

## INFLUENZA DEGLI ORGANISMI BENTONICI SULLA FORMAZIONE DI SAND WAVES: LA LUNGHEZZA D'ONDA

G. Besio<sup>1</sup> & B.W. Borsje<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>DICAT - Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente e del Territorio, Università di Genova - e-mail: [giospud@dicat.unige.it](mailto:giospud@dicat.unige.it)

<sup>2</sup>Department of Water Engineering and Management, Università di Twente, Enschede, Olanda

<sup>3</sup>WLDelft Hydraulics, Marine and Coastal Systems, Delft, Olanda

### SOMMARIO

*La presenza di organismi bentonici sul fondo del mare ha una influenza significativa sui processi idro e morfodinamici e quindi sulla formazione di forme di fondo di piccola e grande scala. Nel presente lavoro si realizza una analisi preliminare degli effetti dell'attività biologica sulla formazione di forme di fondo di grande scala (sand waves). Una volta verificata l'affidabilità del modello predittivo sviluppato da Besio et al. (2006), l'influenza dell'attività biologica dovuta a organismi bentonici viene simulata variando i valori dei parametri caratteristici del problema (tensione critica tangenziale per il trasporto solido e scabrezza del fondo). I risultati ottenuti mostrano come le lunghezze d'onda delle forme di fondo ottenute con il modello bio-morfodinamico siano in migliore accordo rispetto ai valori ottenuti tramite l'utilizzo del solo modello morfodinamico.*

### 1 INTRODUZIONE

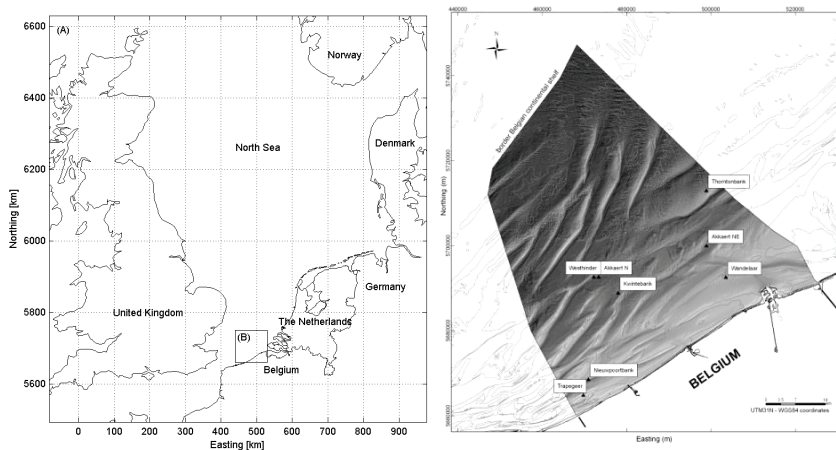
Sul fondo del Mare del Nord sono presenti delle forme di fondo di grande scala denominate nella letteratura anglosassone “sand waves”, caratterizzate da lunghezze d'onda dell'ordine delle centinaia di metri e altezze di alcuni metri. Tali forme di fondo possono migrare con velocità dell'ordine di grandezza di una decina di metri all'anno e la loro presenza rappresenta una grave minaccia per diverse attività produttive (industria estrattiva e navigazione su tutte).

La presenza di organismi bentonici sul fondo del Mare del Nord è stata documentata da diversi autori (Heip et al., 1992; Kunitzer et al., 1992; Rabaut et al., 2007). Tali organismi hanno la tendenza a cercare di ottimizzare l'ambiente a loro circostante per la propria sopravvivenza, innescando una forte interazione con la morfodinamica locale. Data la variazione sia stagionale che spaziale degli agenti biologici nelle regioni soggette a marea (Knaapen et al., 2003; Van Hoey et al., 2004; Baptist et al., 2006), è lecito aspettarsi variazioni significative nei valori dei parametri abiotici. Per poter realizzare previsioni a lungo termine dell'effetto dell'attività biologica sull'evoluzione morfodinamica del fondo marino è necessario poter descrivere con una certa accuratezza l'interazione tra l'attività degli organismi bentonici e il trasporto solido. L'obiettivo di questo contributo è realizzare una analisi preliminare dell'effetto

dell'attività biologica sul processo di formazione delle sand waves con particolare attenzione alle loro caratteristiche geometriche (lunghezza d'onda). Queste ultime vengono valutate utilizzando il modello sviluppato da Besio et al. (2006) successivamente modificato e verificato con una serie di dati di campo della piattaforma continentale belga da Cherlet et al. (2007).

## 2 AREA DI STUDIO

L'area di studio considerata si trova nella zona meridionale del Mare del Nord, in corrispondenza delle coste del Belgio. In questa zona è presente un sistema di sand banks e sand waves e la profondità media si aggira intorno ai 35 metri. Tutta questa area è soggetta a maree di carattere semidiurno e con velocità di picco comprese tra i 50 e i 70 centimetri al secondo.



**Figura 1.** Area di studio situata nella piattaforma continentale belga (da Cherlet et al., 2007)

	$d_{50}$ [mm]	$s$ [%]	$M_c$ [%]	$D_{off}$ [km]	$H$ [m]
<i>Macoma Baltica</i>	0.08	0.15	50	3	7
<i>Abra Alba</i>	0.22	0.38	10	8	13
<i>Nephtys Cirrosa</i>	0.28	0.50	0	22	13
<i>Ophelia Limacina</i>	0.42	0.55	0	40	30

**Tabella 1.** Habitat caratteristici delle comunità bentoniche. Diametro sedimenti ( $d_{50}$ ), pendenza ( $s$ ), contenuto in fango ( $M_c$ ), distanza dalla costa ( $D_{off}$ ) e profondità ( $H$ ) (Degraer et al., 2008)

In questa area è stata documentata la presenza di comunità di organismi bentonici di diverse specie (Degraer et al., 2003; Van Hoey et al., 2004) quali: (1) *Macoma Balthica*, (2) *Abra Alba*, (3) *Nephtys Cirrosa*, (4) *Ophelia Limacina*.

## 3 MODELLO TEORICO

Come evidenziato da Hulscher (1996), Gerkema (2000) e Besio et al. (2006), il processo che conduce alla formazione delle sand waves è simile a quello che da origine ai ripples in presenza di onde di gravità (Blondeaux, 2001). L'interazione tra il moto

oscillante della marea e una perturbazione del fondo da vita alla formazione di celle di ricircolo sulla verticale. Tali celle di ricircolo innescano un meccanismo di trasporto di sedimenti dai cavi alle creste. Nel caso in cui tale trasporto sia maggiore rispetto al trasporto dovuto alla gravità, la perturbazione del fondo si amplifica e si ha la formazione delle forme di fondo. In caso contrario, invece, la perturbazione non si amplifica e il fondo rimane inequivocabilmente piano. Lo studio teorico della formazione delle sand waves è stato realizzato utilizzando di modelli di stabilità lineare (Hulscher, 1996; Gerkema, 2000; Besio et al., 2006) studiando l'evoluzione di piccole perturbazioni del fondo. L'evoluzione nel tempo della perturbazione del fondo è controllata dall'equazione di continuità dei sedimenti. Per poter integrare questa equazione è necessario utilizzare una relazione per la valutazione del trasporto solido e avere risolto il campo di moto. Quale sia il modello di trasporto utilizzato si perviene inequivocabilmente ad una equazione per l'evoluzione nel tempo dell'ampiezza della perturbazione al fondo nella forma:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \Gamma(t) A(t) \quad (1)$$

dove  $A(t)$  è l'ampiezza della perturbazione e  $\Gamma(t)$  è una funzione complessa periodica sul periodo della marea. L'amplificazione o smorzamento dell'ampiezza della perturbazione dipende quindi dal valore mediato sul periodo della marea  $\bar{\Gamma}$  di  $\Gamma(t)$ . Tale valore viene definito come fattore di amplificazione. L'analisi lineare, una volta valutato il fattore di amplificazione, è in grado di fornire valori della lunghezza d'onda, della velocità di migrazione e dell'orientamento del modo più instabile (ovvero quello che presenta il valore del fattore di amplificazione maggiore), che si ritiene coincidere con la forma di fondo che verrà a formarsi in natura (Dodd et al., 2003). Il modello teorico viene sviluppato in forma adimensionale, utilizzando la profondità locale  $h_0^*$ , la velocità massima mediata sulla verticale della marea  $U_0^*$  e l'inverso della frequenza angolare  $\omega^*$  della marea come grandezze scala. Il problema idrodinamico adimensionale è caratterizzato dai seguenti parametri adimensionali:

$$k_c = \frac{U_0^*}{\omega^* h_0^*} ; \quad \hat{\mu} = C \int_{-1}^0 F(\xi) d\xi \quad (2a,b)$$

dove  $C$  è un coefficiente di resistenza, valutato tramite l'utilizzo di relazioni standard per le correnti (Fredsoe & Deigaard, 1992), tenendo in conto la scabrezza dovuta alla presenza di forme di fondo di piccola scala. Infine la funzione  $F(\xi)$  descrive la struttura verticale della viscosità turbolenta come indicato da Dean (1974).

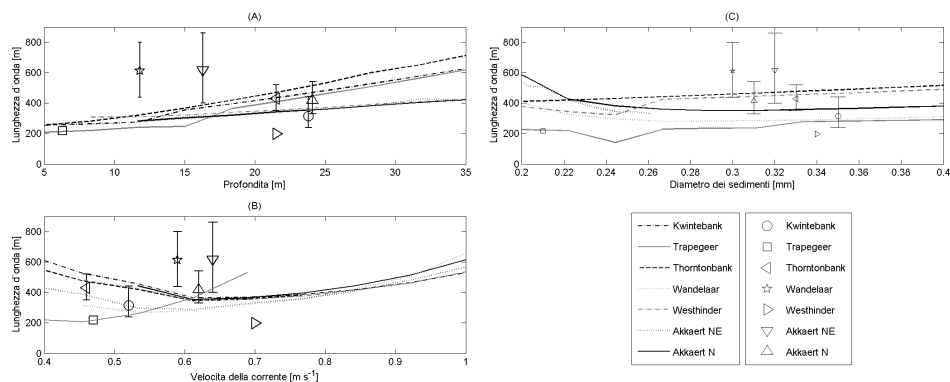
Il problema morfodinamico è caratterizzato dal diametro dei sedimenti  $d$ , dal numero di mobilità della particella  $\Psi_d$  e dal numero di Reynolds delle particelle  $R_p$ :

$$d = \frac{d^*}{h_0^*} ; \quad \Psi_d = (\omega^* h_0^*)^2 / (\rho_s^* / \rho^* - 1) g^* d^* ; \quad R_p = \sqrt{(\rho_s^* / \rho^* - 1) g^* d^*} / \nu^* \quad (3a,b,c)$$

Infine, per la valutazione del trasporto solido al fondo è stata utilizzata la relazione proposta da Van Rijn (1991), mentre per la valutazione del trasporto in sospensione è stata risolta l'equazione di convezione-diffusione per la concentrazione dei sedimenti (Besio et al., 2006). La scabrezza al fondo è stata valutata utilizzando il modello per la descrizione delle caratteristiche dei ripples sviluppato da Soulsby & Whitehouse (2005).

#### 4 CONFRONTO CON I DATI DI CAMPO

Per verificare l'affidabilità del modello teorico, *Cherlet et al. (2007)* hanno provato, con successo, a riprodurre le lunghezze d'onda di una serie di dati di campo della piattaforma continentale belga, partendo da informazioni specifiche sull'intensità delle correnti di marea, del diametro dei sedimenti e della profondità locale. Nel seguito si riportano i risultati ottenuti da *Cherlet et al. (2007)* e gli andamenti delle variazioni della lunghezza d'onda delle forme di fondo in funzione della velocità della corrente, della profondità locale e del diametro dei sedimenti.

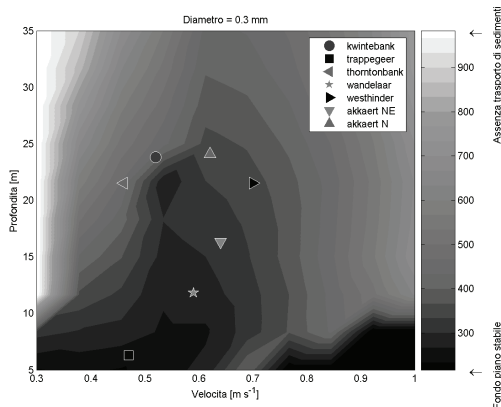


**Figura 2.** Lunghezza d'onda delle sand waves in funzione della profondità locale, della velocità della corrente e del diametro dei sedimenti per i differenti siti della piattaforma continentale belga. Linee: simulazioni teoriche; punti: dati di campo

Aumentando il valore della profondità locale la lunghezza d'onda delle sand waves aumenta linearmente e il trasporto solido diminuisce. Aumentando il valore della velocità della corrente è possibile osservare come una volta attivato il trasporto solido al fondo si abbia un incremento del valore del fattore di amplificazione (il fondo diventa “più instabile”) e la lunghezza delle sand waves tende a diminuire (figura 2b). Un ulteriore aumento della velocità della corrente innesca il trasporto solido in sospensione, responsabile di un effetto stabilizzante sulle forme di fondo (*Besio et. al, 2006*) e la lunghezza d'onda tende nuovamente ad aumentare. Per valori particolarmente elevati della velocità della corrente il fondo piano risulta invariabilmente stabile.

Comportamento simile si verifica nel caso di variazioni del diametro medio dei sedimenti: ad un aumento del diametro medio dei sedimenti è associata una diminuzione del trasporto solido in sospensione e quindi una diminuzione della lunghezza d'onda delle forme di fondo. Dai risultati presentati in figura 2 risulta che il modello è in buon accordo con i dati di campo anche se nel caso di Akkaert Ne, Wandelaar e Westhinder la lunghezza d'onda delle forme di fondo predetta dal modello teorico si discosta dalle osservazioni di campo. Poiché dalle misure di campo risulta che il diametro medio dei sedimenti è molto prossimo a 0.3 mm nei test successivi si assumerà che per tutti i siti considerati sia presente un diametro medio pari a 0.3 mm. Variando quindi i valori di profondità locale e di velocità della corrente è possibile osservare come per i siti in cui i risultati teorici e i dati di campo non erano in perfetto accordo non si abbia un significativo miglioramento dei valori delle lunghezze d'onda

(confronto tra i dati di campo e i risultati teorici di figura 3). Tale risultato suggerisce il fatto che variazioni locali delle grandezze caratteristiche del processo di formazione delle sand waves (velocità della corrente e profondità) non riescono a giustificare le differenze quantitative tra i risultati teorici e le osservazioni di campo.



**Figura 3.** Lunghezza d’onda per i siti della piattaforma continentale belga variando profondità e velocità. Il colore dei punti sperimentali corrisponde alla lunghezza d’onda misurata in campo

## 5 ATTIVITÀ BIOLOGICA

Secondo gli studi realizzati da Rabaut et al. (2007) e Degreear et al. (2008), diverse comunità bentoniche sono presenti sulla piattaforma continentale celga (tabella 2).

	Kwintebk	Trapegeer	Thorntonbk	Wandelaar	Westhinder	Akkaert NE	Akkaert N
<i>M. Balthica</i>		X	X	X		X	
<i>Lanice C.</i>	X				X		X

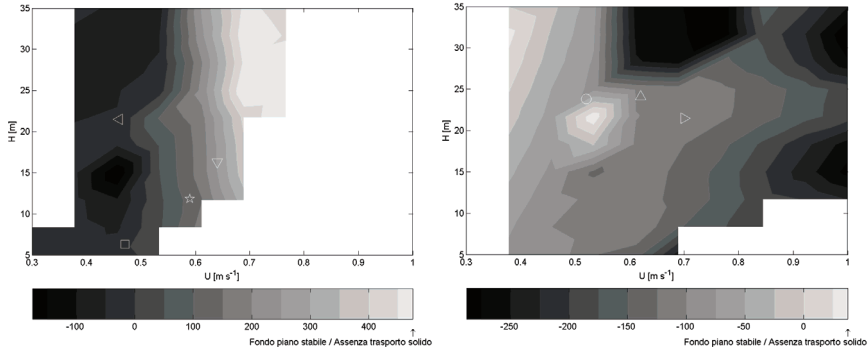
**Tabella 2.** Presenza delle comunità macrobentiche nella piattaforma continentale belga

La presenza di organismi bentonici influenza la stabilità del fondo: la *Macoma Balthica* tende a incentivare il trasporto solido al fondo a causa delle sue attività di scavo e di nutrizione (Austen et al., 1999). Nel Wadden Sea, la presenza della *Malcoma Balthica* è responsabile di una riduzione fino al 50% della tensione critica di Shields (Borsje et al., 2007). La presenza di comunità di *Lanice Conchilega*, invece, influisce sulle velocità in prossimità del fondo, modificando sensibilmente i processi di formazione dei ripples (e quindi la scabrezza del fondo, O’Donoghue et al., 2006). Una prima approssimazione degli effetti dell’attività biologica sul trasporto di sedimenti sono state introdotte nel modello teorico modificando il valore della tensione critica di Shields e il valore della scabrezza al fondo:

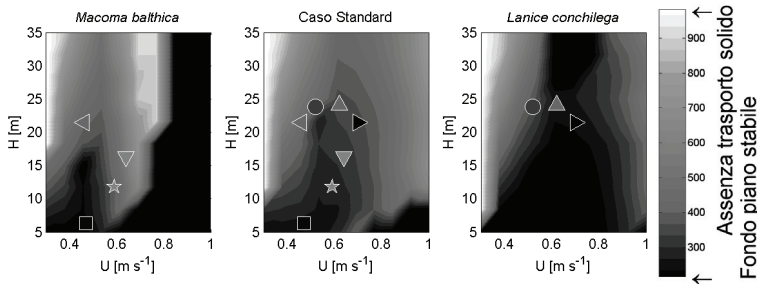
$$\theta_{cr} = \theta_{cr}^d T_d (\text{Macoma}); \quad z_r = z_r^d E_s (\text{Lanice}) \quad (4)$$

dove  $T_d$  e  $E_s$  sono dei fattori (de)stabilizzanti legati all’attività biologica. L’apice  $^d$  sta a rappresentare le condizioni standard del modello morfodinamico, senza attività biologica (“default”). Ovviamente l’effetto delle comunità bentiche è proporzionale alla

loro densità. Borsje et al. (2008) hanno stimato  $T_d=0.65$  e  $E_s=0.6$  rispettivamente.



**Figura 4.** Variazioni della lunghezza d'onda dovute alla presenza di comunità bentoniche. Pannello di sinistra: *Macoma Balthica*; Pannello di destra: *Lanice Conchilega*.

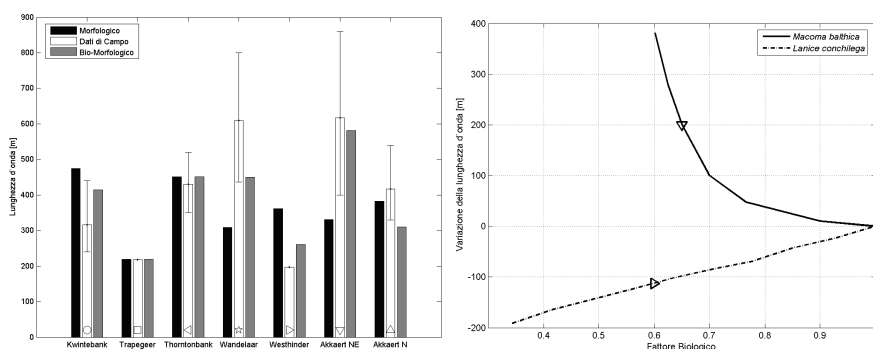


**Figura 5.** Lunghezze d'onda previste dal modello teorico nel caso di presenza di: *Macoma Balthica* (sinistra); assenza di attività biologica (centro); *Lanice Conchilega* (destra). I simboli geometrici corrispondono ai siti della piattaforma continentale belga (vedi figura 3)

L'introduzione dell'effetto dell'attività biologica all'interno del modello teorico modifica quantitativamente i risultati della lunghezza d'onda. La presenza della *Macoma Balthica* infatti aumenta il tasso di trasporto solido al fondo e facilita anche il trasporto in sospensione. Ne risulta che il fondo risulta stabile per velocità inferiori rispetto al caso in cui non venga considerato l'effetto dei macro organismi e il minimo della lunghezza d'onda si ottiene per valori della velocità inferiori rispetto al caso standard (pannello sinistro di figura 4). La presenza della *Lanice Conchilega* tende a diminuire il valore della scabrezza del fondo. Per piccoli valori della velocità della corrente non vi sono sostanziali differenze con il caso standard, mentre all'aumentare della velocità le lunghezze d'onda tendono a diminuire a causa della diminuzione del trasporto solido in sospensione rispetto al caso standard. Da figura 4 risulta evidente come nei siti della piattaforma belga ove il modello morfodinamico fornisce delle lunghezze d'onda in buon accordo con i dati di campo non vi siano miglioramenti significativi dei risultati. Al contrario, considerando i siti in cui le predizioni non sono in buon accordo con le osservazioni di campo (Westhinder, Wandelaar e Akkaert NE), i risultati ottenuti migliorano sensibilmente includendo l'attività biologica (figura 5).

## 6 CONCLUSIONI

L'introduzione degli effetti dovuti all'attività biologica sul trasporto solido presenta variazioni significative sui risultati del modello teorico proposto da Besio *et al.* (2006). Confrontando i risultati ottenuti utilizzando i modelli morfodinamico e bio-morfodinamico si può apprezzare un miglioramento nelle capacità predittive del modello nei siti in cui le previsioni del modello morfodinamico non erano in buon accordo con le osservazioni sperimentali (figura 6, pannello di sinistra). Come precedentemente descritto, l'attività biologica ha effetti diversi a seconda del tipo di comunità bentonica considerata. Come evidenziato in figura 6, pannello di destra, la presenza della *Macoma Balthica* tende ad aumentare la lunghezza d'onda delle forme di fondo, mentre la *Lanice Conchilega* provoca una diminuzione della lunghezza d'onda; inoltre l'effetto della prima risulta maggiore rispetto a quello della seconda.



**Figura 6.** Pannello di sinistra: confronto tra i valori della lunghezza d'onda dei dati di campo, dei risultati del modello morfodinamico e del modello bio-morfodinamico. Pannello di destra: variazioni della lunghezza d'onda delle sand waves dovute alla variazione dei fattori biologici  $T_d$  ed  $E_s$  per i siti Akkaert NE e Westhinder. I punti rappresentano i valori utilizzati in questo studio

Nell'ambito del presente studio sono state considerate due comunità bentoniche (*Macoma Balthica* e *Lanice Conchilega*), mentre è noto che la popolazione di macroorganismi presente sul fondale del Mare del Nord è molto più varia. Per una corretta descrizione dell'effetto dell'attività biologica sul processo di formazione delle sand waves è importante estendere l'analisi per diverse comunità bentoniche. Infine, per avere predizioni morfologiche accurate è necessario migliorare la parametrizzazione dell'attività biologica rispetto alle relazioni qui proposte (relazioni 4a e 4b).

## BIBLIOGRAFIA

- Austen, I., Andersen, T.J. & Edelvang, K., 1999. The influence of benthic diatoms and invertebrates on the erodibility of an intertidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 99-111.
- Baptist, M.J., van Dalzen, J., Weber, A., Passchier, S. & van Heteren, S., 2006. The distribution of macrozoobenthos in the Southern North Sea in relation to meso-scale bedforms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 538-546.
- Besio, G., Blondeaux, P. & Vittori, G., 2006. On the formation of sand waves and sand banks. *Journal of Fluid Mechanics* 557, 1-27.

- Blondeaux, P., 2001. Mechanics of coastal forms. *Annual Review of Fluid Mechanics* 33, 339-370.
- Borsje, B.W., Besio, G., Hulscher, S.J.M.H., Blondeaux, P., & Vittori, G., 2008. Exploring biological influence on offshore sandwave length. In: *Proceedings of 3rd MARID Workshop*, Leeds, UK, April 1-2, 2008.
- Borsje, B.W., Hulscher, S.J.M.H., De Vries, M.B. & De Boer, G.J., 2007. Modeling large scale cohesive sediment transport by including biological activity. Eds. Dohmen-Janssen and Hulscher, *Proceedings 5<sup>th</sup> IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 255-262.
- Cherlet, J., Besio, G., Blondeaux, P. van Lancker, V., Verfaillie, E. & Vittori, G., 2007. Modeling sand wave characteristics on the Belgian Continental Shelf and in the Calais-Dover Strait. *Journal of Geophysical Research* 112, C06002, doi:10.1029/2007/JC004089.
- Degraer, S., Verfaillie, E., Willems, W., Adriaens, E., Vincx, M. & Van Lancker, V., 2008 Habitat suitability modelling as a mapping tool for macrobenthic communities: An example from the Belgian part of the North Sea. *Continental Shelf Research* 28, 369-379.
- Degraer, S., Van Lancker, V., Moerkerke, G., Van Hoey, G., Vanstaen, K., Vincx, M. & Henriët, J.-P., 2003. Evaluation of the ecological value of the foreshore: habitat-model and macrobenthic side-scan sonar interpretation: extension along the Belgian Coastal Zone. *Tech. Report*, Ghent University, Belgium.
- Dean R.B., 1974. *AERO Report 74-11*. Imperial College, London.
- Dodd, N., Blondeaux, P. Calvete, D., De Swart, H., Falques, A., Hulscher, S.J.M.H., Rozynski, G., Vittori, G., 2003. The use of stability methods for understanding the morphodynamical behaviour of coastal systems. *Journal of Coastal Research* 19, 849-865.
- Fredsoe & Deigaard (Edt.), 1992. Mechanics of coastal sediment transport. Advance Series on Ocean Engineering. World Scientific, Singapore, xviii+369 p.
- Gerkema T. 2000. A linear stability analysis of tidally generated sand waves. *Journal of Fluid Mechanics* 417, 303-322.
- Heip, C., Basford, D., Craeymeersch, J.A., Dewarumez, J.-M., Dörjes, J., De Wilde, P., Duineveld, G., Eleftheriou, A., Herman, P.M.J., Niermann, U., Kingston, P., Künitzer, A., Rachor, E., Rumohr, H., Soetaert, K. & Soltwedel, T., 1992. Trends in biomass, density and diversity of North Sea macrofauna. *Journal of Marine Science* 49, 13-22.
- Hulscher, S.J.M.H. 1996. Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. *Journal of Geophysical Research* C9, 101, 20727-20744.
- Knaapen, M.A.F., Holzhauser, H., Hulscher, S.J.M.H., Baptist, M.J. & van Ledden, M., 2003. On the modeling of biological effects on morphology in estuaries and seas. *Proceedings 3<sup>rd</sup> IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 773-783.
- Künitzer, A., Duineveld, G.C.A., Basford, D., Dewarumez, J.-M., Dörjes, J., Eleftheriou, A., Heip, C., Herman, P.M.J., Kingston, P., Niermann, U., Rumohr, H. & De Wilde, P.A.W.J., 1992. The benthic infauna of the North Sea: species distribution and assemblages. *Journal of Marine Science* 49, 127-143.
- O'Donoghue, T., Doucette, J.S., van der Werf, J.J. & Ribberink, J.S., 2006. The dimensions of sand ripples in full-scale oscillatory flows. *Coastal Engineering* 53, 997-1012.
- Rabaut, M., Guillini, K., Van Hoey, G., Vincx, M. & Degraer, S., 2007. A bio-engineered soft-bottom environment: The impact of *Lanice conchilega* on the benthic species-specific densities and community structure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75, 525-536.
- Soulsby, R.L. & Whitehouse, R.J.S. 2005 Prediction of ripples properties in shelf seas: Mark 2 Predictor for Time Evolution. *Rep. TR 154*, HR Wallingford Ltd, Wallingford UK.
- Van Hoey, G., Degraer, S. & Vincx, M., 2004. Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 59, 599-613.
- Van Rijn, L.C., 1991. Sediment transport in combined waves and currents, in *Proceedings of Euromech 262*, Balkema, A.A., Brookfield, Vt.