Tiefe) zunimmt. Daß dies zumindest für die maximale Tiefe nicht

überall so ist, wurde bereits oben erwähnt. Noch wichtiger für die Fassungsvermögen und Durchflußquerschnitte ist jedoch die **m i t t l e r e** Tiefe eines Tidebeckens. Die Abb. 4 zeigt die mittlere Tiefe unter $MThw$ (\bar{d}_{MThw}) der 14 Tidebecken in Abhängigkeit von der Beckengröße bei $MThw$.

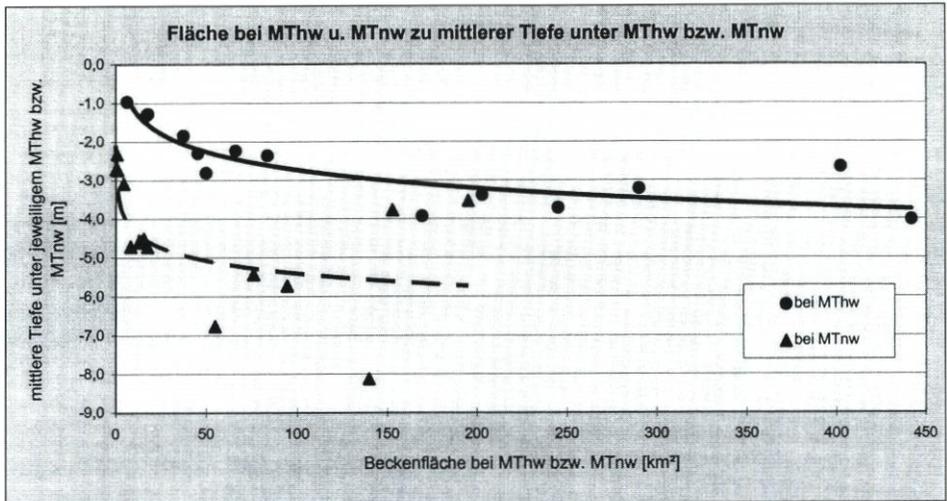


Abb. 4: mittlere Tiefe unter $MThw$ und $MTnw$ in Abhängigkeit von der Beckengröße

Das Ergebnis läßt sich folgendermaßen zusammenfassen: Das größte Becken hat auch die größte mittlere Tiefe bei $MThw$, das kleinste Becken die geringste. Durch die Bezugnahme auf $MThw$ wird der jeweiligen Gezeitensituation im Tidebecken bereits Rechnung getragen, allerdings bleibt der Einfluß unterschiedlicher Tidenhübe noch unberücksichtigt. Dies ist eine wichtige Erklärung der resultierenden Streuung der Datenpunkte um die eingetragene Regressionskurve, die einer nichtlinearen Funktion entspricht. Demnach nimmt die mittlere Wassertiefe bei $MThw$ mit wachsender Beckengröße zu, allerdings unterproportional. Für sehr große Becken ergibt sich bei den herrschenden Tideverhältnissen eine asymptotische mittlere Grenztiefe von rd. 4 m unter $MThw$. Dies erscheint auf den ersten Blick als recht wenig, wenn man bedenkt, daß der mittlere Tidenhub schon 2–3 m beträgt.

Dabei sind es gerade die Wattflächen, die dies bewirken: Sie bedecken große Teile des jeweiligen Beckens und liegen z. T. nur wenige Dezimeter unterhalb von $MThw$. Dementsprechend steigt auch die mittlere Wassertiefe der Tidebecken an, wenn man die Niedrigwasser-Situation betrachtet (s. o.). Es ist eben ein besonderes Charakteristikum von Wattgebieten, daß mit steigendem Wasserstand (also bei Flut) die **m i t t l e r e** Wassertiefe sinkt und umgekehrt.

Für die $MTnw$ -Situation ergibt sich eine sehr viel größere Streuung der Datenpunkte. Noch bemerkenswerter ist jedoch, daß nun das größte Becken (Norderhever-Heverstrom) zwar weiterhin die größte mittlere Wassertiefe unter $MTnw$ aufweist, aber nur noch die drittgrößte Fläche aller Becken beim jeweiligen Niedrigwasser hat. Das zweitgrößte Becken (Lister Tief) verfügt über die größte Fläche bei $MTnw$ und gleichzeitig über eine sehr geringe mittlere Wassertiefe bei Niedrigwasser, wie sie sonst nur noch die sehr kleinen Becken aufweisen. Ähnliches gilt für das drittgrößte Becken (Hörnüm-Tief), das nur einen geringen

Wattflächenanteil hat. Dementsprechend groß ist seine MT_{nw} -Fläche, und somit ist auch keine große mittlere Tiefe bei MT_{nw} nötig, um ein angemessenes Prielvolumen aufnehmen zu können.

Auch diese Betrachtung zeigt, daß eine rein statistische Auswertung zu wenig auf die beckenspezifischen Besonderheiten eingehen kann und somit als Mittel zur induktiven Ableitung eventueller Gesetzmäßigkeiten ungeeignet ist.

Es wird ebenso deutlich, daß die bisweilen vertretene Annahme, ein steigender Meeresspiegel könnte durch flächendeckendes Mitwachsen der Wattgebiete kompensiert werden, so nicht stimmen kann. Meeresspiegeländerungen haben auch eine Änderung der Flächengröße der zugehörigen Wattgebiete und ihrer Hypsometrie zur Folge. Eine derartige Änderung (Vergrößerung durch Überflutung von Supratidal, Zunahme der Intertidalflächen durch vermehrten Tidenhub ...) wiederum zieht eine Modifikation der Tiefenverteilung nach sich, die allerdings nicht in linearem Zusammenhang mit der Anstiegsrate steht, von beckenspezifischen Besonderheiten ganz zu schweigen. Folge: Nur bei absoluter Flächenkonstanz während eines Meeresspiegelanstiegs ohne $MThb$ -Änderung wäre – aus der Sicht der Tiefenverteilung – ein flächendeckendes Mitwachsen der Wattgebiete als morphologische Anpassung denkbar. Im Falle einer Vergrößerung der Grundfläche eines Tidebeckens durch Überflutung von Supratidalflächen hingegen muß demnach die mittlere Tiefe sogar zunehmen. Dies geschieht natürlich bereits durch den Anstieg des $MThw$ an sich. Da die neu hinzukommenden Areale wegen ihrer geringen Wassertiefen andererseits für eine Abnahme der mittleren Tiefe sorgen, müssen die Priele und Rinnen dann u. U. sogar weiter eingetieft werden (vgl. SPIEGEL, 1997).

Noch ein weiterer Zusammenhang zwischen Morphologie und Hydrologie soll hier angeführt werden: Es ist dies die Abhängigkeit des Anteils des Tideprismas am Gesamtwasservolumen eines Tidebeckens in Abhängigkeit von dessen Größe Ab_{MThw} .

Auch hier zeigt sich ein nicht-linearer Zusammenhang dergestalt, daß mit zunehmender Beckengröße der Anteil des Tideprismas P am gesamten Wasservolumen eines Tidebeckens

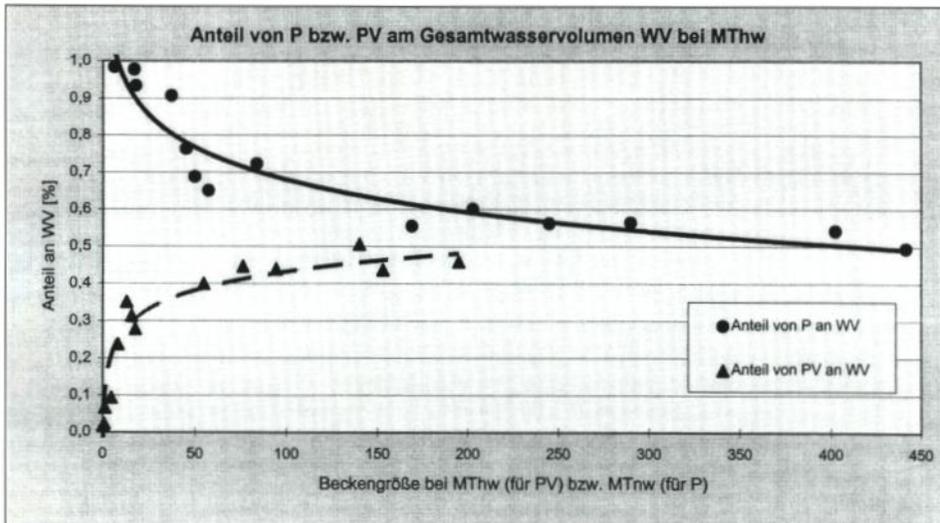


Abb. 5: Anteil des Tideprismas P und des Prielvolumens PV am Gesamtwasservolumen in Abhängigkeit von der Beckengröße bei MThw

sinkt. Mit anderen Worten: Je größer ein Becken ist, desto geringer wird derjenige Anteil seines gesamten Fassungsvermögens, der mit den Gezeitenströmen ein- und ausströmt. Der Zusammenhang erscheint hier besonders straff, der Einfluß von Tidenhub und von örtlichen Besonderheiten – wie Wasserübertritte und Festlandsabfluß – ist zwar deutlich vorhanden, aber nicht dominant. Als Grenzwert für große Tidebecken bei den gegebenen Gezeitenverhältnissen zeichnet sich etwa ein Anteil von 0,5 ab. Das bedeutet, daß (rechnerisch) in diesen Becken rund die Hälfte des Gesamtvolumens im Becken verharnt und die andere Hälfte ein- und ausströmt. Mit abnehmender Beckengröße steigt der Anteil des in ständigem Austausch befindlichen Wasservolumens (= Tideprisma P).

Ein sehr ähnliches Ergebnis erzielen LOUTERS u. GERRITSEN (1994) für ihre Untersuchung der Tidebecken in den Niederlanden: Sie ermitteln einen logarithmischen Zusammenhang zwischen Beckenvolumen unter NAP (niederländisches NN) und dem Tideprisma. Die größten Becken haben (umgerechnet) ebenfalls einen Anteil von ungefähr 50 % des Tideprismas am Gesamtwasservolumen.

Weitere derartige Ansätze zur vergleichenden Darstellung morphologisch-hydrologischer Kennwerte der schleswig-holsteinischen Tidebecken finden sich bei SPIEGEL (1997).

2. Ansätze zur Beurteilung morphologisch-hydrologischer Gleichgewichtszustände

Die „klassischen“ Kennwerte zur morphologischen Einordnung von Wateinzugsgebieten (vgl. z. B. RINGER, 1976a u. b; MISDORP et al., 1990) sind die Größen Tideprisma P (tidal prism), Einzugsgebietsgröße Ab (Area of the basin) und Seegatquerschnitt Ac (Area of the cross-section):

Das Tideprisma P ist dasjenige Wasservolumen im Einzugsgebiet, das im Höhenintervall zwischen mittlerem Tideniedrigwasser $MTnw$ und mittlerem Tidehochwasser $MThw$, also im Intertidal, liegt. Somit entspricht es demjenigen Volumen, das während der Flutphase durch das Seegat einströmt (Flutvolumen FV) bzw. das während Ebbe wieder ausfließt (Ebbvolumen EV), sofern es keinen Landabfluß gibt und auch keinen Übertritt über die Watthöhscheiden, also wenn $FV = EV$. Diese Bedingung ist jedoch nur selten vollständig erfüllt. Es wird häufig als Näherungswert formuliert:

$$P = \frac{FV + EV}{2}$$

Demgegenüber muß der Begriff des Tidevolumens (TV) abgegrenzt werden: Das TV umfaßt das gesamte Wasservolumen, das bei Flut einströmt und bei Ebbe wieder ausströmt, ggf. inklusive Oberwasserabfluß und/oder Wasserübertritten. Für die meisten Tidebecken gilt:

$$TV = FV + EV \approx 2 \cdot P$$

Die Einzugsgebietsgröße Ab wird definiert als das bei $MThw$ wasserbedeckte Areal (Ab_{MThw}). Die Supratidalfächen bleiben hierbei also unberücksichtigt.

Der Seegatquerschnitt Ac beschreibt die Größe der Querschnittsfläche des Seegatprofils unterhalb eines bestimmten Niveaus, z. B. unterhalb NN (Ac_{NN}) oder unterhalb $MTnw$ (Ac_{MTnw}).

Anhand dieser weitverbreiteten Parameter wurden von zahlreichen Autoren vergleichende Arbeiten zu einzelnen Küstenabschnitten vorgelegt. Die Auswertung der gesammelten Literatur erlaubt folgenden Überblick über die durchweg empirisch gewonnenen Beziehungen:

2.1 Gleichungen zur Beschreibung von Fließgleichgewichten

Tab. 2: Gleichungen zur Beschreibung von Fließgleichgewichten

Autor:	Formel:	Bemerkungen:
BARUA u. KOCH (1986)	$Ac = 58 \cdot 10^{-6} \cdot TV$	Megna Ästuar
BYRNE et al. (1980)	$Ac = 9,902 \cdot 10^{-3} \cdot P^{0,61}$	15 kleine Seegats in Chesapeake Bay, aus Abflußmessungen, Ac zwischen 0,5 und 26 m ²
DIECKMANN (1985)	$Ac = 3,720 \cdot 10^{-4} \cdot P^{0,915}$	P aus hypsometrischen Kurven der einzelnen Tidebecken berechnet (Regression über 26 der 28 deutschen Seegats)
EYSINK (1983)	$Ac = 80 \cdot 10^{-6} \cdot P$	Statt P müßte hier EV stehen, denn darum handelt es sich. Ac bezogen auf „mean water level“. Nakdong Ästuar
FERK (1992, 1995)	$P = 0,008 \cdot Ac^{1,04}$ bzw. $P = 0,009 \cdot Ac + 25,3$	P in Mio m ³
GERRITSEN u. DE JONG (1985)	$EV = (17\,106 \cdot Ac) - 79,2 \cdot 10^6$ $FV = (16\,092 \cdot Ac) - 48,4 \cdot 10^6$ $TV = (33\,198 \cdot Ac) - 127,6 \cdot 10^6$	bezogen auf Springtideverhältnisse
GERRITSEN u. DE JONG (1985), GERRITSEN (1990)	$EV = (13\,538 \cdot Ac) + 1,445 \cdot 10^6$ $FV = (14\,405 \cdot Ac) - 5,214 \cdot 10^6$ bzw: $Ac = 7,16 \cdot 10^{-5} \cdot P - 135$	Diese Formeln gelten für die Rinnen innerhalb eines TB, nicht am Seegat
GIESE (1971)	$Ac_{MTnw} = k \cdot 10^{-4} \cdot P$	mit $k = 0,5$ bis $0,7$. ermittelt für Wattgebiete der Deutschen Bucht
HARING (1967)	$Ac = 4,129 \cdot 10^{-5} \cdot TV$	
HUME u. HERDENDORF (1990)	$Ac = 1,59 \cdot 10^{-4} \cdot P^{0,953}$	P für Springverhältnisse, bestimmt durch Abflußmessung. NO-Neuseeland
JARRETT (1976)	$Ac = 22,19 \cdot 10^{-6} \cdot P^{1,07}$ $Ac = 699,0 \cdot 10^{-6} \cdot P^{0,86}$ $Ac = 8,95 \cdot 10^{-6} \cdot P^{1,10}$ $Ac = 37,97 \cdot 10^{-6} \cdot P^{1,03}$	Atlantikküste Golfküste Pazifikküste Kombination aus allen drei Formeln
JARRETT (1976)	$Ac = 3,030 \cdot 10^{-5} \cdot P^{1,050}$	Atlantikküste
JARRETT (1976)	$Ac = 158 \cdot 10^{-6} \cdot P^{0,95}$	für Springverhältnisse

Tab. 2: Fortsetzung

Autor:	Formel:	Bemerkungen:
JOHNSON (1972)	$Ac = 678,1 \cdot 10^{-6} \cdot P^{0,88}$	P als Produkt aus mittlerer TB-Größe und Tidenhub am Seegat
VAN DER KREEKE u. HARING (1979)	$Ac = 0,82 \cdot 10^{-4} \cdot FV$	der Bezug auf FV anstatt P kommt davon, daß diese Formel für Flutdelta-gebiete entwickelt wurde
MISDORP et al. (1990)	$TV = (35\,959 \cdot Ac) - 152 \cdot 10^6$	ermittelt aus Tiefenkarten, nicht aus Abflußmessungen
NIEMEYER et al. (1995)	$Ac = 7,45 \cdot 10^{-5} \cdot TV$ $Ac = 7,72 \cdot 10^{-5} \cdot TV$ $Ac = 6,98 \cdot 10^{-5} \cdot TV$	für das Ostfriesische Wattenmeer für die Dithmarscher Bucht (vor der Eindeichung) für die Dithmarscher Bucht (nach Beginn der Eindeichung) vermutlich ist TV hier durch P zu ersetzen
O'BRIEN (1931), bei VAN KLEEF (1991), S. 3	$Ac = 901,5 \cdot 10^{-6} \cdot P^{0,85}$	P als gemittelte Fläche bei Hoch- bzw. Niedrigwasser mal Springtidenhub am Seegat (v. a. kleine TBs). Ac bezogen auf „mean sea level“
original:	$Ac = 4,69 \cdot 10^{-4} \cdot P^{0,85}$	mit P in Fuß ³ , Ac in Fuß ² unter msl, alles zu Springtideverhältnissen bei halbtägigen Gezeiten
O'BRIEN (1969), bei van KLEEF (1991), S. 4	$Ac = 65,6 \cdot 10^{-6} \cdot P$	P als gemittelte Fläche bei Hoch- bzw. Niedrigwasser mal Tidenhub am Seegat (v. a. kleine TB's). Ac bezogen auf „mean sea level“
STEIJN (1991)	$Ac = 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot P^{1,03}$	P für Springverhältnisse

Zahlreiche weitere Beziehungen, auch zwischen hier nicht genannten Parametern, wurden von zahlreichen Autoren für verschiedene Wattgebiete berechnet. Ein umfassender Überblick findet sich bei SPIEGEL (1997).

Mit allen o. g. Zusammenhängen wird in erster Linie versucht, Relationen zwischen zwei Parametern zu beschreiben, zu quantifizieren und eventuell mit Hilfe statistischer „Beweise“ zu Gesetzmäßigkeiten aufzuwerten. Oft sollen damit dann beobachtete oder erwartete Änderungen der hydrologischen Rahmenbedingungen in ihrer Auswirkung auf die Morphologie abgeschätzt werden. Dabei erfassen diese statistischen Zusammenhänge stets höchstens einige wenige (meist nur zwei) der in diesem komplexen System enthaltenen Relationen unter Vernachlässigung der – gelegentlich dominierenden – beckenspezifischen Besonderheiten und v. a. des jeweils herrschenden Tidenhubs.

OOST u. DE BOER (1994) stellen zu den von ihnen diskutierten Gleichungen fest: „This and earlier numerical relationships have all been defined empirically; the exact nature of the generating physical mechanisms is still subject to debate ...“.

2.2 Definition zweier Szenarios

Die meisten Arbeiten, die sich mit der Erfassung von Fließgleichgewichten für die Wattenmeer-Morphologie befassen, haben ihren Antrieb in dem Wunsch, morphologische Umgestaltungen für die Zukunft vorhersagen zu können. Dies wiederum rührt daher, daß auch in Zukunft (wie in den letzten Jahrhunderten und -tausenden auch) mehr oder weniger ausgeprägte Änderungen der Tideverhältnisse als Folge eines globalen Meeresspiegelanstiegs stattfinden werden.

Nun hat ein globaler Meeresspiegelanstieg von Ort zu Ort sehr unterschiedliche Auswirkungen. Gerade die flachen Wattgebiete am Rande der Nordsee reagieren in ihrer Tidedynamik mehr oder weniger abweichend von dem Anstiegsbetrag im offenen Ozean.

Es kann also nicht der Versuch unternommen werden, die zukünftige Meeresspiegelentwicklung anzugeben, etwa durch einen Anstiegsbetrag des „mean sea level“. Lediglich die Festlegung zweier als realistisch für den Untersuchungsraum anzunehmender Szenarios, stellvertretend für die unbekannt Zukunft, kann als Werkzeug für weitere Überlegungen dienen.

FÜHRBÖTER u. JENSEN (1985) zeigen, daß die Wasserstandsentwicklung der letzten rd. 100 Jahre an den deutschen Pegeln keineswegs gleichförmig war. Zeitlich wie räumlich gab es Unterschiede. Dabei beobachten sie einen verstärkten Anstieg (Beschleunigung) des *MThw* seit etwa 1950. Anhand ihrer Ergebnisse sollen die Anstiegsraten des *MThw* für die beiden Szenarios bestimmt werden, die den weiteren Auswertungen zugrunde liegen: FÜHRBÖTER u. JENSEN (1985) geben als mittlere Anstiegsrate des *MThw* in 100 Jahren an:

- für die Zeitreihe 1934-1983: 0,325 m
- für die Zeitreihe 1959-1983: 0,637 m

Diese Werte sind das Mittel für zehn Pegel, sechs in Niedersachsen und vier in Schleswig-Holstein. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Arbeiten, die mit anderen Zeitreihen naheliegenderweise zu etwas anderen Ergebnissen kommen, können die folgenden beiden Szenarios für den *MThw*-Anstieg in Schleswig-Holstein als begründet angenommen werden, wobei das 1. Szenario als wahrscheinlicher gilt:

1. Szenario: Anstieg des *MThw* um 0,35 m / 100 Jahre
2. Szenario: Anstieg des *MThw* um 0,60 m / 100 Jahre

Hinsichtlich der Entwicklung des *MTnw* und damit des Tidenhubs ist die Situation deutlich schwieriger zu beurteilen:

FÜHRBÖTER u. JENSEN (1985) ermitteln für das *MTnw* über die Zeitreihen seit 1934 und 1959 ein leichtes Absinken des *MTnw*. Sie weisen für einige Pegel jedoch auch einen leichten Anstieg nach.

Als säkulares Szenario soll hier von einem leichten *MTnw*-Anstieg für das schleswig-holsteinische Wattenmeer ausgegangen werden. Um einen Anstieg des *MThb* dabei zu berücksichtigen, seien folgende *MTnw*-Anstiegsbeträge für die beiden Szenarios festgelegt:

1. Szenario: Anstieg des *MTnw* um 0,25 m / 100 Jahre
2. Szenario: Anstieg des *MTnw* um 0,40 m / 100 Jahre

Daraus ergibt sich für den Tidenhub:

1. Szenario: Anstieg des *MThb* um 0,10 m / 100 Jahre
2. Szenario: Anstieg des *MThb* um 0,20 m / 100 Jahre

Diese Annahmen decken sich ebenfalls gut mit jüngsten Modellergebnissen von STENGEL u. ZIELKE (1994), die u. a. für das schleswig-holsteinische Wattenmeer eine Erhöhung des Tidenhubs um bis zu 30 % des Meeresspiegelanstiegs ergeben.

Somit wird also im weiteren Verlauf mit folgenden Änderungen der Tidestände in den einzelnen Tidebecken gerechnet:

Szenario 1:

$MThw + 0,35$ m gegenüber Ist-Zustand

$MTnw + 0,25$ m gegenüber Ist-Zustand

=> $MThb + 0,10$ m gegenüber Ist-Zustand

Szenario 2:

$MThw + 0,60$ m gegenüber Ist-Zustand

$MTnw + 0,40$ m gegenüber Ist-Zustand

=> $MThb + 0,20$ m gegenüber Ist-Zustand

2.3 Anwendung

Zuerst einige grundsätzliche Überlegungen:

Wenn das mittlere Hochwasser ansteigt, hat dies u. a. folgende Auswirkungen:

- Vergrößerung der Gesamtfläche des Tidebeckens durch Überflutung vormals supratidaler Areale
 - Vergrößerung der intertidalen Fläche (auch wenn $MTnw$ in gleichem Maße steigt, wegen der nichtlinearen Hypsometrie)
 - Vergrößerung des Gesamtwasservolumens WV im Tidebecken
 - Vergrößerung des Tideprismas
 - Vergrößerung des intertidalen Sedimentvolumens ISV
 - Vergrößerung des Seegatquerschnitts $Ac_{MT1/2w}$ (durch Erhöhung des $MT1/2w$)
- Demgegenüber hat ein Anstieg des $MTnw$ folgende Auswirkungen:
- Verringerung der intertidalen Fläche (bei konstantem $MThw$, s. o.)
 - Vergrößerung der subtidalen Fläche
 - Verringerung des Tideprismas P
 - Vergrößerung des Prielvolumens PV
 - Verringerung des intertidalen Sedimentvolumens ISV
 - Vergrößerung des subtidalen Sedimentvolumens SSV
 - Vergrößerung des Seegatquerschnitts $Ac_{MT1/2w}$ (durch Erhöhung des $MT1/2w$)

Auf das Gesamtwasservolumen WV hat der $MTnw$ -Anstieg keine Auswirkungen.

Aus dieser ersten Gegenüberstellung wird erneut die Berechtigung deutlich für das Plädoyer, derartige Parameter nicht an NN zu koppeln, sondern an tideabhängige Niveaus. Denn wenn z. B. der Seegatquerschnitt zu NN gemessen würde, dann bliebe er bei einem Anstieg des $MThw$ und/oder des $MTnw$ konstant, wogegen in beiden Fällen das Tideprisma sich ändern würde. Wo bliebe da die Vergleichbarkeit?

Die o. g. Betrachtung zeigt, daß ein Anstieg des $MThw$ und des $MTnw$ teilweise gleichgerichtete, teilweise entgegengesetzte Entwicklungen hervorruft.

Bedeutsam sind die Auswirkungen hinsichtlich des Seegatquerschnitts: Bei einem $MThw$ -Anstieg ebenso wie bei einem $MTnw$ -Anstieg wird die Querschnittsfläche vergrößert, da sie sinnvollerweise auf $MT1/2w$ (nach o. g. Definition) bezogen wird. Somit ist Ac die einzige Größe, die in beiden Fällen gleichgerichtet geändert wird.

Des weiteren muß gerade die Maßzahl des Seegatquerschnitts auch reagieren können auf geänderten Tidenhub: Es wurde bereits dargelegt, daß es sehr unwahrscheinlich ist, daß sich in Zukunft das $MThw$ und $MTnw$ parallel entwickeln. Vielmehr ist mit einer Erhöhung des Tidenhubs zu rechnen. Dieser Entwicklung wird ebenfalls dadurch Rechnung getragen, daß der Seegatquerschnitt auf $MT1/2w$ bezogen wird. Dieses Niveau ist nämlich von $MThw$ und $MTnw$ abhängig. Diese Überlegung zeigt aber auch, daß es nicht funktionieren kann, nur das Tideprisma und den Seegatquerschnitt einander gegenüberzustellen: Die Berücksichtigung des Tidenhubs ist unabdingbar.

Die folgenden Tabellen geben für die beiden oben beschriebenen Szenarios die neuen Werte der Parameter Gesamtfläche (Ab_{MThw}), Intertidalfläche (Ab_{int}), Tideprisma (P), Prielvolumen (PV) und intertidales Sedimentvolumen (ISV) wieder. In Klammern ist jeweils die Veränderung in Prozent gegenüber dem Ist-Zustand (vgl. Tab. 1) angegeben:

Tab. 3: Gesamtfläche, Intertidalfläche, Tideprisma, Prielvolumen und intertidales Sedimentvolumen der 14 Tidebecken für das 1. Szenario (in Klammern: Änderung gegenüber Ist-Zustand in Prozent)

1. Szenario						
Tidebecken	MThw-Fläche [km ²]	Intertidalf. [km ²]	Tideprisma [Mio m ³]	Prielvolumen [Mio m ³]	int. Sed.-Vol. [Mio m ³]	
Lister Tief	419,5 (+4,3)	188,5 (-9,0)	670,4 (+15,7)	543,9 (+10,9)	147,6 (-10,8)	
Hörnum-Tief	290,5 (+0,1)	96,2 (-29,9)	585,2 (+10,9)	452,8 (+10,7)	54,7 (-33,9)	
Norderaue	247,3 (+0,8)	139,0 (-7,7)	574,1 (+11,9)	426,1 (+6,3)	116,5 (-20,7)	
Hoogeloch	19,7 (+10,7)	18,3 (+9,6)	27,6 (+29,6)	1,8 (+20,0)	26,1 (+2,9)	
Süderaue	174,2 (+2,9)	89,8 (-3,5)	410,1 (+10,9)	317,1 (+6,8)	107,6 (-6,8)	
Rummelloch West	87,0 (+3,9)	66,7 (+0,9)	167,1 (+17,8)	59,4 (+8,6)	73,7 (-9,6)	
Norderh.-H.-strom	463,2 (+4,8)	315,1 (+4,4)	1003,8 (+14,0)	935,4 (+4,0)	494,1 (-2,0)	
Tümlauer Bucht	15,9 (+152,4)	15,8 (+154,8)	9,6 (+60,0)	0,1 (+0)	40,1 (+205,2)	
Eidermündung	52,3 (+5,0)	35,6 (+3,8)	110,1 (+14,3)	48,0 (+9,2)	58,4 (-1,4)	
Wesselbur. Loch	67,6 (+2,3)	53,0 (-0,4)	130,7 (+17,9)	40,5 (+9,2)	84,9 (-9,0)	
Piep	210,9 (+3,9)	150,8 (+1,8)	472,3 (+14,2)	289,6 (+5,2)	241,7 (-4,5)	
Flackstrom	46,5 (+2,4)	37,4 (+0,8)	93,7 (+17,5)	27,0 (+8,8)	61,6 (-8,5)	
Neufahrwasser	42,0 (+12,6)	36,4 (+11,0)	72,8 (+20,8)	7,7 (+19,7)	61,9 (+11,1)	
Schatzkammer	19,7 (+15,1)	18,6 (+14,1)	28,1 (+28,0)	0,7 (+46,0)	35,0 (+12,3)	

Die Flächenzuwächse (Spalte 2) zeigen das erwartete Bild: Dort, wo viel Supratidalfläche bereitsteht, sind die Raten hoch, ansonsten gering bis fast Null. Die Extreme der Skala werden gebildet von der Tümlauer Bucht, die ihre Größe mehr als verdoppelt, und andererseits dem Hörnum-Tief, dessen Hochwasserfläche praktisch unverändert bleibt. Nennenswerte Zuwächse (> 10 %) erfahren auch das Hoogeloch aufgrund der Einbeziehung von Teilen der Außensände sowie die Becken Neufahrwasser und Schatzkammer, die den überwiegenden Teil des Vorlandes hinzugewinnen.

Sehr viel heterogener zeigt sich das Bild hinsichtlich der Änderungen der Intertidalflächen (Spalte 3): Ihre Entwicklung hängt nicht nur vom Zugewinn bisheriger Supratidalfläche ab, sondern auch von der Höhenlage der bisherigen Wattflächen, denn diese bestimmt, ob und wieviel der bisherigen Intertidalfläche nun in das subtidale Höhenintervall gelangt. Somit kann also u. U. trotz Flächenzuwachs der Gesamtfläche ein Verlust an Intertidalfläche auftreten:

Erneut wird das Ergebnisspektrum begrenzt durch die Tümlauer Bucht und das Hörnum-Tief. In der Tümlauer Bucht wächst die Intertidalfläche um ziemlich genau den gleichen Betrag wie die Gesamtfläche, absolut wie relativ. Dies darf als Idealfall im Sinne eines guten Pufferungsvermögens der Morphologie gegenüber steigenden Meeresspiegelständen gelten. Das Gegenteil ist im Hörnum-Tief der Fall: Fast ein Drittel der Wattflächen gehen bereits im 1. Szenario verloren. Dieser Wert wird in keinem anderen Becken auch nur annähernd erreicht. Erneut weisen die Becken mit hohen Supratidal-Reserven auch bei der Bilanz des Intertidals deutliche Gewinne auf (Hoogeloch, Neufahrwasser, Schatzkammer). Negative Bilanzen hingegen erfahren die großen Becken in Nordfriesland, abgesehen vom größten, dem

Becken Norderhever-Heverstrom, das eine klar positive Bilanz hat. Auch das Lister Tief erfährt intertidale Verluste trotz eines Gewinns an Gesamtfläche. Hierin kommt die geringe mittlere Höhe der Wattflächen zum Ausdruck, v. a. im südwestlichen Teil des Beckens. Auffällig ist, daß in Dithmarschen alle Becken, auch das große Becken der Piep, positive Bilanzen zeigen mit Ausnahme des Wesselburener Lochs, wobei dessen negatives Ergebnis sicher nicht signifikant im Minusbereich liegt. Hierin bestätigt sich erneut die These, daß die Wattflächen in Dithmarschen im Mittel höher liegen als in Nordfriesland und somit zu einer günstigeren Ausgangssituation führen als im nördlichen Teil des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres.

Deutlich homogener wird das Bild bei der Betrachtung der Änderungen des Tideprismas (Spalte 4) in den 14 Becken: Durchgehend zeigen sich Zuwächse zwischen rd. 10 und 30 %, lediglich die Tümlauer Bucht weist 60 % auf infolge ihrer überproportionalen Flächen-gewinne.

Das Prielvolumen (Spalte 5) wächst ebenfalls in allen Becken. Das muß auch zwingend so sein, da das *MTnw* überall ansteigt.

Nennenswerte Unterschiede hingegen weist die Änderung des intertidalen Sedimentvolumens *ISV* auf (Spalte 6): Bei den Betrachtungen hierzu genauso wie zur Intertidalfläche muß berücksichtigt werden, daß beide Szenarios jeweils eine Vergrößerung des Tidenhubs beinhalten, also zu einer Ausdehnung von Intertidalfläche und -sedimentvolumen beitragen. Dennoch ist dies nicht überall der Fall: Erneut zeigt das Hörnum-Tief die größten Verluste und die Tümlauer Bucht den mit Abstand größten Gewinn. Interessante Aussagen liefert ein Vergleich der Spalten 3 und 6: Hier lassen sich einige Becken finden (Rummelloch West, Norderhever-Heverstrom, Eidermündung, Piep, Flackstrom), die zwar eine Vergrößerung der Intertidalfläche aufweisen, allerdings eine Abnahme des intertidalen Sedimentvolumens. Somit relativiert sich die o. g. günstigere Ausgangslage in Dithmarschen wieder. Allerdings weisen hier die beiden südlichsten Becken auch hinsichtlich des intertidalen Sedimentvolumens Gewinne auf. Dies gilt ansonsten außer für die Tümlauer Bucht nur noch für das kleine, durch Zugewinn von den Außensänden gekennzeichnete Hoogeloch.

Tab. 4: Gesamtfläche, Intertidalfläche, Tideprisma, Prielvolumen und intertidales Sedimentvolumen der 14 Tidebecken für das 2. Szenario (in Klammern: Änderung gegenüber Ist-Zustand in Prozent)

2. Szenario					
Tidebecken	MThw-Fläche [km ²]	Intertidalfl. [km ²]	Tideprisma [Mio m ³]	Prielvolumen [Mio m ³]	int. Sed.-Vol. [Mio m ³]
Lister Tief	420,4 (+4,5)	162,1 (-21,8)	738,7 (+27,5)	580,6 (+18,4)	123,1 (-25,6)
Hörnum-Tief	290,6 (+0,1)	74,6 (-45,7)	627,1 (+18,9)	483,5 (+18,2)	41,9 (-49,3)
Norderaue	248,5 (+1,3)	130,9 (-13,1)	619,0 (+20,6)	443,1 (+10,6)	99,9 (-32,0)
Hoogeloch	19,7 (+10,7)	18,0 (+7,8)	32,3 (+51,5)	2,1 (+40,0)	23,4 (-7,7)
Süderaue	174,2 (+2,9)	84,8 (-8,9)	440,6 (+19,1)	330,1 (+11,1)	94,5 (-18,2)
Rummelloch West	87,2 (+4,2)	64,7 (-2,1)	185,7 (+30,9)	62,6 (+14,4)	64,3 (-21,2)
Norderh.-H.-strom	463,5 (+4,9)	309,0 (+2,4)	1097,0 (+24,6)	958,1 (+6,5)	448,4 (-11,1)
Tümlauer Bucht	16,6(+163,5)	16,4(+164,5)	13,7 (+27,8)	0,2(+100,0)	39,8(+202,9)
Eidermündung	53,4 (+7,0)	36,0 (+5,0)	120,8 (+25,4)	50,5 (+15,0)	56,4 (-4,8)
Wesselbur. Loch	68,3 (+3,4)	52,7 (-0,9)	145,5 (+31,2)	42,7 (+15,4)	79,4 (-15,0)
Piep	211,3 (+4,1)	147,7 (-0,3)	515,8 (+24,7)	298,9 (+8,6)	220,4 (-12,9)
Flackstrom	47,0 (+3,6)	37,2 (+0,3)	103,9 (+30,4)	28,4 (+14,4)	57,8 (-14,1)
Neufahrwasser	42,0 (+12,7)	35,7 (+8,8)	82,4 (+36,8)	8,6 (+33,4)	56,6 (+1,6)
Schatzkammer	19,8 (+16,0)	18,5 (+13,5)	32,9 (+49,7)	0,9 (+80,0)	32,7 (+4,9)

Der Schritt vom ersten zum zweiten Szenario liefert hinsichtlich der Bilanz der Gesamtflächen keine großen Unterschiede: Bedingt durch die Modellarchitektur werden die meisten Supratidalflächen bereits vom ersten Szenario einbezogen, es kommt nur zu kleinen weiteren Zuwächsen durch den zusätzlichen Anstieg des $MThw$ von 0,35 auf 0,60 m.

Anders hingegen verhält es sich mit den Wattflächen: Wenn praktisch keine neue Supratidalfläche hinzukommt und gleichzeitig das $MTnw$ weiter steigt, so ist eine Abnahme der Wattflächengröße zu erwarten. Dieser Effekt tritt jedoch längst nicht überall auf: Vor allem die kleinen Becken wiederum (Hoogeloch, Tümlauer Bucht, Neufahrwasser, Schatzkammer) erfahren auch im zweiten Szenario noch eine Vergrößerung ihrer Intertidalfläche. Und auch bei größeren Becken kann dies auftreten: Als Besonderheit darf hierbei das größte untersuchte Becken, Norderhever-Heverstrom, gelten, das sogar beim Übergang auf das zweite Szenario noch Gewinne im Intertidal aufweisen kann. Sie ergeben sich hauptsächlich aus den Zugewinnen der Supratidalflächen im Mündungsbereich (Süderoogsand und Westerheversand) sowie aus den zahlreichen Vorländern entlang des Heverstroms und entlang der Festlandsküste der Norderhever.

Als anderes Extrem ist erneut das Hörnum-Tief zu nennen, das nun fast die Hälfte seiner ursprünglichen Wattflächen verloren hat.

Hinsichtlich des Tideprismas verläuft die Entwicklung erwartungsgemäß: Weitere Zunahmen in annähernd linearem Umfang kennzeichnen die Becken. Lediglich die Tümlauer Bucht und die Schatzkammer zeigen rechnerisch einen geringeren Zuwachs des Tideprismas im zweiten Szenario gegenüber dem ersten: Dies resultiert aus der gleichzeitigen Erhöhung des $MTnw$. Entsprechend deutlich ist demzufolge nämlich der Anstieg des Prielvolumens in diesen Becken im zweiten Szenario. Ansonsten entspricht auch dieser Anstieg den Erwartungen, die sich aus der weiteren Erhöhung des Niedrigwassers ergeben.

Markant wiederum sind die Unterschiede bei der Entwicklung des intertidalen Sedimentvolumens: Nur noch die Tümlauer Bucht, das Neufahrwasser und die Schatzkammer erfahren Gewinne im zweiten Szenario. Alle anderen Becken verlieren intertidales Sediment, am deutlichsten wiederum das Hörnum-Tief mit rd. 50 %. Auch das Hoogeloch kann seinen leichten Zugewinn aus dem ersten Szenario nicht halten.

Es zeigt sich, daß die Änderung der Parameter für jedes Becken andere Ausmaße annimmt: Je nach Verfügbarkeit von Supratidalflächen und je nach Hypsometrie des jeweiligen Beckens fallen sie mehr oder weniger deutlich aus. Die Tümlauer Bucht stellt dabei sicher einen Extremfall dar: Die Entwicklung des kleinen Tidebeckens ist geprägt von den umgebenden ausgedehnten Supratidalflächen, die erst weit landeinwärts von Deichen begrenzt sind.

Relativierend muß hinzugefügt werden, daß die tatsächliche Höhenlage v. a. der Salzwiesen nicht genau bekannt ist. Es ist im Einzelfall also möglich, daß an manchen Stellen die Supratidalflächen, die jetzt bereits im 1. Szenario (rechnerisch) zum Tidebecken hinzukommen, frühestens im Falle des 2. Szenarios regelmäßig überflutet würden. Diese Einschränkung ändert jedoch nichts an der prinzipiellen Aussage, daß der Schritt vom Ist-Zustand zum 1. Szenario deutlichere Folgen hat als der Schritt vom 1. zum 2. Szenario. Diese Überlegung ist deshalb von Interesse, da man ja das 1. Szenario auch als Zwischenschritt zum 2. betrachten kann. In allen Überlegungen spielt die Zeitfrage keine Rolle, es kommt also nicht darauf an, ob die Wasserstände der Szenarios in hundert Jahren eintreten oder früher bzw. später. Lediglich zur formal korrekten Formulierung eines Szenarios ist die Bezugnahme auf die Zeitskala notwendig.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen graphisch die Änderungen des Tideprismas, der Beckengröße und des Seegatquerschnitts für die 14 Tidebecken und für beide Szenarios. Zum Vergleich sind neben den Ist-Werten auch die jeweiligen Regressionsgeraden eingetragen:

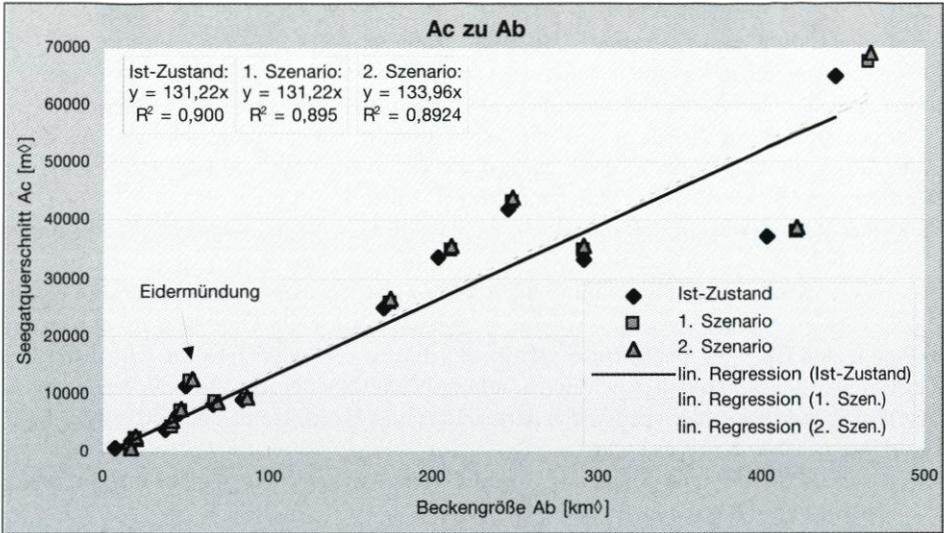


Abb. 6: Beckengröße zu Seegatquerschnitt für den Ist-Zustand und beide Szenarios

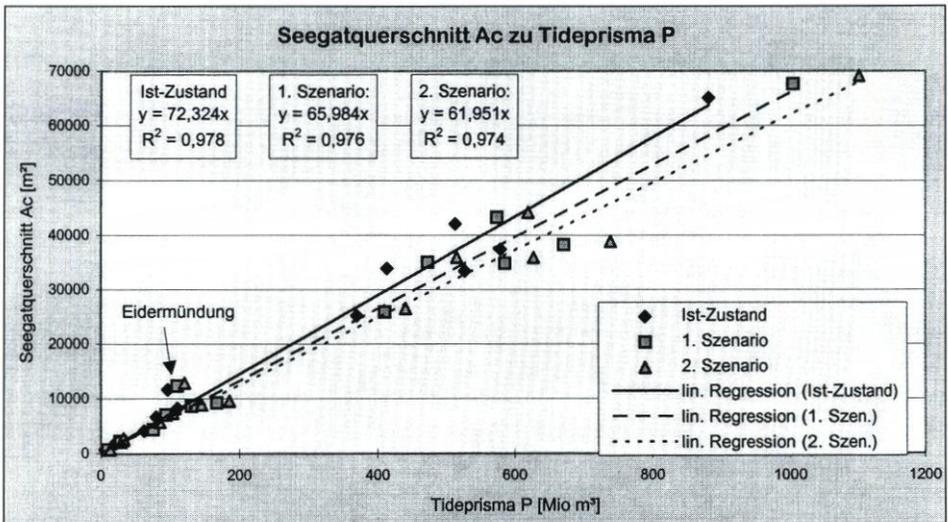


Abb. 7: Tideprisma zu Seegatquerschnitt für den Ist-Zustand und beide Szenarios

Die beckenspezifischen Unterschiede hinsichtlich der Reaktion auf die beiden Szenarios werden deutlich. Interessant ist ein Blick auf die Verschiebung der beiden Regressionsgeraden: So gering die quantitative Aussagefähigkeit einer derartigen statistischen Auswertung auch ist (die „guten“ Werte für R^2 haben aufgrund des zu kleinen Datenkollektivs keine statistische Relevanz), so klar sind doch die qualitativen Folgerungen, die sich aus einer solch einfachen Gegenüberstellung ergeben: Abb. 6 zeigt die Verlagerung der entsprechenden Datenpunkte für den Übergang vom Ist-Zustand zu den beiden Szenarios. Die zugehörigen Regressionsgeraden ändern sich dabei kaum, sie werden geringfügig steiler. Dies bedeutet,

daß die Seegatquerschnitte (y-Achse) prozentual etwas stärker wachsen als die Becken-
größen. Dies sagt allerdings nichts aus über zukünftig zu erwartende morphologische An-
passungen. Ganz anders das Bild in Abb. 7: Die Regressionsgeraden werden deutlich flacher,
bedingt durch ein sehr viel stärkeres relatives Wachstum der Tideprismen gegenüber den See-
gatöffnungen. Unter Einbeziehung der Abb. 6 läßt sich dieser Zuwachs der Tideprismen
überwiegend begründen durch den Anstieg des Tidenhubs und nur in sehr geringem Maße
durch Hinzugewinn neuer Flächen – ein weiterer Beleg für die notwendige Berücksichtigung
des Tidenhubs.

Die folgende Abbildung zeigt abschließend nochmals die Gegenüberstellung von See-
gatquerschnitt und Tideprisma. Zusätzlich sind zum Vergleich die entsprechenden Werte von
FERK (1992) für einige Tidebecken aus Ostfriesland sowie von MISDORP et al. (1990) für das
niederländische Wattenmeer eingetragen:

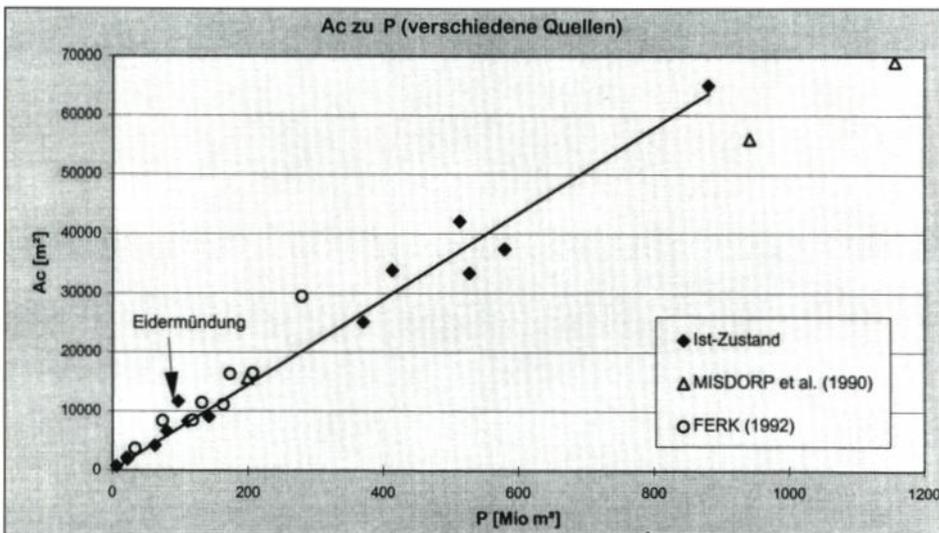


Abb. 8: Verhältnis von Tideprisma zu Seegatquerschnitt nach verschiedenen Quellen

Vergleicht man die berechneten Regressionsgeraden des Ist-Zustandes mit den zahlrei-
chen ebenfalls empirisch ermittelten Ergebnissen anderer Autoren (vgl. Kap. 2.1), so zeigt
sich: Die Ergebnisse haben die gleiche Größenordnung, jedoch machen die unterschiedlichen
Vorgehensweisen (Datengewinnung, Bezugshorizonte, Stichprobenumfang usw.) sowie die
jeweils bedeutsamen örtlichen Gegebenheiten einen direkten Vergleich oder gar eine Über-
tragung unmöglich. Die Berücksichtigung des jeweils herrschenden Tidenhubs ist ein we-
sentlicher Schritt zur Verbesserung der Aussagekraft und Vergleichbarkeit derartiger Resul-
tate.

Als Hilfsmittel zur Prognose von morphologischen Anpassungen an geänderte Tidebe-
dingungen sind derartige Betrachtungen jedoch nicht brauchbar: Ihre statistische Haltbar-
keit ist hierfür nicht ausreichend. Davon abgesehen liefern derartige Ergebnisse keinerlei
quantitative, physikalische Erklärungen für die ermittelten Zusammenhänge. Wünschens-
wert sind deduktive Ansätze, zumindest auf der Basis von Tidebecken (SPIEGEL, 1997),
günstigstenfalls natürlich gekoppelte hydrologisch-morphologische HN-Modellierungen
hoher Auflösung.

3. Schlußfolgerungen

Zwei Themenbereiche wurden in den vorangegangenen Kapiteln für die 14 Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres behandelt: Die vergleichende Erfassung zahlreicher morphologisch-hydrologischer Kennwerte des Ist-Zustandes (KFKI-Küstenkarte) und ihre Einordnung in die Ergebnisse internationaler Arbeiten einerseits sowie die Quantifizierung der Änderungen dieser Kennwerte auf der Basis zweier Meeresspiegelanstiegsszenarios.

Der Vergleich mit den Watten Ostfrieslands (Werte von FERK in Abb. 8) zeigt keine systematischen Abweichungen der morphologischen Kennwerte gegenüber dem schleswig-holsteinischen Wattenmeer, sieht man einmal von den etwas „zu großen“ Seegatöffnungen ab. Dies liegt jedoch wenigstens zum Teil an einer geringfügig abweichenden Methodik der Festlegung der Seegatstrassen.

Auch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Teilen der Welt zeigt eine im Prinzip gute Übereinstimmung. Die folgende Abb. enthält die Regressionskurven verschiedener Autoren, basierend auf ihren jeweiligen Untersuchungsergebnissen, vgl. Kap. 2.1 (in Auszügen):

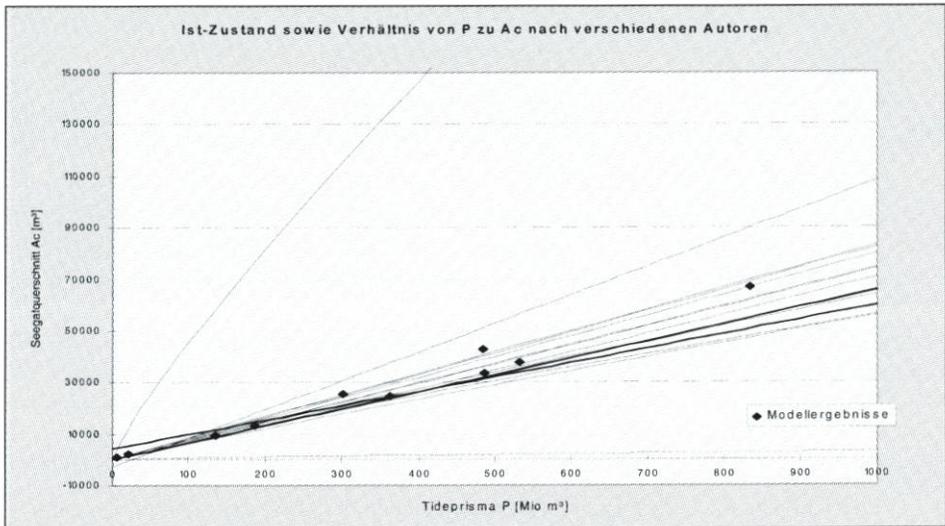


Abb. 9: Vergleich der Ergebnisse von Schleswig-Holstein ($Ac_{MT1/2w}$ zu P) mit den Ergebnissen anderer Autoren und Regionen (● = Schleswig-Holstein)

Diese Ähnlichkeiten sind nicht selbstverständlich, da äußere Einflüsse wie Tidenhub und -periode, Seegangsklima, Sturmfluthäufigkeit und -höhe, Vegetationsbedeckung u. v. m. Einfluß nehmen auf die Hydro- und Morphodynamik der Wattflächen. Vor diesem Hintergrund scheinen die meisten der gezeigten Regressionsgeraden eine unerwartete Ähnlichkeit zu besitzen. Vergleicht man dazu jedoch die Streuung der Daten von Schleswig-Holstein in obiger Abb., so wird klar, daß je nach Datenkollektiv verschiedene dieser Geraden „passen“ könnten mit entsprechenden Folgen für die Interpretation.

Es bleibt festzuhalten: Die Ergebnisse für Schleswig-Holstein im Ist-Zustand sind prinzipiell vergleichbar mit den meisten anderen Wattgebieten der Erde. Eine weitergehende Aussage auf der Basis derartiger Regressionen, z. B. als Prognoseinstrument für zukünftige

Meeresspiegelstände, verbietet sich aufgrund der fehlenden statistischen Aussagekraft. Diese These wird unterstützt durch die Ergebnisse in Kap. 2.3: Es gibt immense Unterschiede zwischen den 14 Tidebecken bei der Entwicklung der morphologisch-hydrologischen Kennwerte infolge eines steigenden Meeresspiegels. Sie sind mit statistischen Kollektivbetrachtungen nicht zu erfassen.

Die Veränderung der morphologisch-hydrologischen Kennwerte der 14 Tidebecken bei steigendem Meeresspiegel weist deutliche Unterschiede auf. Zusammenfassend bleibt festzustellen: Je größer die verfügbaren Supratidalflächen eines Tidebeckens sind, um so geringer sind die Änderungen der Kennwerte. Betrachtet man die Konstanz dieser Kennwerte als Indiz für eine stabile Morphologie eines Tidebeckens auch bei steigendem Meeresspiegel, so gilt: Ausgedehnte Supratidalflächen (Sände, Salzwiesen) sind die beste Vorsorge. Dies belegen auch deduktive Untersuchungen des gleichen Gebietes (SPIEGEL, 1997).

Da in den meisten Tidebecken jedoch nicht genug Supratidal existiert, um einen Meeresspiegelanstieg kompensieren zu können, stellt sich die Frage, inwieweit andere Möglichkeiten zur morphologischen Anpassung denkbar sind, v. a. die Aufhöhung der Supra-, Inter- und Subtidalflächen durch Materialeintrag in das Wattenmeer:

In der Literatur werden als mögliche Materialquellen häufig genannt (vgl. z. B. PIERCE, 1969 oder LOUTERS u. GERRITSEN, 1994):

- offene Nordsee (landwärtiger Küstenquertransport)
- Inseln, Halligen, Sände (Erosion an Kliff- und Flachküsten, landwärtiger Transport mit Hilfe der Küstenlängsströmung und der küstennormalen Gezeitenströme)
- Ebbdeltas (landwärtiger Transport durch Gezeitenströme in den Seegats)
- biogene Ablagerungen
- Suspensionsfracht im Festlandsabfluß
- atmosphärischer Eintrag

JESPERSEN u. RASMUSSEN (1989) nennen als Quellen für die positive Sedimentbilanz des dänischen Wattenmeeres den Boden der offenen Nordsee sowie die Küsten der jütischen Westküste und der Westküste von Sylt.

Für das schleswig-holsteinische und niedersächsische Wattenmeer liegen v. a. die Ebbdeltas als Materialspeicher und -lieferant nahe: Vor den Seegats befinden sich unterschiedlich große Sedimentkörper (Ebbdeltas), die durch das Zusammenwirken der Ebbströme und des Küstenlängstransportes dort akkumuliert wurden. Die Mächtigkeit dieser Ebbdeltas ist beachtlich: So hat das sehr ausgeprägte Delta vor dem Seegat des Hörnum-Tiefs allein oberhalb der 10-m-Isobathe im Ist-Zustand ein Materialvolumen von rd. 450 Mio m³. Bei gleichmäßiger Verteilung dieses Materials über das zugehörige Gebiet des Tidebeckens reichte dies für eine Aufhöhung um rd. 1,6 m. Das heißt, daß ein *MThw*-Anstieg von weit über 0,60 m (= 2. Szenario) notwendig wäre bei gleichzeitiger morphologischer Anpassung des Wattenmeeres allein durch Sedimentimport aus dem Ebbdelta und bei homogener Verteilung über die Beckenfläche, um diesen Materialvorrat aufzuzehren. Das Problem besteht also weniger in der Verfügbarkeit des Materials an sich als vielmehr in der Frage, welche Transportprozesse in der Lage sind, dieses Material (auch) bei geänderten Gezeitenverhältnissen (und auch geänderten Wind-, Strömungs- und Seegangsverhältnissen) landwärts zu transportieren und dort zur dauerhaften Ablagerung zu bringen. Bisher waren es nämlich seewärts gerichtete Transporte, die Ebbströme, die an der Bildung dieser Deltas maßgeblich beteiligt sind.

Weitere Angaben zu der in ihnen vorhandenen Materialmenge sowie zu ihrer Bestimmung finden sich bei WALTON u. ADAMS (1976), VAN KLEEF (1991) sowie OOST u. DE BOER (1994). Zur Verfügbarkeit von Sedimenten für die weitere Erhöhung des Wattsockels und der Rückseitenwatten gibt es Angaben u. a. bei OOST u. DIJKEMA (1993).

4. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind Teil des Forschungsvorhabens „Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg“. Für die Finanzierung sei dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie und für die fachliche Begleitung dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) herzlich gedankt.

5. Schriftenverzeichnis

- AUSTEN, I.: Geologisch-sedimentologische Kartierung des Königshafens (List auf Sylt) und Untersuchung seiner Sedimente. Diplomarbeit, Univ. Kiel. unveröffentl., Kiel, 1990.
- BARUA, D. K. u. KOCH, F. G.: Characteristic morphological relationship for tide dominated channels of the Mengha estuary. Proc. Regional workshop on erosion and sediment transport processes, UNESCO, BUET and BWBD, Bangladesh, 68–82, 1986.
- BERNER, H., KAUFHOLD, H., NOMMENSEN, B. u. Prober, C.: Detaillierte Kartierung der Oberflächensedimente im mittleren und südlichen Nordfriesischen Wattenmeer. Meyniana 38. Kiel. 81–94, 1986.
- BETTAC, W., SCHLEIDER, W. u. SINDERN, J.: Das Küstenkartenwerk 1:25 000 der Deutschen Bucht. Vermessung und Kartographie. Die Küste, H. 40, Heide, 13–32, 1984.
- BURGER, H. u. SKALA, W.: Die Untersuchungen ortsabhängiger Variablen: Modelle, Methoden und Probleme. Geologische Rundschau 67, Stuttgart, 823–839, 1978.
- BYRNE, R. J., GAMMISCH, R. A. u. THOMAS, G. R.: Tidal prism-inlet area relations for small tidal inlets. Proc. 17th Coastal Engineering Conference, Vol. III. 2517–2533, 1980.
- DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover, H. 60, 133–361, 1985.
- DOLEZAL, R.: Vermessungstechnische Methoden zur Erfassung der Topographie von Küsten mit und ohne Gezeiten. Zeitschrift für Vermessungswesen, H. 12, 1974.
- EYSINK, W. D.: Nakdong estuary barrage and land reclamation, morphological aspects. Delft Hydraulics, Publ. 297, 1983.
- FERK, U.: Wirkung von Meeresspiegeländerungen auf Wateinzugsgebiete. Diplomarbeit, Univ. Hamburg. unveröffentl., Hamburg, 1992.
- FERK, U.: Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste. Die Küste, H. 57, Heide, 135–156, 1995.
- FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, Heide, 78–100, 1985.
- GERRITSEN, F.: Morphological stability of inlets and channels of the Western Wadden Sea. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Rap. GWAO-90-019, Den Haag, 1990.
- GERRITSEN, F. u. JONG, H. DE: Stabiliteit van doorstroomprofielen in het waddengebied. Rijkswaterstaat, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ-84, Vol. 6. 53 S., 1985.
- GIESE, E.: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. Die Wasserwirtschaft, H. 3, 1971.
- GÖHREN, H.: Triftströmungen im Wattenmeer. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover, H. 30, 1968.
- GÖHREN, H.: Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. Hamburger Küstenforschung 29, Hamburg, 50 S., 1974a.
- GÖHREN, H.: Strombeobachtungen an Langzeit-Meßstationen. Die Küste, H. 25, Heide, 1974b.
- GÖHREN, H.: Zur Dynamik und Morphologie der hohen Sandbänke im Wattenmeer zwischen Jade und Eider. Die Küste, H. 27, Heide, 28–49, 1975.
- HAKE, G., HEILDORN, D. u. WEGENER, B.: Wattkarten als Luftbildkarten – Gestaltung und Herstellung. Wissenschaftl. Arbeiten der Fachr. Vermessungswesen der Univ. Hannover 110, 1982.
- HARING, J.: De verhouding van getijvolume en doorstromingsprofiel in de zeegaten Hringvliet, Brouwershavense Gat, Oosterschelde en in de mond van de Rotterdamse Waterweg uit

- alle beschikbare waarnemingen tot heden. Rijkswaterstaat, Deltadienst Waterloopkundige Afdeling, Nota K-271, 1967.
- HIGELKE, B.: Morphodynamik und Materialbilanz im Küstenvorfeld zwischen Hever und Elbe. Ergebnisse quantitativer Kartenanalysen für die Zeit von 1939–1969. Regensburger Geographische Schriften, Regensburg, 167 S., 1978.
- HIGELKE, B.: Bestandaufnahme des Wattreliefs, Morphodynamik und Tendenzen morphologischer Veränderungen im Tidebecken der Norderhever und westlich der Insel Pellworm. Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein 12, Kiel, 155–174, 1981.
- HIGELKE, B.: Topographie, Morphodynamik und Hydrographie der südlichen nordfriesischen Watten. In: MÜLLER-WILLE, M. et al. (Hrsg.): Norderhever-Projekt. Offa-Bücher 66, Neumünster, 39–50, 1988.
- HIGELKE, B.: Sedimentbilanz der Wattflächen, Kartenauswertung und Luftbildanalyse. Abschlußbericht des SWAP-Teilprojektes 4.2a. unveröffentl., Kiel, 1995.
- HAKE, G., HEILDORN, D. u. WEGENER, B.: Wattkarten als Luftbildkarten – Gestaltung und Herstellung. Wissenschaftl. Arbeiten der Fachr. Vermessungswesen der Univ. Hannover, 110, 1982.
- HUME, T. M. u. HERDENDORF, C. E.: Morphologic and hydrologic characteristics of tidal inlets on a headland dominated, low littoral drift coast, Northeastern New Zealand. J. of Coast. Research, Proc. Skagen Symp., 527–563, 1990.
- JARRETT, J. T.: Tidal prism – inlet area relationships, general investigations of tidal inlets. G.I.T.I. Rept. no. 3, Coastal Eng. Research Center, Ft. Belvoir, Va. 32 S., 1976.
- JESPERSEN, M. u. RASMUSSEN, E.: Margrethe-Koog – Landgewinnung und Küstenschutz im südlichen Teil des dänischen Wattenmeeres. Die Küste, H. 50, Heide, 97–154, 1989.
- JOHNSON, J. W.: Bolinas Lagoon Inlet, California. US Army Corps of Eng., Misc. Paper No. 3–74, Fort Belvoir, Va. 46 S., 1972.
- KLEEF, A. W. VAN: Empirical relationships for tidal inlets, basins and deltas. Rijksuniversiteit Utrecht, Geografisch Instituut, Vakgroep Fysische Geografie, Report GEOPRO 1991.019 (IRO), 1991.
- KREEKE, J. VAN DE u. HARING, J.: Equilibrium flow areas in the Rhine-Meuse Delta. Coast. Eng. 3, 97–111, 1979.
- KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) (Hrsg.): KFKI-Küstenkarte 1:25 000. Kiel, 1974/78.
- LOUTERS, T. u. GERRITSEN, F.: The riddle of the sands – A tidal system's answer to a rising sea level. National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, Report RIKZ-94.040, 69 S., 1994.
- MISDORP, R., STEYAERT, F., HALLIE, F. u. RONDE, J. DE: Climate change, sea level rise and morphological developments in the Dutch Wadden Sea, a marine wetland. In: BEUKEMA, J. J. et al. (Hrsg.): Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems. Kluwer Academic Publ., 123–131, 1990.
- NIEMEYER, H. D., GOLDENBOGEN, R., SCHROEDER, E. u. KUNZ, H.: Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. Die Küste, H. 57, Heide. 65–94, 1995.
- O'BRIEN, M. P.: Estuary tidal prisms related to entrance areas. Trans. Amer. Soc. Civil Engr. 1, 738–739, 1931.
- O'BRIEN, M. P.: Estuary tidal prisms related to entrance areas. Civil. Eng. 8. 738–739, 1969.
- OOST, A. P. u. BOER, P. L. DE: Sedimentology and development of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and backbarrier areas of the Dutch Wadden Sea. Senckenbergiana maritima 24, 1/6, Frankfurt/Main, 65–116, 1994.
- OOST, A. P. u. DIJKEMA, K. S.: Effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee. IBN rapport 025. DLO-Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Den Burg, 1993.
- PARTENSKY, H.-W. u. DIECKMANN, R.: Stabilitätsuntersuchungen für das südliche nordfriesische Wattenmeer. Kurzfassung. Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein, H. 12, 35–62, 1981.
- PARTENSKY, H.-W. u. DIECKMANN, R. u. MESSAL, H.: Stabilitätsuntersuchungen für das südliche nordfriesische Wattenmeer. Untersuchungsbericht des Franzius-Instituts der TU Hannover, unveröffentl., 1979.
- PIERCE, J. W.: Sediment budget along a barrier islang chain. Sedimentary Geol. 3, 5–16, 1969.

- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover, H. 43, 1–160, 1976a.
- RENGER, E.: Grundzüge der Analyse und Berechnung von morphologischen Veränderungen in Wattgebieten. Mitteilungen des Franzius-Instituts der TU Hannover, 44, 412–433, 1976b.
- RENGER, E. u. PARTENSKY, H.-W.: Stabilitätskriterien für Tidebecken. Die Küste, H. 27, Heide, 63–73, 1975.
- SIEFERT, W.: Umsatz- und Bilanzanalysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht. Grundlagen und erste Auswertungen. (Teil 1 der Ergebnisse eines KFKI-Projektes). Die Küste, H. 45, Heide, 1–57, 1987.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. Die Küste, H. 52, Heide, 1991.
- SIEFERT, W., FAHSE, H., MIESSNER, F., RICHTER, H.-H., TAUBERT, A. u. WIELAND, P.: Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 35, Heide, 1980.
- SPIEGEL, F.: Die Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres: Morphologische Strukturen und Anpassungsbedarf bei weiter steigendem Meeresspiegel. Berichte des Forschungs- und Technologiezentrums der Universität Kiel, Bd. 14, Büsum, 272 S., 1997.
- STEIJN, R. C.: Some considerations on tidal inlets. A literature survey on hydrodynamics and morphodynamic characteristics of tidal inlets with special attention to „Het Friesche Zee-gat“. Delft Hydraulics, Coastal Genesis, Rep. H840, 45, 109 S., 1991.
- STENGEL, T. u. ZIELKE, W.: Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 56, Heide, 93–118, 1994.
- UNSÖLD, G.: Jahreslagen und Aufwachsrate in Schlicksedimenten eines künstlichen, gezeitenoffenen Sedimentationsbeckens (Wattgebiet südlich Nordstrand/Nordfriesland). Meyniana 26, Kiel. 103–111, 1974.
- WALTON, T. L. u. ADAMS, W. D.: Capacity of inlet outer bars to store sand. Proc. 15th ICCE, Vol. 2, 1919–1927, 1976.
- WIELAND, P.: Untersuchungen zur geomorphologischen Entwicklungstendenz des Außensandes Blauort. Die Küste, H. 23, Heide, 122–149, 1972.
- WIELAND, P.: Entwicklung und Bau eines extrem flachgehenden Watten-Meßbootes. Die Küste, H. 25, Heide, 53–71, 1974.
- WIELAND, P.: Untersuchungen über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 40, Heide, 107–138, 1984.
- WIELAND, P.: Umfang und Häufigkeit topographischer und fotografischer Erfassung des Wattenmeergebietes zwischen Hever- und Elbemündung von 1934 bis 1984. Die Küste, H. 42, Heide, 237–244, 1985.
- WIELAND, P. u. THIES, E.: Methoden der Wattvermessung an der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Wasserwirtschaft 65, 194–198, 1985.