10353

SEDIMENTOLOGISCHE EN BIOLOGISCHE PROCESSEN EN DE EROSIEGEVOELIGHEID VAN COHESIEVE SEDIMENTEN OP ENKELE SLIKKEN IN DE BENEDEN-ZEESCHELDE

M. FETTWEIS[1], T. YSEBAERT[2], M. SAS[1] en P. MEIRE[2]
[1] IMDC nv
[2] Instituut voor Natuurbehoud

Vlaams Instituut voor de Zee
Flanders Marine Institute

VLIZ (vzw)
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE
FLANDERS MARINE INSTITUTE
Oostende - Belgium

SEDIMENTOLOGICAL AND BIOLOGICAL PROCESSES AND THE EROSION SENSITIVITY OF COHESIVE SEDIMENTS ON INTERTIDAL MUDFLATS IN THE SCHELDT ESTUARY

This paper describes the results of two field campaigns to measure critical shear stress for erosion of muddy sediments in intertidal mudflats of the Scheldt estuary in relation to both abiotic and biotic parameters.
The critical erosion shear stress was measured in situ *in three intertidal mudflats (Groot Buitenschoor, Galgenschoor and Paardenschor) situated in the Belgian part of the Scheldt estuary, using the HR Wallingford instrument SedErode. The tidal flats are situated in the mesohaline and the turbidity maximum zone of the estuary. On every intertidal flat three sampling locations were chosen. In every location three measurements of erosion stress were carried out and samples of the top layer were taken for sediment and benthos analysis. The sampling stations differed in topographical elevation: the average time of flooding during a spring tide varied between 2 and 9 hours.*
The pigments chlorophyll a and fucoxanthin were determined as an indication of the presence of microphytobenthos. Large differences in chlorophyll a content were found between both campaigns, with maxima in April, being ten times higher than in September.
The number per m² of all benthic species was measured. A total of 13 different species was found. The highest diversity occurred during September. The benthos density was substantially higher during September than April.
Very low pigment content and macrofauna density occurred on the Galgenschoor intertidal flat. The sample locations on this tidal flat are situated low in the intertidal zone and are flooded during a major part of the tidal cycle.
The measured critical shear stress for erosion was up to 65% higher during April than September. The value of the critical shear stress is situated between 0.26 and 0.43 Pa (April) and between 0.24 and 0.29 Pa (September). The critical erosion shear stresses measured on the Galgenschoor, where the biological activity was very low, showed little variation between both campaigns. The data do not permit to establish a clear correlation between D50 or mud content and the critical shear stress or density. Some data, however, suggest a relation between shear stress and increasing sand content or density. This can be explained by the presence of sand in a muddy bed, which will compact the sediment and increase the erosion resistance. The difference in erosion resistance between both campaigns is for a major part caused by biological parameters.

1. INLEIDING: SEDIMENTOLOGIE EN BIOLOGIE

Sedimentologie houdt zich traditioneel bezig met de fysische krachten, die inwerken op het substratum en met de abiotische eigenschappen ervan (korrelgrootte, densiteit, samenstelling, mineralogie). Een belangrijk onderzoeksdomein omvat het ontwikkelen van meetmethoden en het gebruik van numerieke modellen, die toelaten het transport van sedimenten te berekenen. Als toepassingen hiervan worden o.a. aangehaald het voorspellen van de effecten van een verdieping van de vaargeul op de slibbalans en het schatten van de onderhoudsbaggerwerken in bestaande of geplande havendokken. Om het sedimenttransport te kunnen berekenen heeft men een grondige kennis nodig van de samenstelling en eigenschappen van het suspensiemateriaal (valsnelheid, cohesief gedrag, samenstelling) en van de bodemsedimenten. De weerstand tegen erosie van cohesieve sedimenten is afhankelijk van onder meer de sedimentsamenstelling, het poriënwater, de afzettingswijze van het sediment, de consolidatiegraad en de aanwezigheid van organismen (Mehta et al., 1989). Erosie van slib wordt gedefinieerd als de som van de processen, die maken dat afgezette slibdeeltjes terug in suspensie gebracht worden en getransporteerd kunnen worden (Teeter, 1992). Erosie treedt op van zodra de bodemschuifspanning veroorzaakt door de heersende stroming groter wordt dan de inherente sterkte van de bodem. De sterkte van de bodem kan uitgedrukt worden als een kritische schuifspanning voor erosie. De hoeveelheid slib, die erodeert per tijdseenheid (de erosiesnelheid) bepaalt de lokale slibconcentratie en aldus ook de hoeveelheid slib, die beschikbaar is voor transport en sedimentatie op andere plaatsen.
Slibrijke sedimenten in de Schelde komen vooral voor in de intergetijdengebieden, naast de toegangsgeulen en andere kunstmatige insteken in het estuarium. De slikken en schorren in de Beneden-Zeeschelde vormen een leefomgeving voor tal van organismen. In en op de bodem treedt er een interactieve wisselwerking op tussen de sedimentologische, de hydraulische en de biologische factoren en processen. De veranderingen teweeggebracht in het sediment door biologische processen en organismen zijn complex en het gedrag van cohesieve sedimenten in intergetijdengebieden kan dan ook niet louter voorspeld worden op basis van fysische factoren alleen. Organismen ingegraven in het sediment of levend op de bodem kunnen ofwel de erosiegevoeligheid ervan vergroten, verkleinen ofwel geen effect hebben. In de literatuur worden volgende biologische invloeden vermeld (Paterson, 1997):

- Door o.a. bioturbatie (doorwoeling van de bodem door organismen met als gevolg

een doordringende verandering van onder meer structuur, textuur en samenstelling van het sediment) en door de opvullingen van onregelmatigheden en holtes in de bodem en tussen de sedimentkorrels met microbiotische matten en polymeer secreties verandert de hydraulische ruwheid, wat een invloed heeft op de stroming boven de bodem en dus ook op de bodemschuifspanning.

- Netwerkvormende organismen zoals macrophyten en micro-organismen (fungi, bacteriën, cyanobacteriën en algen) en de productie van extracellulaire polymerische substanties door organismen vergroten de bodemstabiliteit.
- De aanwezigheid van in het sediment ingegraven macrofauna kan de bodemstabiliteit versterken of verzwakken. Zo hebben Meadows & Tait (1989) en Meadows et al. (1990) aangetoond dat *Corophium volutator* en *Nereis diversicolor* de erosieweerstand van het sediment kunnen vergroten. De verhoging van de sedimentstabiliteit wordt uitgelegd door de afscheiding van secreties die de gangen versterken, door compactie en door verlaging van het watergehalte van het sediment. Deze bevindingen zijn tegengesteld aan de resultaten van andere *in situ* experimenten (Gerdol & Hughes, 1994), waaruit blijkt dat door de aanwezigheid van de ampiphoda *Corophium volutator* enerzijds het watergehalte van het sediment verhoogt (en dus de stabiliteit verkleint) en anderzijds de hoeveelheid diatomeeën en bacteriën afneemt door begrazing. Deze laatsten hebben een verhogend effect op de stabiliteit van de sedimenten, zoals uit de hier voorgestelde meetresultaten blijkt.

In deze bijdrage worden de resultaten van sediment- en benthosmetingen voorgesteld, die uitgevoerd werden in april en september 1997 op het Groot Buitenschoor, het Galgenschoor en het Paardenschor, alle gelegen in de Beneden-Zeeschelde; een gedetailleerde beschrijving wordt gegeven in Fettweis et al. (1998). Deze metingen kaderen in het door AWZ - afdeling Zeeschelde opgezette hydraulisch-sedimentologisch studieprogramma van het containerdok West (Deurganckdok), zie IMDC (1998), en werden voornamelijk uitgevoerd om de waarde van de kritische erosieschuifspanning van cohesieve sedimenten en haar ruimtelijke en temporele variabiliteit in de intergetijdengebieden van de Beneden-Zeeschelde te bepalen. Deze kritische erosieschuifspanning is een belangrijke parameter bij het analyseren van de slibdynamiek en bij het opstellen en kalibreren van numerieke slibtransportmodellen. Het belang van dergelijke metingen is echter ruimer en kan b.v. ook gevonden worden in het feit dat vele polluenten zich vasthechten aan sedimentdeeltjes in de bodem van b.v. estuaria en kustzones (Jespers et al., 1997). Door de weerstand tegen erosie te kennen, kan de vraag beantwoord worden of en hoe deze sedimenten in suspensie gebracht kunnen worden bij de normaal heersende bodemschuifspanningen of bij extreme condities (zoals stormvloeden).

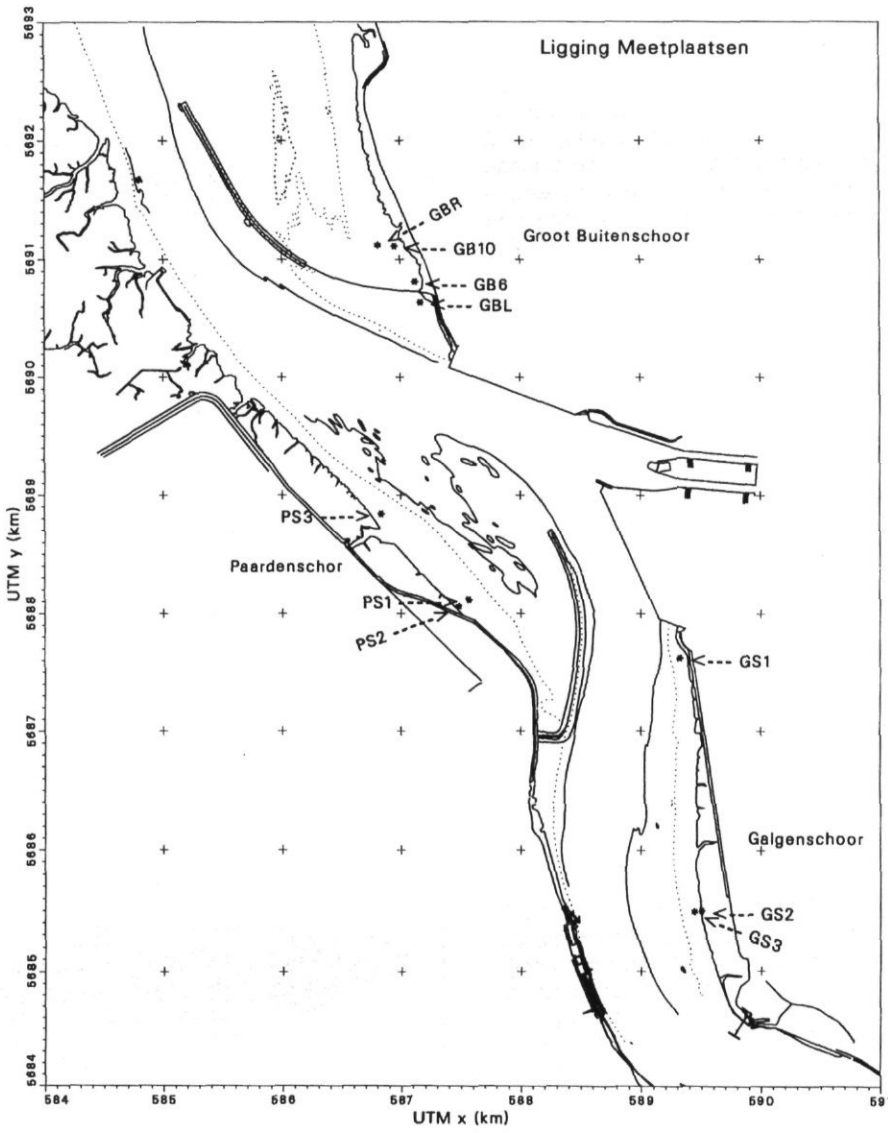
In het artikel zal ingegaan worden op de resultaten van de opgemeten fysische (densiteit, kritische erosieschuifspanning, korrelgrootteverdeling, organisch stofgehalte) en biologische parameters (microphytobenthos, zoobenthos) en zullen verbanden voorgesteld worden tussen de kritische erosieschuifspanning en de sedimentsamenstelling, de densiteit van de bodem, de aanwezigheid van pigmenten en zoobenthos. De erosiegevoeligheid werd gemeten voor de toplaag van de bodem; de verbanden die voorgesteld worden zijn daarom enkel geldig voor de bovenste niet geconsolideerde sedimentlaag. Een meer gedetailleerde analyse van deze metingen is te vinden in Ysebaert et al. (*submitted*).

2. MEETPLAATSEN

De metingen werden uitgevoerd tijdens laagwater op het Groot Buitenschoor (GB), het Galgenschoor (GS) en het Paardenschor (PS), alle gelegen in de Beneden Zeeschelde, zie figuur 1. Deze intergetijdengebieden zijn gesitueerd in de mesohaliene en de zone van maximale turbiditeit van het estuarium. Om de ruimtelijke variabiliteit van de erosie- en sedimentkarakteristieken te kunnen begroten, werden in elk van deze gebieden de metingen uitgevoerd in minimum een drietal locaties. Op elke locatie zijn in drie sublocaties in een straal van ongeveer 10 meter metingen uitgevoerd.

Op het Groot Buitenschoor werden metingen op 4 verschillende locaties uitgevoerd. De locaties GBR en GB10 liggen ongeveer 300 m en de locatie GB6 op ongeveer 50 m ten noorden van de leidam. De locatie GBL ligt ongeveer 100 m ten zuiden van de leidam. Op het Galgenschoor en het Paardenschor werden op drie locaties metingen uit-

Figuur 1: Ligging van de meetlocaties in de Beneden-Zeeschelde op het Groot Buitenschoor (GBR, GBL, GB6 en GB10), het Galgenschoor (GS1, GS2 en GS3) en het Paardenschor (PS1, PS2 en PS3).



gevoerd. De locatie GS1 ligt juist stroomopwaarts van de Europaterminal, terwijl de locaties GS2 en GS3 ongeveer 2 km ten zuiden hiervan liggen i.e. ter hoogte van de Plaat van Lillo. De locaties PS1 en PS2 liggen ter hoogte van de Plaat van Doel en de locatie PS3 ongeveer 1 km meer noordelijk, i.e. ter hoogte van de Schaar van Ouden Doel.

De meetlocaties op het Groot Buitenschoor zijn "hoog" gelegen (tussen 4.03 en 4.73 m TAW) en worden enkel gedurende een kort deel van de getijcyclus overspoeld, i.e. 0-2 uren gedurende een doodtij en 2-3 uren gedurende een springtij. Op het Galgenschoor zijn de locaties "laag" gelegen (tussen 1.04 en 2.62 m TAW); de meetplaatsen GS1 en GS3 staan daar ongeveer 10 uur onder water gedurende een doodtij en 9 uur gedurende een springtij, terwijl locatie GS2 ongeveer 6 uur per getij overspoeld wordt. Op het Paardenschor zijn de locaties op een "gemiddelde" hoogte gelegen (tussen 2.42 en 3.73 m TAW) t.o.v. deze van het Groot Buitenschoor en het Galgenschoor; de overstromingsduur is hier gelegen tussen 3 uur tijdens een doodtij en 4 uur tijdens een springtij voor PS2 en PS3 en 6 uur per getij voor PS1. Bij de hoog (>4 m TAW) en laag (±1 m TAW) gelegen plaatsen is de overspoelingsduur sterker beïnvloed door de tijamplitude (doodtij - springtij) dan op de tussenliggende plaatsen van het slik. Op de laag gelegen plaatsen (±1 m TAW) neemt de overspoelingsduur toe met afnemende tijamplitude, terwijl op de hoger gelegen plaatsen de overspoelingsduur toeneemt met stijgende tijamplitude. Deze verschillen zijn het gevolg van het verschil in vorm tussen een doodtij- en een springtijcurve en van het feit dat tijdens een doodtij de laagwaters hoger en de hoogwaters lager zijn dan tijdens een springtij. De meetlocaties op het Groot Buitenschoor komen gedurende enkele getijen (tijdens doodtij) droog te staan, terwijl de meetlocaties op de twee andere slikken tijdens elk getij overspoeld worden.

Parallel met de erosie- en benthosmetingen, werden door het KBIN boorkernen (Ø 8 cm) genomen op dezelfde locaties. De bemonsterde diepte bedroeg 30 of 60 cm afhankelijk van de densiteit. De sedimenten in de boorkernen werden geanalyseerd over de diepte op densiteit, korrelgrootte en accumulatiesnelheid. Een beschrijving van de gebruikte analysetechnieken en de interpretatie van de resultaten kan gevonden worden in Wartel et al. (1998). Samenvattend kan vermeld worden dat de accumulatiesnelheid duidelijk het grootst is op het Groot Buitenschoor achter de leidam (GB10: 0.73 g/cm²/jaar of 4.47 mm/jaar; een positieve waarde wijst op netto aangroei). Op het Galgenschoor en het Paardenschor zijn vergelijkbare accumulatiesnelheden gevonden; de gemiddelde waarde bedraagt hier 0.52 g/cm²/jaar (3.27 mm/jaar). Het is belangrijk te benadrukken dat accumulatie en afzetting hier een andere betekenis hebben. Afzetting geeft een tijdelijke stockage van sedimentdeeltjes op de bodem aan, terwijl accumulatie gedefinieerd wordt als de netto som van vele afzettings- en erosiecycli (McKee et al., 1983). Gegeven deze accumulatiesnelheden en de oppervlakte van het Groot Buitenschoor (165 ha waarvan 150 ha slik), het Galgenschoor (112 ha waarvan 64 ha slik) en het Paardenschor (95 ha waarvan 47 ha slik) kan de hoeveelheid slib die jaarlijks afgezet wordt op de slikken (tussen haakjes totale oppervlakte, i.e. slik en schor; er wordt aangenomen dat de accumulatiesnelheid hetzelfde is) geschat worden op: GB 11×10^3 t (12×10^3 t), GS 3.3×10^3 ton (5.8×10^3 t) en PS 2.4×10^3 t (4.9×10^3 t). Het slikgebied van het Groot Buitenschoor omvat ook de (zandige) Ballastplaat, zodat de slibhoeveelheid vermoedelijk overschat wordt.

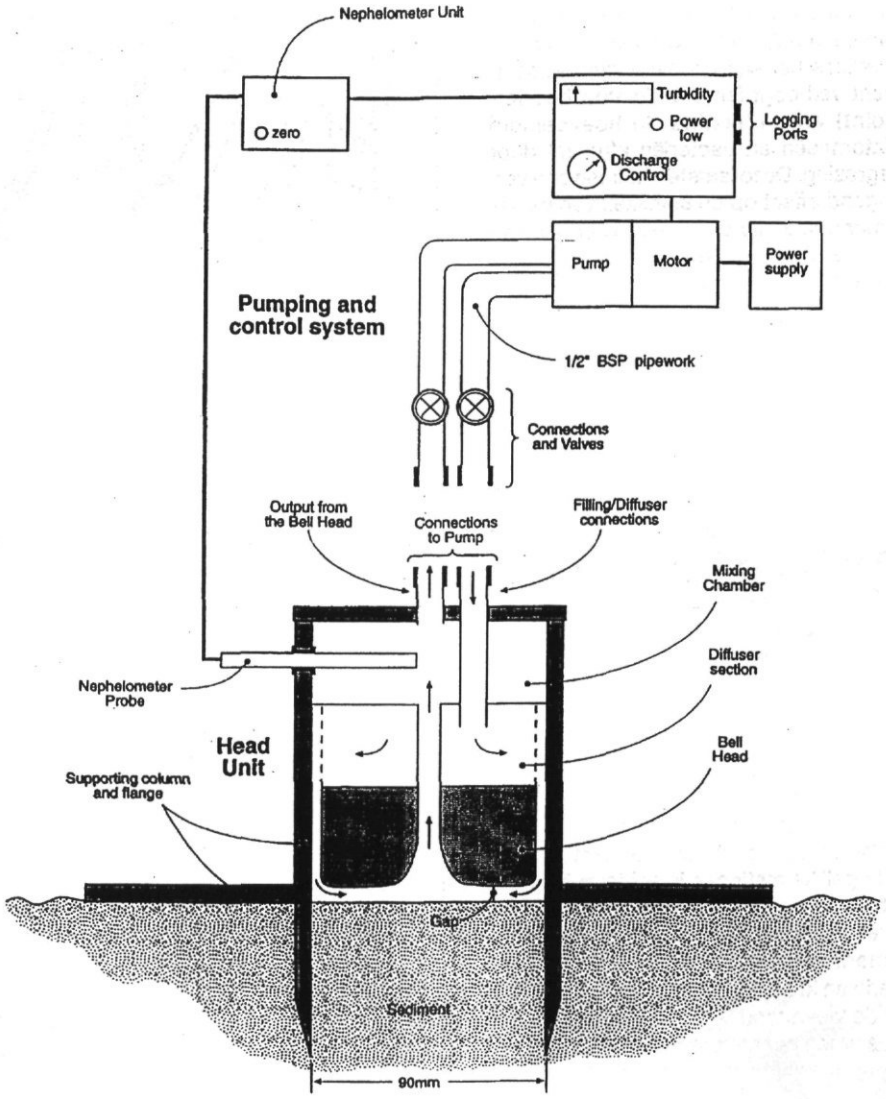
3. MEETPROCEDURE

De metingen werden zowel tijdens het voorjaar (8 tot 10 april 1997) als tijdens de late zomer (2 tot 4 september 1997) uitgevoerd. Aldus konden seizoengebonden variaties tengevolge van een andere biologische en/of fysische samenstelling op de erosiekarakteristieken geëvalueerd worden. Om een vergelijking mogelijk te maken tussen de resultaten van beide meetcampagnes werd getracht om bij beide campagnes dezelfde meetpunten te gebruiken.

3.1. Erosiegevoeligheidsmetingen

De erosiegevoeligheid werd gemeten met behulp van het SedErode toestel; deze metingen werden uitgevoerd door HR Wallingford (Mitchener, 1997). Het principe van SedErode is dat gekende bodemschuifspanningen (debieten) opgelegd worden terwijl de reactie van de bodem (toenemende turbiditeit) wordt gemeten. Hieruit kan de kritische erosieschuifspanning afgeleid worden. Een schets van het meetinstrument wordt gegeven in figuur 2; voor een gedetailleerde technische beschrijving

Figuur 2: Belangrijkste onderdelen van het SedErode meetsysteem, voor de in situ *bepaling van de kritische erosieschuifspanning van cohesieve sedimenten (Williamson & Ockenden, 1996).*



wordt verwezen naar Williamson & Ockenden (1996).
Gedurende een erosiemeting wordt het debiet en dus ook de bodemschuifspanning geleidelijk vergroot totdat er een sprong te observeren valt in de turbiditeitskromme. Dit is het moment waarop de kritische bodemschuifspanning voor erosie juist wordt overschreden en de bodemlaag begint te eroderen. Een verdere toename van de schuifspanning leidt tot verdere erosie van de sliblaag. Het beginpunt van kritische oppervlakte-erosie is berekend als het gemiddelde van twee toegepaste schuifspanningen, m.n. de stap voor initiatie van de erosie en deze na erosie. De kritische schuifspanning is het gemiddelde van deze twee waarden en wordt gebruikt als schatting voor de kritische schuifspanning voor erosie. Met het SedErode instrument wordt de bovenste laag van de bodem geërodeerd, dit zijn de bovenste mm. Uit de metingen kan dus geen informatie gehaald worden over de erosiesterkte van dieper gelegen en meer geconsolideerde lagen. Een voordeel van het SedErode instrument is dat een meting op een korte tijd kan gebeuren, zodat meerdere metingen per droogval kunnen uitgevoerd worden.

3.2. Sediment-, benthos- en pigmentmetingen

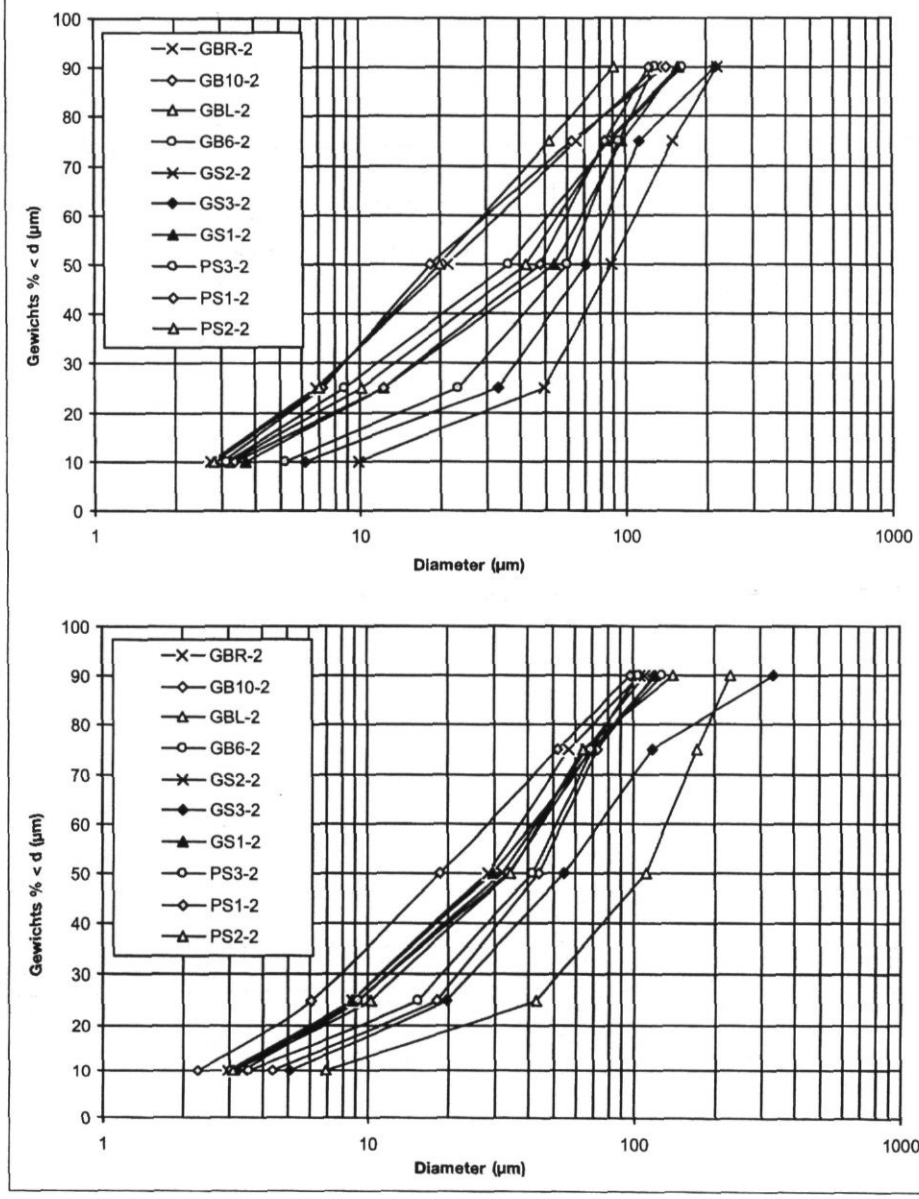
Per meetlocatie werden een aantal cores genomen. De cores voor sedimentanalyse (Ø 2 cm) werden opgedeeld in verschillende dieptes. De samenstelling (korrelgrootte, kleigehalte, slibgehalte, organisch stofgehalte) werd bepaald voor de bovenste 0.5 en 10 cm van de bodem (mengmonsters van 3 replica's). De korrelgrootteverdelingen werden bepaald met een Malvern Mastersizer R toestel (laserdiffractietechniek). De monsters van de bovenste laag van de bodem kunnen als representatief beschouwd worden voor het sediment waarvoor de erosiegevoeligheid werd opgemeten. De analyses van de bovenste 10 cm geven een gemiddeld beeld van de bodem op de slikken. Deze analyses werden uitgevoerd aan het Instituut voor Natuurbehoud (IN).
Voor de zoobenthosanalyses werden cores (Ø 4.5 cm) van de bovenste 10 cm gezeefd over de zeeffracties 1 mm, 0.5-1 mm en 0.25-0.5 mm. Alle individuen van het benthos werden gedetermineerd tot op soortniveau, behalve Oligochaeta, Nematoda en Copepoda. De biomassa werd bepaald aan de hand van het asvrijdrooggewicht (AFDW), bekomen door het asgewicht (na verassing gedurende 2 uur bij 550 °C) af te trekken van het drooggewicht (na 12 uur drogen bij 105 °C). Deze analyses werden uitgevoerd aan het IN.
Op iedere locatie werd tevens de bovenste 0.3 cm van de bodem afgeschraapt. Van deze stalen werd de densiteit en de korrelgrootteverdeling bepaald. De densiteit (*in situ* densiteit) werd bepaald door een gekend volume aan sediment te wegen. De mediane korrelgroottes en de korrelgrootteverdelingen van deze stalen werden met behulp van een Coulter[R] LS Particle Size Analyser bepaald. Deze twee laatste analyses werden uitbesteed aan het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout.
Per meetlocatie werd ook een core (Ø 2 cm) genomen voor pigmentanalyse. De geanalyseerde pigmenten zijn chlorofyl a (chl a) en fucoxantine. De analyses werden uitbesteed aan de Sectie Mariene Biologie van de Universiteit Gent. De gebruikte analyse is een aangepaste methode van Mantoura en Llewellyn (1983).

4. MEETRESULTATEN

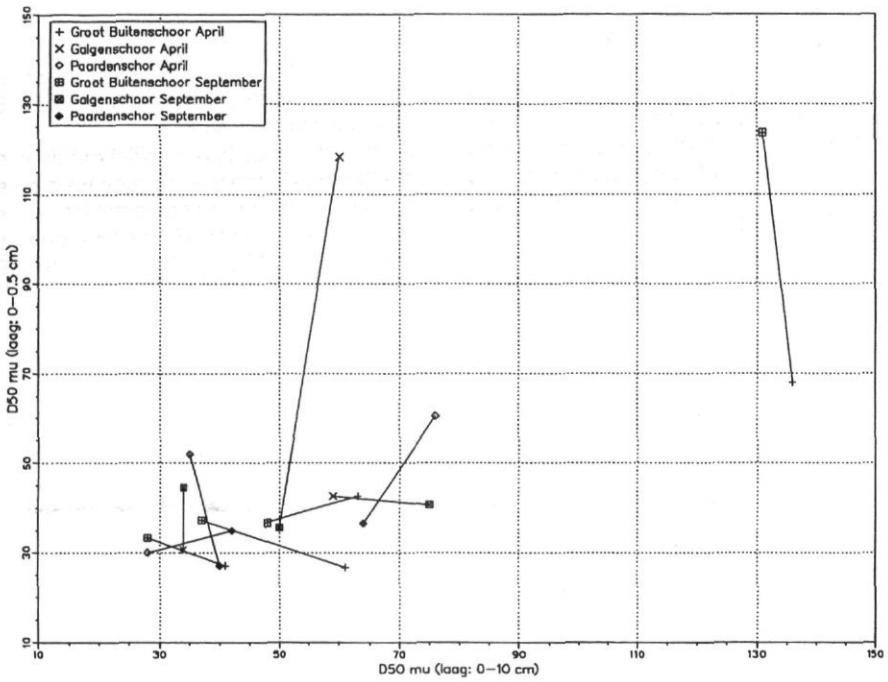
4.1. Sedimentsamenstelling

Een samenvatting van de sedimentanalyses kan gevonden worden in tabel 1 en figuren 3 en 4. Nagenoeg alle locaties (uitgezonderd GBL) hebben een lage mediane korrelgrootte (D50<100 ìm) en een hoog slibgehalte (>40 vol. %) en kunnen geklasseerd worden als slibbodems. Het slibgehalte is meestal iets groter en de D50 meestal iets kleiner in de bovenste 0.5 cm dan in de bovenste 10 cm van de bodem; uitzonderingen zijn GS2 (Galgenschoor) en PS1 (Paardenschor) in april.
Uit de data en de figuren blijkt dat de sedimenten op de meeste locaties weinig verschillen vertonen in samenstelling tussen april en september. Uitzonderingen zijn locaties GBL, GS2 en PS1: Op locatie GBL was het sediment in de bovenste 0.5 cm beduidend slibrijker (+100%) in april dan in september, terwijl de samenstelling van de bovenste 10 cm nauwelijks wijzigde. Ter hoogte van locaties GS2 en PS1 was de bovenlaag in april relatief zandiger dan in september; ook hier wijzigde de samenstelling van de bovenste 10 cm weinig.
In april was het organische stofgehalte op

Figuur 3: (a) April- en (b) septembermeetcampagne: Korrelverdeling van de bovenste 0.3 cm van de bodem (GB? = Groot Buitenschoor, GS? = Galgenschoor, PS? = Paardenschoor). De meetwaarden hebben betrekking op één sublocatie.



Figuur 4: Sedimentanalyses van de bodem, bovenste 0.5 cm tov bovenste 10 cm. Dezelfde locaties zijn met elkaar verbonden: (a) Volume % slib en (b) D50 (in µm).



de meeste locaties hoger (3-12 gew. %) dan in september (3-7 gew. %), zie tabel 1.
In tabel 2 wordt per locatie de gemiddelde waarde van de densiteit van het sediment van de bovenste 0.3 cm gegeven voor beide meetperiodes. Op het Groot Buitenschoor zijn de slibdensiteiten in april (1256-1493 kg/m³) ongeveer 10 tot 20% lager dan in september (1477-1783 kg/m³). Het slib van het Groot Buitenschoor heeft in april de laagste densiteiten van de drie meetgebieden, terwijl in september de hoogste densiteiten hier (locatie GBL) gevonden werden. De densiteiten van het slib op het Galgenschoor zijn hoger in april (1546-1811 kg/m³) dan in september (1402-1445 kg/m³). Op de Paardenschor locaties PS1 en PS3 zijn de densiteiten weinig verschillend in april (1507-1642 kg/m³) en september(1464-1531 kg/m³). In locatie PS2 heeft het slib een ongeveer 20% lagere densiteit in april (1306 kg/m³) dan in september (1566 kg/m³). Figuur 5 toont aan dat het slibgehalte omgekeerd gecorreleerd is met de densiteit en dit voor een significantieniveau a kleiner dan 1% (aantal stalen n=20, R=-0.79, α=0.003%). Tussen de D50 en de densiteit is er ook een duidelijke correlatie (R=0.79, n=20, α=0.03%).

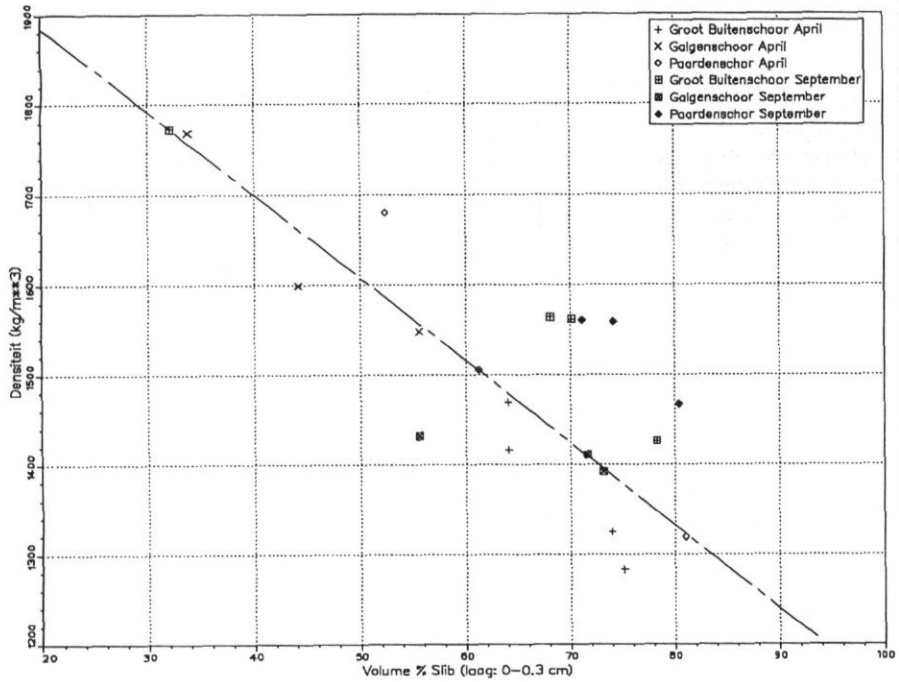
Tabel 1: Overzicht sedimentanalyses (0-0.5 en 0-10 cm; vol. = volume; gew. = gewicht; org. = organisch stofgehalte). De meetwaarden zijn gemiddeld per locatie.

	April					September				
	D50 (µm)		Slib (vol. %) <63 (µm)		org. gew. %	D50 (µm)		Slib (vol. %) <63 (µm)		org. gew. %
	0-0.5 cm	0-10 cm	0-0.5 cm	0-10 cm	0-0.5 cm	0-0.5 cm	0-10 cm	0-0.5 cm	0-10 cm	0-0.5 cm
GBR	27	41	74	62	12	33	28	73	75	7
GB10	43	63	62	50	9	37	48	71	59	5
GB6	27	61	72	51	12	37	37	70	67	7
GBL	68	136	48	23	5	124	131	27	23	3
GS1	43	59	63	52	7	41	75	63	44	5
GS2	118	60	29	52	3	36	50	72	60	7
GS3	31	34	72	66	10	45	34	62	68	7
PS1	52	35	58	69	6	27	40	77	66	7
PS2	30	28	76	75	8	35	42	71	64	6
PS3	61	76	52	41	3	37	64	71	49	5

Tabel 2: Hoogteligging (z), densiteit van de bovenste 0.3 cm (ρ), kritische erosieschuifspanning van de toplaag (τ_{cr}) en volume % slib van de bovenste 0.3 cm. De meetwaarden zijn gemiddeld per locatie.

		April			September		
	z (m TAW)	ρ (kg/m³)	τ_{cr} (Pa)	Slib (vol. %) <63 (µm)	ρ (kg/m³)	τ_{cr} (Pa)	Slib (vol. %) <63 (µm)
GBR	4.03	1315	0.43	74	1477	0.26	78
GB10	4.67	1256	0.42	75	1589	0.29	68
GB6	4.73	1332	0.26	64	1559	0.27	70
GBL	4.19	1493	0.33	64	1783	0.29	32
GS1	1.08	1563	0.26	56	1445	0.24	72
GS2	2.62	1811	0.30	34	1402	0.29	73
GS3	1.04	1546	0.30	44	1432	0.25	56
PS1	2.42	1507	0.35	61	1464	0.25	80
PS2	3.73	1306	0.30	81	1566	0.26	74
PS3	3.32	1642	0.32	52	1531	0.26	71

Figuur 5: Sedimentanalyses van de toplaag van de bodem (bovenste 0.3 cm). Densiteit i.f.v. volume % slib. (n = 20, R = -0.79, significantieniveau = 0.003%).



Het significantieniveau α van een correlatie geeft de waarschijnlijkheid aan dat de nulhypothese geldig is. De nul-hypothese zegt dat de correlatie tussen de twee gekozen grootheden statistisch niet zinvol (of significant) is. Zij kan gedefinieerd worden door een correlatiecoëfficiënt R_0 te schatten in functie van het aantal (x,y)-waarden (n) en een betrouwbaarheidsniveau (1-α). Indien de correlatiecoëfficiënt R kleiner is dan R_0, dan is de correlatie niet significant verschillend van de nul-hypothese bij het geschatte betrouwbaarheidsniveau (1-α). De correlatie tussen b.v. 20 (x,y)-waarden is significant verschillend van de nul-hypothese bij een betrouwbaarheidsniveau van 99% (of een significantieniveau van 1%) indien de correlatiecoëfficiënt R groter is dan R_0=0.56 (zie Emery & Thomson, 1998). Een kleinere waarde van a wijst dus op een significantere correlatie.

4.2. Kritische erosieschuifspanning

In tabel 2 is per locatie de kritische erosieschuifspanning te vinden voor beide meetperiodes. De kritische erosieschuifspanning in april varieert tussen 0.26 en 0.43 Pa, terwijl in september waarden van 0.24 tot 0.29 Pa gevonden werden. In april werden tot 65% hogere kritische erosieschuifspanningen gemeten dan in september en dit vooral op het Groot Buitenschoor en het Paardenschor. Uitschieters zijn de locaties GBR en GB10 (Groot Buitenschoor) en locatie PS1 (Paardenschor). Op het Galgenschoor zijn de verschillen tussen de twee meetcampagnes geringer: in april waren de kritische erosieschuifspanningen maximaal 20% (GS3) groter dan in september.

4.3. Pigmenten

De pigmenten chlorofyl a en fucoxantine wijzen op het voorkomen (biomassa) van microphytobenthos, waarbij fucoxantine specifiek wijst op de aanwezigheid van diatomeeën. Zowel tussen de verschillende locaties als tussen de twee meetperioden worden grote verschillen waargenomen, zie tabel 3.
Op het Groot Buitenschoor en het Paardenschor zijn de waarden van zowel chl a als fucoxantine tien keer hoger in april dan in september. De hoge gehaltes aan pigmenten in april houden verband met de voorjaarsbloei van micro-organismen (algen, diatomeeën). Opvallend zijn de zeer lage waarden aan pigmenten op het Galgenschoor tijdens beide meetperiodes. Een verklaring voor de grote verschillen tussen de locaties in april moet voornamelijk gezocht worden in de hoogteligging van het meetpunt (een langere overspoelingsduur betekent een grotere lichtlimitatie). Dit komt ook tot uiting in de zeer significante correlatie tussen het pigmentgehalte en de hoogteligging (chl a: R=0.74, $\alpha=0.5\times10^{-4}$ %, n=29; fucoxantine: R=0.73, $\alpha=0.1\times10^{-4}$ %, n=29). Binnen een meetlocatie werden ook grote verschillen waargenomen doordat o.a. de algenmatten in april al duidelijk aan het wegeroderen waren op het Groot Buitenschoor. Gezien de zeer lage waarden in september kunnen er geen significante variaties tussen de locaties waargenomen worden.

4.3. Benthos

De resultaten van de zoobenthosanalyses worden voorgesteld per zeeffractie; een overzicht wordt gegeven in tabellen 4 en 5. In totaal zijn 13 soorten benthos waargenomen op de 1 mm zeeffractie, met Annelida als dominante groep. In april worden minder soorten waargenomen dan in september en het Galgenschoor heeft het minst aantal soorten, het Paardenschor het hoogst. Het is ook op het Galgenschoor dat de zoobenthosdensiteit (aantal individuen per m²) het laagst was. Van verschillende soorten werd slechts één waarneming van één individu gedaan en deze kunnen dan ook als toevallige vondst beschouwd worden. Op de kleinere zeeffracties (0.25 en 0.5 mm) werden tevens Nematoda en Copepoda aangetroffen. Hierna volgt een korte bespreking per zeeffractie.

Fractie >1 mm

In april is de zoobenthosdensiteit (#/m², aantal individuen per m²) gedomineerd door Oligochaeta, terwijl in september, afhankelijk van de beschouwde locatie, *Corophium volutator* en *Heteromastus filiformis* de meest dominante soorten zijn.
De zoobenthosdensiteiten zijn veel lager in april dan in september, zie tabel 5. De totale densiteit varieert tussen 0 en 10400 #/m² in april en 80 en 36800 #/m² in september. Opvallend zijn de lage densiteiten op het Galgenschoor; enkel in locatie GS2 wordt een vergelijkbare densiteit waargenomen als op de andere slikgebieden. De

Tabel 3: Gemiddeld gehalte aan pigmenten per meetlocatie, april- en septembercampagne (bovenste sedimentlaag 0-0.5 cm).

	April		September	
	chl a (µg/g)	fucoxantine (µg/g)	chl a (µg/g)	fucoxantine (µg/g)
GBR	66	23	5	2
GB10	68	24	4	2
GB6	86	31	7	2
GBL	26	10	6	2
GS1	4	1	2	1
GS2	2	1	4	1
GS3	8	2	4	2
PS1	22	9	4	2
PS2	43	19	4	1
PS3	14	6	4	2

hoogste benthosdensiteiten worden waargenomen op het Paardeschor.

Fractie 0.5-1 mm

In april wordt het zoobenthos gedomineerd door Oligochaeta, met vooral op het Groot Buitenschoor een codominantie van *Manayunkia aestuarina*. Nematoda zijn enkel op PS1 en GBL in belangrijke mate aanwezig. In september blijven Oligochaeta dominant, maar *Manayunkia aestuarina* is volledig verdwenen. Net als in de fractie >1 mm heeft *Corophium volutator* nu een belangrijk aandeel in de Groot Buitenschoor en Paardenschor locaties.
De zoobenthosdensiteiten zijn veel lager in april dan in september, zie tabel 5. De totale densiteit varieert tussen 400 en 78200 #/m² in april en 5700 en 148200 #/m² in september. Net als bij de >1 mm fractie valt ook hier de lage densiteit op de Galgenschoor locaties GS1 en GS3 op.

Fractie 0.25-0.5 mm

In april wordt het zoobenthos van de fractie 0.25-0.5 mm gedomineerd door Nematoda, en in mindere mate door *Manayunkia aestuarina* en Copepoda. In september is de dominantie verschillend van locatie tot locatie, maar Oligochaeta zijn relatief belangrijker dan in april. Andere belangrijke soorten zijn Nematoda, *Corophium volutator* en Copepoda.
De zoobenthosdensiteiten zijn, net zoals bij de andere fracties, veel lager in april dan in september, zie tabel 5. De totale densiteit varieert tussen 600 en 473000 #/m² in april en 53100 en 788700 #/m² in september. Net als bij de andere fracties vallen ook hier de zeer lage densiteiten op het Galgenschoor op. De hoogste zoobenthosdensiteiten worden in april waargenomen op het Paardenschor en in september op het Groot Buitenschoor.

5. EROSIEGEVOELIGHEID: FYSISCHE EN BIOLOGISCHE FACTOREN

De hier voorgestelde data laten niet toe om een eenduidig verband af te leiden tussen het slibgehalte, de D50, de densiteit of de biologische activiteit van de sedimenten en de kritische erosieschuifspanning. Al deze parameters hebben een invloed op de erosieweerstand van de bodem, wat een interpretatie van de resultaten moeilijk maakt. Bij sommige resultaten is echter één van bovengenoemde parameters bijzonder uitgesproken aan- of afwezig. Dit laat dan toe om het effect van deze parameter(s) afzonderlijk te bekijken. Volgende conclusies worden geformuleerd:

- Bij de resultaten 'met algenbloei' (dit zijn de aprilresultaten van het Groot Buitenschoor en van het Paardenschor) kan een omgekeerde correlatie waargenomen worden tussen sedimentdensiteit en kritische erosieschuifspanning, zoals te zien in figuur 6 bij de meetresultaten van het

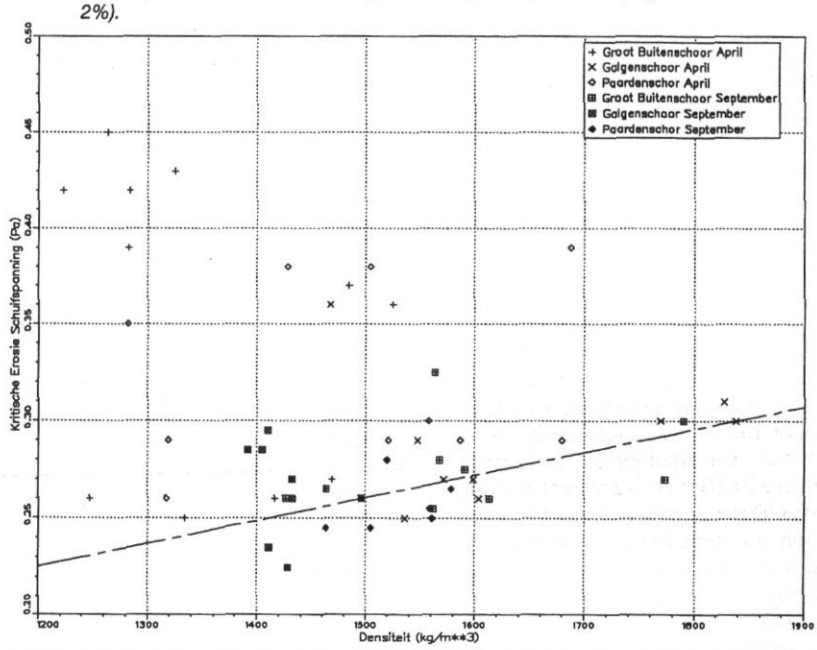
Tabel 4: Soortensamenstelling van het zoobenthos op de 1 mm fractie voor de april- en septembercampagne. x = aanwezig; - = afwezig; 1 = waarneming van één individu. (GB=Groot Buitenschoor, GS=Galgenschoor, PS=Paardenschor)

	April			September		
	GB	GS	PS	GB	GS	PS
Annelidae						
Eteone longa	-	-	-	-	-	1
Heteromastus filiformis	1	-	x	x	x	x
Manaeyunkia aestuarina	x	-	1	x	-	-
Nereis diversicolor	x	x	x	x	x	x
Oligochaeta (undet.)	x	x	x	x	x	x
Polydora ligni	-	-	-	1	1	x
Pygospio elegans	1	1	x	x	x	x
Crustacea						
Corophium lacustre	-	-	1	-	-	-
Corophium volutator	x	1	x	x	x	x
Crangon crangon	-	-	-	-	-	x
Mollusca						
Hydrobia ulvae	-	-	1	x	x	x
Macoma balthica	1	-	x	x	x	x
Mya arenaria	-	-	1	-	-	-

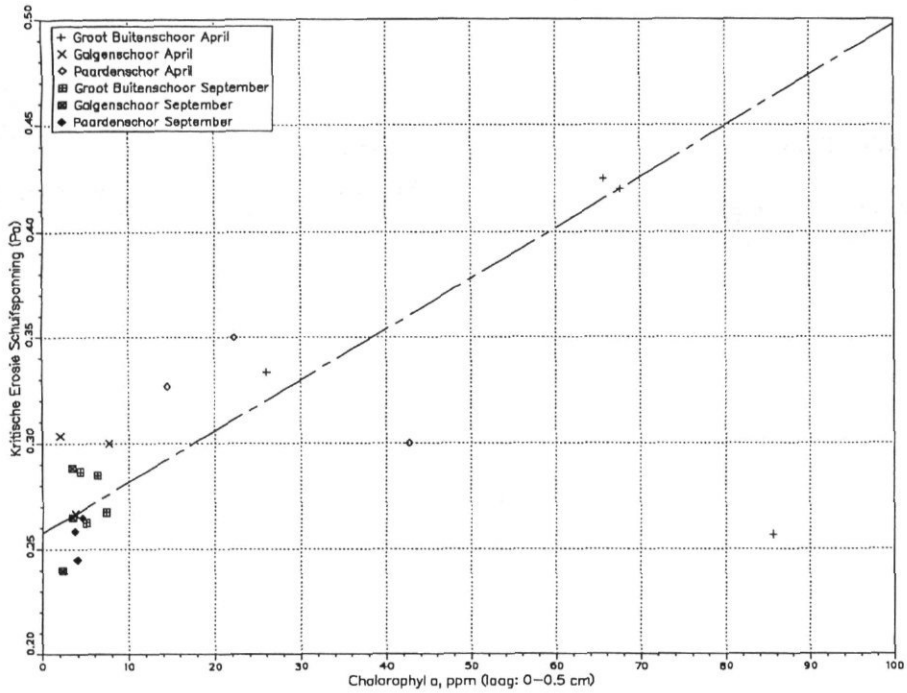
Tabel 5: Zoobenthosdensiteit (in 1000 #/m²) per meetlocatie, tijdens de april- en septembercampagne.

	April			September		
	> 1 mm	0.5-1 mm	0.25-0.5 mm	> 1 mm	0.5-1 mm	0.25-0.5 mm
GBR	5.7	50.7	229.9	15.2	148.2	788.7
GB10	0.5	27.0	138.1	12.0	60.8	330.0
GB6	0.5	32.9	167.0	8.5	100.1	518.1
GBL	2.4	68.3	194.9	23.4	61.2	536.9
GS1	0.0	0.4	0.6	1.4	5.7	76.4
GS2	5.6	45.5	11.1	14.1	111.4	256.8
GS3	0.5	4.0	2.3	0.08	5.7	53.1
PS1	10.4	78.2	473.0	34.5	58.0	374.5
PS2	1.9	21.2	319.0	20.9	38.2	315.8
PS3	5.4	27.5	88.9	36.8	54.8	144.3

Figuur 6: Kritische erosieschuifspanning i.f.v. densiteit. De regressielijn werd opgesteld met de resultaten met laag pigmentgehalte (chl a < 15 µg/g), dit zijn alle septemberresultaten en de aprilresultaten van het Galgenschoor (n = 13, R = 0.47, significantieniveau = 2%).



Figuur 7: Kritische erosieschuifspanning (locatie gemiddelde waarde) i.f.v. chlorofyl a gehalte. (n = 20, R = 0.58, significantieniveau = 0.8%).



Groot Buitenschoor: in april werden kritische erosieschuifspanningen van 0.43-0.26 Pa en densiteiten van 1256-1493 kg/m³ gemeten, terwijl de waarden in september 0.26-0.29 Pa en 1477-1589 kg/m³ bedroegen.

- Een toename van het zandgehalte (of afname van het slibgehalte) heeft als gevolg dat de densiteit van het sediment vergroot, zie figuur 5. Het effect van consolidatie op de densiteit en dus ook op de erosieschuifspanning kan hier verwaarloosd worden, omdat de hier voorgestelde erosie- en densiteitsmetingen enkel betrekking hebben op niet-geconsolideerd materiaal (toplaag). Uit de resultaten 'zonder algenbloei' (dit zijn de septemberresultaten en deze van het Galgenschoor) kan een verband tussen de sedimentdensiteit en de kritische erosieschuifspanning waargenomen worden, zie figuur 6. Bij een sediment met een lagere densiteit (lager zandgehalte) is de kritische erosieschuifspanning iets lager dan bij een sediment met een hogere densiteit. Dit verband is hier echter niet zeer duidelijk omdat grote spreidingen in de gegevens, zowel in termen van kritische erosieschuifspanning als van densiteit of slibgehalte, vastgesteld werden. Deze spreidingen kunnen grotendeels verklaard worden door de natuurlijk optredende variabiliteit in zowel kritische erosieschuifspanning als densiteit, tengevolge van de heterogeniteit van de meetplaatsen zelf. Volgens Mitchener et al. (1996) heeft een toenemend zandgehalte in het slib een compactie van het sediment tot gevolg en dus zowel een toename van de densiteit (kg/m³) als van de erosieweerstand (kritische erosieschuifspanning). Met behulp van laboratoriummetingen kon vastgesteld worden dat voor een welbepaald sediment en voor een opgelegde schuifspanning de erosiesnelheid een unieke functie is van de *in situ* densiteit (of het watergehalte) van het sediment en afneemt met toenemende densiteit (Jespers et al., 1997).
- Met de gemeten densiteitsextrema (september) van 1400 en 1800 kg/m³ komen zandgehaltes van ongeveer 25 vol. % en 70 vol. % en kritische erosieschuifspanningen van 0.25 en 0.30 Pa overeen. Bij de resultaten van sliberosiemetingen in een stroomgoot (Toorman & Luyckx, 1997) werd vastgesteld dat met toenemend zandgehalte (van 0 tot 30%) de kritische erosieschuifspanning afneemt (van 0.79 tot 0.56 Pa). Deze verschillende resultaten zijn te wijten aan de volledig andere 'omgeving'. In het laboratorium werd getracht om een bodem op te bouwen die afwisselend uit zand- en sliblaagjes bestond. Naast het feit dat dit zeer moeilijk uit te voeren was, verandert elke behandeling van sedimenten in een laboratorium de fysische, chemische en biologische structuur zodanig dat ook de erosiesterkte gewijzigd wordt (Widdows et al., 1998). Dit maakt dat een vergelijking tussen de resultaten van laboratorium en *in situ* metingen moeilijk is. Een ander verschil tussen de *in situ* en de laboratoriummetingen is de herkomst van het slib; voor de laboratoriummetingen werd slib gebruikt dat afkomstig was uit de toegangsgeul van de Kallosluis.
- De biologische invloed op de erosiesterkte van het sediment is duidelijk zichtbaar bij de in de lente optredende algenbloei (aanwezigheid van microphytobenthos). Dit is in overeenstemming met o.a. Paterson (1989) en Underwood *et al.* (1995), die vaststelden dat de mucus, uitgescheiden door epipelische diatomeeën, de cohesie van het sediment en dus ook de erosieweerstand vergroot. Toenamen van de gehalten van chl a met 40 ppm en van fucoxantine met 20 ppm doen de kritische erosieschuifspanning toenemen met ongeveer 0.1 Pa. In figuur 7 wordt de kritische erosieschuifspanning i.f.v. het chl a gehalte getoond (R=0.58, α=0.8%, n=20). Het verloop van het fucoxantinegehalte i.f.v. de kritische erosieschuifspanning is analoog (R=0.56, α=1.1%, n=20).
- Tussen de zoobenthosdensiteit en de kritische erosieschuifspanning kan geen duidelijk direct verband gevonden worden. Wel wordt in Ysebaert et al. (*submitted*) een indirect verband voorgesteld tussen het voorkomen van zoobenthos en de kritische erosieschuifspanning. Uit de hier voorgestelde data kan immers aangetoond worden dat de locaties met een hoog pigmentgehalte in april ook de hoogste dichtheden hebben, van een aantal typisch aan de oppervlakte voorkomende zoobenthossoorten in september (vooral *Corophium volutator*). Het bovenvermelde indirecte effect van het zoobenthos op de kritische erosieschuifspanning wordt aldus veroorzaakt door het weggrazen van het microphytobenthos door het zoobenthos. Gerdol & Hughes (1994) vermelden dat een toenemende begrazing door zoobenthos inderdaad het microphytobenthosgehalte doet verminderen.

De abiotische samenstelling (korrelgrootte, slibgehalte) van de sedimenten op de beschouwde intergetijdengebieden vertoont over het algemeen weinig verschillen tussen de seizoenen. Er werden wel grote verschillen in pigmentgehalte en in zoobenthosdensiteit en -diversiteit tussen de seizoenen waargenomen. Deze variaties in biologische parameters hebben, zoals de data duidelijk aantonen, een belangrijke invloed op de bodemsedimenten en dus ook op het materiaal in suspensie. Bij een hoger gehalte aan microphytobenthos op de bodem neemt de erosieweerstand van het sediment op de slikken toe en zal dus minder slib in suspensie gebracht kunnen worden. De erosieweerstand, die uitgedrukt wordt als een kritische erosieschuifspanning, is een belangrijke parameter bij het modelleren van slibtransport.

De resultaten van de hier besproken meetcampagnes vormen een voor de Beneden-Zeeschelde unieke dataset doordat in detail zowel de sedimentsamenstelling, de erosiesterkte en enkele biologische parameters opgemeten werden. De resultaten laten echter ook zien dat bijkomende metingen vereist zijn om nieuwe of duidelijke(re) verbanden tussen de grootheden te kunnen opstellen. Deze bijkomende metingen dienen zowel in tijd als in ruimte gespreid te

zijn om de natuurlijk optredende variaties van de parameters te kunnen omvatten. Een belangrijke vraag die immers (voor een groot stuk) onbeantwoord blijft (en die enkel door bijkomende data beantwoord kan worden), is: 'wat zijn de tijd- en ruimteschalen waarin deze variaties optreden en welke variaties zijn relevant en moeten gekend zijn om het langdurig cohesief sedimenttransport nauwkeurig te kunnen berekenen?'

DANKWOORD

De hier besproken metingen kaderen in het studieprogramma 'Containerdok West, Hydraulisch-Sedimentologisch Onderzoek'. Deze studie werd door IMDC nv uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, administratie Waterwegen en Zeewezen, afdeling Zeeschelde. De auteurs wensen hun dank te betuigen aan ir. E. Taverniers van de afdeling Maritieme Schelde (AWZ) voor de logistieke steun bij het meetprogramma en aan Prof. Dr. M. Vincx van de Universiteit Gent (Sectie Mariene Biologie) voor het uitvoeren van de pigmentanalyses.

LIJST MET SYMBOLEN EN AFKORTINGEN

AWZ	Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap – Administratie Waterwegen en Zeewezen
chl a	chlorofyl a
D50	mediane korrelgrootte (in mm)
GB	Groot Buitenschoor (GBR, GB6, GB10, GBL: naam van meetlocaties op het GB)
gew.	gewicht
GS	Galgenschoor (GS1, GS2, GS3: naam van meetlocaties op het GS)
IN	Instituut voor Natuurbehoud
KBIN	Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen
n	aantal stalen
org.	organisch stofgehalte
PS	Paardenschor (PS1, PS2, PS3: naam van meetlocaties op het PS)
R	correlatiecoëfficiënt
vol.	volume
z	hoogteligging van het meetpunt (m TAW)
α	significantieniveau van een correlatie (1-α: betrouwbaarheidsniveau)
ρ	densiteit van het sediment (kg/m³)
τ_{cr}	kritische erosieschuifspanning (Pa)
#	aantal individuen
#/m²	zoobenthosdensiteit (aantal individuen/m²)

REFERENTIES

EMERY J.W. & R.E. THOMSON. (1998) Data analysis methods in physical oceanography. *Pergamon Press, 634pp.*

FETTWEIS M., T. YSEBAERT, M. SAS & P. MEIRE. (1998). Containerkaai West, Hydraulisch-Sedimentologisch Onderzoek. Deelrapport 3: *In situ* metingen van de erosiegevoeligheid van slib in de Beneden-Zeeschelde, Winter en zomercampagne. *IMDC en IN Rapport, I/RA/11128/98.005/WFE.*

GERDOL V. & R.G. HUGHES (1994) Effect of *Corophium volutator* on the abundance of benthic diatoms, bacteria and sediment stability in two estuaries in southeastern England. *Marine Ecology Progress Series 114, 109-115.*

IMDC (1998). Containerdok West, Hydraulisch-Sedimentologisch Onderzoek: Eindrapport. *IMDC Rapport, I/RA/11128/98.029/MFE.*

JESPERS R., J. ROBERTS & W. LICK. Effects of bulk density on sediment erosion rates. *Water, Air and Soil Pollution 99, 21-31.*

MANTOURA, R.F.C. & C.A. LLEWELLYN (1983). The rapid determination of algal chlorophyll and carotenoid pigments and their breakdown products in natural water by reverse phase high performance liquid chromatography. *Analytica Chimica Acta 151, 297-314.*

MEADOWS P.S. & J. TAIT (1989). Modification of sediment permeability and shear strength by two burrowing invertebrates. *Marine Biology 101, 75-82.*

MEADOWS P.S., J. TAIT & S.A. HUSSAIN (1990). Effects of estuarine infauna on sediment stability and particle sedimentation. *Hydrobiologia 190, 263-266.*

McKEE B.A., C.A. NITTROUER & D.J. DeMASTER (1983). Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze river. *Geology, 11, 631-633.*

MEHTA A.J., E.J. HAYTER, W.R. PARKER, R.B. KRONE & A.M. TEETER (1989). Cohesive sediment transport. I Process description and II Application. *ASCE Journal of the Hydraulics Division 115(8), 1076-1112.*

MITCHENER H., H. TORFS & R.J.S. WHITEHOUSE (1996). Erosion of mud/sand mixtures. *Journal of Coastal Engineering 29.*

MITCHENER H. (1997). Scheldt estuary erodibility study. Winter Survey 8-10 april 1997 and summer survey 2-4 september 1997. *HR Wallingford Reports, May & November 1997.*

PATERSON D.M. (1989). Short-term changes in erodibility of intertidal cohesive sediments related to the migratory behaviour of epipelagic diatoms. *Limnology and Oceanography 34, 223-234.*

PATERSON D.M. (1997). Microbiological factors contributing the erosion resistance in natural cohesive sediments. In: *Cohesive Sediments, N. Burt, R. Parker & J. Watts (eds.), 215-229.*

TEETER A.M. (1992). Erosion of cohesive dredged material in open-water disposal sites. *US Army Engineering Waterways Experiment Station. DRP-1-07, Vicksburg.*

TOORMAN E. & G. LUYCKX (1997). Containerkaai-dok West, hydraulisch-sedimentologisch onderzoek. Erosiegevoeligheid van de bodemsedimenten, laboratoriumproeven. *KUL Rapport HYD/ET97.3.*

UNDERWOOD, G.J.C., D.M. PATERSON, & R.J. PARKES (1995). The measurement of microbial carbohydrate exopolymers from intertidal sediments. *Limnology and Oceanography, 40, 1243-1253.*

WARTEL S., M. SHAN CHEN & P. SCHOTTE (1998). Beneden-Zeeschelde, Linkeroever te Doel, Studie Containerdok-West: Gammadensitometrisch onderzoek, korrelgrootte onderzoek en radio-isotopen onderzoek. *Rapport Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, 36pp.*

WIDDOWS J., M.D. BRINSLEY, N. BOWLEY & C. BARRETT (1998). A benthic annular flume for *in situ* measurement of suspension feeding/biodeposition rates and erosion potential of intertidal cohesive sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science 46, 27-38.*

WILLLIAMSON H.J. & M.C. OCKENDEN (1996). ISIS: An instrument for Measuring Erosion Shear Stress *In situ*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science 42, 1-18.*

YSEBAERT, T., M. FETTWEIS, P. MEIRE, M. SAS, & H. MITCHENER (submitted). Spatiotemporal variations in the physical and biological characteristics of intertidal, cohesive sediments in the mesohaline part of the Schelde estuary.

M. FETTWEIS[1,3], T. YSEBAERT[2], M. SAS[1] en P. MEIRE[2,4]

[1] IMDC nv, Wilrijkstraat 37-45, B-2140 Antwerpen

[2] Instituut voor Natuurbehoud, Kliniekstraat 25, B-1050 Brussel

[3] Huidig adres: Beheerseenheid van het Mathematisch Model, Gulledelle 100, B-1200 Brussel

[4] Huidig adres: UIA, departement Biologie, Universiteitsplein 1, B-2610 Wilrijk