

HET VERBAND TUSSEN DE GEOMETRIE VAN DE GETIJDENDUINEN EN DE KENMERKEN VAN HET BODEMSEDIMENT IN DE MARITIEME SCHELDE

Veerle VANWESENBEECK*

1. INLEIDING

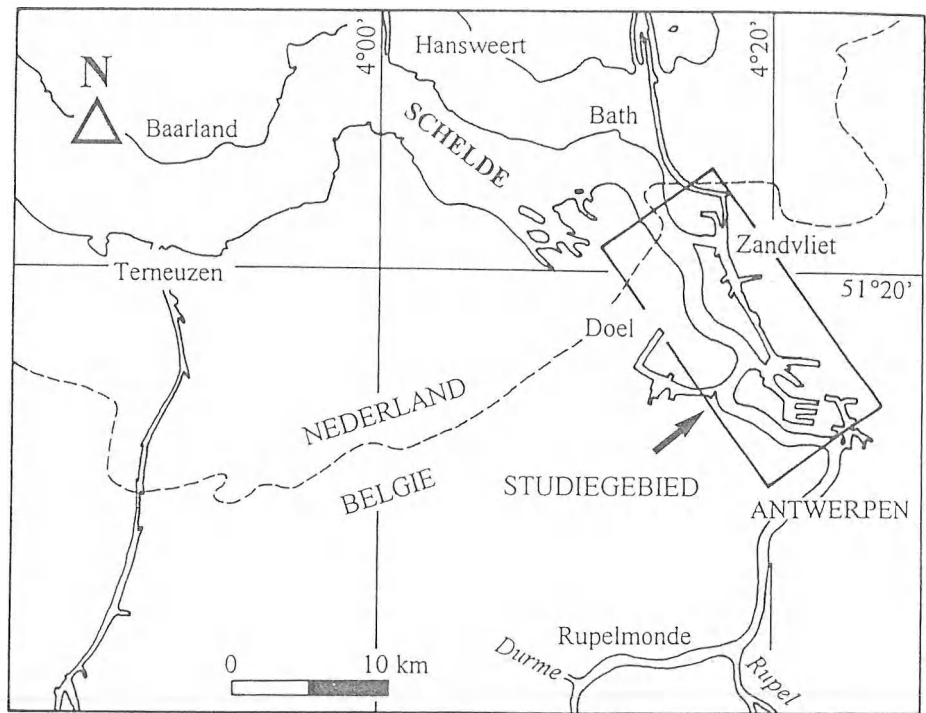
Het Schelde-estuarium vormt een bijzonder dynamisch gebied, zowel op fysisch (getijden, stromingen, golven), chemisch, biologisch als sedimentologisch vlak. Daarbij komt het drukke scheepvaartverkeer dat langsheen het estuarium de haven van Antwerpen bereikt. Er vinden onder invloed van de complexe hydrodynamische agentia aanzienlijke sedimentverplaatsingen plaats. Vanuit de scheepvaart is men sterk geïnteresseerd in de transportprocessen die zich op de Scheldebodem afspelen, onder meer omdat deze een indicatie geven over de snelheid waarmee de vaargeul zou kunnen dichtslibben en de richting waarin het sediment verplaatst zal worden. Intensief baggeren teneinde de vaargeul diep genoeg te houden is in dit gebied zeer noodzakelijk.

Onder invloed van de verschillende stromingen vormen zich in het bodemsediment duinvormige structuren van verschillende afmetingen. De doelstelling van deze studie is het bepalen van de relaties die bestaan tussen de sedimentologische karakteristieken en de geometrische kenmerken van de getijdenduinen die op de bodem van de Schelde voorkomen.

2. SITUERING

Het Schelde-estuarium vormt de toegangsroute tot de haven van Antwerpen (figuur 1). De getijdengolf reikt vanaf de monding tot 125 km stroomopwaarts en een groot deel van de rivier heeft de morfologische kenmerken van een macrotidaal estuarium: de getijdenamplitude ligt tussen 4.0 en 6.0 m (M.O. Hayes, 1979). Deze amplitude neemt in stroomopwaartse richting toe: ter hoogte van Hansweert is deze gemiddeld 4.41 m, bij Antwerpen 5.19 m en ter hoogte van Schelle bereikt deze 5.33 m (J. Claessens & L. Meyvis, 1994). De getijden

* Aspirant van het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek, Vlaanderen (F.W.O.), Universiteit Gent.



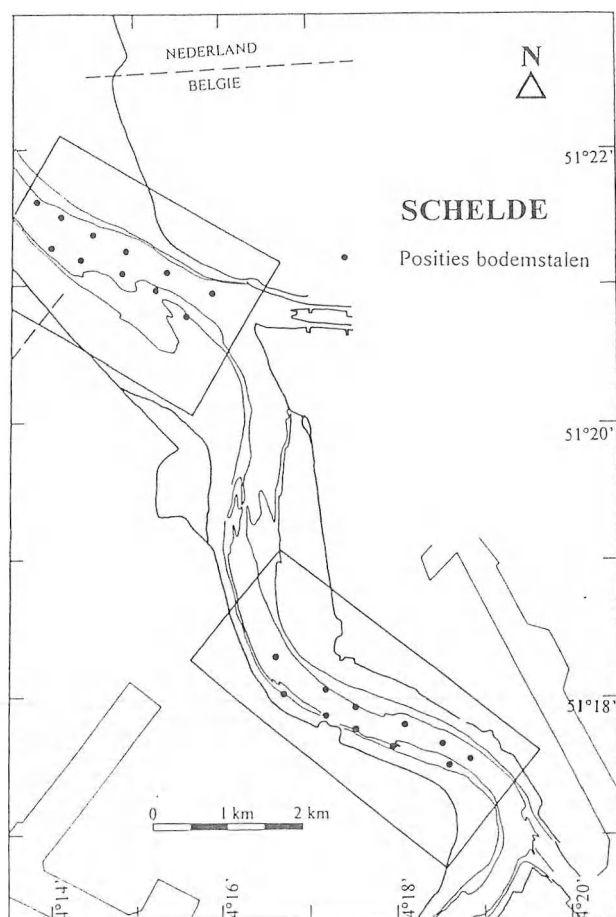
Figuur 1: Het zuidwestelijke deel van het Schelde-estuarium met situering van het studiegebied - SW portion of the Scheldt Estuary with location of the study area.

kennen een asymmetrisch verloop, waarbij de ebstroom steeds iets langer duurt dan de vloedstroom. Het resultaat van deze asymmetrie, die stroomopwaarts meer uitgesproken wordt, is dat de vloedstroom sterker is dan de ebstroom (P. McLaren, 1994). Dit geldt vooral aan Belgische zijde van de Belgisch-Nederlandse grens. Ter hoogte van de Plaat van Doel bereikt de piekvloedstroom snelheden tot 2 ms^{-1} , terwijl de piekebstroomsnelheid schommelt tussen 1.58 en 1.67 ms^{-1} . Ter hoogte van Antwerpen bereikt de piekebstroom een maximale snelheid van 1.75 ms^{-1} . De piekebstroom heeft hier een snelheid tussen 1.25 en 1.33 ms^{-1} (R. Codde & L. De Keyser, 1967). Grote delen van het estuarium worden sterk beïnvloed door de baggeractiviteiten.

In wat volgt wordt een onderzoek besproken dat werd uitgevoerd in de maritieme Schelde: het gedeelte van het estuarium dat zich tussen de Belgisch-Nederlandse grens en de stad Antwerpen bevindt (figuur 1).

3. ONDERZOEKSMETHODEN

In het maritieme deel van het Schelde-estuarium werden twee studiegebieden van respectievelijk 9.4 en 10.0 km^2 geselecteerd voor een gedetailleerd sedi-

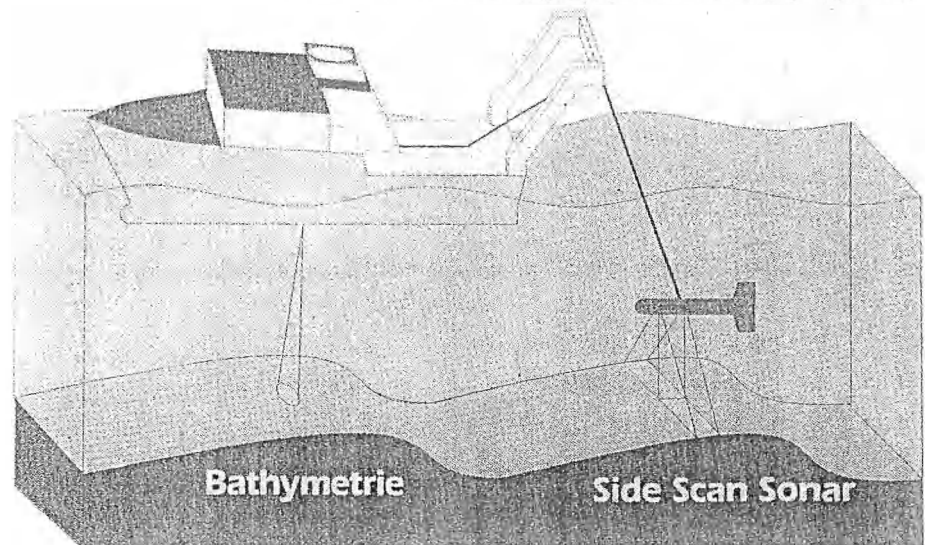


Figuur 2: Posities van de staalnamepunten in studiegebied 1 en 2 - Positions of the grab samples in study area 1 and 2.

mentologisch en geomorfologisch onderzoek (figuur 2). In beide gebieden werden bodemstalen genomen met behulp van een Van Veengrijper (J. Van Veen, 1936), die het sediment bemonstert tot op een diepte van ongeveer 10 cm (J. Lanckneus et al., 1992).

In het laboratorium werd elk staal aan de lucht gedroogd en een representatief staal van 200 g werd afgescheiden. Deze stalen werden door nat zeven opgesplitst in een grove fractie (grind en zand) en een fijne fractie (silt en klei). De grove fractie werd opgesplitst op een serie van 26 zeven. De korrelgrootteverdeling van de fijne fractie werd geanalyseerd met behulp van een Micromeritics Sedigraph. Dit is een toestel dat werkt met X-stralen en dat gebruik maakt van een toepassing van de wet van Stokes voor het bepalen van de korrelgroottesamenstelling van fijn materiaal. Het kalkgehalte en het gehalte aan organisch materiaal van elk staal werd eveneens bepaald. De laboratoriumresultaten werden verwerkt met "Gransed", een speciaal aangepast softwareprogramma dat ontwikkeld werd door het Renard Centre for Marine Geology van de

Sonografische opnametechnieken



Figuur 3: Tijdens de registraties bevindt de bathymeter zich onder het schip, terwijl de vis van het side-scan sonarsysteem erachter gesleept wordt. In de vis zitten twee transducers die een waaier aan ultrasone geluidsgolven uitzenden naar de zeebodem en na reflectie weer opvangen, waarna de informatie doorgestuurd wordt naar de recorder van het side-scan sonarsysteem. - When registrations are carried out, the bathymeter is positioned under the vessel, while the fish of the side-scan sonar system is towed behind it. The fish contains two transducers that send out a ultrasound waves in a fanlike way. After reflection at the sea floor, the ultrasound waves are caught by the transducers and the information is sent further to the side-scan sonar recorder.

Universiteit van Gent. Bepaalde statistische parameters, zoals de gemiddelde korrelgrootte, de sortering of standaarddeviatie en de kurtosis* (R.L. Folk & W.C. Ward, 1957) werden hiermee berekend. Ook het procentueel aandeel zand, klei en grind, het kalkgehalte en het gehalte aan organisch materiaal werden bepaald.

Voor het bestuderen van de getijdenduinen die zich vormen in het bodemsediment, werd een digitale Klein 595 side-scan sonar gebruikt (figuur 3). Aldus wordt langsheen de vaarroute een 150 m brede strook van de zeebodem in beeld gebracht. De resulterende side-scan sonarbeelden kunnen beschouwd worden als het akoestisch analoog van een luchtfoto (G. De Moor & J. Lanckneus, 1990). Tegelijkertijd met de sonografische registraties werden diepteme-

* De kurtosis is een maat voor de vorm van de korrelgroottecurve. Een normale curve is mesokurtisch. Een curve die breder en vlakker is dan een normale is platykurtisch, terwijl een curve die een smalle, scherpe piek vormt, leptokurtisch genoemd wordt.

tingen uitgevoerd met behulp van een Deso XX bathymeter. De verwerking van de beelden resulteerde in een geomorfologische kaart van de twee studiegebieden.

Er blijken in beide studiegebieden zeer veel getijdenduinen voor te komen. Getijdenduinen worden omschreven als sedimentaire structuren die een min of meer driehoekige dwarsdoorsnede hebben en hoger zijn dan 0.06 m. Ze zijn meestal asymmetrisch met een steilere lijzijde en een zwakkere loefzijde. Als 'hoogte' werd omschreven het hoogteverschil tussen de top van de getijdenduin en het laagste punt langs de stroomafwaartse lijzijde. Voor de nomenclatuur van de getijdenduinen werd het classificatiesysteem van G.M. Ashley (1990) (tabel 1) gebruikt.

	RIBBELS	GETIJDENDUINEN			
		KLEIN	MEDIUM	GROOT	ZEER GROOT
L	< 0,6 m	5 m	10 m	100 m	
H	< 0,06 m	0,25 m	0,5 m	3 m	

Tabel 1: Classificatiesysteem voor getijdenduinen (Ashley, 1990), waarbij H = hoogte van de duinen (m) en L = golflengte (m) - Classification of subaqueous dunes (Ashley, 1990), H = height (m) and L = wavelength (m).

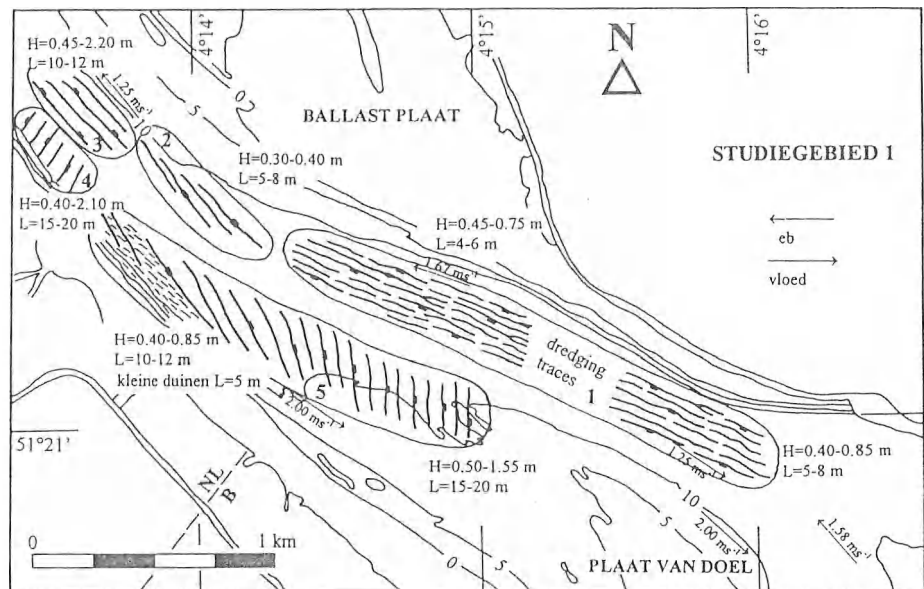
Hun geometrische karakteristieken zoals hoogte, golflengte, oriëntatie en asymmetrie werden vergeleken met de kenmerken van het sediment waaruit ze zijn opgebouwd.

4. KENMERKEN VAN DE GETIJDENDUINEN

4.1. Studiegebied 1

In studiegebied 1 worden verschillende groepen getijdenduinen met variërende geometrische eigenschappen geobserveerd (figuur 4).

Groep 1 bestaat uit medium getijdenduinen met een hoogte van 0.50 tot 0.85 m. Ze kunnen over vrij grote afstanden gevolgd worden en de afstand tussen hun kamlijnen varieert tussen 4 en 8 m. Hier en daar vertonen de kamlijnen vertakkingen. Hun oriëntatie is opmerkelijk uniform en varieert tussen N40°E en N68°E: de getijdenduinen liggen vrijwel parallel aan het lengteprofiel van de rivier. Bijna allemaal hebben ze hun steile flank gericht naar het SSW, wat aangeeft dat ze zich in die richting voortbewegen (D.N. Langhorne, 1973, N.H. Kenyon & A.H. Stride, 1970, M.A. Johnson et al., 1982). Getijdenduinen zoals deze kunnen zich verscheidene m per jaar verplaatsen in de richting van hun steile flank (J. Lanckneus & G. De Moor, 1991). Het sediment wordt onder invloed van de lokale dominerende stromingen over de zwakke loefzijde in de richting van de kamlijn van de getijdenduin getransporteerd, om vervolgens



Figuur 4: Geomorfologische kaart van studiegebied 1, resulterend uit de side-scan sonarregistraties van 13/12/1995. De kamlijnen van de getijdenduinen en de richting van hun steile flanken is weergegeven. De volle en onderbroken pijlen geven respectievelijk de vloed- en ebstroom weer met vermelding van de maximum snelheid (ms^{-1}) in de bovenlaag (R. Codde & L. De Keyser, 1967). - Geomorphological map of study area 1, resulting from the side-scan sonar registrations of 13/12/1995. The crest lines of the dunes and the direction of their steep slopes is indicated. The full and dotted arrows represent the flood and ebb current, respectively, with the maximum current speed (ms^{-1}) in the upper layer (R. Codde & L. De Keyser, 1967).

langs de steilere lijkzijde naar beneden te storten. Op deze manier draagt het sedimenttransport bij tot de verplaatsing van de getijdenduin, en kan uit de geometrie van de duin de richting van het lokale sedimenttransport afgeleid worden. Aldus kan aangenomen worden dat de getijdenduinen aan de rechterzijde van de vaargeul migreren in een SSW richting.

Groep 2 komt voor in de nabijheid van de Ballast Plaat en bestaat uit enkele getijdenduinen die gekenmerkt worden door een nagenoeg symmetrische doorsnede. Ze bereiken een beperkte hoogte (tot 0.40 m) en golflengte (tot 8 m). Noordwestelijk van deze symmetrische structuren komt groep 3 voor. Dit zijn getijdenduinen die relatief grote afmetingen hebben: hun hoogte kan tot 2.20 m bereiken en hun golflengte overschrijdt 10 m. Ze liggen parallel met de lengterichting van de vaargeul en hebben hun steile flank gericht naar het NE. Aan de andere kant van de vaargeul, nabij de linkeroever van de rivier, komt groep 4 voor, eveneens grote getijdenduinen. Hun kamlijnen hebben een oriëntatie van $\text{N}325^\circ\text{E}$, wat vrijwel loodrecht is op de lengterichting van de vaargeul. De meest noordelijke getijdenduinen van deze groep hebben hun steile flank gericht naar het NW, de zuidelijke naar het SE.

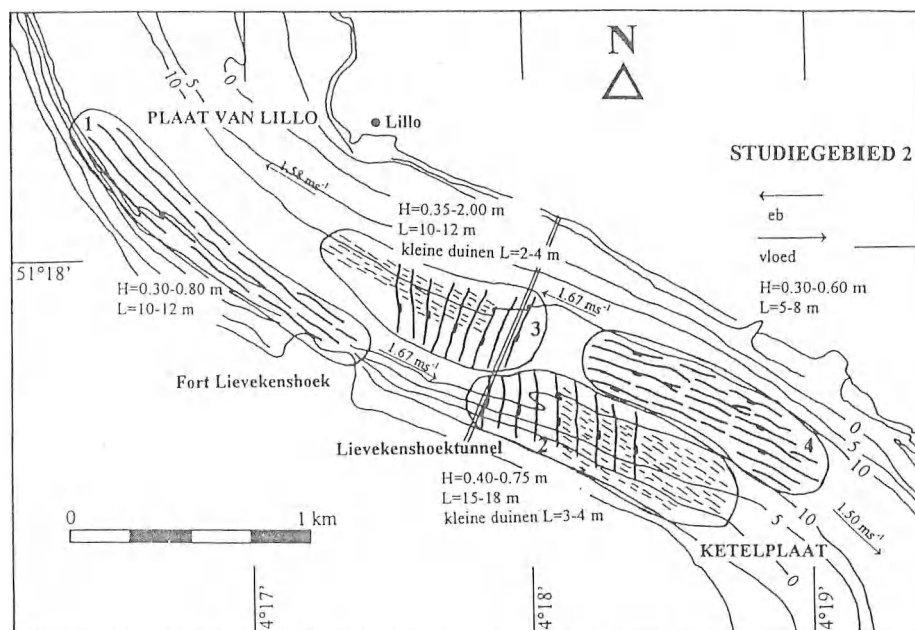
Langsheen de linkeroever van de rivier, nabij de Belgisch-Nederlandse grens, wordt *groep 5*, een cluster medium tot grote getijdenduinen, geobserveerd. Hun hoogte varieert tussen 0.40 en 1.55 m en hun golflengte tussen 10 en 20 m. De meeste westelijke exemplaren hebben kleine getijdenduinen op hun flanken. De oriëntatie van de grote exemplaren varieert tussen N325°E en N-S. De meest oostelijk gelegen getijdenduinen liggen nagenoeg loodrecht op de richting van de getijdenstromingen en hun steile flanken zijn gericht naar het oosten. Deze oriëntatie van hun steile flanken geeft aan dat zij door de lokale, oostelijk gerichte vloedstroom gegenereerd zijn. Op figuur 4 is zichtbaar dat de vloedstroom zich inderdaad bij de Plaat van Doel situeert, terwijl de ebstroom daarentegen de vaargeul volgt (R. Codde & L. De Keyser, 1967, M. Fettweis, 1995). Volgens deze denkwijze lijkt het logisch dat de getijdenduinen die in de vaargeul voorkomen (*groep 1 en 2*), door de ebstroom gegenereerd worden. Hun oriëntatie en asymmetrie geven echter aan dat ze gevormd zijn door stromingen die gericht zijn naar het SSW, loodrecht op de getijdenstromingen. De hier aanwezige getijdenduinen zijn dus niet onder invloed van de ebstroom ontstaan. De piekebstroom bereikt in de vaargeul snelheden tussen 1.25 en 1.67 ms⁻¹, wat relatief weinig is in vergelijking met de piekvloedsnelheid van 2.00 ms⁻¹ ter hoogte van de Plaat van Doel. Mogelijk is de piekebstroomsnelheid in de vaargeul te beperkt om getijdenduinen te genereren. Volgens N.H. Kenyon en A.H. Stride (1970) zijn piekgetijdenstromingen van 0.65 ms⁻¹ nochtans voldoende opdat zij getijdenduinen zouden genereren en in stand houden. De piekebstromingen in de vaargeul zouden dus ruim voldoende moeten zijn. Klaarblijkelijk domineerde evenwel een andere, SSW gerichte stroming lokaal het hydrodynamisch milieu.

4.2. Studiegebied 2

Ook in studiegebied 2 worden verschillende groepen getijdenduinen waargenomen (figuur 5).

Een *eerste groep* getijdenduinen komt voor ten noorden van Fort Lievekenshoek, opmerkelijk dicht bij de linkeroever. Ze zijn symmetrisch in dwarsdoorsnede en de afstand tussen de kamlijnen is vrijwel constant: 10 tot 12 m. Ze bereiken een hoogte van hooguit 0.80 m. Ze hebben een uniforme oriëntatie van N315°E, parallel met de lengterichting van de vaargeul.

Groep 2 komt meer zuidwaarts voor, op het noordwestelijke deel van de Ketelplaat. De hoogte (0.40-0.75 m) van deze medium getijdenduinen is relatief klein in vergelijking met hun golflengte (> 15 m), een verschijnsel dat waarschijnlijk te wijten is aan de beperkte waterdiepte op de plaat. D.N. Langhorne (1973) observeerde iets analoogs in het Thamesestuarium: bij een afname van de waterdiepte worden de getijdenduinen minder hoog en neemt de afstand tussen de kamlijnen toe. De hoogte van de waterkolom boven de getijdenduinen blijkt een belangrijke parameter te zijn. A.H. Stride (1963) en J.J.H.C.



Figuur 5: Geomorfologische kaart van studiegebied 2, resulterend uit de side-scan sonarregistraties van 13/12/1995. De volle en onderbroken pijlen geven respectievelijk de vloed- en eb-stroom weer met vermelding van de maximum snelheid (ms^{-1}) in de bovenlaag (R. Codde & L. De Keyser, 1967). - Geomorphological map of study area 2, resulting from the side-scan sonar registrations of 13/12/1995. The full and dotted arrows represent the flood and ebb current, respectively, with the maximum current speed (ms^{-1}) in the upper layer (R. Codde & L. De Keyser, 1967).

Houbolt (1968) vermelden dat een waterdiepte van minstens 17 m vereist is voor het voorkomen van grote getijdenduinen. Kleine tot medium duinen kunnen ook in ondieper water voorkomen, zoals ook blijkt in de maritieme Schelde. De getijdenduinen hebben een N-S oriëntatie en hun steile flanken zijn gericht naar het E, wat aangeeft dat ze vloedgedomineerd zijn. De meeste oostelijke duinen van deze groep hebben op hun flanken kleine getijdenduinen met een golflengte van 3-4 m en een oriëntatie van $N67^{\circ}E$. Het feit dat hun oriëntatie afwijkt van deze van de grote duinen wordt verklaard doordat de lokale stroomrichting -die de ligging van de kleine getijdenduinen bepaalt- afwijkt van de regionale stroomrichting door de aanwezigheid van de grote duinen, die als het ware een obstakel vormen in de stroming (D.N. Langhorne, 1973). De kleine getijdenduinen worden ook meer oostwaarts teruggevonden, waar de medium tot grote duinen afwezig zijn.

Aan de rechterzijde van de vaargeul, ten zuiden van Lillo, komt groep 3 voor: grote getijdenduinen die -net als aan de overkant van de vaargeul- een oriëntatie van $N21^{\circ}E$ tot N-S hebben. Ze hebben hun steile flank gericht naar het oosten. Hun golflengte is 10-12 m en ze bereiken hoogtes tot 2.00 m. Kleine

getijdenduinen met een oriëntatie van N295°E komen voor op de flanken van de westelijke getijdenduinen en ten W van de groep.

Zowel de getijdenduinen van groep 2 als van groep 3 lijken onder invloed te staan van de ESE gerichte vloedstroom, die inderdaad in hun nabijheid stroomt en lokaal een maximale snelheid van 1.67 ms^{-1} bereikt.

Groep 4, een cluster medium getijdenduinen, bevindt zich in de vaargeul ten N van de Ketelplaat. Zij hebben een golflengte van 5-8 m en worden nooit hoger dan 0.60 m. De oriëntatie van hun kamlijnen is N290°E tot N300°E en hun steile zijde is gericht naar het SSW. Sporadisch splitst een kamlijn zich op, een proces waardoor twee duinen gecreëerd worden uit één enkele (S.L. Gabel, 1993).

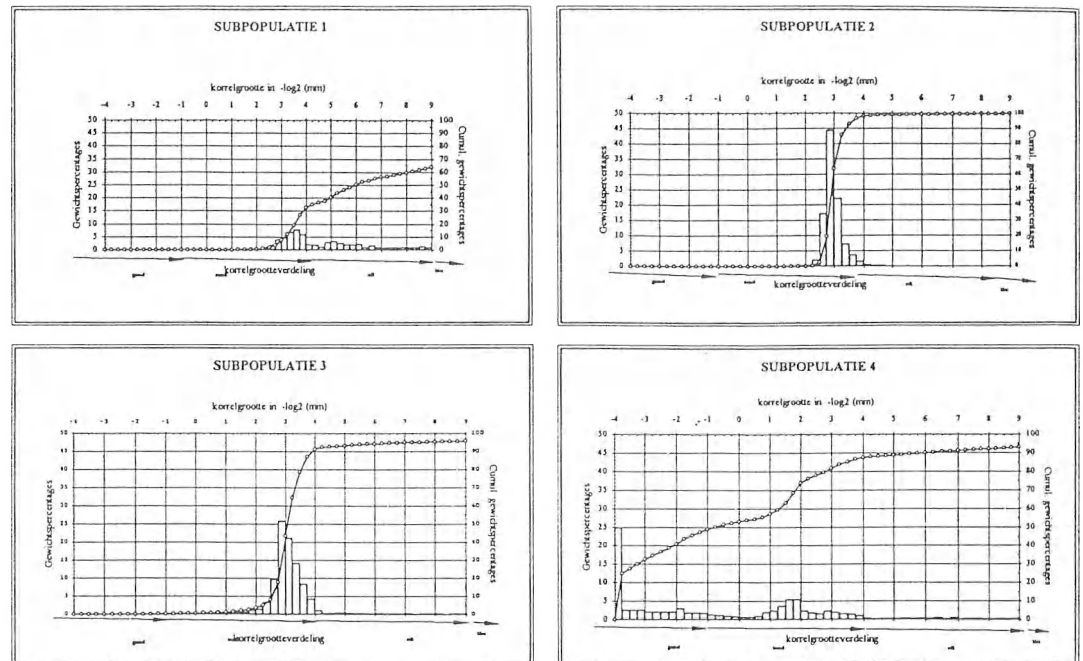
5. KENMERKEN VAN HET BODEMSEDIMENT

Het programma "Gransed", dat ontwikkeld werd in het Renard Centre of Marine Geology van de Universiteit van Gent, werd na het voltooiën van de laboratoriumanalyses aangewend voor de berekening van de gemiddelde korrelgrootte, de sortering/standaard deviatie, de kurtosis en het procentuele gehalte aan klei, zand, grind, kalk en organisch materiaal van elk staal. Gebaseerd op deze karakteristieken van de stalen konden 4 'subpopulaties' van het sediment gedefinieerd worden (tabel 2). In figuur 6 is voor elke subpopulatie een karakteristieke korrelgrootteverdelingscurve weergegeven.

Subpopulatie 1 bestaat gemiddeld uit relatief fijn sediment met een slechte sortering en een mesokurtische tot zeer platykurtische korrelgrootteverdelings-

	Gemiddelde korrelgrootte	Standaard-deviatie	Kurtosis	Zand 63-2000 μm	Klei < 2 μm	Grind > 2000 μm	CaCO ₃	Organisch materiaal
Subpopulatie 1	< 63 μm	zeer slecht gesorteerd > 2.00 ϕ	mesokurtisch tot zeer platykurtisch < 1.11 ϕ	< 60 %	> 20 %	< 5 %	> 10 %	> 0.5 %
Subpopulatie 2	125-175 μm	goed tot zeer goed gesorteerd < 0.50 ϕ	leptokurtisch 1.11-1.50 ϕ	> 95 %	< 1 %	< 1 %	< 5 %	< 0.25 %
Subpopulatie 3	63-350 μm	matig goed tot slecht gesorteerd 0.70-2.00 ϕ	zeer tot extreem leptokurtisch > 1.50 ϕ	60-95 %	1-20 %	< 5 %	5-10 %	0.25-1 %
Subpopulatie 4	> 350 μm	middelmatig tot goed gesorteerd 0.35-0.70 ϕ	zeer leptokurtisch tot platykurtisch 0.67-3.00 ϕ	variabel	variabel	> 5 %	> 10 %	variabel

Tabel 2: Kenmerken van de 4 subpopulaties, gebaseerd op de sedimentologische parameters van het sediment - Characteristics of the 4 subpopulations, based upon the sedimentological parameters of the sediment.



Figuur 6: Karakteristieke korrelgrootteverdelingscurves voor elk van de 4 subpopulaties - Curves representing the characteristic grain-size distribution of the 4 subpopulations.

curve. Dit laatste impliceert dat het sediment is samengesteld uit een brede range aan korrelgroottes. Het bestaat verder uit minder dan 60 % zand, minstens 20 % klei en minder dan 5 % grind. De gehalten aan kalk en organisch materiaal liggen respectievelijk hoger dan 10 % en 0.5 %.

Het sediment van *subpopulatie 2* heeft een gemiddelde korrelgrootte van 125-175 μm (fijn zand) en is goed tot zeer goed gesorteerd. Het heeft een leptokurtische curve, wat betekent dat het sediment zeer weinig variatie in de granulometrie vertoont. Het bestaat voor meer dan 95 % uit zand. Het kalkgehalte ligt lager dan 5 % en het gehalte aan organisch materiaal lager dan 0.25 %.

Het sediment van *subpopulatie 3* heeft een gemiddelde korrelgrootte van 63-350 μm (fijn tot medium zand), is matig goed tot slecht gesorteerd en heeft een zeer tot extreem leptokurtische curve. Het bestaat voor 60-95 % uit zand, voor minder dan 20 % uit klei en minder dan 5 % uit grind. Het kalkgehalte ligt tussen 5 en 10 % en het gehalte aan organisch materiaal tussen 0.25 en 1.0 %.

Subpopulatie 4 bestaat uit gemiddeld relatief grof materiaal (> 350 μm) met een slechte tot zeer slechte sortering en een zeer leptokurtische tot platykurtische korrelgroottecurve. Het bevat meer dan 5 % grind en meer dan 10 % kalk.

6. RUIMTELIJK PATROON VAN DE SEDIMENTOLOGISCHE PARAMETERS

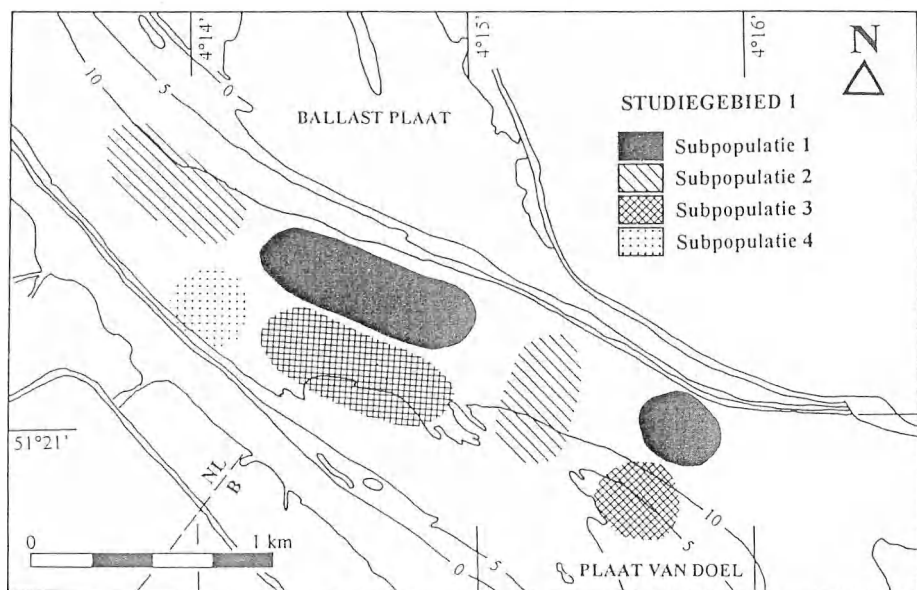
6.1. Studiegebied 1

Figuur 7 geeft het ruimtelijke verdelingspatroon van de 4 subpopulaties in studiegebied 1 weer. De verschillende sedimentologische kenmerken variëren heel sterk over relatief korte afstanden.

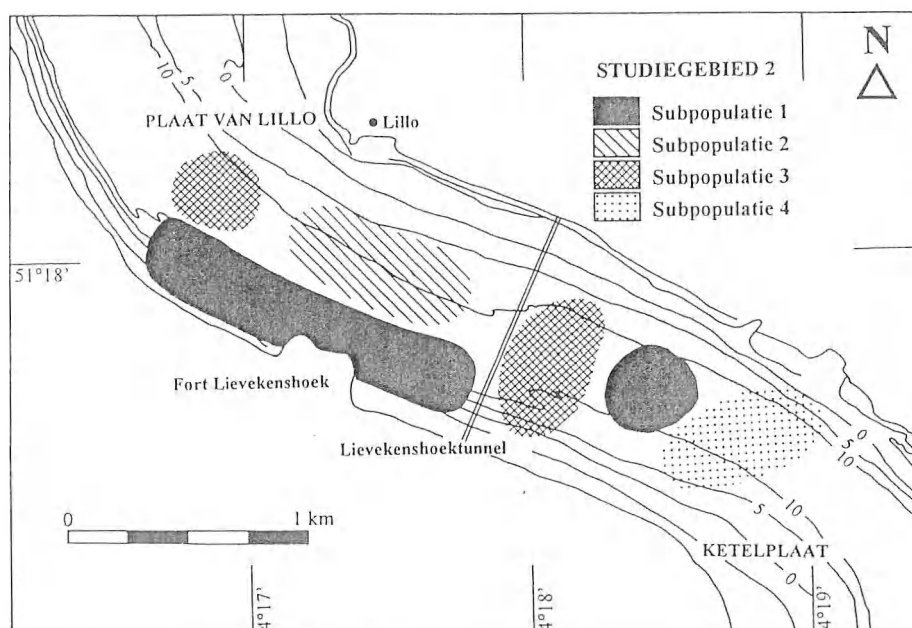
Het fijne, slecht gesorteerde sediment van subpopulatie 1 komt voor in twee diepe zones aan de rechterkant van de vaargeul: een groter gebied ten zuiden van de Ballast Plaat en een kleiner gebied in het meest oostelijke deel van het studiegebied. Aan de overkant van de vaargeul komen op dezelfde hoogte 2 gebieden voor met sediment van subpopulatie 3. Ten NW van de Plaat van Doel en ten SW van de Ballast Plaat komen 2 zones voor met zandig, goed gesorteerd sediment, dat geklasseerd wordt als subpopulatie 2. Aan de linkerkant van de vaargeul, ten N van de grens, bevindt zich een klein gebiedje met het grove, slecht gesorteerde sediment van subpopulatie 4.

6.2. Studiegebied 2

Net als in studiegebied 1 werden ook hier op korte afstand van elkaar stalen met sterk uitéénlopende sedimentologische kenmerken gevonden (figuur 8). Subpopulatie 1 wordt vooral aan de linkerzijde van de rivier, ten westen van de Lievekenshoektunnel, gevonden. Een kleiner gebiedje met dit relatief fijne



Figuur 7: Ruimtelijk verdelingspatroon van de 4 subpopulaties in studiegebied 1. De definiëring van de subpopulaties is weergegeven in Tabel 2 - Areal distribution of the 4 subpopulations in study area 1. The subpopulations are defined in Table 2.



Figuur 8: Ruimtelijk verdelingspatroon van de 4 subpopulaties in studiegebied 2. De definiëring van de subpopulaties is weergegeven in Tabel 2 - Areal distribution of the 4 subpopulations in study area 2. The subpopulations are defined in Table 2.

sediment komt meer oostwaarts, in het midden van de vaargeul, voor. In het meest oostelijke deel van het studiegebied komt subpopulatie 4 voor. Het zandige en goed gesorteerde sediment van subpopulatie 2 wordt gevonden aan de rechterzijde van de vaargeul, ter hoogte van Lillo. Ten westen hiervan, evenals in het gebied ten oosten van de Lievekenshoektunnel, komt het sediment van subpopulatie 3 voor.

7. VERGELIJKING TUSSEN DE GEOMETRIE VAN DE GETIJDENDUINEN EN DE KENMERKEN VAN HET BODEMSEDIMENT

De geometrische eigenschappen van de getijdenduinen zijn onder andere een functie van de hoeveelheid beschikbaar materiaal (S.L. Gabel, 1993), de wrijving over de bodem (P.D. Osborne & C.E. Vincent, 1993, J. Fredsøe, 1979) de stromingsdiepte (M.S. Yalin, 1977) en van de kenmerken van het bodemsediment (R.H. Belderson et al., 1982). Een vergelijking van de geomorfologische kaarten met het ruimtelijk verdelingspatroon van de sedimentologische parameters in beide studiegebieden brengt een aantal interessante correlaties aan het licht.

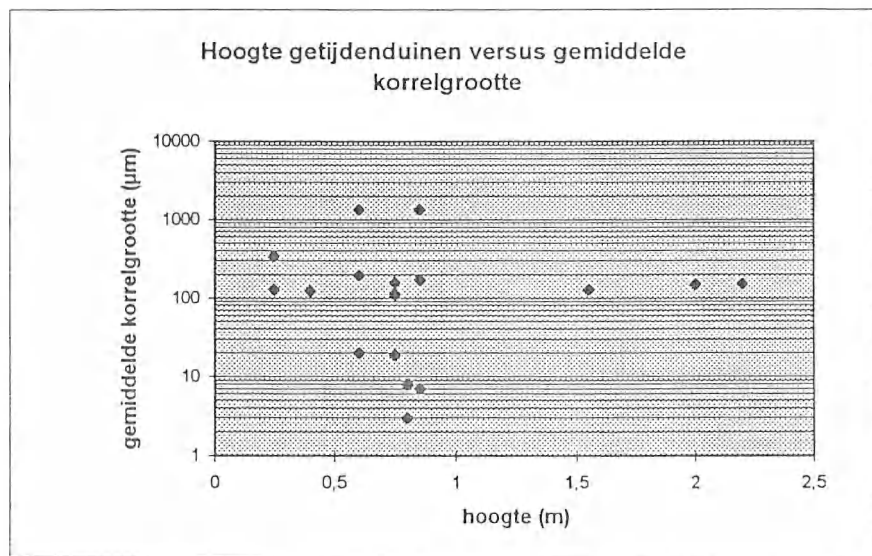
7.1. Gemiddelde korrelgrootte

In figuur 9 is het verband tussen de de hoogte van de getijdenduinen en de gemiddelde korrelgrootte van de stalen uit de maritieme Schelde grafisch weergegeven. Er bestaat geen duidelijke lineair correlatie. Toch onthult een nader onderzoek van figuur 4, 5, 7 en 8 een aantal verbanden.

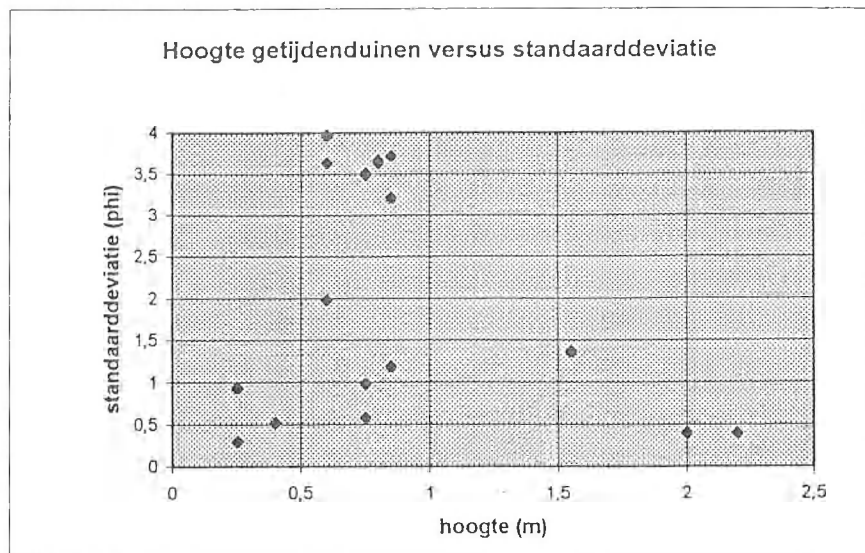
De getijdenduinen bereiken hun grootste hoogte waar het sediment een gemiddelde korrelgrootte heeft van 125-175 μm (fijn zand) en voor minstens 95 % uit zand bestaat. In dit materiaal worden getijdenduinen met een hoogte tot 2.20 m gevormd. Dit staat in contrast met de bevindingen van R.W. Dalrymple (1984) die stelt dat grote getijdenduinen met een hoogte boven de 0.5 m alleen voorkomen in sediment met een gemiddelde korrelgrootte van 274 μm of meer. De golflengte van deze grote getijdenduinen in de maritieme Schelde is in verhouding tot hun hoogte relatief klein: 10-12 m. Duinen met een golflengte tot 20 m ontwikkelen zich in hetzelfde zandige bodemsediment, maar deze worden niet hoger dan 1.55 m. Deze grote getijdenduinen liggen loodrecht op het lengteprofiel van de rivier.

In gebieden met relatief fijn sediment (gemiddeld < 63 μm) dat veel klei bevat, komen medium getijdenduinen voor met maximale hoogte van 0.80 m en een golflengte tot 8 m. Deze liggen meestal parallel met het lengteprofiel van de rivier en hebben hun steile flanken gericht naar het S tot SSW.

In het grofste sediment (gemiddelde > 250 μm) komen medium getijdenduinen voor. In studiegebied 1 zijn ze tot 0.85 m hoog en hebben een golflengte



Figuur 9: Het verband tussen de hoogte van de getijdenduinen en de gemiddelde korrelgrootte van de stalen genomen in de maritieme Schelde - Correlations between the height of the tidal dunes and the mean grain-size of the samples taken in the maritime Scheldt.



Figuur 10: Het verband tussen de hoogte van de getijdenduinen en de standaarddeviatie van de stalen genomen in de maritieme Schelde - Correlations between the height of the tidal dunes and the standard deviation of the samples taken in the maritime Scheldt.

van 10-12 m. In studiegebied 2 zijn hun afmetingen aanzienlijk kleiner. Er komen vaak kleine getijdenduinen voor op hun flanken.

7.2. Standaarddeviatie / sortering

Figuur 10 stelt het verband tussen de hoogte van de getijdenduinen en de standaarddeviatie van de stalen voor. Ook hier komt niet direct een lineair verband naar voor, maar toch kunnen de volgende bevindingen afgeleid worden, zowel uit deze als uit voorgaande figuren (figuur 4, 5, 7 en 8).

In zeer slecht gesorteerd sediment komen medium getijdenduinen voor die nagenoeg parallel liggen met het lengteprofiel van de rivier. Ze vertonen binnen een cluster een zeer uniforme oriëntatie en asymmetrie. In studiegebied 2 worden de hoogste getijdenduinen gevonden in het best gesorteerde sediment. In studiegebied 1, daarentegen, komen de grootste getijdenduinen voor in slecht gesorteerd sediment, terwijl getijdenduinen met kleinere afmetingen eerder voorkomen in goed tot zeer goed gesorteerd sediment

7.3. Kurtosis

In beide studiegebieden komen de grootste getijdenduinen voor in sediment met een leptokurtische tot zeer leptokurtische korrelgrootteverdeling, m.a.w. in sediment met een nauwe range aan korrelgroottes. Deze getijdenduinen liggen nagenoeg loodrecht op het lengteprofiel van de rivier. Medium getijden-

duinen met een hoge graad van parallelisme, een oriëntatie parallel met de rivier en een sterke uniformiteit in de asymmetrie komen meestal voor in platykurtisch tot zeer platykurtisch sediment.

7.4. Gehalte aan CaCO_3

In gebieden waar het kalkgehalte van het sediment relatief hoog is ($> 10\%$) komen getijdenduinen met medium afmetingen en een oriëntatie parallel met het lengteprofiel van de rivier voor. Dit geldt in beide studiegebieden. In studiegebied 1 worden de hoogste getijdenduinen gevonden in sediment met een kalkgehalte van ongeveer 6% . In studiegebied 2, daarentegen, worden de hoogste getijdenduinen (tot 2 m) gecreëerd in sediment met een laag kalkgehalte ($< 5\%$).

7.5. Gehalte aan organisch materiaal

In studiegebied 2 komen de hoogste getijdenduinen voor in sediment met een laag gehalte aan organisch materiaal ($< 0.5\%$). Deze getijdenduinen liggen loodrecht op het lengteprofiel van de Schelde en hebben vaak kleinere duinen op hun flanken. In sediment met een relatief hoog gehalte aan organisch materiaal ($> 1\%$) ontwikkelen zich meestal medium getijdenduinen met een oriëntatie parallel aan het lengteprofiel van de rivier. In studiegebied 1 kon geen duidelijke relatie tussen het gehalte aan organisch materiaal en de geometrische kenmerken van de getijdenduinen waargenomen worden.

8. CONCLUSIES

In de twee studiegebieden in het maritieme deel van de Schelde blijken zowel de sedimentologische kenmerken als de geometrische eigenschappen van de getijdenduinen sterk te variëren over relatief korte afstanden. Een aantal verbanden tussen de geomorfologie en de sedimentologie kwamen uit deze studie naar voor.

(1) De getijdenduinen met de grootste afmetingen liggen meestal nagenoeg loodrecht op het lengteprofiel van de rivier. Zij vormen zich in sediment met een gemiddelde korrelgrootte tussen 125 en $175\text{ }\mu\text{m}$ dat voor minstens 95% uit zand bestaat. Meestal is dit sediment goed tot zeer goed gesorteerd en heeft het een leptokurtische tot extreem leptokurtische korrelgrootteverdelingscurve. Hoe lager het gehalte aan organisch materiaal en CaCO_3 , hoe hoger de getijdenduinen worden.

(2) In beide studiegebieden komen medium getijdenduinen voor die parallel liggen aan het lengteprofiel van de rivier. Ze vertonen een hoge graad van parallelisme en hebben hun steile flanken allemaal naar dezelfde richting gekeerd. Ze vormen zich in gemiddeld fijn sediment (gemiddeld $< 63\text{ }\mu\text{m}$) dat

slecht gesorteerd is en een platykurtische tot zeer platykurtische verdelingscurve heeft. Dit sediment bevat vrij veel CaCO_3 ($> 10\%$) en organisch materiaal ($> 1\%$).

(3) Er worden ook een aantal gebieden gevonden waar de kamlijnen van de medium getijdenduinen loodrecht op de lengterichting van de rivier liggen. Ze hebben vaak kleine getijdenduinen op hun flanken. Deze structuren komen vooral voor in relatief grof sediment (gemiddeld $> 250\ \mu\text{m}$), dat matig tot goed gesorteerd is en dat tussen 1 en 5 % CaCO_3 en tussen 0.5 en 1 % organisch materiaal bevat.

DANKBETUIGING

Deze studie wordt gefinancierd door het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek - Vlaanderen (F.W.O.). De auteur wenst Prof. Dr. C. Vernemmen en Em. Prof. Dr. G. De Moor te danken voor hun wetenschappelijke ondersteuning. Zij dankt Prof. Dr. P. Jacobs van het Renard Centre of Marine Geology voor het gebruik van de laboratoriumfaciliteiten en het softwareprogramma "Gransed". Zij is de Beheerseenheid Mathematisch Model van de Noordzee en het Schelde-estuarium en Ir. H. Belmans, Ir. E. Taverniers en Ir. F. De Cock van de Afdeling Maritieme Schelde van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap erkentelijk voor hun medewerking en logistieke ondersteuning bij de data-verwerking. De hulp die Lic. G. Moerkerke verleende tijdens het veldwerk wordt erg gewaardeerd. De auteur is veel dank verschuldigd aan de bemanning van de onderzoeksschepen Belgica, Veremans en Parel II voor hun bereidwillige medewerking tijdens de side-scan sonarregistraties en staalnames.

Tot slot wenst de auteur Em. Prof. Dr. G. De Moor en een tweede lezer te danken voor het lezen en beoordelen van het originele manuscript. Hun opbouwende kritiek droeg aanzienlijk bij tot het verbeteren van de tekst.

REFERENTIES

- G.M. Ashley (1990), Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem, *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, p. 160-172.
- R.H. Belderson, M.A. Johnson & N.H. Kenyon (1982), Bedforms, In: A.H. Stride (ed.), *Offshore tidal sands, processes and deposits*, London-New York, Chapman and Hall, p. 27-58.
- J. Claessens & L. Meyvis (1994), Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het decennium 1981-1990, Antwerpse Zeehavendienst, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 108 p.
- R. Codde & L. De Keyser (1967), Noordzee - kust - Scheldemonding - Zeeschelde. In : *Atlas van België*, bl. 18a en 18b en commentaar. Brussel : Nationaal comité voor geografie, 64 p.
- R.W. Dalrymple (1984), Morphology and internal structure of sandwaves in the Bay of Fundy, *Sedimentology*, 31, p. 365-382.

- G. De Moor & J. Lanckneus (1990), Stabilité et apports sédimentaires sur les bancs de Flandre, *Annales de la Société Géologique du Nord*, CIX, p. 129-139.
- M. Fettweis (1995), Modelling currents and sediment transport phenomena in shelf seas and estuaries, Leuven, Doctoraatsproefschrift, 253 p.
- R.L. Folk & W.C. Ward (1957), Brazos River bar : a study in the significance of grain-size parameters, *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, p. 3-26.
- J. Fredsøe (1979), Unsteady flow in straight alluvial streams: modification of individual dunes, *Journal of Fluid Mechanics*, 91, p. 497-512.
- S.L. Gabel (1993), Geometry and kinematics of dunes during steady and unsteady flows in the Calamus River, Nebraska, USA, *Sedimentology*, 40, p. 237-269.
- M.O. Hayes (1979), Morphology and sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium, In: L.E. CRONIN (ed.), *Estuarine Research: Vol. II, Geology and Engineering*, London, Academic Press, p. 3-22.
- J.J.H.C. Houbolt (1968), Recent sediments in the Southern Bight of the North Sea, *Geologie en Mijnbouw*, 47 (4), p. 245-273.
- M.A. Johnson, N.H. Kenyon, R.H. Belderson & A.H. Stride (1982), Sand transport, In: A.H. Stride (ed.), *Offshore tidal sands, processes and deposits*, London-New York, Chapman and Hall, p. 58-94.
- N.H. Kenyon & A.H. Stride (1970), The tide-swept continental shelf sediments between the Shetland Isles and France, *Sedimentology*, 14, p. 159-173.
- D.N. Langhorne (1973), A sand wave field in the Outer Thames Estuary, Great Britain, *Marine Geology*, 14, p. 129-143.
- N.H. Kenyon & A.H. Stride (1970), The tide-swept continental shelf sediments between the Shetland Isles and France, *Sedimentology*, 14, p. 159-173.
- J. Lanckneus & G. De Moor (1991), Present-day evolution of sand waves on a sandy shelf bank, *Oceanologica Acta*, 11, p. 123-127.
- J. Lanckneus, G. De Moor, G. De Schaepmeester, I. Meyus & V. Spiers (1992), Residual sediment transport directions on a tidal sand bank. Comparison of the "McLaren Model" with bedform analysis, *Tijdschrift van de Belgische Vereniging voor Aardrijkskundige studies*, 1992-2, p. 425-446.
- P. McLaren (1994), Sediment transport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde, Antwerpen, Antwerpse Zeehavendienst, Intern rapport, 20 p.
- P.D. Osborne & C.E. Vincent (1993), Dynamics of large and small scale bedforms on a macro-tidal shoreface under shoaling and breaking waves, *Marine Geology*, 115, p. 207-226.
- A.H. Stride (1963), Current-swept sea floors near the southern half of Great Britain, *Quart. J. geol. Soc. Lond.*, 119, p. 175-199.
- J. Van Veen (1936), *Onderzoekingen in de Hoofden in verband met de gesteldheid der Nederlandse kust*. Rotterdam, Nieuwe Verh. Bataafsch Genootsch. Proefond. Wijsbeg., 2de reeks II.
- M.S. Yalin (1977), *Mechanics of Sediment Transport*, Oxford, Pergamon Press, 298 p.

ENGELSE SAMENVATTING

The relation between subaqueous dune geometry and sediment characteristics in the maritime part of the Scheldt

In two study areas in the maritime part of the Scheldt Estuary, grab samples were taken and side-scan sonar recordings were carried out. Within the study areas, the strong variation in both the geometry of the subaqueous dunes and the sedimentological characteristics is striking. A comparison between the geomorphological and sedimentological maps revealed some relations. In this particular part of the Scheldt Estuary, the subaqueous dunes tend to have the largest dimensions in well sorted sediment that consists mainly of sand, contains relatively low amounts of calciumcarbonate and organic matter, and has a leptokurtic to extremely leptokurtic grain-size distribution.