

Hydro- und Morphodynamik in Seegraswiesen

Erik Pasche, Nicolle Deußfeld

Abstract:

Auf der Suche nach ökologisch vertretbaren Erosionsschutzkonzepten in Küstengewässern wurden die hydro- und morphodynamischen Prozesse der Küstenströmungen durch Seegraswiesen untersucht. Zunächst wurde ein theoretisches Konzept zur Berücksichtigung der Fließwiderstände und Turbulenzeigenschaften von flexiblem Bewuchs in den 3D-Flachwassergleichungen und der Advektions-Diffusions-Gleichung entwickelt. Dabei wird auf die energiedissipierende Wirkung des Bewuchses als Rauheitselement und Strömungswiderstand eingegangen. Anhand von pilotartigen Felduntersuchungen in Seegras in einem Wattgebiet vor Sylt konnte erstmalig die energiedissipierende Wirkung dieses Bewuchses und die dadurch hervorgerufenen Strömungsverhältnisse in Seegrasbeständen der norddeutschen Küstenregion dargelegt werden. Diese ersten Untersuchungen haben noch nicht zur Verifizierung des theoretischen Modells geführt, geben aber Aufschluss über geeignete Messtechnik und notwendigen Umfang an experimentellen Untersuchungen zur vollständigen wissenschaftlichen Analyse des hier aufgegriffenen Problems des Bio-Hydro-Engineering.

1 Einleitung

Durch das Zusammenspiel aus Wind, Wasserbewegung und Land sind Küstenzonen von je her einem ständigen Änderungsprozess unterworfen. Vor allem im zurückliegenden Jahrhundert haben einerseits anthropogene Eingriffe, wie Landgewinnung, Umweltverschmutzung und Sohleintiefung der Tidengewässer zum Zweck der erweiterten Schiffbarmachung, aber auch geogene Veränderungen (erhöhter Anstieg des Meeresspiegels) den Prozess der morphodynamischen Veränderung in den Küstengewässern nicht nur beschleunigt, sondern auch zu einem schwer kalkulierbaren Risiko für die gesamte Küstenregion an Nord- und Ostsee gesteigert. So sind in Schleswig-Holstein rund 25% der Landesfläche (25% von 3.730 km²) potentiell sturmflutgefährdet. Das heißt, es müssen heute ca. 344.000 Menschen und Werte von etwa 47 Mrd. EUR vor der geballten Kraft der Meere geschützt werden [12]. Dies geschieht in der Hauptsache durch Eindeichung der tiefer gelegenen Gebiete und den Bau von Wehren. Die Deiche entlang der Küsten und Tideflüsse verhindern das Ausbreiten der Wassermassen, aber auch die Befriedigung ihrer Transportkapazitäten, so dass es an exponierten Küstenabschnitten zu überproportional hohen Erosionsraten kommen muss. Das am meisten zitierte Beispiel ist die Insel Sylt. Hier wird seit ca. 130 Jahren versucht, die Westküste der Insel durch konventionelle Küstenschutzmaßnahmen (aktiv und passiv) zu stabilisieren. Alle Versuche schlugen fehl. Die Insel verliert weiterhin jedes Jahr etwa 1 Million m³ Sediment [13]



Abb. 1. Provisorische Messplattform des AB Wasserbau der TUHH im Sylter Watt

Den sich bewegenden Wassermassen fehlt es an Retentionsraum. Dieser kann in Anbetracht des stetig steigenden Raumbedarfs des Menschen kaum erhöht werden. Es muss somit auf wenig Fläche höchstmögliche Retentionswirkung erzielt werden. Kombiniert man diesen Bedarf mit der Forderung, ökologisch vertretbar zu sein, liegt es nahe, eine biogene Lösung des Küstenschutzes/-erhaltes zu finden. Das Aufwachsen von Muschelbänken, Austernriffen oder Seegras- und Salzwiesen führt bereits nachgewiesenermaßen (z.B. durch Fonseca [3]; Kalletat [4]; Koch [5]) zu einer Stabilisierung bestimmter Abschnitte des Küstenvorfeldes. Da der Transport von Feststoffen im Wesentlichen vom Strömungsfeld abhängt, sind durch die reduzierten Strömungsgeschwindigkeiten im Vegetationsfeld geringere Transportkapazitäten vorhanden, so dass sich die Depositionsraten in den Feldern erhöht. Dabei wirkt die Vegetation je nach dem Verhältnis Bewuchshöhe/Wassertiefe und der Bewuchsdichte als zusätzliche Rauheit und/oder als Strömungswiderstand. Außerdem vollziehen flexible Pflanzen unter Oberflächenwellen eine Schwingungsbewegung, was die

Dämpfung der Welle zur Folge hat. Durchströmte Tier- oder Pflanzenbestände bilden somit einen nicht zu vernachlässigenden Faktor der lokalen Morphodynamik.

In den 80-er Jahren fanden an der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen eines Projektes zur Untersuchung von Erosionsschutz im Seewasserbau bereits hydro- und morphodynamische Untersuchungen mit künstlichen Seegräsern in Form von Kunststoffstreifen statt (Arns [1], Eichweber [2]). Der Arbeitsbereich Wasserbau der TU Hamburg-Harburg stellt sich derzeit dem Forschungsthema, die Wirkungsweise und Effektivität natürlicher Seegraswiesen zu quantifizieren. Hierfür sind grundlegende Untersuchungen zur Prozessanalyse notwendig. Aus diesem Grund fanden erste Felduntersuchungen in der Sylt-Rømø-Bucht statt. Es wurde im Jahr 2000 eine provisorische Meßplattform (Abb. 1) ca. 1,5 km nördlich der Ortschaft Kampen (Abb. 2) aufgestellt und in der Zeit vom 3. bis 9.9.2000 ein Messprogramm ausgeführt. Aus diesem vor ca. 2 Jahren begonnenen Forschungsvorhaben liegen erste Ergebnisse vor, die im Rahmen dieses Beitrages der Fachwelt vorgestellt werden sollen. Zunächst wird ein neuartiges theoretisches Modell zur Quantifizierung der Fließwiderstände und der turbulenten Größen in den 3D-Flachwassergleichungen sowie der Dispersionkoeffizienten in der Stofftransportgleichung entwickelt. Die bei den Naturmessungen gewonnenen Erkenntnisse werden im zweiten Teil beschrieben und Schlussfolgerungen für das weitere experimentelle Vorgehen abgeleitet.

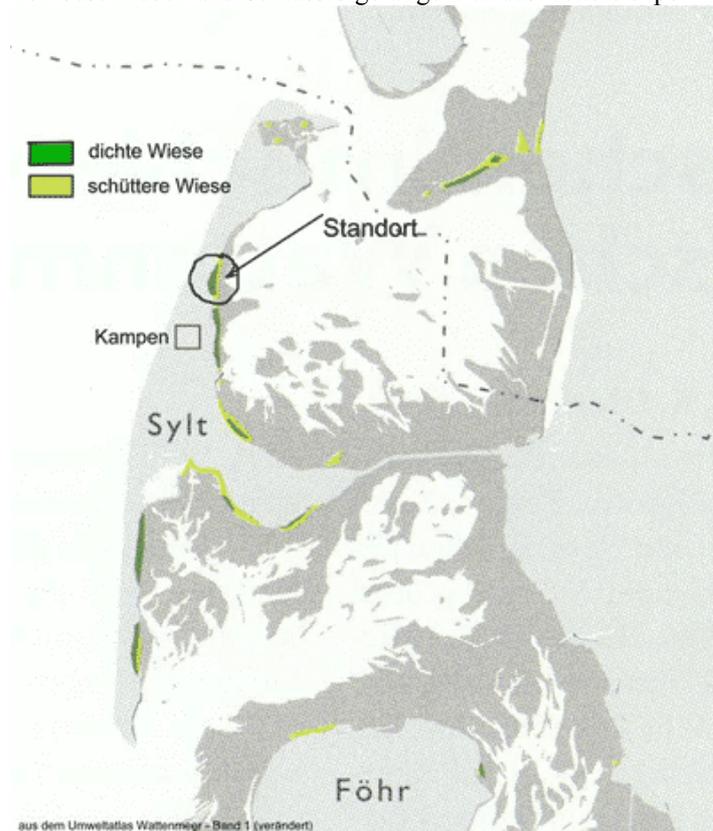


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes

2 Theoretische Grundlagen

In der theoretischen Grundlage wird von einer Flachwasserströmung, die durch Seegräser beeinflusst wird, ausgegangen. Dabei werden die beiden in deutschen Küstengewässern verbreiteten Seegräser der Gattung *Zostera* (das kleine Seegras *Zostera noltii*, Abb. 3 und das große Seegras *Zostera marina*, Abb. 4) zu Grunde gelegt. Das kleine Seegras ist unempfindlich gegen Trockenfallen und wächst im oberen Wattbereich mit maximalen Wassertiefen von etwa 1 m. Es erreicht maximale Blattlängen von ca. 22 cm. Wenn das kleine Seegras trocken fällt, liegt es direkt auf dem Wattboden auf (Abb. 3). Wird es durch- bzw. überströmt, so richtet es sich in Fließrichtung aus. Das große Seegras hingegen wächst kurz unterhalb der Niedrigwasserlinie bis zu einer Wassertiefe von 10 m, und ist somit ständig überflutet. Es kann im Gegensatz zum kleinen Seegras Blattlängen von bis zu 2 m erreichen, an der mecklenburgischen Küste findet man das Seegras mit ca. 60 cm langen Blättern. Beide Arten besitzen nur in den ersten 5-25 mm über dem Boden eine signifikante Steifigkeit



Abb. 3: Das kleine Seegras *Zostera noltii* mit Querlöper (Felduntersuchungen 09-2000)



Abb. 4: Das große Seegras *Zostera marina* (aus [14])

Zum heutigen Stand der Technik in der mathematischen Modellierung von Strömung- und Stofftransport gehört die numerische Lösung der dreidimensionalen, zeitlich gemittelten Kontinuitätsgleichung, der Reynoldsgleichungen und der Advektions-Diffusions-Gleichung. Diese Gleichungen müssen aus Effektivität an das jeweilige Problem angepasst werden.

Für diese Untersuchungen wird angenommen, dass sich der Druck im Strömungsfeld der Seegraswiesen hydrostatisch verteilt. Somit ist eine Spezialisierung der Gleichungen durch Einführung der hydrostatischen Druckverteilung (Vernachlässigung vertikaler Beschleunigungen) durchführbar und man erhält nachfolgendes Ausgangsgleichungssystem:

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

3D-Flachwassergleichungen:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial(a_0 + h)}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{p,i} + f_i$$

Advektions-Diffusions-Gleichung:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} D_j \frac{\partial c}{\partial x_j}$$

Hierbei bezeichnet u_i ($i=1..3$) die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in alle drei Raumrichtungen x_i ($i=1..3$). a_0 ist eine geographische Referenzhöhe, h steht für die Wassertiefe. τ_{ij} ist der Tensor der inneren Spannungen. Er setzt sich aus 2 Spannungsanteilen zusammen, den viskosen und den turbulenten Spannungen.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \cdot \overline{u'_i u'_j}$$

Die molekulare Viskosität μ des Wassers beträgt ca. 10^{-3} Pas (kg/ms). Die turbulenzinduzierten Spannungen im Wasserkörper werden durch die mittlere Korrelation der Geschwindigkeitsschwankungen $\overline{u'_i u'_j}$ wiedergegeben.

U_i ($i=1..3$) kennzeichnet die Bewegungsgeschwindigkeiten des Partikels in der Wassersäule. Für die Advektions-Diffusions-Gleichung wird vorausgesetzt, dass das Sediment in der Horizontalen die gleiche Geschwindigkeit wie das Fluid hat ($U_1 = u_1$ und $U_2 = u_2$) und die vertikale Geschwindigkeit des Sediments der Summe aus Strömungsgeschwindigkeit u_3 und Sinkgeschwindigkeit w_s der Partikel $U_3 = u_3 + w_s$ entspricht.

Die Besonderheit dieses Gleichungssystems stellt sich im Term $f_{p,i}$ dar, welcher die Widerstandskräfte, die durch die flexible Vegetation des Seegrases hervorgerufen werden, berücksichtigt.

Zur Schließung dieses Gleichungssystems sind weitere Bestimmungsgleichungen für Sinkgeschwindigkeit, turbulente Schubspannung, Widerstandskraft und Wandschubspannungen zu entwickeln. Dabei ist man auf empirische Ansätze angewiesen, die nachfolgend erläutert werden.

2.1 Turbulente Spannungen

Zur Quantifizierung dieser Terme existieren heute mehr oder weniger aufwendige Schließungsansätze erster und zweiter Ordnung. Dem Großteil aller verwendeten Schließungsansätze in der Hydrodynamik liegt der Wirbelviskositätsansatz von Boussinesq zugrunde.

Darin wird nicht die Turbulenz selbst berechnet, sondern ihre Wirkung mit Hilfe der turbulenten Viskosität ν_t abgeschätzt. ν_t ist starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterworfen. Zu ihrer Quantifizierung greift man auf algebraische Modelle oder Ein- bzw. Mehrgleichungsmodelle zurück. Da die turbulente Diffusivität D des Schwebstoffs direkt proportional zur turbulenten Viskosität ν_t des Strömungsfeldes ist, ist für die Herleitung und Berechnung des Einflusses flexibler Vegetation auf den Schwebstofftransport und somit auch für Sedimentations- und Erosionsraten die möglichst genaue Erfassung der hydrodynamischen Größen Grundvoraussetzung. Da bislang nur wenige experimentelle Untersuchungen zum Turbulenzverhalten in vegetationsbeeinflussten Strömungen existieren, können derzeit keine zuverlässigen Aussagen über turbulente Schubspannungen und damit zu geeigneten Turbulenzansätzen getroffen werden. Bei der Modellierung ist hier zu berücksichtigen, dass turbulente Schwankungen sich nicht ungehindert ausbreiten können. Die Bildung der Makrostrukturen wird in diesem Bereich also nicht wie normal durch Gewässereigenschaften (Durchflussbreiten, -höhen, Wassertiefen, ...) begrenzt, sondern durch die Vegetationsdichte vorgegeben. Dieser Faktor muss somit auch bei der Kalkulation der Wirbelviskosität berücksichtigt werden. Es liegt nahe, die Wassersäule in 2 Turbulenzbereiche zu unterteilen, so dass die energiedissipierende Wirkung des Bewuchslayers durch spezielle Modellierung der Turbulenz in die Berechnung eingeht.

2.2 Strömungswiderstand des flexiblen Bewuchses

Seegras ist ein besonders flexibles Material mit sehr geringer Biegesteifigkeit. Bereits bei Strömungsgeschwindigkeiten < 5 cm/s neigt es sich in Strömungsrichtung. In vielen Strömungssituationen ist die Neigung so ausgeprägt, dass der Gesamtströmungswiderstand nicht nur einen Formwiderstand darstellt, sondern auch durch Wandschubspannungen an den Blattoberflächen gebildet wird. Der Strömungswiderstand der Pflanze ergibt sich somit aus den folgenden Kraftkomponenten.

$$\begin{aligned} f_{p,i} &= F_{D,i} + F_{S,i} \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot u_i^2 \cdot C_{D,i} \cdot LAI \cdot l_p b_p \cdot \sin \Theta_i + \frac{1}{8} \rho \cdot u_i^2 \cdot \lambda_i \cdot LAI \cdot l_p b_p \cdot \cos \Theta_i \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot u_i^2 \cdot LAI \cdot l_p b_p \cdot \left(C_D \sin \Theta_i + \frac{1}{4} \lambda \cdot \cos \Theta_i \right) \end{aligned}$$

Dabei ist F_D die senkrecht auf die Oberfläche der Pflanze wirkende Druckkraft (Abb. 5). Diese Komponente wird auch als Formwiderstand bezeichnet. F_S bezeichnet die auf der Pflanzenoberfläche wirkende Reibungskraft.

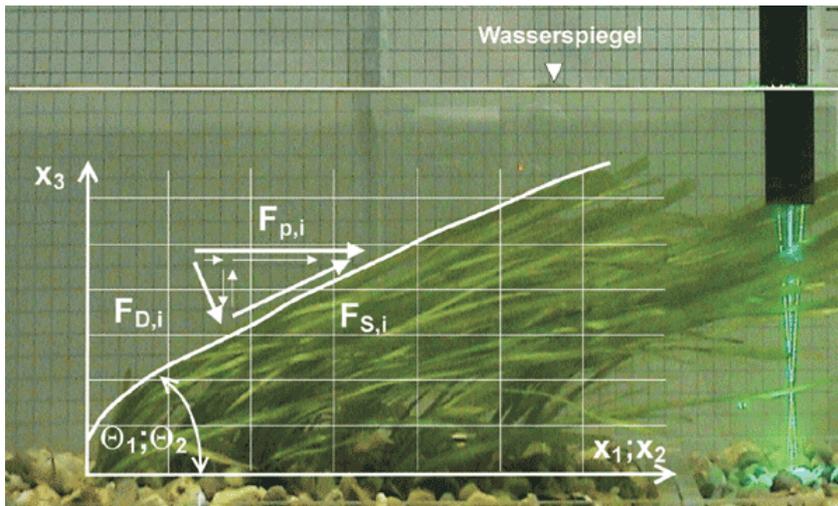


Abb. 5: Variablendefinition (Lasermessung im Laborkanal des AB Wasserbau der TUHH)

Beide Kräfte resultieren aus der relativen Bewegung des Wasserkörpers um die Pflanze. Bei dieser Formulierung bleibt die Eigenbewegung der Pflanze unberücksichtigt, da eine extrem hohe zeitliche und räumliche Diskretisierung notwendig wäre und somit die statistische Turbulenzmodellierung nicht mehr ausreichte. Der Geschwindigkeitstensor u_i entspricht demzufolge den Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers. LAI bezeichnet den sog. LeafAreaIndex. Er gibt an wieviel Quadratmeter Blattfläche sich auf einem Quadratmeter Grundfläche befinden und ist unter Biologen ein gebräuchliches Maß für die Bewuchsdichte. Somit steht er für viele Vegetationsbereiche zur Verfügung. Die Variablen l_p und b_p stehen für die durchschnittliche Blattlänge und Blattbreite auf einem m^2 Grundfläche. Auch diese Werte werden häufig von Biologen erhoben. Der Winkel Θ gibt die Blattneigung zum Gewässerboden an. Er ist eine Funktion der Dichte des Pflanzenmaterials ρ_p , der Blattlänge l_p , der Biegesteifigkeit EI_p , der Bewuchsdichte LAI, der Wassertiefe h , der Anströmgeschwindigkeit u und der Reynoldszahl der Strömung. In dimensionsloser Form lautet der funktionale Zusammenhang (in Anlehnung an Kouwen und Unny [6]) für diesen Gleichgewichtszustand:

$$\Theta = f\left(\frac{\rho - \rho_p}{\rho}, \frac{l_p}{h}, \frac{EI_p}{\rho u^2 h^4}, LAI, Re = \frac{uh\rho}{\mu}\right)$$

Auch wenn verschiedene Untersuchungen, vor allem zu durchströmten, gehölzartigen Pflanzenbeständen existieren (Lindner [7], Oplatka [9], Pasche [10]), liegen derzeit keine ausreichenden experimentellen Datengrundlagen vor, die den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Formwiderstandsbeiwert C_D und dem Reibungsbeiwert λ mit den geometrischen Grundströmungsparametern quantifizieren. Ebenfalls unbeantwortet ist die Bedeutung des Strömungsbruchs und des Reibungswiderstandes an der Blattoberfläche im Vergleich zum Formwiderstand. Dabei wird der Neigungswinkel der Pflanze Θ zu einer entscheidenden Größe.

2.3 Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe w_s

Die Sinkgeschwindigkeit des Schwebstoffs hängt je nach Art (sphärisch oder kohäsiv) hauptsächlich von der Rohdichte und der Form der Partikel, der bestehenden Konzentration und vom Turbulenzgrad der Strömung ab. Für sphärische Partikel wird im Allgemeinen der Ansatz nach Stokes verwendet:

$$w_s = \frac{g}{18\nu} \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_w} d_s$$

Für kohäsives Material in der Wassersäule schlägt Malcherek [8] vor:

$$w_s = kc^m \frac{1 + aG}{1 + bG^2}$$

Hierbei bezeichnen k , m , a und b empirische Parameter, die für jedes Gebiet explizit ermittelt werden müssen. G ist ein Maß für die Turbulenz der Strömung. Mit dieser Formel ist sowohl die Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit durch Turbulenz als auch die das Absinken behindernde Wirkung der turbulenten Bewegungen berücksichtigt.

2.4 Schwebstoffkonzentration

Die Existenz eines Bewuchslayers verändert die vertikale Geschwindigkeitsverteilung deutlich. Im Bewuchs findet ein beruhigtes Strömungsgeschehen statt, während die Wassermassen über dem Vegetationsfeld beschleunigt strömen. Bei der Betrachtung der Advektions-Diffusions-Gleichung ist zu erkennen, dass die Schwebstoffkonzentration mit der Strömung transportiert wird (Advektionsterm). Eine durch Bewuchs veränderte Geschwindigkeitsverteilung hat also zur Folge, dass sich in den beruhigten Strömungszonen die Schwebstoffkonzentration erhöht, da Stoffe langsamer weiter transportiert werden. Bei reduzierter Turbulenz (beschränkte Makrowirbel durch Bewuchsdichte) und verringerter Vertikalgeschwindigkeit innerhalb des

Bewuchses sinken die Teilchen schneller zu Boden, werden weniger aufgewirbelt und können sich so besser absetzen. Mit der Variation der turbulenten Viskosität ν_t im Seegrasfeld ändert sich auch die turbulente Diffusivität D der Schwebstoffkonzentration.

Die beschleunigte Strömung über den Pflanzen hat auf den Schwebstofftransport vergleichsweise geringe Einflüsse. Dies ist mit der Verteilung des Schwebstoffs über die Wassersäule zu begründen, welche sich mit Berücksichtigung der turbulenten Diffusivität der Strömung ohne Bewuchs nach dem sog. Rouseprofil [8] ergibt:

$$c(z) = c_0 \left(\frac{h-z}{z} \frac{z_0}{h-z_0} \right)^{w_s / \kappa u_*}$$

Dabei ist c_0 eine Referenzkonzentration in Höhe $z = z_0$ der Wassersäule (nahe am Boden). κ bezeichnet die von-Kaman-Konstante und hat einen Wert von 0,41, u_* ist die Bodenschubspannungsgeschwindigkeit, die als Wurzel des Quotienten aus der Bodenschubspannung und der Rohdichte des Wassers definiert ist. Die Funktion ist in der Abb. 6 dargestellt. Reicht nun der Bewuchs, wie hier betrachtet, weit in die Wassersäule, wird der größte Teil der Schwebstoffe im Vegetationsfeld zurückgehalten.

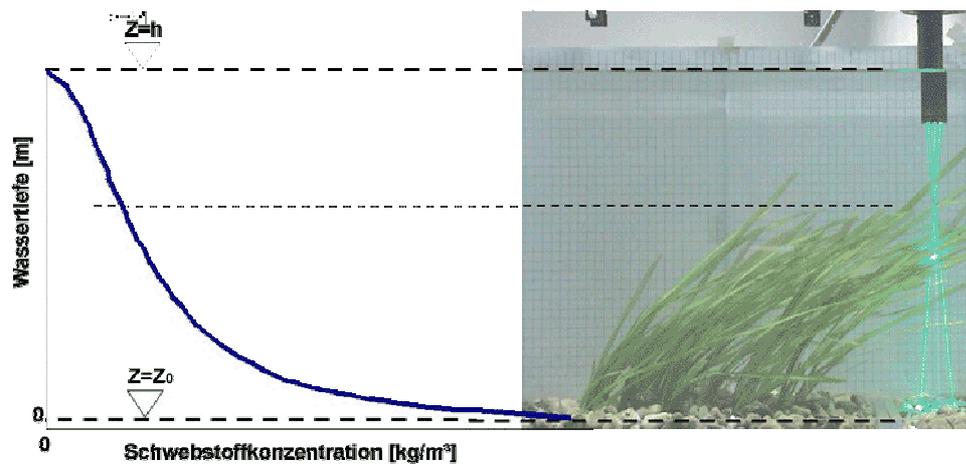


Abb. 6 Rouseprofil der vertikalen Verteilung von Schwebstoffen in der Wassersäule

Die große Anzahl empirischer Konstanten in den hier vorgestellten Ansätzen lässt die Schwierigkeit erkennen, ein universelles Gesetz zu formulieren. Damit sind für jeden betrachteten Fall individuelle Messungen notwendig. Um einen Überblick über die Wirkungsweise flexibler Vegetation in Küstengewässern zu bekommen, wurde entschieden, die morphodynamischen Prozesse in Seegraswiesen zu analysieren.

3 Felduntersuchungen in Seegraswiesen

Die enge Wechselwirkung zwischen Morphodynamik und Hydrodynamik in Seegrasbeständen erfordert zur umfassenden Klärung der in den theoretischen Herleitungen noch offen gebliebenen Fragestellungen eine integrale, experimentelle Untersuchung. Diese wird idealerweise in situ unter realen Bedingungen durchgeführt. Im Rahmen einer pilotartigen Untersuchung sollten die Rahmenbedingungen und technischen Voraussetzungen für ein entsprechendes Untersuchungsprogramm festgestellt und die prinzipielle Machbarkeit sowie die zu erwartenden Erkenntnisse abgeschätzt werden.

3.1 Untersuchungsgebiet und Messprogramm

Die Felduntersuchungen im Sylter Wattenmeer fanden in Zusammenarbeit mit der Wattenmeerstation des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) und mit dem Arbeitsbereich Meerestechnik I der TUHH statt. Die Abb. 2 zeigt das Untersuchungsgebiet etwa 1,5 km nordöstlich der Ortschaft Kampen auf der Insel Sylt. Es handelt sich um ein *Zostera noltii* Feld hoher und mittlerer Bewuchsdichte. Die Blattlänge variierte im Bereich von 6 bis 20 cm und betrug im Mittel 16 cm. Es fanden an 7 Tagen Messungen zu Wasserständen (Druckmessdosen, Messgenauigkeit von $\pm 2,5$ cm), den lokalen Fließgeschwindigkeiten (Heißfilmsonden, kalibriert zwischen 2 und 30 cm/s), Bodenschubspannungen (Heißfilmsonden, kalibriert zwischen 0,004 und 0,200 N/m²) und der Kornzusammensetzungen des Bodenmaterials (Siebanalyse) statt. Die Abb. 7 stellt die Platzierung der Sonden und Probeentnahmestellen dar.

Das Gebiet liegt im Nationalpark Holsteinisches Wattenmeer und ist von Schiffsverkehr frei. Aufgrund der geringen Wasserstände und der ausgedehnten Wirklänge des Windes ist das Strömungsfeld stark durch Wind geprägt. Seegang wurde während der Messungen kaum (maximale Auslenkungen von 5 cm) beobachtet und somit bei der Erhebung und Auswertung der Messdaten nicht berücksichtigt.

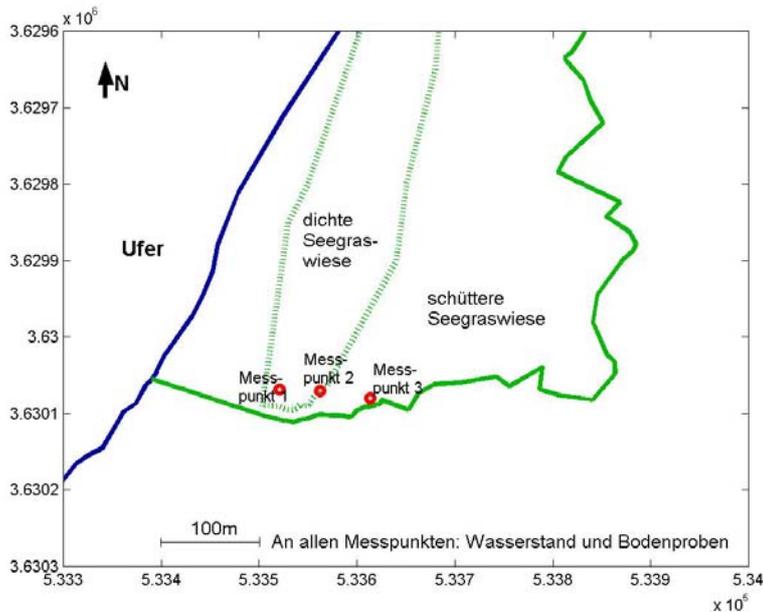


Abb.: 7 Anordnung der Messpunkte (aus[11])

3.2 Messergebnisse

3.2.1 Wasserstand

Die Druckmessdosen wurden dem Arbeitsbereich freundlicherweise von der Hamburger Dienststelle der BAW zur Verfügung gestellt. Es handelte sich dabei um Relativdrucksonden der Fa. Hartmann & Braun, welche auf einen Messbereich zwischen 0 und 2,5 m Wassersäule kalibriert wurden. Mit einer maximalen Abweichung von 1% des Messintervalls ergibt sich die Messgenauigkeit von $\pm 2,5 \text{ cm}$. Die Messungen wurden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die maximalen Wasserstände lagen im Messzeitraum zwischen 0,70 und 1,01 m und betragen durchschnittlich 0,81 cm. Wasserstandsmessungen fanden insgesamt an allen 3 Stellen des Untersuchungsgebietes statt: im Bereich dichten Bewuchses, des schütterten Bewuchses und ohne Bewuchs. Die zeitlich gemittelten Werte (über 60 s) der gemessenen Wasserstände sind bis auf Abweichungen im Millimeterbereich quasi identisch. Mögliche Oberflächengradienten liegen somit in wesentlich geringeren Bereichen als 0,5% (Messgenauigkeit der Sonden 2,5cm/ Sondenabstand $\approx 50 \text{ m}$).

3.2.2 Strömungsgeschwindigkeiten

Die Strömungsmessungen mit den Heißfilmsonden fanden in Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich Meerestechnik I der TUHH statt. Das Prinzip der Heißfilmanemometrie beruht auf der zwangsläufigen Wärmekonvektion durch das strömende Medium über einem definiert aufgeheizten elektrischen Widerstand. Strömt also Meerwasser über eine Sonde bestimmter Temperatur, wird dieser Sonde Wärme entzogen. Um die Temperatur der Sonde konstant zu halten, wird der Anteil elektrischer Energie erhöht. Durch die Proportionalität zwischen konvektierter Wärmemenge und Energieerhöhung lässt sich auf die Geschwindigkeit des Fluids schließen. Das Messgerät reagiert somit auf Temperaturschwankungen. Diese werden in der Natur nicht nur durch konvektive Prozesse ausgelöst. Um die vorhandenen Temperaturschwankungen des Wassers (z.B. Vormittag und Nachmittag) zu berücksichtigen, sind die verwendeten Sonden wärme kompensiert. Es handelt sich hier um ein innovatives Verfahren, welches von Prof. Gust entwickelt wurde. Die Messung vertikaler Geschwindigkeitsprofile fand während zweier Tiden statt. Hierbei wurden alle 4 Sonden übereinander in Höhen von 7, 19, 25 und 35 cm über Grund angeordnet. Damit befand sich die unterste Sonde im Seegrasfeld, die anderen darüber. Die Messungen fanden am Messort 3 (Abb. 7) im dichten Seegrasfeld statt. Die oberste Sonde fiel während der Profilmessungen wegen eines Kabelbruchs vollständig aus. Abb. 8 zeigt eine der Zeitreihen. Im Diagramm ist das gleitende Mittel über 10 Minuten aufgetragen. Die Wassermasse läuft aus den tiefen Prielen auf die höher gelegenen Wattflächen mit extrem niedrigen Geschwindigkeiten auf. Während die Fließrichtung in den Prielen eindeutig war, lag die Erfassung der Strömungsrichtung auf den Wattflächen außerhalb der Messgenauigkeit der zuvor im Labor kalibrierten Messtechnik (ADV-Sonde) und konnte somit bei diesen Untersuchungen nicht analysiert werden. Es sind bei allen Strömungsmessungen 2 hydrodynamisch völlig unterschiedliche Phasen zu erkennen. Zum einen die Flutphase. Das vertikale Geschwindigkeitsprofil gehorcht keiner bekannten Strömungsgesetzmäßigkeit (Abb. 9). Die Geschwindigkeiten verringern sich mit dem Abstand zur Sohle. Es wird vermutet, dass eine

Geschwindigkeiten - gleitendes Mittel über 10min

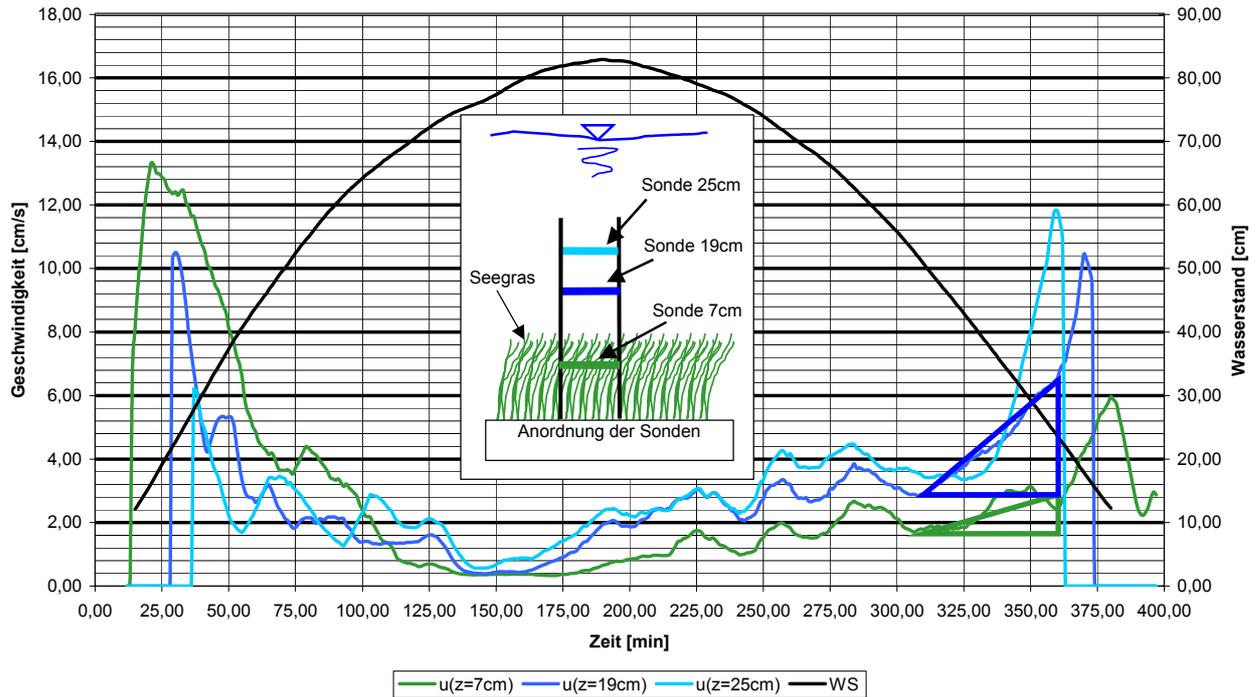


Abb. 8: Geschwindigkeitsmessungen in der Wassersäule

windinduzierte Sekundärströmung an der Wasseroberfläche dafür verantwortlich ist. Das Wasser überströmt das Messgebiet von Ost bis Südost. An diesem Tag wurde ein schwacher Wind der Stärke 1 von Nordwesten protokolliert. Geht man von den üblichen 3 bis 4% der Windgeschwindigkeit aus, die sich in die Wassersäule übertragen, würden Rückströmungen an der Wasseroberflächen von 0,3 cm/s bis 15 cm/s induziert. Weiter ist nicht auszuschließen, dass schon kleine Windwellen von wenigen Dezimetern Länge die Hydrodynamik der Wassersäule beeinflusst haben. Bei Wasserständen ab 70 cm stellen sich logarithmische Geschwindigkeitsprofile ein (Abb. 10). Auch bei ablaufendem Wasser verteilt sich die Strömungsgeschwindigkeit über die Wassersäule logarithmisch. Es gibt eine Ausnahme, zwischen 320 min und 340 min. Hier reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit 25 cm über dem Boden, während sie über der restlichen Wassersäule beschleunigt stattfindet. Es wird vermutet, dass treibende Seegrasblätter die Sonde für diesen Zeitraum überdeckt haben, so dass die Strömung, und damit die Wärmekonvektion von der Sonde gebremst wurde. Einen Hinweis über die strömungsreduzierende Wirkung des kleinen Seegrases gibt die Zeitableitung der Geschwindigkeit über die Wassersäule. Bis zu einem Wasserstand von 50 cm ist kein signifikanter Unterschied in den verschiedenen Höhen zu erkennen. Unter 50 cm werden die Wassermassen unterschiedlich schnell beschleunigt. Wie die Dreiecke in Abb. 8 erkennen lassen, beträgt die Beschleunigung im Seegras nur ein Drittel derer über dem Seegrasfeld. Es ist weiter festzustellen, dass die morphodynamisch relevanten Geschwindigkeiten bei Wasserständen unter 30 cm und somit in den ersten 40 bzw. in den letzten 50 min auftreten. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ist es notwendig, ein Messprogramm und entsprechend sensitive Messtechnik zu entwickeln, welche die Strömungsprozesse gerade in diesen Bereichen besonders gut auflöst.

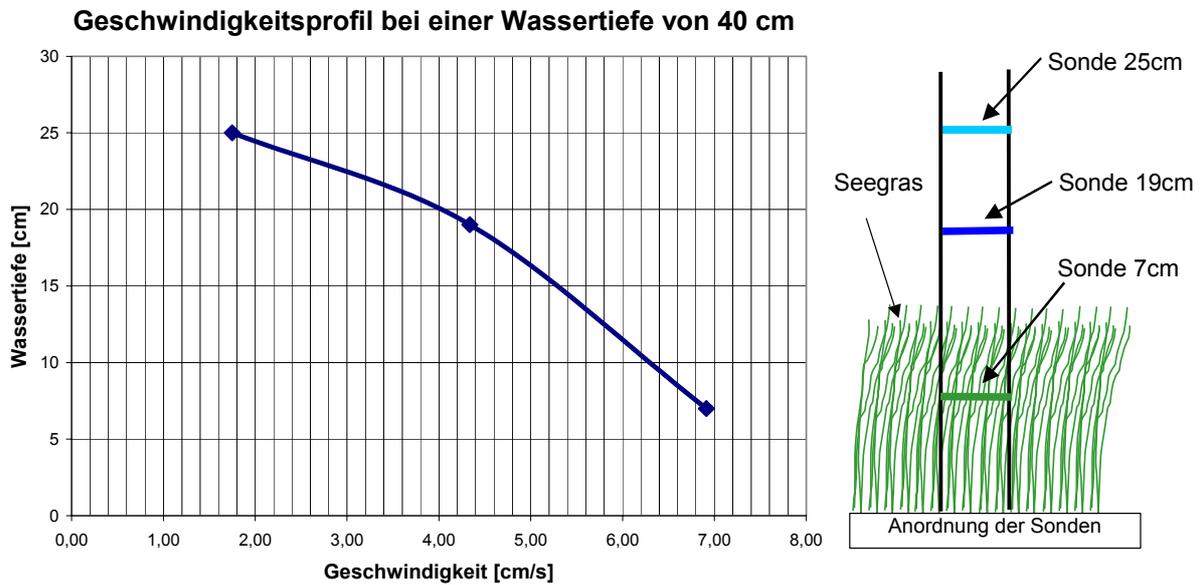


Abb. 9: Geschwindigkeitsprofil bei 40 cm Wasserstand

3.2.3 Sohlschubspannungen

Die Schubspannungen wurden ebenfalls mit den Heißfilmsondensonden des Arbeitsbereiches Meerestechnik I gemessen. Bei der Nutzung als Schubspannungssonden wurde zur Eichung ein sogenannter Mikrokosmos verwendet, der ebenfalls von Prof. Gust, Leiter des AB Meerestechnik I der TUHH entwickelt wurde. Hierin können definierte Schubspannungen erzeugt und die entsprechenden Spannungsschwankungen der einzelnen Sonden aufgezeichnet werden. Aus diesen Daten läßt sich eine Kalibrierkurve ermitteln, welche Aufschluss über die herrschenden Wandschubspannungen gibt.

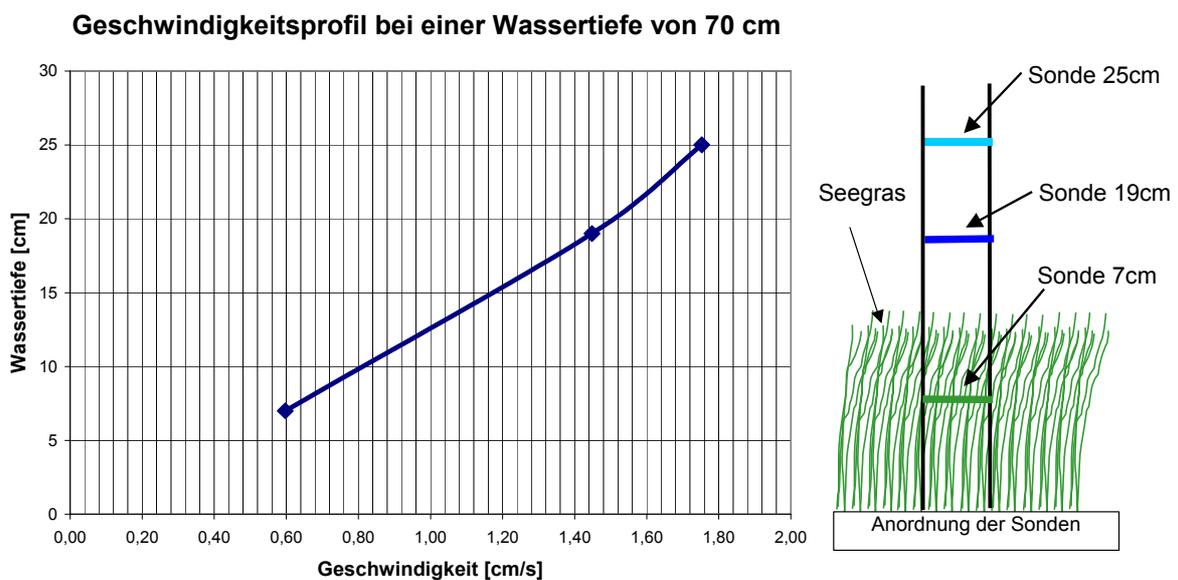


Abb. 10: Geschwindigkeitsprofil bei 70 cm Wasserstand

Die Abb. 11 zeigt die gemessenen Sohlschubspannungen. Dabei wurden die Messungen der 3 Sensoren arithmetisch gemittelt und dann das gleitende Mittel über 10 Minuten dargestellt. Zum Zeitpunkt dieser Messung (4.9.02, 16-23h) wehte ein Wind von etwa 2 bis 3 Stärken aus NW. Die Erkenntnisse aus den Strömungsmessungen werden bestätigt. Die Schubspannungen liegen im Bereich von $0,018 \text{ N/m}^2$ bis $0,07 \text{ N/m}^2$ und haben ihr Maximum jeweils bei Wasserständen unter 30 cm .

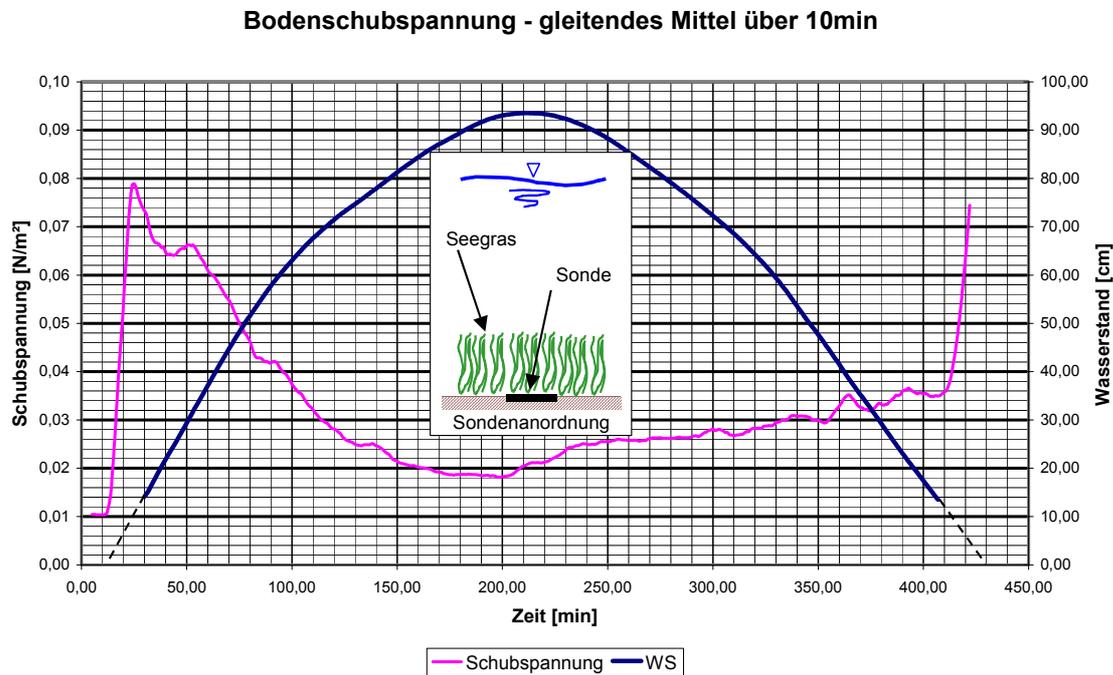


Abb. 11: Schubspannungsmessung direkt über dem Wattboden

3.2.4 Kornzusammensetzung

Die Korngrößenanalyse ergab, dass es sich bei diesem Untersuchungsgebiet, um ein Sandwatt handelt, dessen größter Anteil aus Mittelsand (Korndurchmesser zwischen $0,2$ und $0,63 \text{ mm}$) besteht. Der Anteil an Feinsand (Kornfraktionen $< 0,2 \text{ mm}$) liegt bei fast allen Proben deutlich unter 5% . Die Kornverteilung ist auch über die Sondiertiefe von 1 m sehr gleichförmig. Die Kornfraktionen sind an allen Probestellen sehr gut sortiert, haben also geringe Abweichungen zwischen d_{10} und d_{60} . Die Siebanalyse ergab auch über die Tiefe fast identische Kornverteilungen. Der Medianwert (d_{50}) betrug in der Oberflächenschicht etwa $0,4 \text{ mm}$. Nach Shields ergibt sich für diese Korngröße eine kritische Schubspannung von $0,2 \text{ N/m}^2$. Die gemessenen Schubspannungen lagen mit Höchstwerten zwischen $0,04$ und $0,08 \text{ N/m}^2$ bei 20 bis 40% der abgeschätzten maximalen Spannung. Dies wird durch Beobachtungen bestätigt, da keine Erosionen während der Durchführung der Messreihen im Versuchsfeld festgestellt wurden.

3.3 Ergebnisse und Ausblick

Die bisherige Strukturanalyse zur Morpho- und Hydrodynamik von Seegrasbeständen im Wattenmeer weist noch einen erheblichen Forschungsbedarf zur Quantifizierung der empirischen Koeffizienten in den mathematischen Grundgleichungen auf. Die zur Verfügung stehende Messtechnik muss noch auf die spezielle Problemstellung der extrem niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und der genauen Erfassung der turbulenten Schwankungen angepasst werden. Es reicht aufgrund des komplexen Strömungsfeldes (Schichtung, Wellen) nicht aus, absolute Beträge der Geschwindigkeiten zu quantifizieren, es müssen auch ihre Richtungen aufgezeichnet werden. Das mathematische Modell der Annahme hydrostatischer Druckverteilung in der Wassersäule muss noch einmal überdacht werden. Die Oberflächenrauigkeit und der Formwiderstand der Pflanzen im Bewuchsbestand muss in Laborversuchen ermittelt werden. Die Entwicklung eines geschichteten statistischen Turbulenzmodells wird angestrebt, welches anhand gemessener Daten verifiziert werden soll. In Laboruntersuchungen sollte das generelle Strömungsverhalten extrem flexibler Pflanzen untersucht werden, um durch systematische Parametervariationen den funktionalen Zusammenhang der hydraulischen und geometrischen Parameter darzulegen. Im Rahmen von Feldversuchen sind die Messungen der hydraulischen und sedimentologischen Größen flächig über einen längeren Zeitraum durchzuführen, um dadurch die morphodynamischen Entwicklungen mittel- und langfristig bewerten zu können.

4 Schrifttum

- [1] Arns, L. Über die Wirkung von flexiblen Rauheitselementen auf Strömungsvorgänge, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität Bochum, 1990
- [2] Eichweber G., Über die Wirkung von flexiblen Rauheitselementen auf Sedimentationsvorgänge, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität Bochum, 1990
- [3] Fonseca M.S., Fisher J.S., J.C., Thayer G. W., Influence of the seagrass *Zostera marina L.*, on current flow, Est. Coast. Shelf Sci., 15: 351-354, 1982
- [4] Kelletat D., Physische Geographie der Meere und Küsten, Teubner Studienbücher der Geographie, 2.Auflage, 1999
- [5] Koch E.W., Gust G., Water Flow in tide- and wave-dominated beds of the seagrass *Thalassia testudinum*, Mar Ecol Prog Ser, Vol. 184, pp. 63-72, 1999
- [6] Kouwen N., Unny T.E., Flexible Roughness in Open Channels, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY5, Proc. Paper 9723, pp. 713-728, 1973
- [7] Lindner K., Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen, Mitteilungen des Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 75, 1982
- [8] Malcherek A., Mathematische Modellierung von Strömungen und Stofftransportprozessen in Ästuaren, Institut f. Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, Bericht Nr. 44/1995
- [9] Oplatka M., Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen TH Zürich, Heft 156, 1998
- [10] Pasche E., Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung, Dissertation am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, 1984
- [11] Wieczorek K., Bericht zur Messung der hydrodynamischen Verhältnisse in Seegrasswiesen vor Sylt, Untersuchungsbereich, Arbeitsbereich Meerestechnik I der TUHH, 2000, unveröffentlicht
- [12] <http://www.uni-kiel.de/ftzwest/ag4/PROJEKT/merk.htm>
- [13] http://www.bau.uni-rostock.de/iwr/forschung/deutsch/iwr_fallstudie_sylt_abschlussbericht.pdf
- [14] <http://www.botany.hawaii.edu/seagrass/zost1.htm>