

Kurzfassung zum Forschungsvorhaben MTK 0569

**MODELLUNTERSUCHUNGEN
ZUR MORPHOLOGISCHEN STABILITÄT DES WATTENMEERES
BEI EINEM BESCHLEUNIGTEN MEERESSPIEGELANSTIEG**



CHRISTIAN - ALBRECHTS - UNIVERSITÄT ZU KIEL

FORSCHUNGS- UND TECHNOLOGIEZENTRUM WESTKÜSTE

Flintbek, Dezember 1998

1. Einführung

Das schleswig-holsteinische Wattenmeer, welches der Kategorie der sandigen Gezeitenküsten zugeordnet werden kann, zählt aufgrund seiner engen Verflechtung von Hydrologie und Morphologie zu den Gebieten mit höchster Sensibilität hinsichtlich eines weiteren (beschleunigten) Meeresspiegelanstiegs. Ziel dieses Vorhabens war es, eine wissenschaftlich fundierte Antwort auf die Frage zu erhalten, wie sich die vorhergesagten Änderungen der hydrographischen Rahmenbedingungen (z.B. Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs) im Nordseeraum auf die langfristige morphologische Stabilität des Wattenmeeres von Schleswig-Holstein auswirken werden.

Neben einer zusammenfassenden Analyse der bisherigen morphologischen und hydrographischen Entwicklung des Wattenmeeres (u.a. durch die Berechnung von verschiedenen Tidebeckenparametern) sollten Gleichgewichtsbeziehungen zwischen dem Tidevolumen der Wateinzugsgebiete und dem Durchflußquerschnitt der Seegats statistisch erfaßt werden. Anhand von hydrographischen Szenarios sollte eine Abschätzung der morphologischen Stabilität von Wattgebieten bei steigendem Meeresspiegel gegeben und weiterführende Methoden zu deren Quantifizierung entwickelt werden. Die Ergebnisse seien nachfolgend kurz beschrieben. Eine ausführliche Diskussion hierzu findet sich in SPIEGEL (1997).

2. Digitale Geländemodellierung und Tidebeckenparameter

Um obige Ziele zu verwirklichen, wurde zunächst – in der Kernphase des Projekts (1.05.94 bis 31.10.96) – ein digitales Geländemodell (kurz: DGM) für das gesamte schleswig-holsteinische Wattenmeer (vom Rømø-Damm bis Brunsbüttel) auf der Basis der KFKI-Küstenkarte (1 : 25 000; 1. Ausgabe 1974) erstellt. Basierend auf diesem DGM ließen sich zahlreiche Flächen- und Volumen Kennwerte für ausgewiesene Tidebecken berechnen (Abb. 1 und Tab. 1).

Im Rahmen der Projektverlängerung um ein weiteres Jahr (bis Februar 1998) erfolgte dann die Generierung eines zusätzlichen Geländemodells, welches annähernd den morphologischen Zustand der 40er & 50er Jahre (Vermessung zwischen 1935 bis 1953) markiert. Es deckt das Gebiet Hindenburgdamm bis Brunsbüttel ab und wurde auf der Basis des Kartenwerks des „Wasserwesens an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste“ von F. Müller und O. Fischer im Maßstab 1 : 25 000 (Ausgabe 1955) erstellt.

Die Einbeziehung einer zweiten Aufnahme gestattet über die erneute Berechnung der verschiedenen Beckenparameter (vgl. Tab. 2) einen Vergleich der morphologischen Zustände beider Zeitpunkte. Zudem ist es durch die digitale Aufbereitung der beiden Kartenwerke in Form von DGMs mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems möglich, die langjährigen Sedimentverlagerungen zu bilanzieren. Dabei können Aussagen sowohl zur räumlichen Verteilung der Erosions- und Sedimentationsgebiete als auch zu verlagerten Netto-Sedimentmengen getroffen werden.

3. Bilanzierung

Tabelle 3 gibt eine quantitative Aussage über die Sedimentmengen, die sich in dem Zeitraum von der MÜLLER & FISCHER-Aufnahme (1935 bis 1953) bis zur KFKI-Aufnahme (ca. 1975) in den jeweiligen Tidebecken verlagert haben. Diese Angaben wurden aus der Differenz der jeweiligen morphologischen Zustände (DGM M. & F. minus DGM KFKI) für das Gebiet, das in beiden Geländemodellen als gemeinsamer Raum vorkommt, berechnet. In diesem Zusammenhang muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die im Modell auftretenden Fehler (z. B. Vermessungsfehler, Fehler bei der Interpolation) bei der Berechnung dieser Zahlen nicht berücksichtigt worden sind.

Bei der Betrachtung der errechneten Sedimentbilanzen für jedes Tidebecken fällt auf, daß netto fast in allen Becken Sedimentation stattgefunden hat. Lediglich die beiden nordfriesischen Tidebecken Norder- und Süderauwe weisen für diesen Zeitraum eine negative Sedimentbilanz auf. Bei den kleinen Tidebecken gab es, relativ gesehen, die größten Sedimentationen. So weist das Tidebecken Neufahrwasser einen mehr als dreifachen, die Tümlauer Bucht sogar einen zwanzigfachen Gewinn an Sediment gegenüber dem Verlust auf.

Tidebecken	Sedimentationsvolumen (in Mio. m ³)	Erosionsvolumen (in Mio. m ³)	Bilanz (in Mio. m ³)	Relative Bilanz (in %)
Hörnum Tief	97,4	56,4	+41	42,0
Norderauwe	87,3	99,0	-11,7	-13,4
Süderauwe	68,3	88,0	-19,7	-28,8
Hooge Loch	2,9	2,0	+0,9	31,0
Rummelloch West	45,0	28,1	+16,9	37,6
Norderhever-Heverstrom	225,4	174,6	+50,8	22,5
Tümlauer Bucht	12,1	0,6	+11,5	95,0
Eiderästuar	61,4	38,0	+23,4	38,1
Wesselburener Loch	42,1	41,0	+1,1	2,6
Piep	128,7	110,5	+18,2	14,1
Flackstrom	23,4	19,2	+4,2	17,9
Neufahrwasser	32,5	9,5	+23	70,8
Schatzkammer	5,4	3,0	+2,4	44,4

Tab. 3: Vergleich der Sedimentations- und Erosionsvolumen über den Zeitraum von ca. 1955 – 1975 für die Tidebecken des schleswig - holsteinischen Wattenmeeres

In den großen Tidebecken (z. B. Piep bzw. Norderhever - Heverstrom) sind die Sedimentbilanzen dagegen wesentlich ausgeglichener. Diese Befunde decken sich mit den Ergebnissen von FERK (1995), der für sein Untersuchungsgebiet in Ostfriesland feststellt, daß die größten Sedimentdefizite bei einem Anstieg des Meeresspiegels in kleinen Wateinzugsgebieten auftreten, hingegen in großen Gebieten verhältnismäßig geringe Mengen an Sediment benötigt werden. Zudem bekommen die heutigen Watten nur wenig neues Sediment zugeführt, so daß die meisten Sedimentbewegungen innerhalb des Watts in Form von Umlagerungen stattfinden (REINECK 1978, S. 66).

Vergleicht man die räumliche Verteilung der Erosions- und Sedimentationsbereiche der einzelnen Tidebecken, so ist kein einheitliches Schema erkennbar. Gerade im Bereich der großen Wattströme ist eine starke Zergliederung der Erosions- und Sedimentationsgebiete zu beobachten (ohne Abbildung). Zonen der Erosion liegen - häufig in streifenförmigen Mustern - unmittelbar neben Sedimentationszonen (vgl. auch HEYER 1986, S. 178 f.).

4. Szenarios

Neben momentanen Bestandsaufnahmen der morphologischen Zustände bestand eine wesentliche Aufgabe in diesem Forschungsvorhaben in der Formulierung von Aussagen über die morphologische Stabilität des Wattenmeeres bei einem zukünftigen, beschleunigten Meeresspiegelanstieg.

Zu diesem Zweck wurden auf dem Geländemodell der KFKI-Aufnahme folgende Szenarios, die einen beschleunigten Meeresspiegel simulieren sollen, berechnet:

1. Szenario: Anstieg des *MThw* um + 0,35 m gegenüber 1975
Anstieg des *MTnw* um + 0,25 m gegenüber 1975
Anstieg des *MThb* um + 0,10 m gegenüber 1975
2. Szenario: Anstieg des *MThw* um + 0,60 m gegenüber 1975
Anstieg des *MTnw* um + 0,40 m gegenüber 1975
Anstieg des *MThb* um + 0,20 m gegenüber 1975.

Daraus ergeben sich die in den Tabellen 4 und 5 dargestellten Ergebnisse.

1. Szenario						
Tidebecken	Ab_{MThw} [km ²]	Ab_{int} [km ²]	P [Mio m ³]	PV [Mio m ³]	ISV [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)	
Süderau	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)	

Tab. 4: Gesamtfläche, Intertidalfläche, Tideprisma, Prielvolumen und intertidales Sedimentvolumen der 14 Tidebecken für das 1. Szenario (in Klammern: Änderung gegenüber Ist - Zustand von 1975 in Prozent)

Quelle: SPIEGEL 1997, S. 111

Grundsätzlich lassen sich folgende Aussagen treffen. Bei einem Anstieg des $MThw$ nehmen z. B. die Gesamt- und die Intertidalfläche zu. Des weiteren vergrößern sich das Gesamtwasservolumen (WV), das Tideprisma (P), das intertidale Sedimentvolumen (ISV) sowie der Querschnitt des Seegats bei $MTI/2w$.

2. Szenario						
Tidebecken	Ab_{MThw} [km ²]	Ab_{int} [km ²]	P [Mio m ³]	PV [Mio m ³]	ISV [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)	
Süderau	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)

Tab. 5: Gesamtfläche, Intertidalfläche, Tideprisma, Prielvolumen und intertidales Sedimentvolumen der 14 Tidebecken für das 2. Szenario (in Klammern: Änderung gegenüber Ist - Zustand von 1975 in Prozent)

Quelle: SPIEGEL 1997, S. 113

Ein Anstieg des MT_{nw} bedingt in der Regel eine Zunahme der subtidalen Fläche und des subtidalen Sedimentvolumens (SSV). Auch das Prielvolumen (PV) nimmt zu. Demgegenüber nehmen das Tideprisma, die Intertidalflächen und somit das intertidale Sedimentvolumen ab. Eine Vergrößerung erfährt auch die Querschnittsfläche im Seegat unter $MTI/2w$.

Offensichtlich können also gegenläufige Entwicklungen eintreten, die sich in ihrer Wirkung möglicherweise kompensieren. Zudem ist eine einfache Extrapolation auf einen fiktiven Zustand auf der Basis der aktuellen Morphologie nicht unproblematisch, wie folgendes Szenario zeigt.

Rechnet man die verschiedenen Parameterausprägungen vom Müller & Fischer-Zeitpunkt auf den KFKI-Zeitpunkt hoch, indem man auf den alten Beckengeometrien die jeweiligen hydrologischen Parameter ($MThw$, MT_{nw}) der Müller & Fischer-Aufnahme ansetzt, so zeigen sich zum Teil erhebliche Abweichungen zur Realität (Tab. 6). Zwar lassen sich die beiden Aufnahmen aufgrund leicht unterschiedlicher Becken- und Seegatabgrenzungen nicht vollständig vergleichen, dennoch stehen die teilweise großen relativen Fehler hervor.

Tidebecken	Ab_{MThw}	Ab_{MTnw}	A_i	mittl. T zu $MThw$ bei $MThw$	mittl. T zu $MTnw$ bei $MTnw$	PV	P	Ac_{MTnw}	$Ac_{M1/2w}$	Ac_{MThw}
Hörnum	-0,5	11,9	-14,3	4,6	-3,7	7,5	1,7	15,1	14,2	0,5
Norderaue	1,1	8,8	-3,6	-2,1	-13,0	-5,4	2,3	15,2	21,4	7,4
Süderaue	9,5	2,6	15,3	-9,1	-11,5	-9,3	6,8	30,8	34,3	21,1
Hooge	2,2	54,5	-1,8	10,9	-38,2	-6,7	15,0	21,6	47,1	-15,3
Rummelloch	8,7	27,3	3,8	2,1	-21,3	6,2	13,7	-30,3	-20,2	-31,2
Hever	3,9	3,5	4,0	-3,0	-8,1	-4,8	6,8	1,0	1,2	-12,4
Tümlau	219,0	500,0	214,5	-3,1	-72,7	0,0	206,7	-36,0	145,9	32,2
Eiderästuar	71,7	44,9	83,7	-13,2	-1,1	44,0	51,9	22,3	28,1	-6,7
Wesselburen	6,5	-9,3	10,2	-4,9	-3,5	-11,9	5,9	-9,2	0,5	-29,2
Piep	4,1	0,0	5,6	-2,7	1,6	1,8	0,8	-3,9	-2,5	-22,3
Flackstrom	29,1	44,6	25,6	4,8	-33,4	-3,6	47,4	55,3	65,2	14,2
Neufahrwasser	27,6	88,9	18,9	19,0	8,4	106,3	46,6	51,6	85,3	6,4
Schatzkammer	20,5	0,0	20,9	11,4	-48,5	-40,0	36,4	-70,6	-43,5	-65,4

Tab. 6: KFKI-Hydrologie auf M. & F.-Morphologie (Abweichungen zu 1975 in %)

Noch zwei weitere Eigenschaften der Tabelle 6 fallen auf. So werden die Beckenflächen bei der Hochrechnung überwiegend überschätzt, die mittleren Tiefen dagegen unterschätzt. Dieser Befund unterstützt die Vermutung anderer Autoren (z. B. SPIEGEL 1997), daß ein Anstieg des Meeresspiegels zu einer morphologischen Anpassung in Form einer Aufhöhung der Wattflächen und einer Vertiefung der Rinnen führt.

Betrachtet man die Abhängigkeiten zwischen Beckengröße und Seegatquerschnitt (Abb. 2) sowie Tideprisma und Seegatquerschnitt (Abb. 3), so zeigt sich in beiden Fällen ein starker Zusammenhang, der sich auch für die oben genannten Szenarios nur geringfügig abschwächt. Allerdings dürfen diese Ergebnisse aufgrund der geringen Zahl von Merkmalsträgern (14 Tidebecken) nicht überbewertet werden.

5. Relative Hypsometrie

Zur Beschreibung von Watt- und Marschgebieten wurde in der Literatur schon öfter auf die Analyse der sogenannten „hypsometrischen Kurve“ eines Tidebeckens zurückgegriffen (z. B. RENGER & PARTENSKY 1975; MISDORP et al. 1990; FERK 1992). Bei dieser Kurve handelt es sich um ein Diagramm, welches den Beckentiefen den Anteil der in der jeweiligen Tiefe wasserunbedeckten Beckenfläche gegenüberstellt. Das Diagramm kann auf absoluten oder relativen Tiefen- bzw. Flächenwerten basieren.

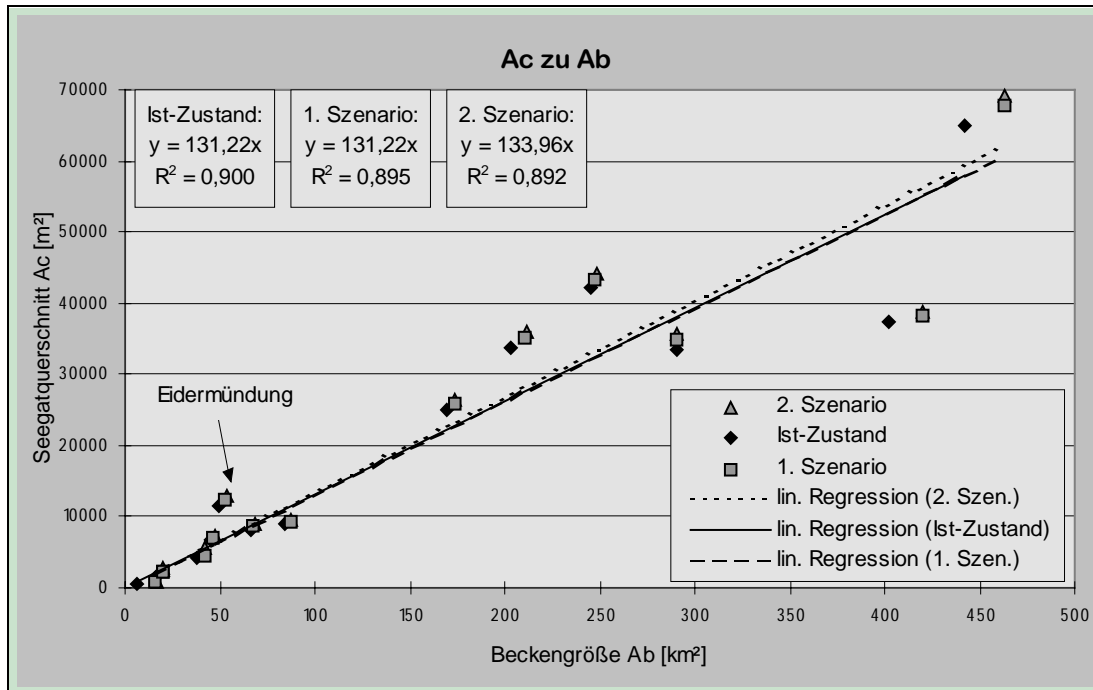


Abb. 2: Beckengröße (Ab) zu Seegatquerschnitt ($Ac_{MTI/2w}$) für KFKI-Zustand und beide Szenarios

Quelle: SPIEGEL 1997, S. 115

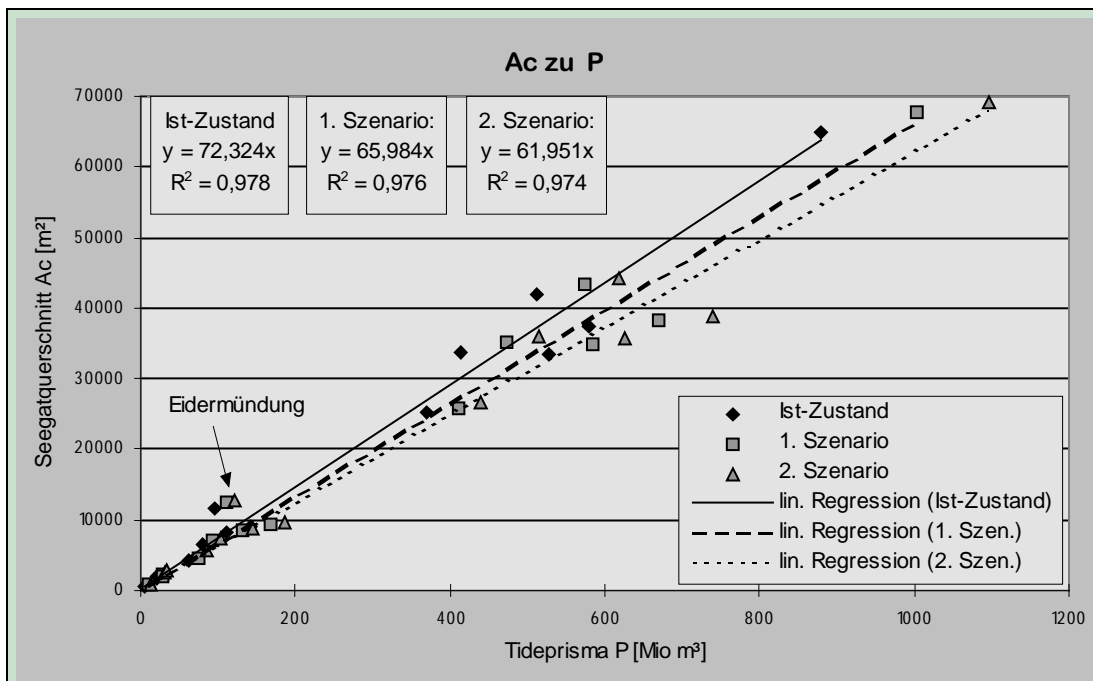


Abb. 3: Tideprisma (P) zu Seegatquerschnitt ($Ac_{MTI/2w}$) für KFKI-Zustand und beide Szenarios

Quelle: SPIEGEL 1997, S. 116

Wegen der besseren Vergleichbarkeit wählt man in der Regel die relative Hypsometrie. Dabei reicht die maximale Tiefe eines Tidebeckens d_{max} (= 100%) vom tiefsten Punkt bis zum $MThw$ -Niveau, die maximale Fläche ist dementsprechend die bei $MThw$ wasserbedeckte Fläche Ab_{MThw} . Abbildung 4 zeigt die relative Hypsometrie des Tidebeckens Neufahrwasser.

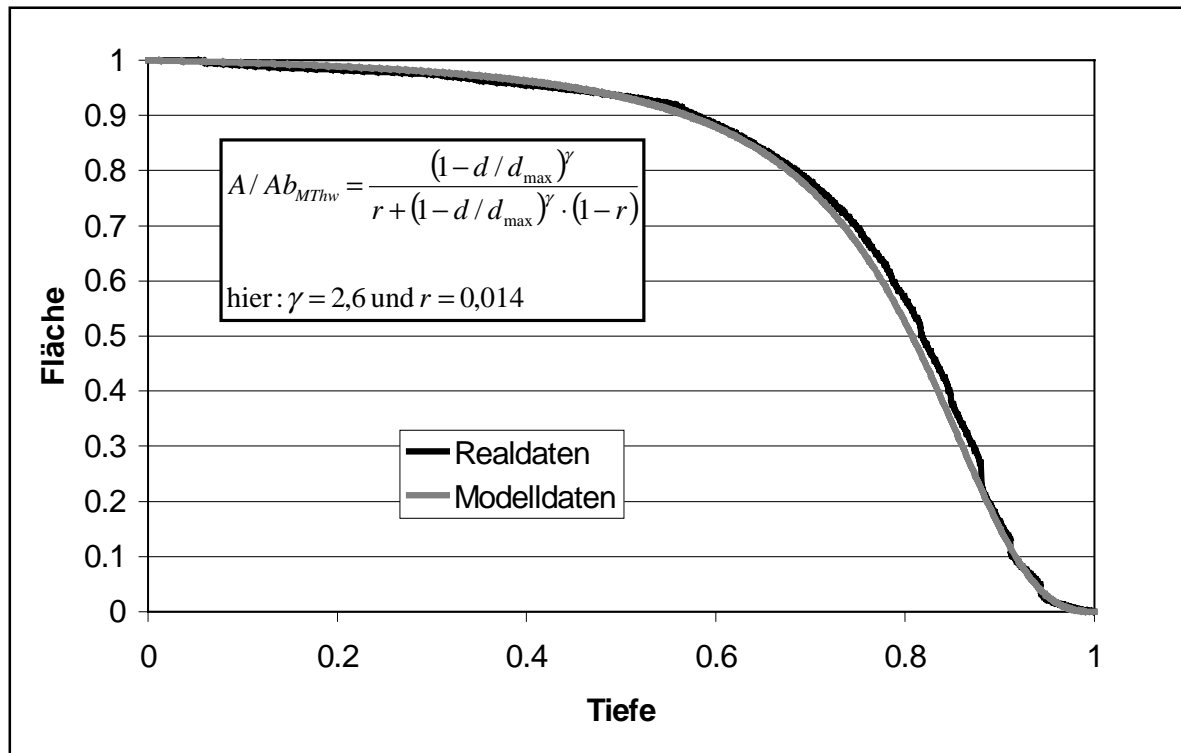


Abb. 4: Relative Hypsometrie des Tidebeckens Neufahrwasser für die KFKI-Aufnahme

Die in Abbildung 4 enthaltene Formel basiert auf einem von STRAHLER (1952) entwickelten Ansatz zur Beschreibung terrestrischer Flußeinzugsgebiete, der von BOON (1975) und BOON & BYRNE (1981) aufgegriffen und auf Watt- und Salzmarschgebiete angewandt wurde. Bei geeigneter Wahl von γ und r erkennt man die gute Übereinstimmung mit der tatsächlichen hypsometrischen Kurve.

Ein Vorteil des hypsometrischen Ansatzes besteht darin, daß sich durch Integration der Funktion verschiedene Beckenparameter ableiten lassen. Beispielsweise gilt für das gesamte Sedimentvolumen SV eines Beckens (vgl. auch Abb. 5):

$$SV = \int_0^1 \frac{(1-x)^\gamma}{r + [(1-x)^\gamma \cdot (1-r)]} dx \cdot d_{max} \cdot Ab_{MThw} \cdot$$

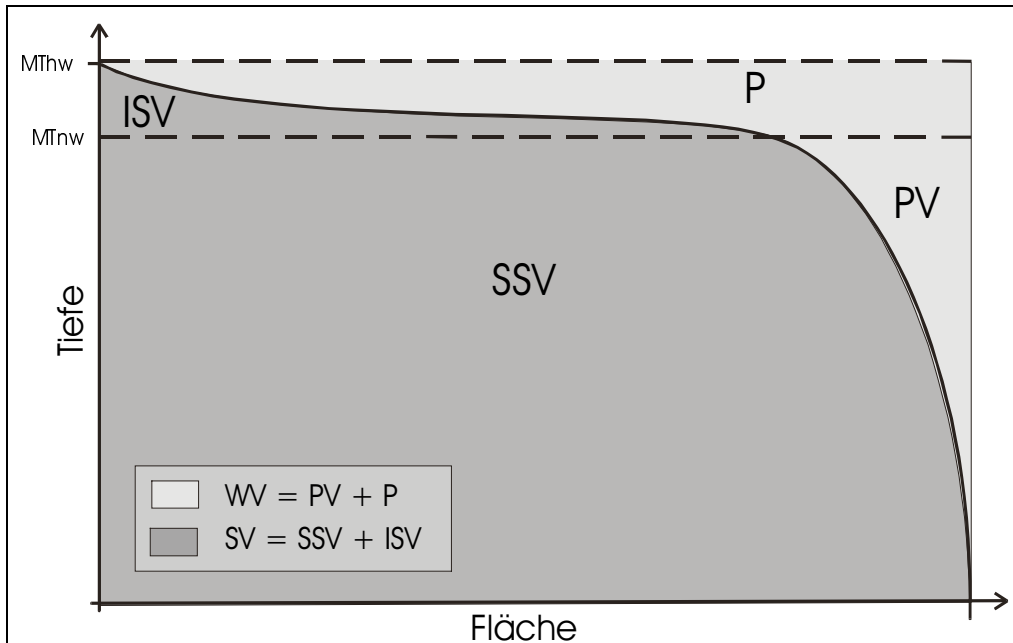


Abb. 5: Sediment- und Wasservolumen, abgeleitet aus der hypsometrischen Kurve
 Quelle: SPIEGEL 1997, S. 129

SPIEGEL (1997) hat argumentiert, daß die beiden Konstanten γ und r für ein ausgewähltes Tidebecken über die Zeit konstant bleiben, sich also auch bei einem Anstieg des Meeresspiegels nicht ändern. Auf diese Weise ließen sich dann sehr leicht Aussagen über zusätzlich benötigte Sedimentmengen treffen (vgl. SPIEGEL 1997, S. 132 ff.).

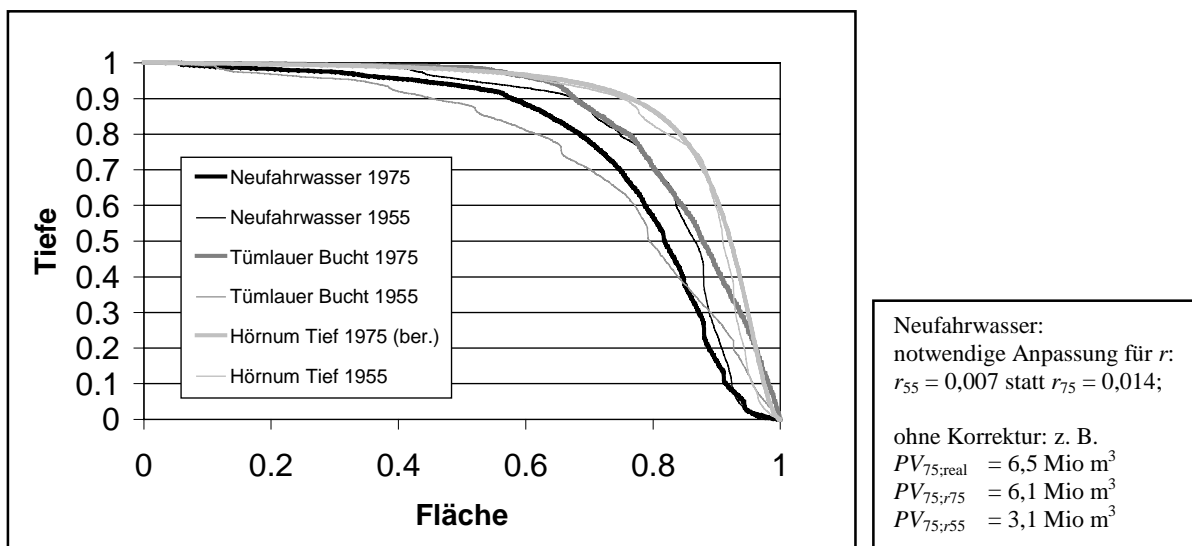


Abb. 6: Relative Hypsometrien für die Müller & Fischer-Aufnahme und die KFKI-Aufnahme.

Aus Abbildung 6 wird jedoch ersichtlich, daß die Kurven der relativen Hypsometrie für ein ausgewähltes Tidebecken über die Zeit mitunter stark differieren können. Die Berechnung von Beckenparametern aus der relativen Hypsometrie führt dann – ohne eine Korrektur γ von und r – zu möglicherweise erheblichen Abweichungen zur Realität.

6. Energiebilanz

Im Rahmen des Projektes wurden auch deduktive Ansätze entwickelt und untersucht. Insbesondere wurde der Energieeintrag E_s , den jedes Becken durch die Gezeitenströme im Seegat während der Flutphase erfährt, im Rahmen einer Energiebilanz den drei Energiesenken zusätzliche potentielle Energie (Hebungsarbeit des Wasserkörpers) ΔE_p , Bodenreibung E_R und kinetische Energie (Übertritte in Nachbarbecken) E_k gegenübergestellt.

SPIEGEL (1997, S. 160 ff.) leitet aus physikalisch-hydrologischen Überlegungen die folgenden Ausdrücke ab:

$$E_s = mg \frac{1}{2} MThb ,$$

$$\Delta E_p = mg \left(MTmw - MTnw - \frac{1}{2} MThb \right) \text{ und}$$

$$E_r = \sum 4 \frac{k\rho}{3\pi} \left(\sqrt{\frac{g}{d_{MT1/2w}}} \frac{1}{2} MThb \right)^3 T_{F.x} ,$$

wobei $\rho = 1025 \text{ kgm}^{-3}$,

$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$,

$T_f = 22350 \text{ s}$,

$k = 8 \times 10^{-5}$.

Eine Überprüfung dieses Ansatzes anhand der Müller & Fischer-Aufnahme erbrachte jedoch für einige Tidebecken völlig unrealistische Werte bei der resultierenden kinetischen Energie. Die Verwendung der Energiebilanz ist daher – zumindest in der obigen Form – gerade für Prognosezwecke kritisch.

7. Fazit

Folgende Schlußfolgerungen lassen sich ziehen:

- Jedes Tidebecken hat seine eigene Charakteristik, beckenspezifische Betrachtungen sind notwendig.
- Die Folgen eines sich beschleunigenden Meeresspiegelanstiegs wachsen überproportional, aber:
- Ein hochgerechneter Zustand kann sich u. U. erheblich von dem real eintretenden unterscheiden.
- Die Differenzen zwischen Prognose und Realität der Beckenzustände deuten auf eine Anpassung der Morphologie durch Vertiefung der Priele und Aufhöhung der Wattflächen hin.
- Die Charakterisierung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Beckenparametern bzw. die Aufstellung von Energiebilanzen ist insbesondere im Hinblick auf eine Abschätzung zukünftiger morphologischer Entwicklungen kritisch.

8. Literatur

BOON, J. D. (1975): Tidal discharge asymmetry in a salt marsh drainage system. In: *Limnology and Oceanography* 20, S. 71 – 80.

BOON, J. D. & BYRNE, R. J. (1981): On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology* 40, S. 27 - 48.

FERK, U. (1992): Wirkung von Meeresspiegeländerungen auf Watteinzugsgebiete. Diplomarbeit, unveröff. Hamburg.

FERK, U. (1995): Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste. In: *Die Küste*, H. 57, S. 135 - 156.

HEYER, H., HEWER, R. & SÜNDERMANN, J. (1986): Die numerische Modellierung von Strömungen und Sedimenttransport in Wattgebieten. In: *Die Küste*, H. 43, S. 167 - 180.

MISDORP, R., STEYAERT, F., HALLIE, F. & RONDE, J. de (1990): Climate change, sea level rise and morphological developments in the Dutch Wadden Sea, a marine wetland.

In: BEUKEMA, J. J. et al. (eds.): Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems. Dordrecht, S. 123 - 131.

REINECK, H.- E. (1978): Die Watten der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste, H. 34, S. 226 - 239.

RENGER, E. & PARTENSCKY, H. – W. (1975): Stabilitätskriterien für Tidebecken. In: Die Küste, H. 27, S. 63 - 73.

SPIEGEL, F. (1997): Die Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres: Morphologische Strukturen und Anpassungsbedarf bei weiter steigendem Meeresspiegel. Büsum (= Berichte, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Nr. 14).

STRAHLER, A. N. (1952): Hypsometry (area – altitude) analysis of erosional topography. In: Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 63.