

Jutta MEYER\* & Irmgard BLINDOW

Biologische Station Hiddensee, Biologenweg 15, 18565 Kloster / Hiddensee  
jutta.meyer82@gmx.de

## Methodenstudie zur Sedimentation im Flachwasserbereich des Grabow (Darß-Zingster-Boddenkette)

### Abstract

Our purpose was to calculate sedimentation rates (SR) of the suspended material in the shallow brackish water lagoons of the Darss-Zingst bodden chain. We chose to use plate sediment traps, because of the water's shallowness (<2 m) and the influence of wind-induced waves. This plate trap (TF) allows calculating net-sedimentation rates, in contrast to a gross sedimentation rate of cylindrical traps (ZF), because already settled material can be resuspended. Our aim was to investigate and compare the influence of wind-induced waves on sedimentation of suspended material in both trap types.

The mean SR of the TF was  $0.6 \pm 0.69$  gDW  $m^{-2} h^{-1}$  and of the ZF  $3.0 \pm 3.06$  gDW  $m^{-2} h^{-1}$  ( $\pm$  SD). The corresponding values for the growth of the sediment height were 0.4 and 2.0 cm per year, respectively. The significant correlations between SR and water motions were negative for the TF ( $p = 0.000$ ;  $r = -0.49$ ;  $n = 61$ ) and positive for the ZF ( $p = 0.000$ ;  $r = 0.63$ ;  $n = 60$ ). The organic content in both trap types increased with increasing organic content of suspended material in the water column and decreased significantly with increasing influence of water motions. However, the organic content is almost always less in the TF than in the ZF and in the suspended material.

We conclude that the plate traps gives more reliable sedimentation rates for the shallow and wave-influenced water body than the cylindrical traps. However, future laboratory investigations of the interactions between plate trap and wave-induced water motions are necessary to confirm the usefulness of that trap type for the described demanding water conditions.

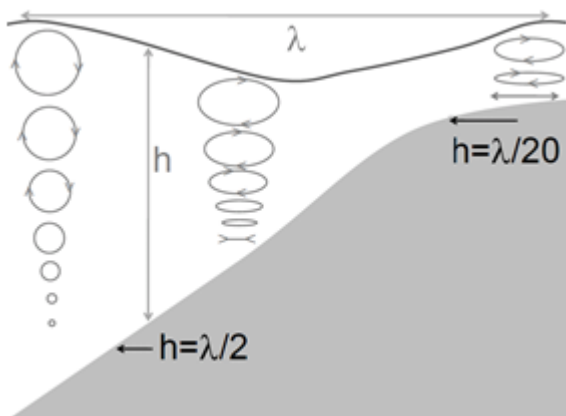
**Keywords:** shallow brackish water lagoons, Darss-Zingst bodden chain, sedimentation, plate traps, wind induced waves, water movements

## 1 Einleitung

Sedimentation und Resuspension haben in flachen Küstengewässern bedeutende Auswirkungen z. B. auf die Trübung des Wasserkörpers und damit auf die Lichtverfügbarkeit für Makrophyten und Phytoplankton (JEPPESEN et al. 1999). Theoretisch können durch Resuspensionsereignisse auch remineralisierte Nährstoffe

wieder in die Wassersäule gelangen und dort dem Phytoplankton wieder potentiell zur Verfügung stehen (SØNDERGAARD et al. 1992; DUIN et al. 2001; JEPPESEN et al. 2003).

In Flachgewässern können windinduzierte Wellen aufgrund des Verhältnisses von großer Wasseroberfläche zu geringer Wassertiefe einen starken Einfluss auf den gesamten Wasserkörper bis zum Gewässerboden ausüben (KRISTENSEN et al. 1992; HAMILTON & MITCHELL 1996; LAENEN & LETOURNEAU 1996; HOFMANN et al. 2011; QIAN et al. 2011; KELDERMAN et al. 2012). Der Wind, der über eine große Strecke über das Wasser ungehindert wehen kann, erzeugt Wellen mit bestimmten Wellenlängen ( $\lambda$ ). Das Verhältnis von Wellenlänge zu Wassertiefe ( $h$ ) bestimmt den Einfluss der Wellen auf den Wasserkörper (Abb. 1). Ist die Wassertiefe größer, als die halbe Wellenlänge, dann wird den Wellen kein Einfluss auf den Gewässerboden zugesprochen (COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER 1984). Verringert sich jedoch die Wassertiefe, bzw. erhöht sich die Wellenlänge ( $h < \lambda/2$ ), dann reicht der Welleneinfluss bis zum Gewässerboden. Dabei flachen die elliptischen Bewegungen mit zunehmender Wassertiefe immer weiter ab, sodass sie am Gewässerboden zu einer oszillierenden Bewegung werden. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit vergrößern sich die Wellenlängen und der Einfluss der Wasserbewegung in Bodennähe steigt. Dadurch verringert sich die Sedimentationsmöglichkeit für suspendierte Partikel, oder es kann zu einer Resuspension des Sedimentes kommen.



**Abb. 1:** Schematische Bewegung der Wasserpartikel von der Wasseroberfläche bis zum Gewässerboden. In tiefen Bereichen mit einer Wassertiefe ( $h$ ) größer als die halbe Wellenlänge ( $\lambda/2$ ), in sehr flachen Bereichen mit einer Wassertiefe  $< \lambda/20$  und dem Übergangsbereich mit  $\lambda/2 < h < \lambda/20$ . Bearbeitet nach (THE OPEN UNIVERSITY 1999).

In aquatischen Systemen werden meist Sedimentationsraten mit Zylinderfallen bestimmt. Dabei sollte eine Resuspension von bereits absedimentiertem Material in der Zylinderfalle verhindert werden. Das wird erreicht, indem das Verhältnis von Länge zu Durchmesser der Falle (Aspect-Ratio) mindestens 5:1 beträgt, wenn nicht sogar 10:1 (BLOESCH & BURNS 1980). Des Weiteren sollte der Durchmesser der Falle nicht zu klein sein, damit die Wasserbewegung nicht über die Fallöffnung hinweggeht und damit sogenannte Randeﬀekte das Absedimentieren von suspendiertem Material nicht verhindern (z. B. BUTMAN 1986; BUTMAN et al. 1986).

Die meisten Gewässer (Seen und Ozeane), die mit Zylinderfallen untersucht wurden, sind tief genug, dass der Welleneinfluss in Bodennähe gering bzw.

vernachlässigbar ist und die Wasserbewegungen mit denen in Fließgewässern vergleichbar sind. Unter diesen Voraussetzungen lassen sich Sedimentationsraten mit Zylinderfallen relativ sicher bestimmen (BUTMAN et al. 1986).

In sehr flachen Gewässern ist der Einsatz von Zylinderfallen schwierig. Mit dem Fallentyp kann die Sedimentation nur weit oberhalb des Sedimentes bestimmt werden, aufgrund der Falllänge. Der Einfluss der Wasserbewegungen ändert sich jedoch mit der Wassertiefe und ist somit in Höhe der Fallöffnung größer, als in Bodennähe.

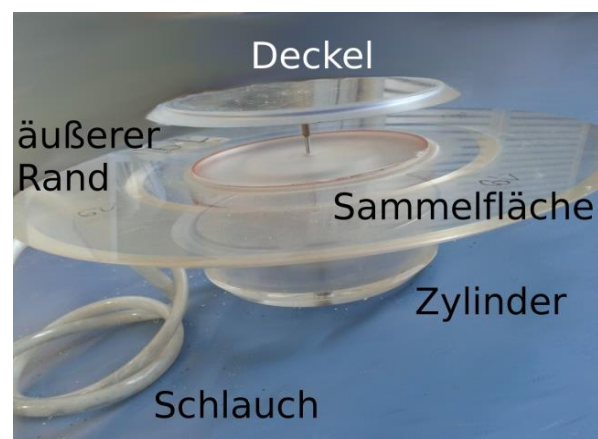
Dies kann zu einer Unterbestimmung der Sedimentationsrate führen. Andererseits kann die Sedimentationsrate überbestimmt werden, da Zylinderfallen keine Resuspension zulassen sollen (KOZERSKI & LEUSCHNER 1999). Sogenannte Tellerfallen, die einen Einfluss der Wasserbewegung zulassen, können realistische Ergebnisse geben (KOZERSKI & LEUSCHNER 1999; BANAS & MASSON 2003). Mit ihnen lassen sich Netto-Sedimentationsraten berechnen, da sie aufgrund ihres flachen Baues im Vergleich zu Zylinderfallen eine Resuspension von bereits sedimentiertem Material zulassen. Eine etablierte Methode gibt es bisher jedoch noch nicht. In dieser Studie wurden Tellerfallen an einem Standort in der Darß-Zingster-Boddenkette getestet, die ursprünglich für die Verwendung in langsam fließenden Flüssen bzw. Seen konzipiert waren (KOZERSKI & LEUSCHNER 1999, 2000).

Die ausgedehnten Gewässer der Darß-Zingster-Boddenkette sind mit einer mittleren Wassertiefe von 2 m sehr flach und daher stark durch windinduzierte Wellen beeinflusst. Dies führt zu engen Rückkopplungen zwischen Sediment und suspendiertem Material. Die Lichtattenuation in der Wassersäule des Untersuchungsgebietes wird hauptsächlich durch Chlorophyll und Seston bestimmt (Chlorophyll: 26 %  $\pm$  4,4 % und Seston: 17 %  $\pm$  8,2 % (Mittelwert  $\pm$  SD), unveröffentlichte Daten). Makrophyten und Phytoplankton stehen im Mittel bei 1,6 m Wassertiefe ( $\pm$  0,4 ,SD) noch 10 % des Oberflächenlichtes zur Verfügung (berechnet nach LUFT 2014).

Ziele der im Folgenden beschriebenen Freilandversuche waren 1) der Test von Tellerfallen in einem wellenexponierten Flachgewässer, 2) die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Sedimentationsrate und der Wasserbewegung oberhalb der Fallen und 3) der Vergleich des Verhältnisses von anorganischem zu organischem Material im suspendierten und sedimentierten Material. Die Ausgangshypothese war, dass mit zunehmendem Welleneinfluss verhältnismäßig weniger organisches Material auf den Tellerfallen bleibt, da organisches Material leicht ist, eine geringe Dichte hat und somit entweder nicht sedimentiert oder leicht wieder resuspendiert werden kann (ROSSI et al. 2003). In vergleichend eingesetzten Zylinderfallen sollte sich der organische Gehalt jedoch nicht von dem in der Wassersäule unterscheiden. Ein weiteres Ziel war die Ermittlung einer minimalen Ausbringungsdauer.

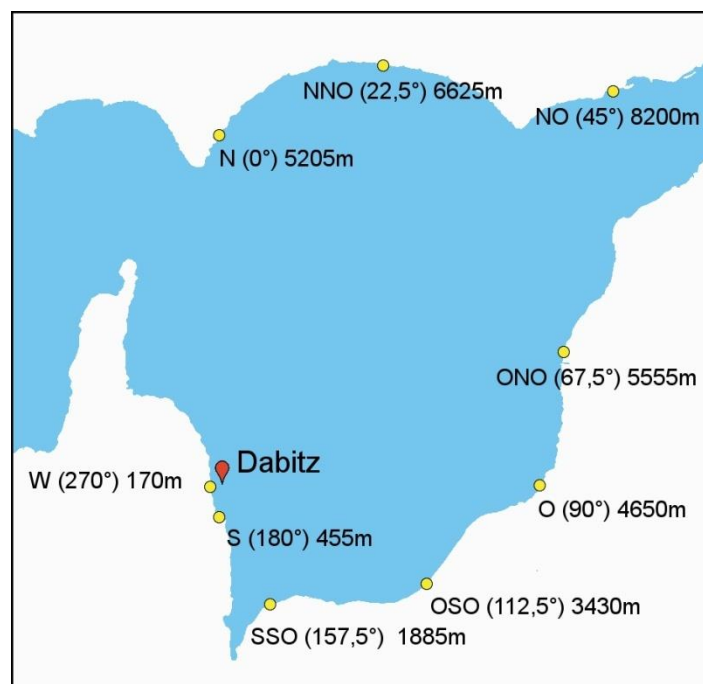
## 2 Material & Methoden

Die Tellerfallen (Abb. 2) bestehen aus einem breiten äußeren Rand und einer inneren Fläche („Sammelfläche“, Durchmesser 0,15 m), auf der suspendiertes Material sedimentieren kann. In der offenen Position bilden der äußere Rand und die Sammelfläche eine Ebene, sodass sedimentiertes Material wieder resuspendiert werden kann. Beim Schließen der Falle bewegt sich die Sammelfläche langsam nach unten in den darunterliegenden Zylinder hinein und der simultan mitbewegte Deckel verschließt den Zylinder. So kann das



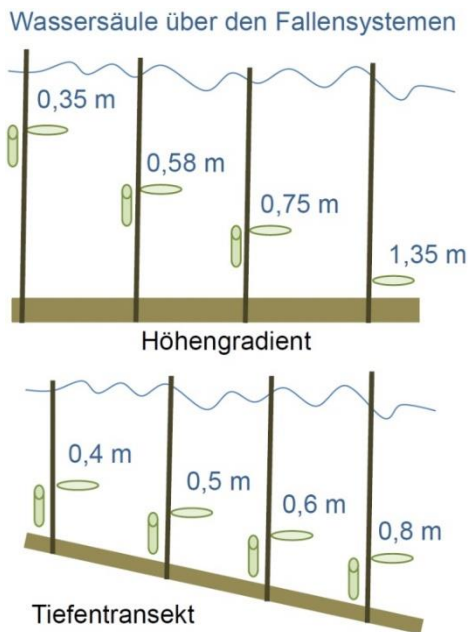
**Abb. 2:** Geöffnete Tellerfalle in der Seitenansicht.

sedimentierte Material aus dem Wasser geborgen werden, ohne es aufzuwirbeln. Sammelteller und Deckel werden mit einer peristaltischen Pumpe bewegt, die mit einem an der Falle angebrachten Schlauch verbunden ist. Auf einem Boot oder an Land wird die Falle geöffnet und das sedimentierte Material in ein Gefäß überführt. Die Tellerfallen (TF) waren an einem „Reiter“ befestigt, der auf einer im Sediment befestigten Metallstange auf und ab bewegt wurde. An diesem Reiter befand sich auch eine Zylinderfalle (ZF, Durchmesser: 0,05 m, Länge: 0,325 m), deren Öffnung sich in gleicher Höhe, wie die der TF befand. Diese Einheit von Fallen an einem Reiter wird im folgenden Text „Fallensystem“ (FS) genannt. Es wurden von Juli bis September 2014 am Probenahmestandort „Dabitz“ im Grabow vier verschiedene Versuchsreihen (Abb. 3) durchgeführt, bei denen die Wassersäule oberhalb der Fallen, die Höhe der Fallen über dem Sediment sowie die Öffnungsdauer variierte.



**Abb. 3:** Östlichster Bodden der DZBK, der Grabow, mit der Verbindung zur vorgelagerten Ostsee (über den Kanal im Nordosten). Die Entfernungen vom Standort der Sedimentationsversuche (dunkler Punkt) bis zum nächstgelegenen Ufer (Fetch [m]) sind beispielhaft für einige Windrichtungen angegeben.

Die Versuche in den Versuchsreihen „Höhengradient“, „Tiefentransekt“, „Zeitserie“ und „24-Stunden Serie“ (Tab. 1) wurden 4-8mal wiederholt und je Versuch wurden vier FS verwendet. Im Höhengradienten (Abb. 4) wurden die FS in gleicher Wassertiefe, aber in unterschiedlicher Höhe über dem Sediment angebracht. Das unterste FS bestand nur aus einer TF, um einerseits das Sedimentationsverhalten in geringer Entfernung zum Sediment zu testen und andererseits eine mögliche Resuspension bzw. eine horizontale Verfrachtung vom Sediment in Bodennähe nachzuweisen. Für einen Resuspensionsnachweis müsste bei großem Welleneinfluss der anorganische Anteil des sedimentierten Materials in der bodennahen Falle größer sein, als in den übrigen Fallen (GASITH 1975; BLOESCH 1994; LUND-HANSEN et al. 1999). Vier FS wurden entlang eines Tiefentransektes mit zunehmender Wassertiefe (Abb. 4) in etwa gleicher Höhe über dem Sediment (0,5-0,6 m) ausgebracht. Diese Versuche dienten ausschließlich der Ermittlung des Welleneinflusses auf die Sedimentation von



**Abb. 4:** Schematische Darstellung der Fallensysteme bestehend aus Tellerfalle (flach) und Zylinderfalle (länglich) und ihrer Anordnung im Feldexperiment. Oben: Höhengradient; unten: Tiefentranspekt.

suspendiertem Material. Die jeweils vier Versuche des Höhengradienten und des Tiefentransektes dauerten ungefähr 24 Stunden. Bei der Zeitserie wurden vier FS in gleicher Wassertiefe und mit gleicher Wassersäule über den Fallen, aber mit unterschiedlicher Dauer (6 h, 12 h, 24 h, 48 h, 72 h) ausgebracht. Mit ihnen sollte eine minimale Ausbringungsdauer ermittelt werden. Die Ausgangshypothese war, dass die Varianzkoeffizienten ( $V_a = \text{Standardabweichung} / \text{Mittelwert}$ ) der Sedimentationsraten von den vier jeweiligen FS der Versuche (Tab. 1) kleiner werden mit zunehmender Ausbringungsdauer. Zusätzlich wurden sieben Versuche (24 h-Serie), ähnlich der Zeitserie, jedoch mit gleicher Dauer durchgeführt, um Schwankungsbreiten bei der Sedimentation zu bestimmen. Insgesamt wurden 122 Fallenproben aus 20 Versuchen ausgewertet. Am Anfang und Ende eines jeden Versuches wurde die Wassertiefe am Halterungsstab sowie die Höhe der Wassersäule über den FS gemessen, und es wurden Sestonproben (mit drei Unterproben) aus der kompletten Wassersäule mit einem Plexiglasrohr

entnommen.

Alle Proben wurden im Labor durch vorgeglühte Filter (4h bei 525°C) filtriert. Das sedimentierte Material wurde zunächst durch MGA Filter (Munktell, ø 100 mm) vorfiltriert und das Filtrat anschließend durch GF/C (Whatman, ø 48 mm) filtriert. Das suspendierte Material aus der Wassersäule (Seston) wurde durch GF/C Filter filtriert. Die Filter wurden dann bei 105°C für 24 h getrocknet und anschließend 4 h lang bei 525°C verglüht. Für die Berechnung der Sedimentationsraten (Formel 1) wurde von der gesamten Trockenmasse der einzelnen Fallenproben der jeweilige anteilige Sestongehalt in den Fallen abgezogen.

$$\text{Sedimentationsrate } [gTM m^{-2} h^{-1}] = \frac{TM_{Falle} - K_{Seston} * FV}{A_{Fallen} * Zeit * 1000} \quad \text{Formel 1}$$

Mit  $TM_{Fallen}$ : der Trockenmasse [mg] des sedimentierten Materials in der Falle;  $K_{Seston}$ : der Konzentration des gemittelten suspendierten Materials in der Wassersäule [ $mg L^{-1}$ ];  $FV$ : dem Fallenvolumen [L];  $A_{Fallen}$ : der Größe der Sammelfläche der Fallen [ $m^2$ ] und  $Zeit$ : die Ausbringungsdauer [h].

**Tab. 1:** Durchführung der verschiedenen Versuchsreihen. FS: Fallensystem; TF: Tellerfalle; ZF: Zylinderfalle.

<b>Versuchsreihe</b>	<b>Höhengradient</b>	<b>Tiefentranspekt</b>	<b>Zeitreihe</b>	<b>24h-Serie</b>
<b>Versuchsanzahl</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>7</b>
Anzahl Fallensysteme pro Versuch	4 bodennahes FS nur aus TF bestehend	4 jeweils TF+ZF	4 jeweils TF+ZF	4 jeweils TF+ZF
Wassertiefe [m]	1,45-1,51	0,93-1,50	0,90-1,07	1,44-1,65
Wassersäule über der Falle [m]	0,34-1,37	0,39-0,95	0,35-1,0	0,77-1,09
TF Höhe über dem Sediment	FS I: 0,14 FS II: 0,76 FS III: 0,88 FS IV: 1,11	0,51-0,60	0,35-0,44	0,47-0,70
Dauer	ca. 24 h	ca. 24 h	1x: 3 h, 24 h, 48 h 2x: 6 h, 12 h, 72 h	ca. 24 h
Ziele und / oder Hypothesen	Ermittlung einer möglichen Sediment-resuspension wenn Resuspension, dann sollte auf der sedimentnahen Falle mehr anorganisches Material sein, als auf den sedimententfernten Fallen	mit zunehmender Tiefe nimmt Welleneinfluss ab und die SR sowie die AFTM zu	Ermittlung einer minimalen Ausbringungsdauer Varianzkoeffizient ( $V_a$ ) nimmt mit steigender Ausbringungsdauer ab	Ermittlung einer allgemeinen Schwankungsbreite

Für alle Versuchstage wurden die stündlichen Windgeschwindigkeiten und – richtungen sowie die Pegelstände der Messstationen in Barth notiert (WINDFINDER 2014; Wsv 2014). Mittels Google Earth wurde für alle Windrichtungen (22,5° Abstände) der Fetch (Strecke, die der Wind ungehindert über die Wasseroberfläche wehen kann) bestimmt. Dafür wurden die Strecken zwischen dem Punkt an dem die Fallen aufgestellt wurden und dem nächstgelegenen Ufer in Windrichtung gemessen. Aus diesen Werten wurden nach der Formel 2 (COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER 1984; LAENEN & LETOURNEAU 1996) die mittleren Wellenlängen während der Versuche berechnet.

$$\lambda = \left(\frac{gT^2}{2\pi}\right) \tanh\left(\frac{2\pi}{\left(\frac{gT^2}{2\pi}\right)}\right) \text{ mit} \quad \text{Formel 2}$$

$$T = 7,54 \left(\frac{U_A}{g}\right) \tanh\left(0,833 \left(\frac{gh}{U_A^2}\right)^{0,375}\right) \tanh\left(\frac{0,0379 \left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{0,333}}{\tanh\left(0,833 \left(\frac{gh}{U_A^2}\right)^{0,375}\right)}\right)$$

Dabei ist  $\lambda$  die Wellenlänge in flachem Wasser [m], T die Wellenperiode [s],  $U_A$  die Windgeschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ], F der Fetch [m], g die Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ) und h die Wassertiefe [m]. Während der Versuche variierten die Wassertiefen am Untersuchungsort, aufgrund von windinduzierten bzw. durch Ein- und Ausstrom bedingten Pegelstandsänderungen. Die schwankenden Pegelstände (-30 bis +20 relativ zu Normal an der Messstelle Barth) wurden bei der Berechnung der Wassersäulen über den Fallen berücksichtigt.

Bei der Datenanalyse wurden die berechneten Sedimentationsraten in Bezug zum Quotienten aus der halben Wellenlänge und der Wassersäule über den Fallen ( $h_F$ ) gesetzt ( $(\lambda/2)/h_F$ ), um die Beziehung zwischen dem Einfluss der Wellen aufgrund ihrer elliptischen Bewegung und der Wassertiefe (Abb. 1) quantitativ darzustellen. Des Weiteren wurde das Verhältnis von anorganischem zu organischem Material untersucht.

Die statistische Auswertung des Datenmaterials erfolgte mittels SPSS.

### 3 Ergebnisse

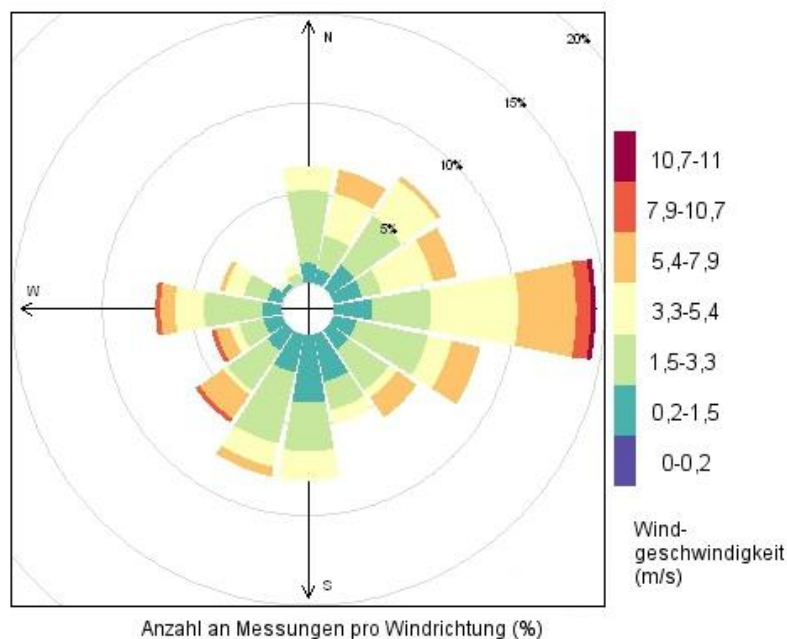
Aufgrund der variierenden Windbedingungen (Abb. 5) wurden unterschiedliche Wellenlängen (bis 4 m) berechnet. Die jeweiligen Wassersäulen über den Fallen betragen zwischen 0,35 m und 1,5 m. Bei 69 % der Fallensysteme war die halbe Wellenlänge kleiner als die Wassersäule über den Fallen (Abb. 6). Die Wellenbewegungen waren somit möglicherweise nicht immer groß genug, um das Sedimentationsgeschehen bei allen FS in den einzelnen Versuchen zu beeinflussen.

Die Sestongehalte und organischen Anteile (AFTM) in der Wassersäule betragen 38 -87  $\text{mgTG L}^{-1}$  bzw. 14 - 60 %TM (Abb. 7). Signifikante Korrelationen gab es zwischen den Sestonkonzentrationen (positiv) bzw. den organischen Anteilen des Sestons (negativ) und den jeweiligen Wellenlängen (Sestonkonzentration:  $p = 0,006$

bzw.  $AFTM_{Seston}$ :  $p = 0,002$ , Tab. 2). Bei kleinen Wellenlängen ( $<2$  m) streuten beide Werte stark.

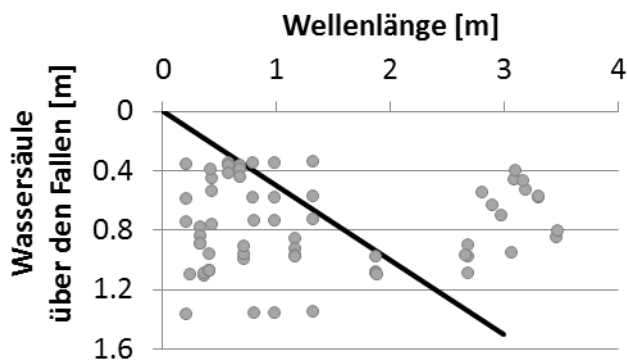
Im Mittel lagen die Sedimentationsraten (SR, Abb. 8a) aller TF bei  $0,6 \pm 0,69 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ( $\pm$  SD) und aller ZF bei  $3,0 \pm 3,06 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ( $\pm$  SD). Die TF fingen im Mittel  $1,1 \pm 1,0 \%$  (SD) und die ZF  $7,1 \pm 6,6 \%$  (SD) des möglichen suspendierten Materials. Allgemeine Schwankungsbreiten der SR, ermittelt in den sieben Versuchen der 24 h-Serie (Tab. 2), betragen bei den TF zwischen 10,6 und 76,7 % und bei den ZF 3,4 und 84,3 % (Standardabweichung in % vom Mittelwert). Im kombinierten Datenmaterial für alle Versuche (Abb. 9 a-d und Tab. 3) bestand eine negative Korrelation zwischen der  $SR_{TF}$  und der Wellenexposition ( $p = 0,000$ ). Dagegen waren die  $SR_{ZF}$  positiv korreliert mit der Wellenexposition und dem Sestongehalt (jeweils  $p = 0,000$ ).

Bis zu dem Verhältnis von  $(\lambda/2)/h_F = 0,4$  streuten die  $SR_{TF}$  (Abb. 9b) stark ( $0,106$ - $1,865 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Oberhalb dieses Verhältnisses waren sie  $<1 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Im Gegensatz dazu streuten die  $SR_{ZF}$  (Abb. 9d) bis zu dem Verhältnis  $(\lambda/2)/h_F = 1,23$  kaum und blieben unter  $2,7 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Ab diesem Verhältnis stiegen die Werte zunächst bis auf  $10,3 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  und fielen dann auf  $2,9 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  zurück.



**Abb. 5** Windbedingungen an der Wetterstation in Barth während der Probenahmen. Windrichtungen mit jeweiligen Windgeschwindigkeiten.

Der Anteil an organischem Material stieg, in den beiden Fallentypen zu gleichen Anteilen, signifikant mit dem steigendem organischem Anteil im Seston (Abb. 10a und Tab. 3). Der organische Anteil lag im Mittel in den TF bei  $23,0 \pm 6,30 \%$ TM und in den ZF bei  $29,7 \pm 6,19 \%$ TM ( $\pm$  SD) (Abb. 8). Mit größer werdender Wellenexposition nahmen die organischen Anteile in beiden Fallentypen signifikant ab (Tab. 3), in den TF jedoch mehr, als in den ZF (Abb. 10b). Zu 94,5 % war der Anteil an organischem Material auf den TF kleiner, als in den ZF. Der organische Gehalt war bei 25,4 % der



**Abb. 6:** In dem Diagramm sind für alle Fallensysteme (graue Punkte) die gemittelten Wassersäulen über den Fallen gegen die berechneten, mittleren Wellenlängen abgetragen. Die Linie markiert die Wassertiefe die genau einer halben Wellenlänge entspricht. Die Sedimentation des suspendierten Materials in den Fallensystemen, die sich oberhalb der Linie befinden, ist potentiell durch Wellenbewegung beeinflusst.

ZF-Proben größer als in den jeweiligen Sestonproben. Bei den TF-Proben waren es nur 4,55 %.

Das Verhältnis von  $AFTM_{Seston} : AFTM_{ZF}$  ( $= 1,15 \pm 0,23$  (Mittelwert  $\pm$  SD)) ist signifikant kleiner ( $p = 0,000$  (Mann-Whitney-U-Test)), als das von  $AFTM_{Seston} : AFTM_{TF}$  ( $= 1,60 \pm 0,51$  (Mittelwert  $\pm$  SD)).

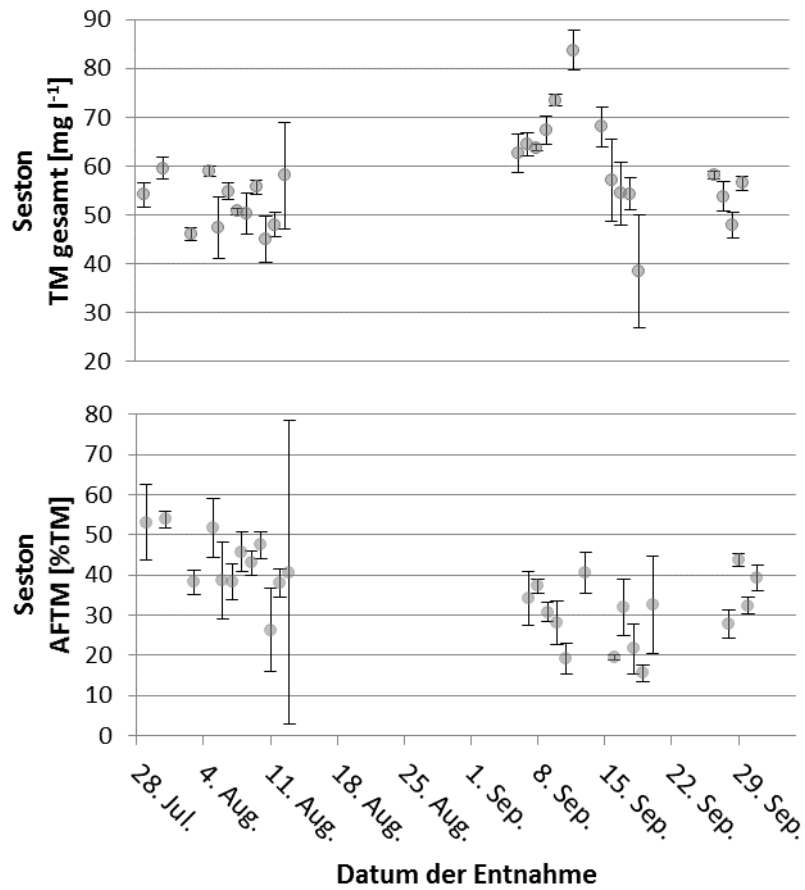
Die Daten zur Beschreibung des Sedimentationsverhaltens in ca. 0,14 m über dem Sediment (TF I) zeigten für diesen Bereich einen geringen Welleneinfluss mit  $(\lambda/2)/h_F < 0,5$  und tendenziell größere Sedimentationsraten als in den Fallen weiter oberhalb des Sedimentes (TF II-IV). Die anorganischen Anteile des sedimentierten Materials auf den

TF I (Abb. 11) waren in zwei von vier Fällen größer als in den TF II-IV.

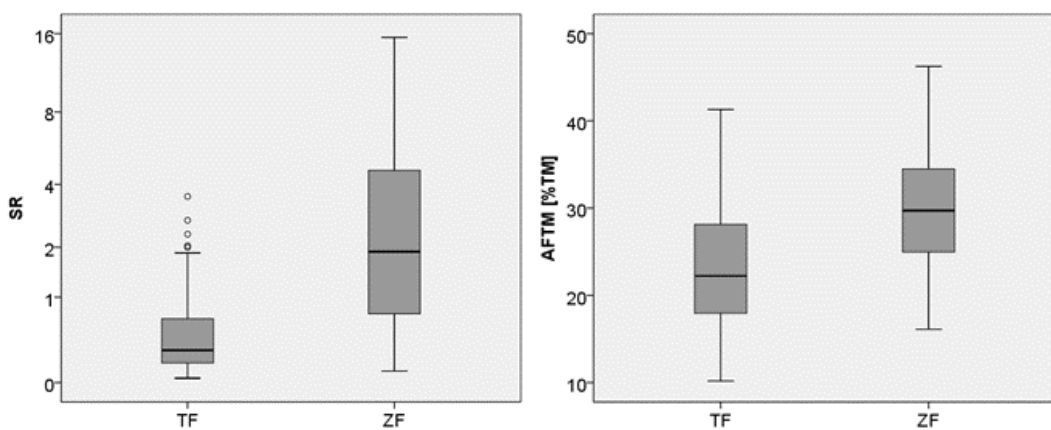
In den Zeitreihenversuchen verringerten sich die Varianzkoeffizienten der Sedimentationsraten in beiden Fallentypen nicht mit der steigenden Ausbringungsdauer (Tab. 4). Somit konnte keine minimale Ausbringungsdauer ermittelt werden.

**Tab. 2:** Ergebnisse der Korrelationsanalysen (SPSS; Spearman-Rho, nicht signifikante Korrelation<sup>##</sup>; n: Anzahl der Proben ). Seston: suspendiertes Material in der Wassersäule; TM und AFTM: Trockenmasse und organische Anteile; SR: Sedimentationsrate; TF: Tellerfallen; ZF: Zylinderfallen;  $(\lambda/2)/h_F$ : Welleneinfluss, d. h. Quotient aus halber Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) und Wassersäule oberhalb der Fallensysteme ( $h_F$ ).

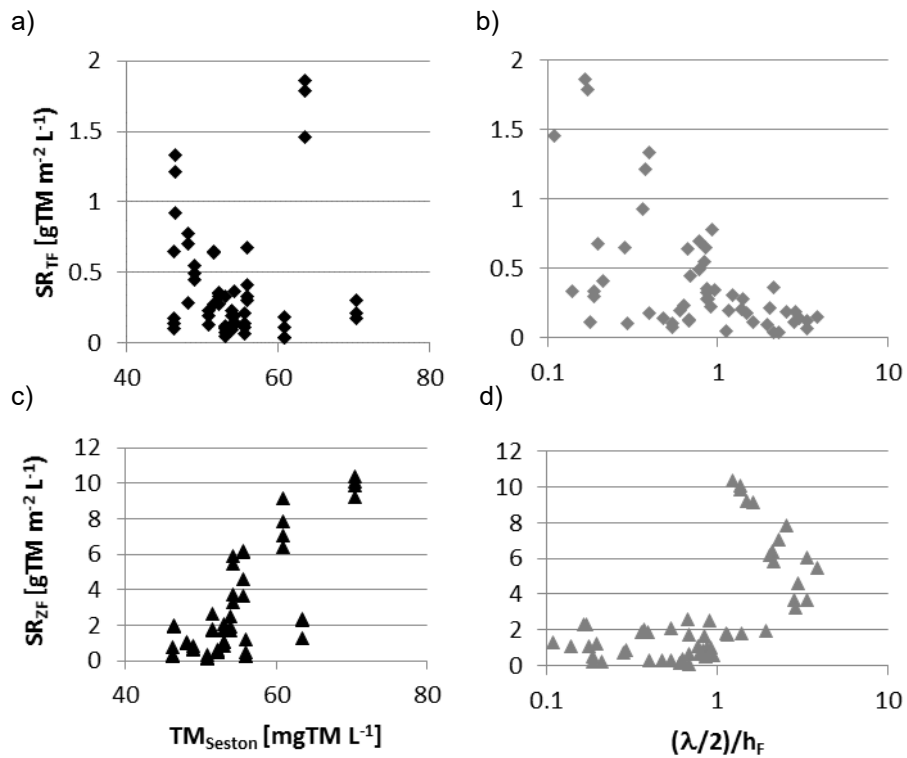
Variable		Korrelationskoeffizient	positive / negative Korrelation	Signifikanz (p; zweiseitig)	n
Seston TM	Wellenlänge	0,351	positiv	0,006	59
Seston AFTM	Wellenlänge	-0,399	negativ	0,002	59
SR <sub>TF</sub>	TM <sub>Seston</sub>	-0,088 <sup>#</sup>		0,481	66
SR <sub>ZF</sub>	TM <sub>Seston</sub>	0,589	positiv	0,000	69
AFTM <sub>TF</sub>	AFTM <sub>Seston</sub>	0,464	positiv	0,000	66
AFTM <sub>ZF</sub>	AFTM <sub>Seston</sub>	0,630	positiv	0,000	67
SR <sub>TF</sub>	$(\lambda/2)/h_F$	-0,486	negativ	0,000	61
SR <sub>ZF</sub>	$(\lambda/2)/h_F$	0,627	positiv	0,000	60
AFTM <sub>TF</sub>	$(\lambda/2)/h_F$	-0,373	negativ	0,003	61
AFTM <sub>ZF</sub>	$(\lambda/2)/h_F$	-0,356	negativ	0,005	60



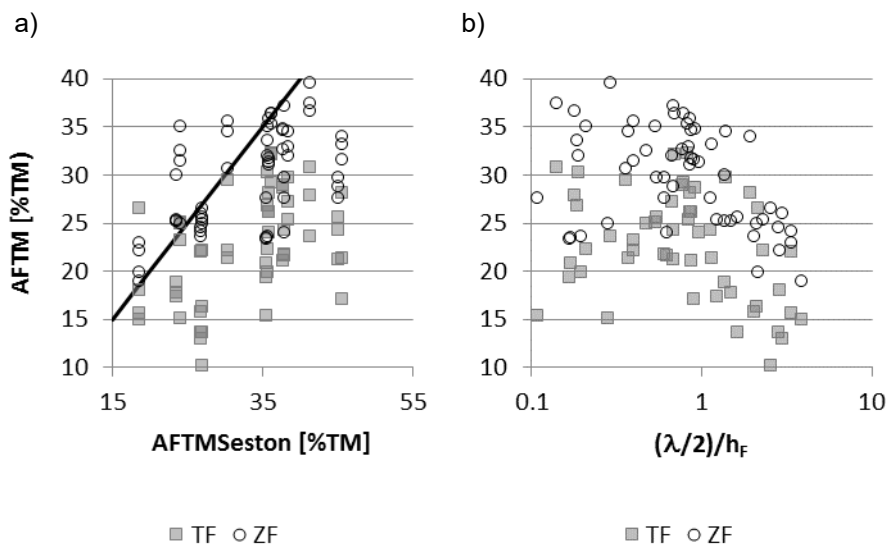
**Abb. 7:** Gesamtkonzentration des suspendierten Materials (Sestons) und organischer Anteil an der Trockenmasse des Sestons (AFTM) während der Versuche. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichung aus drei Unterproben ( $n=3$ ;  $\pm$  SD) einer Wasserprobe, entnommen aus der gesamten Wassersäule.



**Abb. 8:** Sedimentationsraten (SR [ $\text{mgTM m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ]) und organischer Anteil an der Trockenmasse (AFTM [%TM]) aller Tellerfallen (TF) und Zylinderfallen (ZF).



**Abb. 9:** Sedimentationsraten (SR) auf den Tellerfallen (TF) bzw. in den Zylinderfallen (ZF) abgetragen gegen die jeweiligen Sestonkonzentrationen (TF: a bzw. ZF: c) und gegen die jeweiligen gemittelten Wellenexpositionen  $(\lambda/2)/h_F$ , d. h. Quotient aus halber Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) zu Wassersäule über den Fallen ( $h_F$ ) (TF: b bzw. ZF: d).



**Abb. 10:** Zusammenhang zwischen den organischen Anteilen in den Sedimentationsfallen und a) dem organischen Gehalt im Seston sowie b) der Wellenexposition. TF: Tellerfallen, ZF: Zylinderfallen,  $(\lambda/2)/h_F$ : Wellenexposition, d. h. Quotient aus halber Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) zu Wassersäule über den Fallen ( $h_F$ ).

**Tab. 3:** Ergebnisse der 24 h-Serie. Mit dem Mittelwert der Sedimentationsraten ( $m$ ) und der Standardabweichung in Prozent vom Mittelwert (%SD)], sowie der gemittelten Wassersäule ( $h_F$  [m]) über den Tellerfallen (TF) und Zylinderfallen (ZF) und deren Standardabweichung (SD) in den sieben Versuchen.

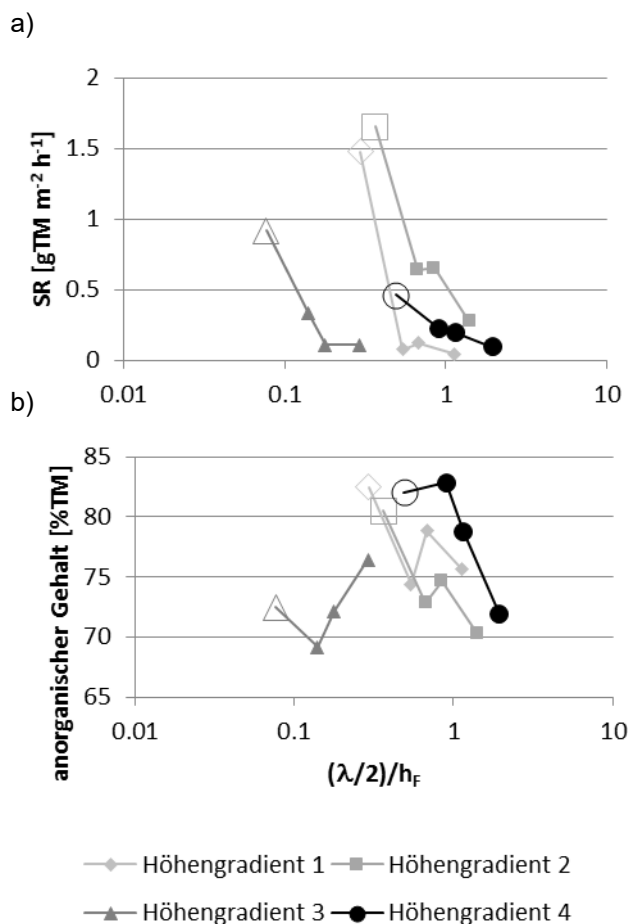
	Versuchsnummer in der 24 h-Serie						
	1	2	3	4	5	6	7
TF-Anzahl	4	4	3	4	3	4	3
$m_{TF}$	1,57	1,76	0,23	0,43	0,18	0,33	0,17
%SD <sub>TF</sub>	20,2	76,7	28,3	40,1	29,4	10,6	22,7
ZF-Anzahl	3	4	4	4	4	4	4
$m_{ZF}$	1,98	5,05	9,89	0,55	0,19	0,55	0,21
%SD <sub>ZF</sub>	29,7	13,0	4,7	84,3	56,1	8,2	3,4
$h_F$	1,0	0,86	0,99	0,85	0,92	1,06	1,07
SD	0,01	0,08	0,10	0,05	0,06	0,06	0,02

**Tab. 4:** Ergebnisse der Zeitserien-Versuche (Z) für die Tellerfallen und Zylinderfallen. Dargestellt sind Mittelwerte ( $m$ ) und Standardabweichung (SD) und Varianzkoeffizienten ( $V_a = \text{Standardabweichung} / \text{Mittelwert}$ ) aus jeweils 2-4 Fallensystemen.

Z	Tellerfallen			Zylinderfallen			
	m	SD	$V_a$	Versuch	m	SD	$V_a$
12 h <sub>1</sub>	0,13	0,004	0,005	6 h <sub>2</sub>	1,93	0,007	0,03
12 h <sub>2</sub>	0,49	0,02	0,04	24 h	1,02	0,04	0,039
48 h	0,26	0,03	0,06	72 h <sub>2</sub>	1,68	0,07	0,041
6 h <sub>1</sub>	0,39	0,07	0,10	48 h	3,44	0,25	0,07
6 h <sub>2</sub>	1,12	0,09	0,19	6 h <sub>1</sub>	13,55	1,23	0,09
72 h <sub>2</sub>	0,94	0,19	0,19	12 h <sub>2</sub>	0,72	0,13	0,18
24 h	0,58	0,11	0,22	3 h	5,96	1,16	0,19
3 h	2,17	0,17	0,24	12 h <sub>1</sub>	1,70	0,40	0,24
				72 h <sub>1</sub>	9,81	4,95	0,50

## 4 Diskussion

Bis heute ist die Aussagekraft von *in-situ* Sedimentationsraten für die realen Bedingungen in flachen Gewässern umstritten (z. B. KOZERSKI 1994, 2006; KOZERSKI & LEUSCHNER 1999; SUKHODOLOV et al. 2003). Natürliche Sedimentationsraten können mit verschiedenen Sedimentationsfallen unter- bzw. überbestimmt werden (BLOESCH & BURNS 1980; GARDNER 1980a; BUTMAN 1986). Des Weiteren können Sedimentationsfallen selektiv auf die Retention von bestimmten Partikeln wirken bzw. diese auch durch einen unterschiedlichen Winkel zwischen Zylinderfallenöffnung und Strömungsrichtung des umgebenen Wassers beeinflussen (GARDNER 1985, LARSSON et al. 1986; BUESSELER et al. 2007). Mit den getesteten Tellerfallen könnten sich neue Möglichkeiten für die Ermittlung von Sedimentationsraten in wellenbeeinflussten Flachgewässern ergeben.



**Abb. 11:** a) Sedimentationsrate und b) anorganischer Gehalt in den Tellerfallen der vier Höhengradientenversuche in Abhängigkeit von der Wellenexposition. Die sedimentnahen Fallensysteme (ungefüllte Markierung) befanden sich ca. 0,14 m über dem Sediment.

Die Sedimentationsraten (SR) der Tellerfallen (TF) und Zylinderfallen (ZF) zeigen eine Abhängigkeit vom Verhältnis der halben Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) zur Wassersäule über den Fallen ( $h_F$ ). Bei den ZF wird ein Einfluss der Wasserbewegungen ab einem Schwellenwert um 1 deutlich. Bei den TF ist der Wert etwas niedriger, zwischen 0,4 und 1 (Abb. 9). Trotz der geringen Wassertiefe ( $<2$  m) am Untersuchungsstandort reichten die windinduzierten Welleneinflüsse nicht immer bis hinunter zu den Sedimentationsfallen. Jedoch reichen sie aus, um das suspendierte Material in der Wassersäule zu halten, denn weniger als 4,4 % (TF) bzw. 25,2 % (ZF) des möglichen sedimentierbaren Materials setzte sich in den Fallen ab.

Der vergleichsweise geringe organische Gehalt des sedimentierten Materials in den TF zeigt, dass organisches Material entweder langsamer absedimentiert oder schnell resuspendiert wird. Selbst in den ZF ist das AFTM zu fast 75 % geringer, als in den jeweiligen Sestonproben. Suspendierte Partikel haben in der

DZBK ein großes Volumen und eine geringe Dichte aufgrund einer hohen Klebrigkeit (SCHUMANN et al. 2001; SCHUMANN & KARSTEN 2006). Dadurch können die Partikel lange in der Wassersäule bleiben und somit für eine hohe Trübung sorgen, auch ohne zusätzliche Resuspension des Bodenmaterials.

Je größer jedoch die Masse von Partikelaggregaten ist, z. B. durch Anlagerung von anorganischen Partikeln, desto eher sedimentieren sie. Das könnte der Grund sein, warum in zwei der vier Versuche im Höhengradienten (Abb. 10) in den sedimentnahen TF die Anteile von anorganischem Material höher waren, als in den TF weiter oberhalb des Sedimentes. Die Möglichkeit eines Resuspensionsereignisses an der Messstelle war jedoch gering, da der Welleneinfluss in beiden Fällen relativ niedrig war ( $(\lambda/2)/h = 0,27$  und  $0,33$ ).

Es gab keine minimale Ausbringungsdauer, da die Varianzkoeffizienten der Sedimentationsraten mit steigender Ausbringungsdauer nicht abnahmen (Tab. 3). Die Ausbringungsdauer sollte in zukünftigen Messungen möglichst kurz sein, damit sich die Wind- und Wellenbedingungen sowie die Sestonkonzentrationen so wenig wie möglich während der Fallenausbringung ändern. Ein Problem besteht jedoch, wenn die Ausbringungsdauer zu kurz ist, denn dann hätten nicht alle Partikelsorten potentiell

die Möglichkeit in den Fallen zu sedimentieren (BUESSELER et al. 2007). Die Ermittlung von Sinkgeschwindigkeiten einzelner Partikelfractionen unter Welleneinfluss ist jedoch kaum möglich, sodass an dieser Stelle nur die Schwierigkeit erwähnt werden soll. Aufeinanderfolgende Beprobungen werden empfohlen, da sich die Arbeitszeit bei gleichzeitiger Ausbringung und Entleerung der Fallen verkürzt.

Die Schwankungen der Sestonhalte in der Wassersäule von aufeinanderfolgenden Probenahmen waren z. T. relativ groß (Abb. 8). Die Sestonkonzentration im Grabow wird unter anderem durch windinduzierte Wellen und durch die Ostsee beeinflusst (GEORGI 1986). Der Wasserkörper dieses Gewässers wird theoretisch 32mal pro Jahr ausgetauscht, d. h. ca. alle elf Tage (CORRENS & JAEGER 1979), wobei das suspendierte Material durch einströmendes klares Ostseewasser verdünnt bzw. bei Ausstromsituationen in die vorgelagerte Ostsee verfrachtet werden kann (SCHLUNGBAUM et al. 1994a). Die Einflüsse von Ein- oder Ausstrom und Wind können sich zeitweise überlagern, sich gegenseitig verstärken oder vermindern. Dies könnte der Grund für die fehlende Korrelation zwischen den SR der Tellerfallen und den jeweiligen Sestonkonzentrationen in der Wassersäule sein.

Im Mittel könnten 5,1 kg suspendiertes Material im Jahr pro Quadratmeter sedimentieren, bei einer mittleren SR der TF von  $0,6 \text{ gTM m}^{-2}\text{h}^{-1}$ . Bezüglich der SR der ZF ergibt das einen Wert von  $26,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$ . Das bedeutet eine Zunahme der Sedimentdicke von 0,4 cm pro Jahr (bzw. 2,0 cm (ZF)) bei einer Trockenraumdichte des Sedimentes in gleicher Wassertiefe am Standort Dabitz von  $1,33\text{g/cm}^3$  (SD; F. BITSCHOFSKY, pers. Mitteilung). Das sedimentierte Material auf den TF hatte einen mittleren organischen Anteil von 23 % TM, das Sediment in der Umgebung aber nur 1,3 % TM (F. BITSCHOFSKY, pers. Mitteilung). Vermutlich wird in den ausgedehnten Flachwasserbereichen, durch die besonderen Eigenschaften des suspendierten Materials, die Sedimentation von organischem Material durch Wasserbewegungen verhindert bzw. wird es schnell wieder resuspendiert. Somit können diese Bereiche langfristig kaum als Senke für Nährstoffe dienen (detailliertere Beschreibungen des Sedimentes in den weiteren Beiträgen dieser Ausgabe; SCHLUNGBAUM et al. 1994b). Es kann davon ausgegangen werden, dass das sedimentierte Material langfristig in tiefere Bereiche verlagert wird, da bei einer Wassertiefe von 1,9 m bereits ein organischer Gehalt von 8,7 % TM vorhanden ist (F. BITSCHOFSKY, pers. Mitteilung).

Bei früheren Sedimentationsversuchen im zentralen Bereich des Grabow (3,0-3,5 m Wassertiefe) wurden mittlere SR von  $4,6 \text{ gTM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Min: 0,3 und Max:  $15,0 \text{ gTM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) und ein mittleres AFTM von 30,2 %TM (Min: 24,6 und Max: 44,1 %TM) in einer Expositionstiefe von 2,4 - 2,9 m gemessen (KLEIB 1987). Die entsprechenden Sedimentfallen bestanden aus bodenlosen Flaschen (20 cm lang und 9 cm im Durchmesser, Aspect-Ratio von 2,2), die mit dem Hals nach unten in einem Gestell über dem Sediment hingen. Im Flaschenhals steckten Reagenzgläser als Auffangbehälter.

In der Zukunft sollten die Berechnungen der SR mit den TF in konstanter Distanz zum Boddenboden in Tiefentransekten, vom flachen Schilfrand bis in die größten Senken (ca. 6 m), weiter geführt werden. Für die Gesamtbetrachtung der Darß-Zingster-Boddenkette sind Messungen des Sedimentationsverhaltens von suspendiertem Material in allen Bodden nötig, da unterschiedliche Sestonzusammensetzungen in den einzelnen Bodden auftreten. In einem Gradienten von West nach Ost verringern sich der Gehalt von Gesamtsuspendiertem und organischem Material, sowie der Chlorophyllgehalt (LUNG 1990-2006).

Durch die Analyse des Sedimentationsverhaltens von Sestonpartikeln in verschiedenen Sedimentationsfällen (ZF und TF), bei kontrolliertem Welleneinfluss unter Laborbedingungen, können zukünftige *in-situ* Messungen verbessert werden, wie es bereits für Fallen unter Strömungsbeeinflussung geschehen ist (z. B. GARDNER 1980b; BUTMAN 1986; GUST et al. 1996; GARDNER & ZHANG 1997). Bei der Simulation muss auf Turbulenzen in Fallennähe und innerhalb von ZF geachtet werden. Der Deckel der hier verwendeten TF kann Turbulenzen erzeugen und die vertikale Wasserbewegung zwischen Deckel und Sammelfläche verringern. Beides würde die Sedimentation beeinflussen. Aus diesem Grund wurde eine Tellerfalle entwickelt, die keinen Deckel hat (BANAS & MASSON 2003). Bei dieser Falle ist die Bergung des sedimentierten Materials aus tieferem Wasser jedoch schwierig, da sie mittels eines Schlauches erfolgt, der rund um die Sammelfläche empor gezogen wird und damit viel überstehendes Wasser samt suspendiertem Material mit einschließt. Ihr Anwendungsbereich liegt daher wie in BANAS & MASSON (2003) beschrieben in sehr flachen lenitischen, d. h. windgeschützten und strömungsberuhigten, Gewässerbereichen.

Die Sedimentationsraten in den ausgedehnten, flachen Bereichen der DZBK sind abhängig von der Wassertiefe, den Wellenbewegungen (inklusive Langmuir-Zirkulationen; CHUBARENKO et al. 2010; TEJADA-MARTÍNEZ et al. 2013) und dem Einfluss der Ostsee (boddenabhängige Austauschraten, Ein- und Ausstromereignisse). In den flachen Randbereichen können auch die dort wachsenden Makrophyten eine Rolle spielen.

Im Allgemeinen wird submersen und emersen Makrophyten, wie Seegräsern, Characeen, Laichkräutern und Schilf, eine sedimentationsfördernde und resuspensionsverringende Wirkung zugeschrieben (GACIA & DUARTE 2001; SCHULZ et al. 2003; LI et al. 2008; NURMINEN & HORPPILA 2009; HEIDE et al. 2011; WILKIE et al. 2012). Dabei kann ein dichter Makrophytenbestand verringern auf Wasserbewegungen (MADSEN et al. 2001) bzw. auf die Wirkung von Wellen in Bodennähe wirken (GRUBER & KEMP 2010; LÖVESTEDT & LARSON 2010). Im Gegensatz dazu können spärliche Makrophytenbestände Resuspension durch Erzeugung von Turbulenzen an den Pflanzenstielen fördern (JÄRVELÄ 2002; BOUMA et al. 2009; LUHAR et al. 2010; NEPF 2012; SUKHODOLOV & SUKHODOLOVA 2012).

Da die genannten physikalisch-biologischen Parameter sehr variabel sind, sollte eine Berechnung von jährlichen Sedimentationsraten für die einzelnen Bodden im Zusammenhang mit zusätzlichen Modellierungen erfolgen, wie für andere Gewässer bereits durchgeführt (KRISTENSEN et al. 1992; HAMILTON & MITCHELL 1996; CÓZAR et al. 2005; LÖVESTEDT & LARSON 2010; PUJOL et al. 2012; MARIOTTI & FAGHERAZZI 2013; NICOLODI et al. 2013). Die Ergebnisse punktueller und zeitlich begrenzter Beprobungen könnten in Modellen mit Wind- und Bathymetriedaten interpoliert werden und dadurch auf größere Flächen und auf längere Zeiträume bezogen werden.

## **Zusammenfassung**

Ziel der Studie war es sogenannte Tellerfallen (TF) für die Berechnung von Sedimentationsraten (SR) an einem Untersuchungsort in der Darß-Zingster-Boddenkette zu testen. Das Besondere des Fallentyps ist die Möglichkeit, dass bereits sedimentiertes Material wieder resuspendiert werden kann, im Gegensatz zu Zylinderfallen (ZF). Die Gewässer sind sehr flach (<2 m) und damit durch wind-

induzierte Wellen beeinflusst. Für die beiden Fallentypen wurde der Einfluss der Wellen und Wassertiefen auf die Sedimentation von suspendiertem Material bestimmt.

Die Mittlere SR der TF betrug  $0,6 \pm 0,69 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  und für die ZF  $3,0 \pm 3,06 \text{ gTM m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ( $\pm$  SD). Die dazugehörigen theoretischen Werte für die Zunahme der Sedimenthöhe waren 0,4 bzw. 2,0 cm pro Jahr. Die signifikanten Korrelationen zwischen den SR und dem Einfluss der Wasserbewegungen (halbe Wellenlänge / Wassersäule über den Fallen) waren negativ für die TF und positiv für die ZF. Der organische Anteil in beiden Fallentypen stieg signifikant mit dem organischen Anteil im suspendierten Material und verringerte sich signifikant mit dem steigenden Einfluss der Wasserbewegungen. Jedoch ist der organische Anteil in den TF fast immer geringer als in den ZF oder im suspendierten Material.

Abschließend kann gesagt werden, dass sich mittels Tellerfallen realistischere Sedimentationsraten für wellenbeeinflusste Gewässer berechnen lassen, als mit Zylinderfallen. Jedoch sind zukünftige Laboruntersuchungen bezüglich der Interaktionen zwischen Tellerfalle und welleninduzierte Wasserbewegungen notwendig. Sie könnten zeigen, dass die Verwendung dieses Fallentyps für die beschriebenen Flachwasserbedingungen sinnvoll ist.

## Danksagung

Wir bedanken uns für die Bereitstellung des Sedimentationsfallen- und Filtrationsequipments sowie für die technische Beratung bei Stefan Thoma und Sabine Wilczek von der SGL Spezial- und Bergbau-Servicegesellschaft Lauchhammer mbH; bei unseren Masterstudentinnen, Vivien Leonhardt, Maria Schiffler und Laura Schulz, für die tatkräftige Mitarbeit bei allen Wetterlagen während der Probenahmen und Probenaufbereitung im Labor; bei Lothar Spengler, Mitarbeiter der Biologischen Station Hiddensee, für die Anpassung unserer Ausrüstung an die gegebenen Ansprüche; sowie bei allen MitarbeiterInnen der Biologischen Station, Rhena Schumann, Maximilian Berthold, Volker Reiff und Rita Wulff, für die Bereitstellung von Unterkunft, Laborplätzen und Ausrüstung, bei dem Transport des Kanus und für die Hilfe bei Probennahme und -aufbereitung.

## Literaturverzeichnis

- Banas, D. & G. Masson, 2003. New plate sediment traps for lentic systems. *Archiv für Hydrobiologie*. 158. 2. 283–288.
- Bloesch, J., 1994. A review of methods used to measure sediment resuspension. *Hydrobiologia*. 284. 13–18.
- Bloesch, J. & N. Burns, 1980. A critical review of sedimentation trap technique. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. 42. 1.
- Bouma, T., M. Friedrichs, P. Klaassen, B. van Wesenbeeck, F. Brun, S. Temmerman, M. van Katwijk, G. Graf & P. Herman, 2009. Effects of shoot stiffness, shoot size and current velocity on scouring sediment from around seedlings and propagules. *Marine Ecology Progress Series*. 388. 293–297.
- Buesseler, K., A. Antia, M. Chen, S. Fowler, W. Gardner, O. Gustafsson, K. Harada, A. Michaels, M. van der Rutgers Loeff, M. Sarin, D. Steinberg & T. Trull, 2007. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes. *Journal of Marine Research*. 65. 345–416.
- Butman, C., 1986. Sediment trap biases in turbulent flows: Results from a laboratory flume study. *Journal of Marine Research*. 44. 645–693.

- Butman, C., W. Grant & K. Stolzenbach, 1986. Predictions of sediment trap biases in turbulent flows: A theoretical analysis based on observations from the literature. *Journal of Marine Research*. 44. 601–644.
- Chubarenko, I., B. Chubarenko, E. Esiukova & H. Baudler, 2010. Mixing by Langmuir circulation in shallow lagoons. *Baltica*. 23. 1. 13–24.
- Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore protection manual.
- Correns, M. & F. Jaeger, 1979. Beiträge zur Hydrographie der Nordrügenschten Bodden. *Acta Hydrophysica*. 24. 3. 149–177.
- Cózar, A., J. Gálvez, V. Hull, C. Garcia & S. Loisell, 2005. Sediment resuspension by wind in a shallow lake of Esteros del Iberá (Argentina): a model based on turbidimetry. *Ecological Modeling*. 186. 63–76.
- Duin, E. Van, G. Blom, F. Los, R. Maffione, R. Zimmermann, C. Cerco, M. Dortch & E. Best, 2001. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth. *Hydrobiologia*. 444. 25–42.
- Gacia, E. & M. Duarte, 2001. Sediment retention by a mediterranean *Posidonia oceanica* meadow: The balance between deposition and resuspension. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 52. 505–514.
- Gardner, W., 1980a. Field assessment of sediment traps. *Journal of Marine Research*. 38. 1. 41–52.
- Gardner, W., 1980b. Sediment trap dynamics and calibration: a laboratory evaluation. *Journal of Marine Research*. 38. 1. 17–39.
- Gardner, W., 1985. The effect of tilt on sediment trap efficiency. *Deep-Sea Research*. 32. 3. 349–361.
- Gardner, W. & Y. Zhang, 1997. The effect of brine on the collection efficiency of cylindrical sediment traps. *Journal of Marine Research*. 55. 1029–1048.
- Gasith, A., 1975. Tripton sedimentation in eutrophic lakes - simple correction for the resuspended matter. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. 19. 116–122.
- Georgi, F., 1986. Die chemische Zusammensetzung des Sestons in inneren Küstengewässern der DDR (Darß-Zingster Boddengewässer, südliche Ostsee). *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*. 14. 6. 581–594.
- Gruber, R. & W. Kemp, 2010. Feedback effects in a coastal canopy-forming submersed plant bed. *Limnology and Oceanography*. 55. 6. 2285–2298.
- Gust, G., W. Bowles, S. Giordano & M. Hüttl, 1996. Particle accumulation in a cylindrical sediment trap under laminar and turbulent steady flow: An experimental approach. *Aquatic Sciences*. 58. 4. 297–326.
- Hamilton, D. & S. Mitchell, 1996. An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes. *Hydrobiologia*. 317. 209–220.
- Heide, T. van der, E. van Nes, M. van Katwijk, H. Olf & A. Smolders, 2011. Positive feedbacks in seagrass ecosystems - evidence from large-scale empirical data. *PLoS ONE*. 6. 1.
- Hofmann, H., A. Lorke & F. Peeters, 2011. Wind and ship wave-induced resuspension in the littoral zone of a large lake. *Water Resources Research*. 47.
- Järvelä, J., 2002. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. *Journal of Hydrology*. 269. 44–54.
- Jeppesen, E., J. Jensen, M. Søndergaard, K. Hansen, P. Møller, H. Rasmussen, V. Norby & S. Larsen, 2003. Does resuspension prevent a shift to a clear state in shallow lakes during reoligotrophication? *Limnology and Oceanography*. 48. 5. 1913–1919.
- Jeppesen, E., J. Jensen, M. Søndergaard & T. Lauridsen, 1999. Trophic dynamics in turbid and clearwater lakes with special emphasis on the role of zooplankton for water clarity. *Hydrobiologia*. 408/409. 217–231.
- Kelderman, P., R. Ang'weya, P. de Rozari & T. Vijverberg, 2012. Sediment characteristics and wind-induced sediment dynamics in shallow Lake Markermeer, the Netherlands. *Aquatic Sciences*. 74. 301–313.
- Kleiß, A., 1987. Untersuchungen zur Sedimentation in der Darss-Zingster-Boddenkette unter Berücksichtigung der hydrographischen Bedingungen. Universität Rostock.
- Kozerski, H.-P., 1994. Possibilities and limitations of sediment traps to measure sedimentation and resuspension. *Hydrobiologia*. 284. 93–100.

- Kozerski, H.-P., 2006. Sedimentation und Resuspension in Flachgewässern - zwei weiterhin schwer fassbare Größen? Rostocker Meeresbiologische Beiträge. 16. 13–33.
- Kozerski, H.-P. & K. Leuschner, 1999. Plate sediment traps for slowly moving waters. *Water Research*. 33. 13. 2913–2922.
- Kozerski, H.-P. & K. Leuschner, 2000. A new plate sediment trap: design and first experiences. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. 27. 242–245.
- Kristensen, P., M. Søndergaard & E. Jeppesen, 1992. Resuspension in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia*. 228. 101–109.
- Laenen, A. & A. LeTourneau, 1996. Upper Klamath Basin nutrient-loading study: Estimate of wind-induced resuspension of bed sediment during periods of low lake elevation. U.S. Geological Survey open-file report.
- Larsson, U., S. Blomqvist & B. Abrahamsson, 1986. A new sediment trap system. *Marine Ecology Progress Series*. 31. 205–207.
- Li, E.-H., W. Li, G.-H. Liu & L.-Y. Yuan, 2008. The effect of different submerged macrophyte species and biomass on sediment resuspension in a shallow freshwater lake. *Aquatic Botany*. 88. 121–126.
- Lövestedt, C. & M. Larson, 2010. Wave damping in reed: field measurements and mathematical modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136. 4. 222–233.
- Luhar, M., S. Coutu, E. Infantes, S. Fox & H. Nepf, 2010. Wave-induced velocities inside a model seagrass bed. *Journal of Geophysical Research*. 115.
- Luft, P., 2012. Attenuation und spektrales Unterwasserlichtklima im Gradienten der Darß-Zingster Boddenkette. Bachelorarbeit, Universität Rostock
- Lund-Hansen, L., M. Petersson & W. Nurjaya, 1999. Vertical sediment fluxes and wave-induced sediment resuspension in a shallow-water coastal lagoon. *Estuaries*. 22. 1. 39–46.
- LUNG, 1990-2006. Gewässergüteberichte Mecklenburg-Vorpommern.
- Madsen, J., P. Chambers, W. James, E. Koch & D. Westlake, 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*. 444. 71–84.
- Mariotti, G. & S. Fagherazzi, 2013. Wind waves on a mudflat: The influence of fetch and depth on bed shear stresses. *Continental Shelf Research*. 605. 99–110.
- Nepf, H., 2012. Flow and transport in regions with aquatic vegetation. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 44. 123–142.
- Nicolodi, J., E. Toldo & L. Farina, 2013. Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments. Guaíba Lake (Brazil). *Brazilian Journal of Oceanography*. 61. 1. 55–64.
- Nurminen, L. & J. Horppila, 2009. Life form dependent impacts of macrophyte vegetation on the ratio of resuspended nutrients. *Water Research*. 43. 3217–3226.
- Pujol, D., J. Colmer, T. Serra & X. Casamitjana, 2012. A model for the effect of submerged aquatic vegetation on turbulence induced by an oscillating grid. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 114. 23–30.
- Qian, J., S.-S. Zheng, P.-F. Wang & C. Wang, 2011. Experimental study on sediment resuspension in Taihu Lake under different hydrodynamic disturbances. *Journal of Hydrodynamics*. 201123. 6. 826–833.
- Rossi, S., A. Grémare, J.-M. Gili, J.-M. Amouroux, E. Jordana & G. Vétion, 2003. Biochemical characteristics of settling particulate organic matter at two north-western Mediterranean sites: a seasonal comparison. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 58. 423–434.
- Schlunbaum, G., H. Baudler & G. Nausch, 1994a. Die Darß-Zingster Boddenkette - ein typisches Flachwasserästuar an der südlichen Ostseeküste. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge*. 2. 5–26.
- Schlunbaum, G., G. Nausch & H. Baudler, 1994b. Sedimentstruktur und Sedimentdynamik in den Darß-Zingster Boddengewässern. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge*. 2. 27–40.
- Schulz, M., H.-P. Kozerski, T. Pluntke & K. Rinke, 2003. The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany). *Water Research*. 37. 569–578.
- Schumann, R. & U. Karsten, 2006. Phytoplankton im Zingster Strom der Darß-Zingster Boddenkette - 13 Jahre Remesotrophierung. *Rostocker Meeresbiologische Beiträge*. 16. 47–59.

- Schumann, R., D. Rentsch, S. Görs & U. Schiewer, 2001. Seston particles along an eutrophication gradient in coastal waters of the southern Baltic Sea: significance of detritus and transparent mucoid material. *Marine Ecology Progress Series*. 218. 17–31.
- Søndergaard, M., P. Kristensen & E. Jeppesen, 1992. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia*. 228. 91–99.
- Sukhodolov, A., H. Bungartz, Engelhardt & Christof, 2003. Comment on "determination of areal sedimentation rates in rivers by using plate sediment trap measurements and flow velocity - settling flux relationship" by Hans-Peter Kozerski. *Water Research*. 37. 2794–2795.
- Sukhodolov, A. & T. Sukhodolova, 2012. Vegetated mixing layer around a finite-size patch of submerged plants. *Water Resources Research*. 48.
- Tejada-Martínez, A., C. Akan, N. Sinha, C. Grosch & G. Martinat, 2013. Surface dynamics in LES of full-depth Langmuir circulation in shallow water. *Physica Scripta*. T155.
- The Open University, 1999. *Waves, Tides and Shallow Water Processes*. Elsevier.
- Wilkie, L., M. O'Hare, I. Davidson, B. Dudley & D. Paterson, 2012. Particle trapping and retention by *Zostera noltii*: A flume and field study. *Aquatic Botany*. 102. 15–22.
- Windfinder, 2014. Windgeschwindigkeit und Windrichtung während der Probenahmen 2014. [www.windfinder.com](http://www.windfinder.com)
- WSV – Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, 2014. Pegelstand Barth. [www.pegelonline.wsv.de](http://www.pegelonline.wsv.de)