

BELAWATT II: Wie stark beeinflusst die hydrodynamische Belastung das Sediment-Regime und die Benthos-Lebensgemeinschaft im Hörnum Tidebecken?

Von WALTER PULS, DIETER EPEL, HARTMUT KAPITZA, REINER ONKEN,
ANDREY PLESKACHEVSKY, ROLF RIETHMÜLLER und BERND VAESSEN

Z u s a m m e n f a s s u n g

Im KFKI-Vorhaben BELAWATT wurde die Frage beantwortet, inwieweit die räumliche Verteilung des Sediments und des Benthos im Hörnum Tidebecken von der Hydrodynamik (Strömung, Seegang) beeinflusst („belastet“) wird. Als potentielle Einflussgröße für die *Sediment-Verteilung* wurden räumliche Verteilungen von Boden-Schubspannungen verwendet, ermittelt aus einer zweijährigen (in BELAWATT berechneten) Zeitreihe von Strömung und Seegang. Als Sedimentdaten dienten Medianwerte gemessener Korngrößenverteilungen. Der Abgleich der räumlichen Verteilungen von Schubspannung und Sedimentdaten ergab: die Sediment-Korngröße ist zwar hochsignifikant korreliert mit der Boden-Schubspannung; die erklärte Varianz ist jedoch mit nur 10 bis 20 % nicht ausreichend, um Vorhersagen der zukünftigen Entwicklung des Sediment-Regimes im Hörnum Tidebecken anhand einer sich ändernden hydrodynamischen Belastung zu erlauben. Als potentielle physikalische Einflussgrößen für die *Benthos-Verteilung* im Hörnum Tidebecken wurden verwendet die räumlichen Verteilungen der Boden-Schubspannungen, der Trockenfallzeiten des Wattbodens und der Median-Korngrößen des Bodensediments. Eine Analyse des Zusammenhangs zwischen den räumlichen Verteilungen des Benthos und der physikalischen Variablen zeigt: die Verteilungen sind zwar hochsignifikant miteinander korreliert, aber die erklärten Varianzen liegen bestenfalls bei 25 %. Die erklärten Varianzen werden als zu gering angesehen, um den Zustand von Benthos-Lebensgemeinschaften mittels der verwendeten physikalischen Variablen vorherzusagen.

S u m m a r y

The objective of the KFKI project BELAWATT was to answer the question: How much are the spatial patterns of sediment and benthos in the Hörnum tidal basin (German Bight, North Sea) influenced by hydraulic impact (currents, waves)? The bed shear stress, calculated from a simulated 2-years time-series of currents and waves (product of BELAWATT) was tested as a potential parameter influencing the spatial sediment pattern. The sediment data consisted of the median values of measured grain-size distributions. The comparison of shear stresses with sediment data showed: the distribution of sediment is highly correlated with bed shear stresses, but the explained variance is (with 10 to 20 %) not sufficient to allow the forecast of the sediment regime in the Hörnum tidal basin as a result of changing hydrodynamic conditions. The potential physical parameters influencing the spatial benthos distribution in the Hörnum tidal basin were the bed shear stress, the duration of subaerial exposure of tidal flats and the median grain-size of bottom sediments. Linking the spatial benthos patterns to the physical variables shows: the spatial patterns of benthos data and of physical variables in the Hörnum tidal basin are highly correlated, but the explained variance is 25 % at best. The explained variances are not sufficiently high to forecast the future development of benthic communities as a result of changing physical variables.

K e y w o r d s

Boden-Schubspannung, hydrodynamische Belastung, Hörnumer Tidebecken, Wattenmeer, Boden-Sediment, Median-Korngröße, Benthos-Lebensgemeinschaft, *Cerastoderma*, *Arenicola*, *Lanice*, Diatomeen, *Zostera*, *Ulva*, PRIMER.

Bottom shear stress, hydraulic impact, Hörnum tidal basin, Wadden Sea, bottom sediment, median grain-size, benthos community, *Cerastoderma*, *Arenicola*, *Lanice*, diatoms, *Zostera*, *Ulva*, PRIMER

I n h a l t

1. Einleitung	78
2. Benthos und Hydrodynamik	79
3. Boden-Schubspannung	81
4. Sedimentverteilung versus Boden-Schubspannung	83
5. Benthos-Lebensgemeinschaft versus physikalische Variablen	87
6. Schlussfolgerung	91
7. Danksagung	91
8. Schriftenverzeichnis	91

1. E i n l e i t u n g

Ein Teil der Ergebnisse des KFKI-Projektes BELAWATT wurde im vorangehenden Artikel von PLESKACHEVSKY et al. (dieses Heft) dargestellt. Dort wurde das Modellsystem MOPS skizziert und es wurde die Erstellung einer zweijährigen Zeitreihe (November 1999–Oktober 2001) der Hydrodynamik im Hörnumer Tidebecken beschrieben. Als ein erstes Anwendungs-Beispiel wurde der Eintrag von Seegangsenergie in die Küstenlinie dargestellt. In dem vorliegenden Artikel werden zwei weitere Anwendungen der BELAWATT-Zeitreihe gezeigt.

Die Hydrodynamik-Zeitreihe ist die Grundlage dafür, die Belastung von Wattgebieten durch Strömung und Seegang am Beispiel des Hörnumer Tidebeckens mit Hilfe geeigneter Kenngrößen zu quantifizieren. Unter einer „Kenngröße“ ist eine Einflussgröße zu verstehen, die für den Zustand eines Systems bestimmend ist. Ein Beispiel ist die Kenngröße „Tidevolumen“, die in einem Watteinzugsgebiet den Querschnitt des Seegats bestimmt.

Die Belastung des Wattbodens durch die Hydrodynamik wird in BELAWATT beschrieben bzw. quantifiziert durch die sog. Boden-Schubspannung τ [N/m²]. Ein wichtiger Vorteil ist, dass τ berechnet werden kann sowohl aus der Strömung als auch aus dem Seegang sowie aus dem Zusammenwirken von Strömung und Seegang. In WARWICK u. UNCLES (1980) und in HERMAN et al. (2001) wird ebenfalls die Boden-Schubspannung verwendet, um die räumliche Verteilung der benthischen Lebensgemeinschaften im Bristol-Kanal bzw. in der Westerschelde zu erklären.

Die in BELAWATT gestellte Frage ist, ob eine ins Auge gefasste Belastungs-Kenngröße (z.B. die räumliche Verteilung der allein durch Seegang erzeugte Boden-Schubspannung) so gut korreliert mit den räumlichen Verteilungen sedimentologischer und/oder benthischer Daten im Untersuchungsgebiet, dass aus einer Änderung der Kenngröße eine Änderung der Sedimentbedeckung und/oder der Benthos-Lebensgemeinschaften prognostiziert werden kann. Die Beantwortung dieser Frage, insbesondere mit Blick auf das Benthos, war das Hauptziel von BELAWATT.

In diesem Artikel werden zwei Anwendungen der zweijährigen Hydrodynamik-Zeitreihe im Hörnum Tidebecken dargestellt. Zum ersten geht es um den Zusammenhang zwischen der Korngröße des Boden-Sediments und der Boden-Schubspannung. Zum zweiten wird die Frage beantwortet, wie stark die Benthos-Lebensgemeinschaft des Hörnum Tidebeckens korreliert ist mit der Boden-Schubspannung, den Trockenfallzeiten des Wattbodens und der Korngröße des Bodensediments.

2. Benthos und Hydrodynamik

Die ersten wichtigen Arbeiten der marinen Benthosforschung zum Zusammenhang zwischen Benthos und Hydrodynamik waren die von WILDISH u. KRISTMANSON (1979) und WARWICK u. UNCLES (1980). WILDISH u. KRISTMANSON (1979) betonten die Bedeutung der Tideströmung für die Nahrungsversorgung von Filtrierern (suspension feeders) und für die Ansiedlung von Larven in der Fundy Bay (Kanada). Die Arbeit von WARWICK u. UNCLES (1980) war die erste Untersuchung einer direkten Korrelation zwischen der Bodenfauna und der strömungs-erzeugten Bodenschubspannung. Im Untersuchungsgebiet Bristol-Kanal wurde eine „bemerkenswerte Übereinstimmung“ gefunden zwischen den räumlichen Verteilungen der (von einem Modell berechneten) Schubspannung und den beobachteten Benthos-Lebensgemeinschaften. Seit dieser Zeit, etwa seit 1980, gibt es im Rahmen der Ökosystemforschung zunehmend mehr Arbeiten, die sich beschäftigen mit dem Zusammenhang zwischen sog. Umweltvariablen (environmental variables) und benthischen Lebensgemeinschaften. Für die Verteilung des Benthos in Tideästuaren sind die wichtigsten Umweltvariablen der Salzgehalt des Wassers, das Bodensediment und die „Bodenhöhe“. Anstelle von „Bodenhöhe“ kann auch stehen: „Trockenfallzeit“ oder „Wassertiefe“. Darüber hinaus ist die Wassertiefe in Tideästuaren eng verknüpft mit der Variablen „Strömungsgeschwindigkeit“.

DAMM-BÖCKER et al. (1993) untersuchen für eine Station im Norderneyer Rückseitenwatt die Sensitivität diverser Benthos-Spezies in Bezug auf saisonale Änderungen des Hochwasserniveaus, der Wasserbedeckungs-Dauer und des Seeganges. Z.B. wird festgestellt, dass die Abundanz (Individuen pro m²) des Pfahlwurmes *Scoloplos armiger* (Detritus-Fresser bzw. deposit feeder) hochsignifikant positiv korreliert ist mit der signifikanten Wellenhöhe.

In YSEBAERT et al. (2003) wird die Wassertiefe als wichtigste Einflussgröße für das Makrobenthos der Westerschelde festgestellt; es folgen der Salzgehalt und an dritter Stelle der Sediment-Charakter (hier: Schlickgehalt). Für die Ästuare des Humber und des Forth (Schottland) kommt BOLAM (2003) zu dem Ergebnis, dass der Salzgehalt die wichtigste Einflussgröße ist für die großräumige Verteilung des Makrobenthos, gefolgt vom Sedimentcharakter. Eine direkte Wirkung der Hydrodynamik auf das Benthos besteht nach BOLAM (2003) nicht. Vielmehr bestimmt die Hydrodynamik die Sedimentverteilung, die Stabilität des Sediments, die Nahrungs-Versorgung und den Larven-Transport, welche dann wiederum auf das Benthos wirken. R. ASMUS (pers. Mitt.) betont dagegen, dass die auf der Sedimentoberfläche lebenden Arten des Epibenthos durchaus eine direkte Beeinflussung durch Strömung und Turbulenz erfahren. Die von BOLAM (2003) angegebene ausschließlich indirekte Wirkung der Strömung trifft nur auf das Endobenthos zu, das in Bauten und Röhren im Sediment lebt.

Eine Vorhersage der räumlichen Makrobenthos-Verteilung in der Westerschelde als Funktion von Umweltvariablen wird in YSEBAERT et al. (2002) angestellt. Mit Hilfe Logistischer Regression (z.B. BACKHAUS et al., 2006) wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einzelner Benthos-Spezies in der Westerschelde vorhergesagt. Eine Vorhersage des Makro-

benthos auf den Wattflächen des Severn nach Bau eines Sperrwerks für ein Gezeitenkraftwerk ist das Thema von WARWICK et al. (1991); allerdings werden nur Tendenzen der Benthos-Entwicklung nach Bau des Sperrwerks angegeben.

In jeder der oben zitierten Arbeiten wird betont, dass die Quantifizierung eines Zusammenhanges zwischen Benthos und Umweltvariablen keine Schlussfolgerung erlaubt über die Prozesse, die die raum-zeitliche Verteilung von Benthos-Spezies bestimmen. Insbesondere weist HERMAN (pers. Mitt.) darauf hin, dass die benthische Fauna nicht unmittelbar von der Hydrodynamik „belastet“ wird, sondern dass die Hydrodynamik in erster Linie auf indirektem Wege wirkt:

- Für aktive suspension feeder (z.B. Muscheln) ist die advective und turbulente Wasserbewegung wichtig für den Herantransport neuer Nahrung. Gemäß ASMUS (pers. Mitt.) kann eine zu starke Wasserbewegung aber auch kontraproduktiv sein: Muscheln können dann nicht genügend Nahrung aus dem Wasser filtrieren, wenn ihre Einsauggeschwindigkeit geringer ist als die Umgebungsströmung.
- Die Strömung ist die entscheidende Größe für den Transport von Larven der benthischen Fauna.
- Für passive suspension feeder wie den Bäumchenröhrenwurm (*Lanice conchilega*) ist die bodennahe Wasserbewegung direkt proportional zur Filtrationsleistung.
- Resuspendiertes Mikrophytobenthos ist eine wichtige Nahrungsquelle für deposit feeders.
- Sedimenttransport kann die Nahrungssituation für deposit feeder (z.B. die Sandklaffmuschel *Mya arenaria*) verbessern, kann aber auch wie ein Sandstrahl-Gebläse wirken.
- Sedimenttransport sorgt für lockeres (instabiles) Bodensediment, wodurch die Ansiedlung von Benthos-Larven erschwert wird.
- Sedimenttransport kann Bodenrippel erzeugen, die den Bau von Wohnröhren beeinträchtigen.
- Der wichtigste Punkt: Die Sedimentverteilung wird durch die Hydrodynamik bestimmt. Wie oben gesagt, ist die Sedimentverteilung eine entscheidende Einflussgröße für fast jede Makrobenthos-Spezies.

Unterhalb der eher großräumigen Abhängigkeit des Benthos von den Umweltvariablen existiert eine kleinskalige (< 1 m) räumliche Verteilung (patchiness) des Benthos. Diese kleinskalige Verteilung hängt ab vom Wettbewerb der verschiedenen Spezies untereinander, vom Druck durch Räuber sowie vom Befall mit Parasiten (LAUCKNER, 1994). Allerdings können die biologischen Interaktionen auch relativ großräumige Verteilungsmuster erzeugen, was zu Fehlinterpretationen führen kann. Ein Beispiel geben YSEBAERT et al. (2002): Der Wattwurm *Arenicola marina* verdrängt viele andere Spezies durch seine Wühltätigkeit, z.B. das Seegrass *Zostera noltii*. Wird nun festgestellt, dass *Arenicola* positiv mit der Umweltvariablen „Sediment-Korngröße“ korreliert ist, so wird man gleichzeitig feststellen, dass *Zostera noltii* negativ mit der Sediment-Korngröße korreliert ist. In Wirklichkeit ist aber nicht die Umweltvariable, sondern der Wattwurm für das Fehlen des Seegrases verantwortlich.

Ein weiterer Mechanismus, der für kleinräumige Benthos-Strukturen verantwortlich ist, ist das sog. „ecosystem engineering“ (HERMAN et al., 2001). Hierbei verändern einzelne (oder mehrere) Benthos-Spezies ihre Umgebung, um bessere Bedingungen für das eigene Überleben zu schaffen. Ein Beispiel für ecosystem engineering ist die Wühltätigkeit des Wattwurms. Ohne diese Wühltätigkeit würde ein Sandwatt verschlickt (VOLKENBORN, 2005). Der sandliebende Wattwurm sorgt durch seine Aktivität also für das ihm genehme Habitat; er arbeitet erfolgreich an gegen eine vom Strömungsregime erzeugte Netto-Ablagerung von Feinsediment.

3. Boden-Schubspannung

Die Boden-Schubspannung τ , berechnet aus der gemeinsamen Wirkung von Strömung und Seegang, wird mit τ_{cw} bezeichnet („c“ = current, „w“ = wave). Man unterscheidet bei τ_{cw} zwischen (a) $\tau_{cw,m}$ als dem τ_{cw} -Mittelwert über eine Wellenperiode, und (b) $\tau_{cw,max}$ als dem τ_{cw} -Maximalwert innerhalb einer Wellenperiode. Die Berechnung von $\tau_{cw,m}$ und $\tau_{cw,max}$ erfolgt dadurch, dass zunächst τ_c und τ_w berechnet werden; τ_c und τ_w sind die Boden-Schubspannungen allein durch die (bodennahe) Strömung bzw. allein durch Seegang. Die dabei verwendeten Formeln stammen aus SOULSBY (1997). Die räumlichen Verteilungen von Strömung und Seegang werden am stärksten geprägt von der in Abb. 1 gezeigten Topographie des Untersuchungsgebietes.

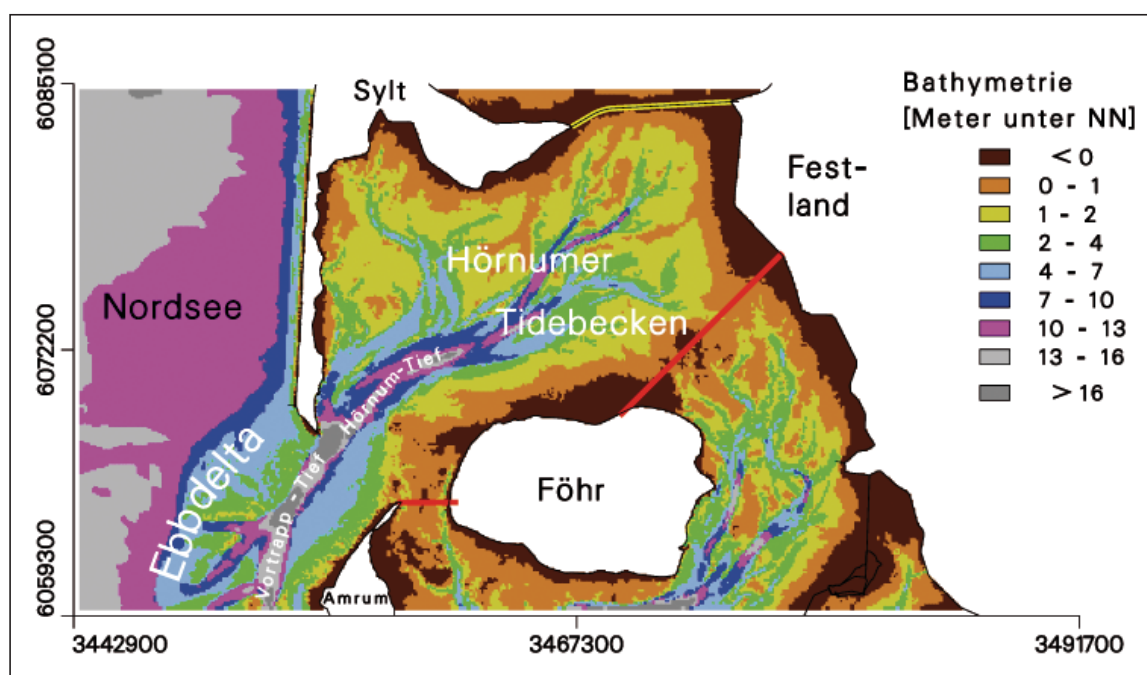


Abb. 1: Tiefenverteilung im BELAWATT-Modellgebiet mit 100 m Gitterweite. Die Tiefenverteilung basiert auf Peildaten des BSH und auf Vermessungsdaten des ALR Husum. Um Rechenzeit zu sparen, wurde der Seegang im Wattbereich südlich der beiden roten Trennlinien und nördlich des Hindenburgdammes (gelb) nicht berechnet. Entsprechend werden Boden-Schubspannungen nur berechnet im eigentlichen Hörnumertidebecken (sowie in der offenen See), siehe die Abb. 2 und 3

Als Wirkung von Strömung und Seegang auf die Sohle (die „Belastung“ der Sohle durch Strömung und Seegang), wird die auf die Sedimentkörner der Sohle wirkende Boden-Schubspannung (skin friction) berechnet. Die skin friction ist die für den Sedimenttransport am Boden (bed load) „zuständige“ Boden-Schubspannung. Die Rauigkeitslänge für die Berechnung der skin friction ist $z_0 = d_{50}/12$, wobei d_{50} der Korngrößen-Medianwert des Bodensedimentes ist. Für das Hörnumertidebecken typisch ist etwa $d_{50} = 200 \mu\text{m}$ – daraus ergibt sich $z_0 = 0.017 \text{ mm}$. Dieser „typische“ Wert wird einheitlich im gesamten Untersuchungsgebiet verwendet. Ein einheitliches z_0 ist notwendig, denn in BELAWATT stellt sich unter anderem die Frage nach einer Korrelation zwischen den räumlichen Verteilungen von Boden-Schubspannung und Korngröße. Die Verwendung der „realen“ Korngrößenverteilung

(Abb. 4) als Input für die Berechnung der Boden-Schubspannung würde zu einer Schein-Korrelation zwischen τ und Korngröße führen.

Der Seegang erzeugt am Gewässerboden eine alternierende sinusoidale Wasserbewegung. Entsprechend ist auch die seegangs-erzeugte Boden-Schubspannung sinusoidal; τ_w ist die Amplitude. Die über eine Wellenperiode gemittelte seegangs-erzeugte Boden-Schubspannung ist (in erster Näherung) Null, da τ eine vektorielle Größe ist. Entsprechend sollte bei gemeinsamer Wirkung von Strömung und Seegang für den Wellenperioden-Mittelwert $\tau_{cw,m}$ gelten: $\tau_{cw,m} = \tau_c$. Was dabei aber nicht berücksichtigt wird: die seegangs-erzeugte Wasserbewegung erzeugt in der Boden-Grenzschicht eine Turbulenz *zusätzlich* zur Turbulenz der mittleren Strömung. Durch die erhöhte Turbulenz verstärkt sich der Kontakt der mittleren Strömung zur Sohle, wodurch sich $\tau_{cw,m}$ gegenüber τ_c erhöht. Der verstärkte Kontakt der mittleren Strömung zur Sohle äußert sich auch „umgekehrt“ in einer erhöhten Bodenreibung für die mittlere Strömung, der sog. „apparent roughness“.

Der durch Seegang verstärkte Sohlkontakt der mittleren Strömung wird in der Literatur beschrieben als „nichtlineare Wechselwirkung“ zwischen den Boden-Grenzschichten der mittleren Strömung und des Seegangs – dazu gibt es diverse theoretische Modellvorstellungen. SOULSBY (1997) empfiehlt anstelle einer komplizierten Theorie seine sog. DATA2-Methode, deren Resultat den Ergebnissen der „besten Theorien“ nahekommt. In DATA2 wird zunächst $\tau_{cw,m}$ berechnet aus τ_c und τ_w ; $\tau_{cw,m}$ hat die gleiche Richtung wie τ_c , nämlich die Richtung der mittleren Strömung. Danach wird $\tau_{cw,max}$ durch Vektor-Addition berechnet aus $\tau_{cw,m}$ und τ_w . Die Abbildungen 2 und 3 zeigen als Beispiele die räumliche Verteilung von $mean[\tau_{cw,m}]$ und $mean[\tau_{cw,max}]$ im Hörnummer Tidebecken. Das Kürzel „*mean*“ steht hier für

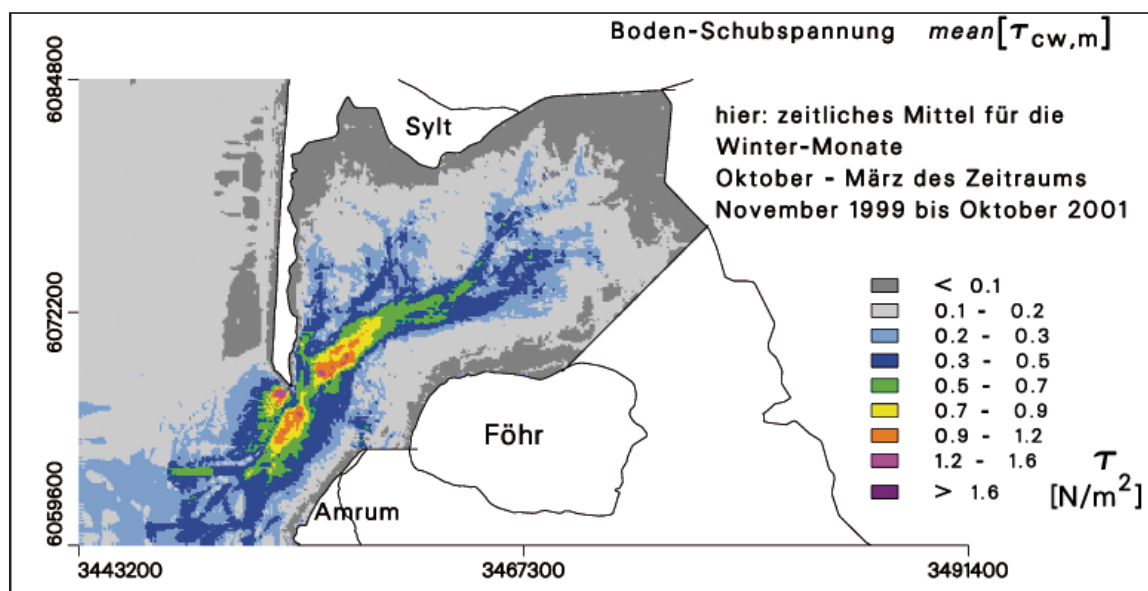


Abb. 2: Verteilung der Boden-Schubspannung $mean[\tau_{cw,m}]$ im Hörnummer Tidebecken, berechnet aus Strömungs- und Seegangsdaten. Aus den im Zeitabstand von 20 Minuten archivierten MOPS-Strömungs- und Seegangsdaten werden $\tau_{cw,m}$ -Felder berechnet. Hier dargestellt ist das zeitliche Mittel aller $\tau_{cw,m}$ -Felder der Winter-Monate (Oktober-März) aus dem Zeitraum November 1999 bis Oktober 2001. Trockenfall-Zeiten werden bei der zeitlichen Mittelung nicht berücksichtigt. Die höchsten $mean[\tau_{cw,m}]$ treten auf im Hörnum-Tief, im Vortrapp-Tief und über Teilen des Ebbdeltas. Die geringsten $mean[\tau_{cw,m}]$ sehen wir über den hohen Wattflächen im Innern des Beckens. Im Wesentlichen ist die Verteilung der $mean[\tau_{cw,m}]$ gleichzusetzen mit der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Hörnummer Tidebecken

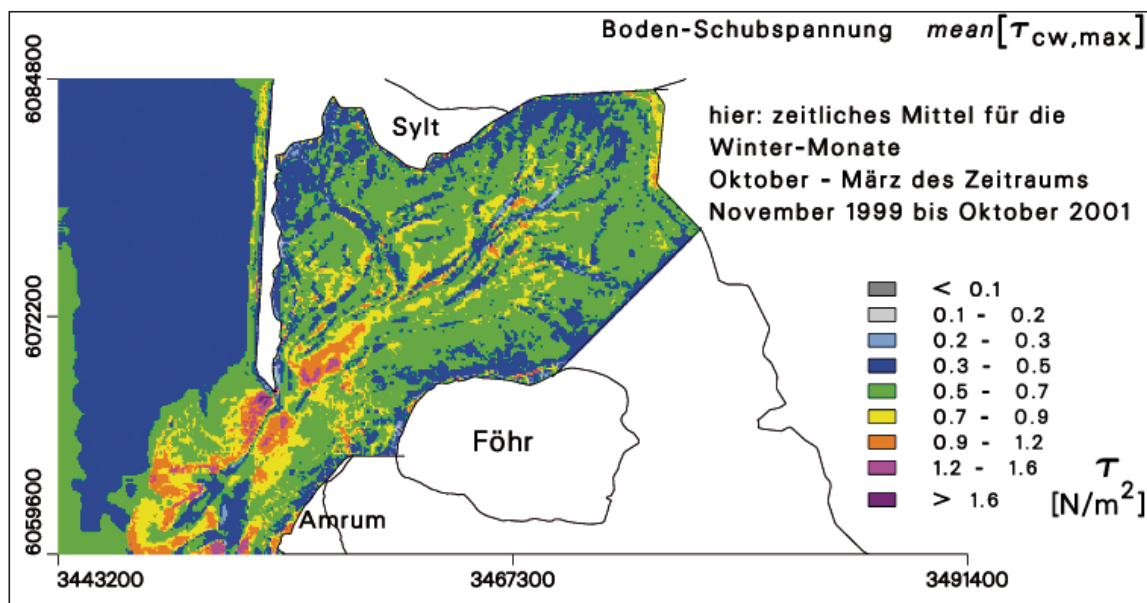


Abb. 3: Verteilung der Boden-Schubspannung $mean[\tau_{cw,max}]$ im Hörnumer Tidebecken, berechnet aus Strömungs- und Seegangdaten. Weitere Informationen siehe Abb. 2. Hohe $mean[\tau_{cw,max}]$ zeigen sich über den Sänden des Ebbdeltas (Einfluss des Seeganges) und im Hörnum-Tief (Einfluss der Strömung). Im Vergleich zur Verteilung der $mean[\tau_{cw,m}]$ in Abb. 2 gewinnt $mean[\tau_{cw,max}]$ um so mehr an Bedeutung über den Wattflächen, je weiter man sich im Innern des Beckens vom Seegat entfernt. Dieses äußert sich insbesondere darin, dass $mean[\tau_{cw,max}]$ über den Wattflächen des inneren Beckens höher ist als in den angrenzenden Rinnen. Die hohen Werte für $mean[\tau_{cw,max}]$ entlang der Festlandsküste entstehen über Salzwiesen, die nur bei kräftigem Wind aus westlicher Richtung (und entsprechend kräftigem Seegang) überflutet werden

einen Mittelwert über einen längeren Zeitraum. In den Abb. 2 und 3 handelt sich um zeitliche Mittel der 12 Wintermonate Oktober–März aus der zweijährigen BELAWATT-Hydrodynamik-Zeitreihe.

Das in Abb. 2 gezeigte $\tau_{cw,m}$ ist in den bed load Formeln von SOULSBY (1997) die für die Sediment-Verfrachtung zuständige Schubspannung. Dagegen ist das in Abb. 3 gezeigte $\tau_{cw,max}$ in den bed load Formeln „nur“ zuständig für die Beantwortung der Frage, ob Sedimenttransport *überhaupt* stattfindet: Sedimenttransport ist nur möglich, wenn $\tau_{cw,max}$ größer ist als die sog. kritische Boden-Schubspannung τ_{cr} des Sediments (siehe auch Abb. 6).

4. Sedimentverteilung versus Boden-Schubspannung

Die Frage ist: besteht ein Zusammenhang zwischen den aus den MOPS-Ergebnissen berechneten Boden-Schubspannungen und der Sedimentverteilung im Hörnumer Tidebecken? Als Schubspannungen werden verwendet die zeitlichen Mittelwerte „ $mean[\tau]$ “ und die Maximalwerte „ $max[\tau]$ “ der $\tau_{cw,m}$ und der $\tau_{cw,max}$. Die räumliche Verteilung der Maximalwerte entsteht dadurch, dass separat für jede Gitterzelle der τ -Maximalwert für den jeweiligen Bezugszeitraum bestimmt wird.

Abb. 4 zeigt die Verteilung der Median-Korngrößen d_{50} der Sediment-Daten von FIGGE (1981) und VAN BERNEM et al. (1994, 2006), siehe Bildunterschrift Abb. 4 für weitere Informationen. Die Korngrößen-Daten wurden zu einem gemeinsamen Datensatz zusammenge-

fasst, siehe EPPEL et al. (2006). Hinter der Zusammenfassung der Daten aus 1972/73, 1987 und 2001–2003 steht der Befund, dass kein zeitlicher Trend in den Sedimentdaten festgestellt wurde. Für den Vergleich mit den Boden-Schubspannungen wurden nur die Daten auf den Wattflächen des Hörnummer Tidebeckens (also östlich des Seegats) verwendet, und zwar das Sediment oberhalb der ungefähren Tideniedrigwasser-Linie bei NN –1 m. Das Flugsandgebiet (mit teilweise sehr grobem Sediment aus den Sylter Land-Dünen) östlich entlang der Sylter Südhälfte wurde ausgeblendet, da hier kein ursächlicher Zusammenhang zwischen Hydrodynamik und Sediment besteht. Für den Test des Zusammenhanges zwischen Sediment und Hydrodynamik (Boden-Schubspannung) war jede Sedimentprobe allein durch seine Median-Korngröße d_{50} charakterisiert.

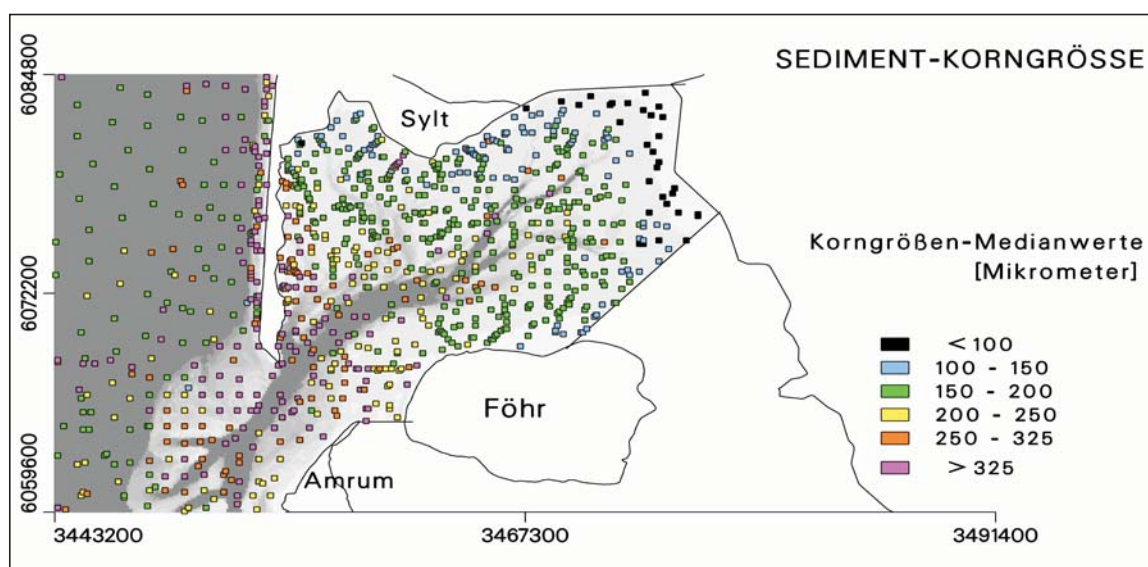


Abb. 4: Verteilung der Median-Korngrößen des Bodensediments im zentralen BELAWATT-Gebiet. Es werden folgende Sedimentdaten verwendet: (1) Daten des BSH (FIGGE, 1981); für das Hörnummer Tidebecken stammen diese Daten vornehmlich aus Probenahmen von 1972/73. Es liegen Daten für die Wattflächen, für die tiefen Rinnen sowie für die offene See vor. (2) Daten der Sensitivitätskartierung im deutschen Wattenmeer (VAN BERNEM et al., 1994) aus dem Jahr 1987. Die Probenahme-Stationen lagen sämtlich auf den Wattflächen. (3) Daten der Habitat-Charakterisierungen 2001, 2002 und 2003 (VAN BERNEM et al., 2006). Wie in 1987 wurden nur Stationen auf den Wattflächen beprobt. Die Tiefenverteilung im Gebiet ist grau unterlegt

Die Abb. 5 und 6 zeigen als Beispiele: Median-Korngröße d_{50} logarithmisch aufgetragen gegen $mean[\tau_{cw,m}]$ und gegen $mean[\tau_{cw,max}]$. Die Schubspannungen sind zeitliche Mittelwerte über alle Winter-Monate zwischen November 1999 und Oktober 2001. Die Skalierung der x-Achsen beider Plots ist nicht identisch. Die Verteilungen der Datenpunkte in beiden Abbildungen zeigen: d_{50} -Werte um 160 μm dominieren die Punkt-Verteilungen über eine weite Spanne von Schubspannungen, mit einem schwachen Anstieg der d_{50} mit wachsendem τ . Dieses „Einheits-Sediment“ bildet das Gros der Wattedimente des Hörnummer Tidebeckens.

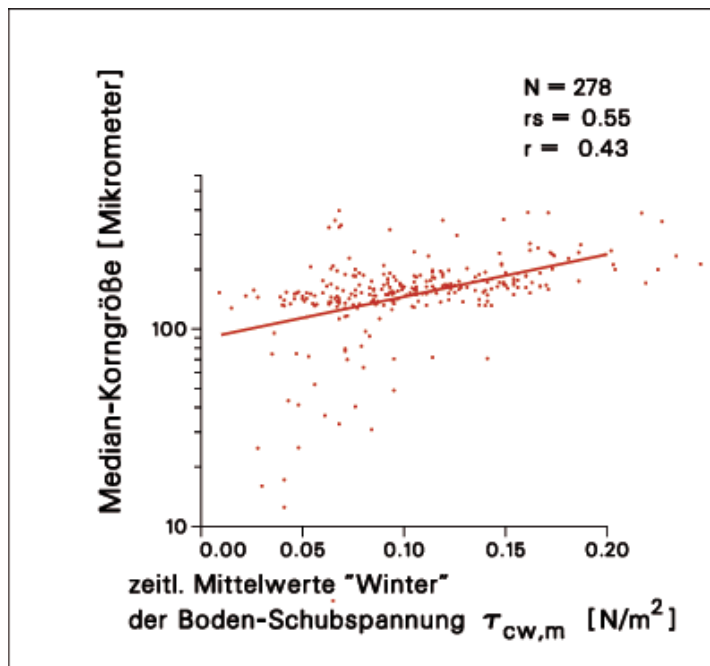


Abb. 5: Gemessene Median-Korngröße d_{50} der Wattsedimente im Hörnummer Tidebecken, aufgetragen gegen die (von MOPS berechnete) Schubspannung $mean[\tau_{cw,m}]$. Die $\tau_{cw,m}$ sind zeitlich gemittelt über die Winter-Monate des Zeitraums November 1999 bis Oktober 2001. Die rote Gerade ist die Regressions-Gerade. „N“ ist die Anzahl der Datenpunkte, „r“ ist der (lineare) Korrelationskoeffizient, „ r_s “ ist der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient

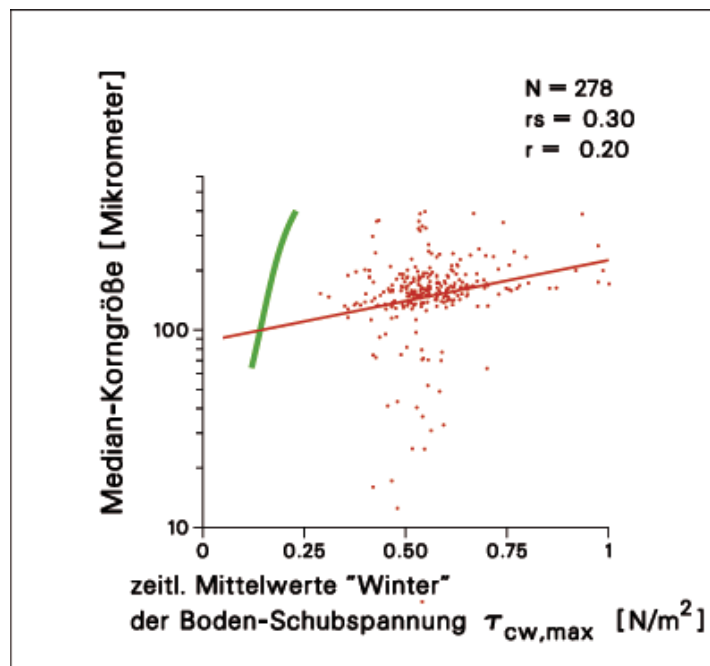


Abb. 6: Wie Abb. 5, aber mit $mean[\tau_{cw,max}]$ anstelle von $mean[\tau_{cw,m}]$. Zusätzlich eingezeichnet ist die Shields-Kurve (grün) (z.B. SOULSBY 1997), die den Beginn des Sedimenttransports (bei einer sog. „kritischen Schubspannung“ τ_{cr}) in Abhängigkeit von der Median-Korngröße angibt. $\tau_{cw,max}$ ist jene Schubspannung, die für die Mobilisierung (bzw. die Erosion) von Sediment zuständig ist. Die Lage der Shields-Kurve zeigt, dass das gesamte Sediment auf den Wattes des Hörnummer Tidebeckens während der Wintermonate die meiste Zeit über in Bewegung sein müsste. Feldmessungen der kritischen Schubspannung τ_{cr} (z.B. MAHATMA, 2004) zeigen aber, dass τ_{cr} eher im Bereich von 0.5 bis 1 N/m^2 liegt

Der Zusammenhang zwischen Boden-Schubspannungen und Sediment-Korngrößen wird durch lineare Korrelations-Koeffizienten quantifiziert. Dabei wird bei den Schubspannungen unterschieden zwischen „Sommer“ und „Winter“. Wie in der Sedimentologie üblich, geht die Korngröße nicht als lineare, sondern als logarithmierte Größe in die Berechnung ein. Tab. 1 zeigt die so berechneten linearen Korrelations-Koeffizienten für die 4 betrachteten Schubspannungs-Versionen.

Tab. 1: Korrelation zwischen 8 berechneten Schubspannungs-Feldern (4 für „Sommer“, 4 für „Winter“) und gemessenen Korngrößen-Medianwerten d_{50} der Wattflächen-Sedimente im Hörnummer Tidebecken (Bereich oberhalb NN -1 m). Die linearen Korrelations-Koeffizienten wurden berechnet mit logarithmierten d_{50} . Zu jedem Koeffizienten ist angegeben die *doppelte* Standardabweichung, berechnet mit einem bootstrap-Verfahren. Die Sommer- und Winter-Werte von $mean[\tau_{cw,m}]$ sind stark miteinander korreliert ($r = 0.98$), daher die identischen Werte in der Zeile für $mean[\tau_{cw,m}]$

Aus MOPS-Ergebnissen berechnete Boden- Schubspannungen τ	Linearer Korrelationskoeffizient „r“	
	Sommer-Monate	Winter-Monate
$mean[\tau_{cw,m}]$	0.43 \pm 0.08	0.43 \pm 0.08
$max[\tau_{cw,m}]$	0.45 \pm 0.07	0.54 \pm 0.07
$mean[\tau_{cw,max}]$	0.28 \pm 0.08	0.20 \pm 0.08
$max[\tau_{cw,max}]$	0.37 \pm 0.07	0.51 \pm 0.07

Tests zeigen, dass die Daten „ τ “ und „ $\log d_{50}$ “ nicht normalverteilt sind, d.h. konventionelle statistische Tests der in Tab. 1 angegebenen linearen Korrelations-Koeffizienten r sind nicht zulässig. Es wird daher ein „bootstrap-Verfahren“ (z.B. Efron und Tibshirani 1993) angewendet. Das Ergebnis: sämtliche linearen Korrelations-Koeffizienten in Tab. 1 sind hochsignifikant von Null verschieden; das zeigen auch die vom bootstrap-Verfahren gelieferten (doppelten) Standardabweichungen (bzw. Unsicherheiten) der Korrelations-Koeffizienten. Der Vergleich der Korrelations-Koeffizienten für $\tau_{cw,m}$ und $\tau_{cw,max}$ in Tab. 1 zeigt: für die Verfrachtungs-Größe $\tau_{cw,m}$ sind die Korrelations-Koeffizienten höher als für die Erosions-Größe $\tau_{cw,max}$. Das heißt: die Sedimentverteilung über den Watten ist mehr durch die (transportierende) Strömung beeinflusst als durch den (aufwirbelnden) Seegang. Diese Aussage gilt angesichts der hohen Standardabweichungen nur mit erheblicher Einschränkung, zumal ein statistisches Verfahren keine direkten kausalen Zusammenhänge nachweisen kann. Allerdings liefern Cluster-Analysen von HIRSCHHÄUSER (2003a) ebenfalls das Ergebnis: die Kornverteilungen im Hörnummer Tidebecken sind „durch eine Transportortierung geprägt“.

Wir kommen nun zurück zur Ausgangsfrage: wie stark korreliert die räumliche Verteilung des Sediments mit der räumlichen Verteilung einer Boden-Schubspannung? Die Antwort auf diese Frage ist: Die Korrelations-Koeffizienten r in Tabelle 1 sind zwar hochsignifikant von Null verschieden, jedoch (bei einem mittleren $r \approx 0.4$) in ihrer Aussagekraft beschränkt: nur rund $r^2 \approx 0.16$ (also 16 %) der Gesamt-Variation von d_{50} wird durch einen linearen Zusammenhang (also durch eine Regression) zwischen τ und d_{50} beschrieben. Eine erklärte Varianz von nur etwa 16 % wird als nicht ausreichend angesehen für eine vorhersagefähige Kenngröße. Die Sediment-Verteilung hängt jedenfalls nur zu einem Prozentsatz von

10 bis 20 % statisch ab von den in BELAWATT berechneten Boden-Schubspannungen. Es gibt mehrere Antworten auf die Frage, wovon die Sediment-Verteilung ebenfalls abhängen kann. Der wichtigste Punkt ist natürlich der Sedimenttransport selbst, also ein dynamischer Vorgang. Weitere Einflussgrößen sind die geologische Vorgeschichte (Stichwort: zutage tretende pleistozäne Sedimente) und die Bio-Deposition von Feinsediment (z.B. HIRSCHHÄUSER, 2003b).

5. Benthos-Lebensgemeinschaft versus physikalische Variablen

Der im vorangehenden Abschnitt angestellte Vergleich zwischen der hydrodynamischen Belastung (in Form der Boden-Schubspannung) und der Sedimentverteilung im Hörnummer Tidebecken war für das BELAWATT-Projekt eher ein Nebenprodukt. Das Hauptziel von BELAWATT war die Beantwortung der Frage, wie stark die Benthos-Lebensgemeinschaft im Hörnummer Tidebecken von der hydrodynamischen Belastung abhängt.

Die Benthos-Daten wurden in den Sommermonaten 2001, 2002 und 2003 erhoben im Rahmen einer die gesamten deutschen Watten umfassenden Habitat-Kartierung (VAN BERNEM et al. 2006). Aus den 25 dokumentierten Spezies wurden für die statistische Auswertung 6 Spezies ausgewählt (EPPEL et al. 2006): Wattwurm (*Arenicola marina*), Herzmuschel (*Cerastoderma edulis*), Bäumchenröhrenwurm (*Lanice conchilega*), Kieselalgen (*Diatomeen*), Kleines Seegras (*Zostera noltii*) und Meersalat (*Ulva lactuca*). Die Benthos-Daten für *Cerastoderma* sind konkrete Individuen-Zahlen (pro m²). Dagegen ist das *Arenicola*-Vorkommen in 5 Häufigkeits-Klassen eingeteilt, für *Diatomeen* und *Zostera* sind es Boden-Deckungsgrade (in %) und für *Lanice* und *Ulva* wird lediglich unterschieden zwischen „nicht vorhanden“, „vereinzelt“ und „dicht“.

Die Auswahl der 6 Spezies erfolgte unter drei Gesichtspunkten: (1) Die Abundanz der Spezies ist im Datensatz differenziert angegeben (gilt für *Arenicola* und *Cerastoderma*), (2) Es wird für die Spezies eine Sensitivität bzgl. der hydrodynamischen Belastung vermutet (gilt für *Lanice*, *Ulva*, *Diatomeen*, *Zostera noltii*), (3) keine zu hohen Korrelationen der Benthos-Spezies untereinander. Der stärkste Zusammenhang unter den 6 gewählten Spezies besteht zwischen *Ulva* und *Cerastoderma* mit einem linearen Korrelation-Koeffizienten von $r = 0.23$. Zwischen den beiden Grünalgen *Ulva lactuca* und *Enteromorpha spp.* ist die Korrelation $r = 0.60$. Entsprechend wurde nur eine der beiden Grünalgen ausgewählt. Die Wahl fiel auf *Ulva*, da *Enteromorpha* mit *Lanice* unerwünscht stark korreliert ist ($r = 0.31$). Unter den 6 ausgewählten Spezies befinden sich je 3 Vertreter des Phytobenthos und des Zoobenthos. Das Zoobenthos besteht aus einem aktiven suspension feeder der Endofauna (*Cerastoderma*), einem passiven suspension feeder der Epifauna (*Lanice*) und einem deposit feeder (*Arenicola*). Abb. 7 zeigt als Beispiel die Häufigkeitsverteilung von *Cerastoderma*, dokumentiert für die Stationen der Habitat-Kartierungen im Hörnummer Tidebecken. Innerhalb des Beckens wurden rund 400 Stationen beprobt.

Die statistische Bearbeitung der Daten erfolgte in BELAWATT mit dem Statistik-Programm PRIMER (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research, CLARKE and WARWICK, 1994). Zum Beispiel wurden die Daten geordnet (die Umweltstatistiker sprechen von „Ordination“) mit einem MDS-Verfahren (MDS = Multidimensionale Skalierung, siehe z.B. BACKHAUS et al., 2006), basierend auf Bray-Curtis-Koeffizienten als Distanz-Maß. Die Analyse erfolgte für die Gesamtheit der 6 ausgewählten Spezies, d.h. für die benthische Lebensgemeinschaft. Da die Berechnung der Bray-Curtis-Koeffizienten keine „missing values“

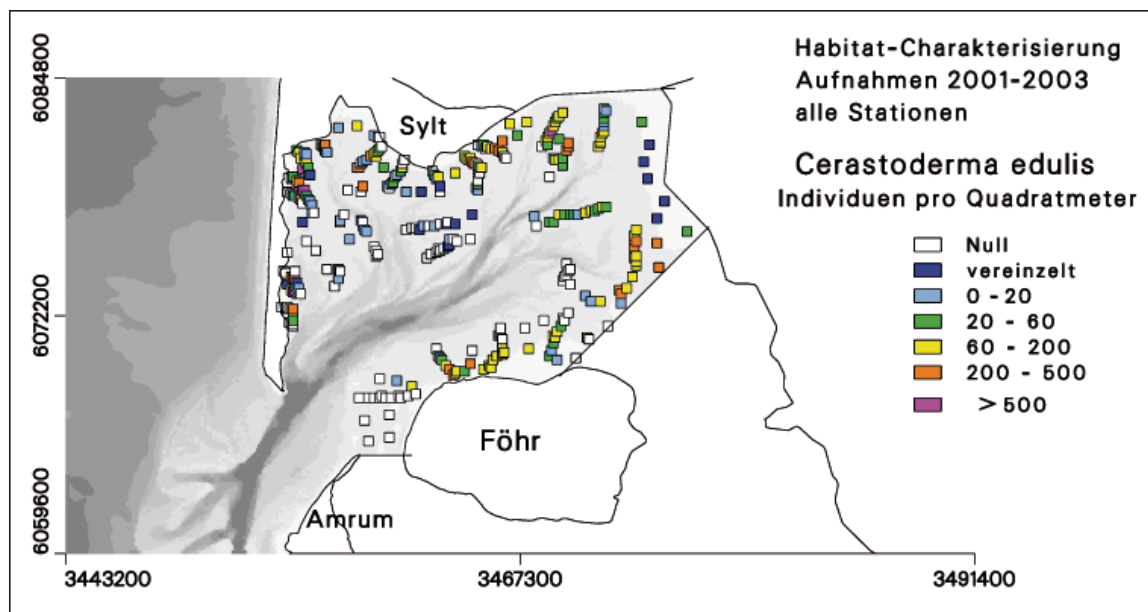


Abb. 7: Räumliche Häufigkeits-Verteilung der Herzmuschel *Cerastoderma edulis* im Hörnumer Tidebecken, Aufnahmen von 2001, 2002 und 2003 (VAN BERNEM et al., 2006). Die Herzmuschel-Häufigkeit wird in den Kartierungs-Daten in Individuen/m² (also keine Einteilung in Häufigkeits-Klassen) angegeben. *Cerastoderma* wurde an insgesamt 316 Stationen kartiert. Die Kartierung erfolgte teilweise in Transekten, erkennbar an einer dichten Aufreihung von Stationspunkten. Die Herzmuschel-Häufigkeit wächst mit wachsender Entfernung von den Tiderinnen. Dieses kann damit zusammenhängen, dass Jungtiere (Besiedlungsdichte hoch) sich eher in höheren Wattten aufhalten (bessere Nahrungs-Situation, besserer Schutz vor Verdriftung). Adulte Herzmuscheln (Besiedlungsdichte gering) suchen dagegen gern tiefergelegene Wattten auf. Allein dieser Zusammenhang zeigt schon, dass die räumliche Verteilung der Benthos-Häufigkeit nicht von der hydrodynamischen Belastung allein abhängt. Im Schlickwatt in der NE-Ecke des Tidebeckens ist die Herzmuschel weniger häufig als in anderen Wattbereichen. Im stark von Seegang beaufschlagten Gebiet westlich Föhr ist die Herzmuschel selten – vielleicht auch wegen des dort vorhandenen gröbereren Sediments. Die starke Heterogenität entlang der Sylter Süd-Halbinsel spiegelt die Heterogenität des Sediments (Flugsand und Schlickwatt nebeneinander) in diesem Bereich wider. Die Topographie ist grau unterlegt

erlaubt, wurden nur jene Kartierungs-Stationen in der statistischen Analyse berücksichtigt, für die *sämtliche* 6 betrachteten Spezies dokumentiert waren: insgesamt 309 Stationen. Ein Test mit dem PRIMER-Programm ANOSIM (Analysis of Similarities) zeigt, dass die Benthos-Daten der 3 Probennahme-Jahre zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengefasst werden dürfen (EPPEL et al., 2006).

Allen 309 Benthos-Stationen wurden von MOPS berechnete, zeitlich gemittelte Bodenschubspannungen zugeordnet: $mean[\tau_{cw,m}]$, $mean[\tau_{cw,max}]$, $max[\tau_{cw,m}]$ und $max[\tau_{cw,max}]$, jeweils berechnet für die Sommer-Monate (April–September) und für die Winter-Monate (Oktober–März) des von BELAWATT simulierten Zeitraums November 1999 bis Oktober 2001. Die Tatsache, dass sich der Simulations-Zeitraum und die Zeiten der Benthos-Kartierungen nur wenig überlappen, ist für die zeitlichen Mittelwerte nicht kritisch, da die mittleren räumlichen Verteilungen von Strömung und Seegang sich von Jahr zu Jahr nur wenig ändern. Bei den Maximalwerten kann es anders aussehen, da ein einziger schwerer Sturm die räumliche Verteilung der maximalen Bodenschubspannungen substantiell ändern kann.

Zusätzlich zu den vier Bodenschubspannungen wurden von MOPS berechnete Trockenfall-Zeiten „dry [%]“ den 309 Benthos-Stationen zugeordnet. Schließlich wurde noch für

jede Benthos-Station eine Median-Korngröße d_{50} gesucht. Häufig wurde parallel zur Benthos-Kartierung eine Sediment-Probe genommen, die im Labor per Siebung auf Korngröße analysiert wurde. Eine direkte Zuordnung einer Median-Korngröße zu einer Benthos-Station war für 227 der 309 Stationen möglich. Dem Rest der Benthos-Stationen wurde ein d_{50} aus einer interpolierten d_{50} -Verteilung zugeordnet. Grundlage für die Korngrößen-Interpolation waren die in Abb. 4 gezeigten Korngrößen-Daten. Die Sedimentdaten des Flugsand-Gebietes entlang der Sylter Südhalbinsel wurden, anders als in Abschnitt 4, jetzt mit verwendet. Die vier Boden-Schubspannungen, die Trockenfall-Zeiten und die Median-Korngrößen werden als „physikalische Variable“ bezeichnet. Der in Abschnitt 2 als wichtige Umweltvariable genannte Salzgehalt ist im Hörnummer Tidebecken praktisch konstant (etwa 27 bis 30 psu) und daher für die räumliche Verteilung des Benthos nicht relevant.

Nach der „Bereitstellung“ aller Daten war die in BELAWATT zu beantwortende Frage: Wie stark beeinflussen die physikalischen Daten die Benthos-Lebensgemeinschaft im Hörnummer Tidebecken? Für die Beantwortung der Frage wurde das PRIMER-Programm BIO-ENV verwendet; die Ergebnisse sind in EPPÉL et al. (2006) dargestellt. Das Programm BIO-ENV findet als wichtigsten physikalischen Einfluss das Zusammenwirken von Korngröße und $mean[\tau_{cw,m}]$ mit einem Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten $r_s \approx 0.3$ (das Verfahren liefert praktisch keine negativen r_s). Die wichtigste physikalische Einzel-Variable ist $mean[\tau_{cw,m}]$ mit $r_s \approx 0.23$. Danach folgen als Einzel-Variable die Korngröße ($r_s \approx 0.21$) und mit größerem Abstand die anderen Variablen mit r_s -Werten zwischen 0.15 und 0.09. Ein

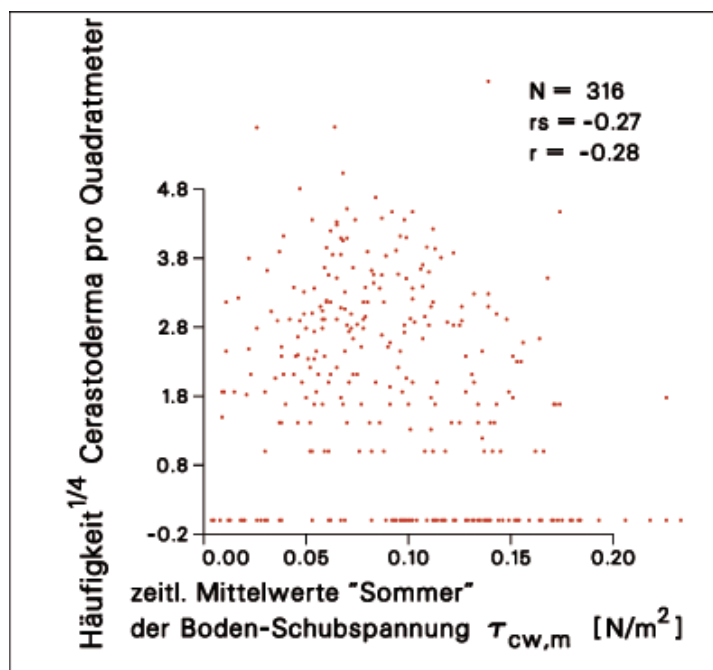


Abb. 8: Gemessene Häufigkeiten der Herzmuschel *Cerastoderma edulis* im Hörnummer Tidebecken, aufgetragen gegen die (von MOPS berechneten) Boden-Schubspannungen $mean[\tau_{cw,m}]$. Die Schubspannungen sind zeitlich gemittelt über die Sommer-Monate des Zeitraums November 1999 bis Oktober 2001. „N“ ist die Anzahl der Datenpunkte, „ r_s “ der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient und „r“ der lineare Korrelationskoeffizient. Die *Cerastoderma*-Häufigkeiten y sind transformiert mit $\sqrt[4]{y}$. Eine *Cerastoderma*-Häufigkeit $\sqrt[4]{4} = 2.8$ bedeutet z.B. eine Häufigkeit von $2.8^4 \approx 60$ Individuen/m². Eine Transformation der Häufigkeiten ist notwendig für die Berechnung der Bray-Curtis-Koeffizienten im Statistik-Paket PRIMER, siehe EPPÉL et al. (2006). Typisch für Benthos-Daten ist die große Anzahl der „Häufigkeit 0“

Signifikanztest der Spearman-Koeffizienten zeigt, dass selbst kleine r_s von 0.1 hochsignifikant von Null verschieden sind. Die obigen Angaben gelten für die Sommer-Monate des BELAWATT-Zeitraums. Es ist festzustellen: $\tau_{cw,m}$ und die Sediment-Korngröße sind die wichtigsten Einflussgrößen für die benthische Lebensgemeinschaft im Hörnummer Tidebecken. Die (auf den flachen Watten) mit dem Seegang verknüpfte Schubspannung $\tau_{cw,max}$ ist dagegen von geringerer Bedeutung. Mit anderen Worten: die mittlere (transportierende) Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst das Benthos stärker als der (erodierende) Seegang.

Letztlich liefert der multivariate Abgleich der Benthos-Lebensgemeinschaft mit den physikalischen Variablen ein ähnliches Ergebnis wie die Korrelation der *einzelnen* Benthos-Spezies mit den *einzelnen* physikalischen Variablen. Ein Beispiel für einen solchen Einzel-Vergleich zeigt das Streudiagramm in Abb. 8. Tabelle 2 zeigt die linearen Korrelationskoeffizienten r für die 6 Benthos-Spezies und die 6 physikalischen Variablen. Aus Tab. 2 ergibt sich: die physikalische Variable mit dem höchsten $|r|$ -Mittelwert (dem Mittel der $|r|$ über alle 6 Spezies) ist $mean[\tau_{cw,m}]$; die gleiche Variable wird von BIO-ENV als wichtigste Einzel-Einflussgröße für die Benthos-Lebensgemeinschaft angegeben.

Tab. 2: Zusammenhang zwischen der Vorkommens-Häufigkeit von Benthos-Spezies und physikalischen Variablen für 309 Benthos-Stationen im Hörnummer Tidebecken. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Variablen wird beschrieben durch lineare Korrelations-Koeffizienten. Die für die Rechnung verwendeten Benthos-Daten sind transformierten Daten, was aber das Ergebnis der Korrelationsrechnung nicht wesentlich beeinflusst. Die verwendeten Schubspannungen und Trockenfallzeiten sind die MOPS-Ergebnisse für die Sommermonate April–September der Jahre 2000 und 2001. Die Median-Korngrößen d_{50} basieren auf Messdaten. Korrelations-Koeffizienten, die betragsmäßig größer als 0.3 sind, sind fett gedruckt. Die ungefähre Gleichsetzung von $\tau_{cw,max}$ und „Seegang“ gilt nur dort, wo die Strömung gering ist, z.B. über den Wattflächen. Die Korrelations-Koeffizienten in der entsprechenden Tabelle für die Wintermonate sind nicht substantiell verschieden von den Korrelations-Koeffizienten der Sommer-Tabelle

SOMMER	$\log d_{50}$	dry	$mean[\tau_{cw,m}]$ \approx Strömung	$max[\tau_{cw,m}]$ \approx Strömung	$mean[\tau_{cw,max}]$ \approx Seegang	$max[\tau_{cw,max}]$ \approx Seegang
<i>Arenicola</i>	0.32	0.18	0.03	0.16	0.10	0.11
<i>Cerastoderma</i>	-0.18	0.14	-0.28	-0.21	-0.20	-0.17
<i>Lanice</i>	-0.02	-0.25	0.17	0.02	0.11	0.07
<i>Diatomeen</i>	-0.19	0.08	-0.27	-0.25	-0.15	-0.16
<i>Zostera noltii</i>	0.02	0.52	-0.51	-0.41	-0.39	-0.26
<i>Ulva</i>	-0.30	-0.08	-0.16	-0.19	-0.13	-0.17

Die in Tab. 2 angegebenen Korrelations-Koeffizienten bestätigen die bekannten Standort- und Lebensgewohnheiten der einzelnen Spezies teilweise. Als suspension feeder ist *Lanice* angewiesen auf Wasserbedeckung (bzw. geringe Trockenfallzeiten) und auf advective Strömung. Dagegen siedelt *Zostera noltii* in Gebieten mit langen Trockenfallzeiten und mit geringer Wasserbewegung. Der Wattwurm *Arenicola* bevorzugt sandiges gegenüber schlickigem Sediment – Wasserbewegung ist ihm offenbar nicht so wichtig. Man begibt sich hier aber leicht auf das Gebiet der Spökenkiekerei. Zum einen wird in Abschnitt 2 auf das

Risiko hingewiesen, Zusammenhänge zwischen den räumlichen Verteilungen des Benthos und den physikalischen Variablen mit einem einfachen Ursache-Wirkung-Schema zu erklären. Zum anderen ist eine Interpretation auf der Grundlage linearer Abhängigkeiten problematisch. Ein Streudiagramm „*Lanice* gegen $\log(d_{50})$ “ zeigt z.B., dass *Lanice* mittlere Korngrößen bevorzugt, zu feines und zu grobes Sediment meidet. Eine Schlussfolgerung aus Tabelle 2 der Art „die Sediment-Korngröße ist für *Lanice* von geringer Bedeutung“ wäre also falsch.

Zusammenfassend ist für das Benthos festzustellen: Die Benthos-Lebensgemeinschaft ist zwar hochsignifikant korreliert mit diversen physikalischen Variablen, jedoch ist die Aussagekraft dieser Korrelation beschränkt. Die in Tab. 2 aufgelisteten linearen Korrelationskoeffizienten r liegen für die wichtigste Einflussgröße $\text{mean}[\tau_{\text{cw,m}}]$ im Betrags-Mittel bei 0.25. Die den Korrelationskoeffizienten in Tab. 2 entsprechenden erklärten Varianzen r^2 liegen bestenfalls im Bereich zwischen 0.1 und 0.25. Mit anderen Worten: Die räumliche Verteilung des Benthos im Hörnummer Tidebecken wird nur zu 10 bis 25 % erklärt durch die verwendeten physikalischen Variablen. Dieser geringe Prozentwert wird als nicht ausreichend angesehen, um die räumliche Verteilung des Benthos im Hörnummer Tidebecken vorherzusagen.

6. Schlussfolgerung

In der Einleitung wurde als Hauptziel von BELAWATT genannt die Suche nach einer physikalischen Belastungs-Kenngröße, die das Sediment-Regime und/oder die Benthos-Lebensgemeinschaft im Hörnummer Tidebecken charakterisieren und prognostizieren kann. Das Ergebnis der Suche ist: Es wurde keine geeignete Belastungs-Kenngröße gefunden. Speziell für das Benthos gilt: Zwar gibt es einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen den physikalischen Belastungs-Größen und der Benthos-Häufigkeit, aber es gibt daneben noch diverse andere Einflussgrößen (Temperatur, Eisbedeckung, Nahrungs-Verfügbarkeit, Druck durch Räuber, Parasitenbefall, Einwanderung neuer Arten ...), die in ihrer Gesamtheit die räumliche Verteilung des Benthos im Hörnummer Tidebecken erheblich stärker beeinflussen als die hydrodynamische Belastung.

7. Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Watthydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten“ (BELAWATT) wurde unter dem Förderkennzeichen 03KIS038 als KFKI-Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

8. Schriftenverzeichnis

- BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W. u. WEIBER, R.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, 2006.
- BOLAM, S. G.: Spatial patterns of estuarine macrobenthic assemblages: relationships with hydrodynamic regime. Estuary Process Research Project (EstProc), Theme 3 Biology Interactions, Report No: FD1905/CEFAS1, 2003.
- CLARKE, K. R. u. WARWICK, R. M.: Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. ISBN 1 85531 140 2, Plymouth Marine Laboratory, 1994.

- DAMM-BÖCKER, S.; KAISER, R. u. NIEMEYER, H. D.: Determination of Wadden Sea habitats by hydrodynamics. Proc. Int. Coast. Congr. '92 Kiel, 1993.
- EFRON, B. u. TIBSHIRANI, R. J.: An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall, 1993.
- EPPEL, D. P.; KAPITZA, H.; ONKEN, R.; PLESKACHEVSKY, A.; PULS, W.; RIETHMÜLLER, R. u. VAESSEN, B.: Wathydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten. GKSS-Report 2006/8, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 2006.
- FIGGE, K.: Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Karte Nr. 2900). Deutsches Hydrographisches Institut, 1981.
- HERMAN, P. M. J.; MIDDELBURG, J. J. u. HEIP, C. H. R.: Benthic community structure and sediment processes on an intertidal flat: results from the ECOFLAT project. Continental Shelf Research 21, 2001.
- HIRSCHHÄUSER, T.: Sedimentologische und biologische Aspekte der morphodynamischen Modellierung von Tidebecken. Ph.D. Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2003a
- HIRSCHHÄUSER, T.: Morphodynamische Modellierung der Biodeposition in einem Testfeld der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 67, 2003b.
- LAUCKNER, G.: Parasiten als bestandsregulierender Faktor im Watt. In: Lozan, J. L., Rachor, E., Reise, K., von Westernhagen, H., Lenz, W. (Hrsg.) Warnsignale aus dem Wattenmeer, Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, 1994.
- MAHATMA, L.: The spatial and temporal patterns of erodibility of an intertidal flat in the East Frisian Wadden Sea, Germany. GKSS-Report 2004/14, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 2004.
- SOULSBY, R.: Dynamics of marine sands. Thomas Telford Publications, London, 1997.
- VAN BERNEM, K.; GROTHJAHN, M.; KNÜPLING, J.; KRASEMANN, H. L.; MÜLLER, A.; NEUGEBOHRN, L.; PATZIG, S.; RAMM, G.; RIETHMÜLLER, R.; SACH, G. u. SUCHROW, S.: Thematische Kartierung und Sensitivitätsraster im deutschen Wattenmeer, Juni 1987–Juni 1993. GKSS-Report 94/E/10, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 1994.
- VAN BERNEM, K.; SCHILLER, H.; KRASEMANN, H.; KLEEBERG, U. u. DOERFFER, R.: Sensitivitätsraster Deutsche Nordseeküste II – Aktualisierung und Erstellung eines operationellen Modells zur Vorsorgeplanung bei der Bekämpfung von Ölunfällen. Abschlussbericht. Report GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 2006 (in Vorbereitung).
- VOLKENBORN, N.: Ecosystem engineering in intertidal sand by the lugworm *Arenicola marina*. Dissertation im Fachbereich Biologie/Chemie der Uni Bremen, 2005.
- WARWICK, R. M. u. UNCLES, R. J.: Distribution of Benthic Macrofauna Associations in the Bristol Channel in Relation to Tidal Stress. Marine Ecology Progress Series 3, 1980.
- WARWICK, R. M.; GOSS-CUSTARD, J. D.; KIRBY, R.; GEORGE, C. L.; POPE, N. D. u. ROWDEN, A. A.: Static and dynamic environmental factors determining the community structure of estuarine macrobenthos in SW Britain: Why is the Severn estuary different? Journal of Applied Ecology, 29, 1991.
- WILDISH, D. J. u. KRISTMANSON, D. D.: Tidal energy and sublittoral macrobenthic animals in estuaries. J. Fish. Res. Board Can. 36 (10), 1979.
- YSEBAERT, T.; MEIRE, P.; HERMAN, P. M. J. u. VERBEEK, H.: Macrobenthic species response surfaces along estuarine gradients: prediction by logistic regression. Marine Ecology Progress Series 225, 2002.
- YSEBAERT, T.; HERMAN, P. M. J.; MEIRE, P.; CRAEYMEERSCH, J.; VERBEEK, H. u. HEIP, C. H. R.: Large-scale spatial patterns in estuaries: estuarine macrobenthic communities in the Schelde estuary, NW Europe. Estuarine, Coastal and Shelf Science 57, 2003.