

wp / sy

---

# Sedimenten in het Molengat

---

Syntheserapport



---

# Sedimenten in het Molengat

---

## Syntheserapport

MEDUSA Project: 2003-P-042  
MEDUSA rapport: 2003-P-042R2  
Opdrachtgever: Informatiedienst water  
Directie Noord-Holland, Rijkswaterstaat  
Bart Spelt  
Opdracht: Bepaling van de sedimentsamenstelling en kartering van een geulwandsuppletie  
in het Molengat nabij Texel.

Contractnummer ANI: NHO-75016  
Opleverdatum: 19/04/2004  
MEDUSA Projectleider: Ronald Koomans  
Rapportage: Ronald Koomans  
Kwaliteitscontrole: Han Limburg

MEDUSA Explorations BV  
Postbus 623  
9700 AP Groningen,

[www.MEDUSA-online.com](http://www.MEDUSA-online.com)

## Samenvatting

*De morfologische verandering van de kustlijnen van de kop van Zuidwest Texel worden voor een belangrijk deel bepaald door de ontwikkelingen van het Nieuwe Schulpengat, de getijdengeul Molengat en de ondiepte, Noorderhaaks. De sedimentologie in de geul van het Molengat is complex. Om de kustlijn te beschermen tegen deze erosie wordt regelmatig zand gesuppleerd. In de zomer van 2003 is een geulwandsuppletie uitgevoerd in het Molengat. Deze geulwandsuppletie moet ervoor zorgen dat de erosie van de kustlijn op een efficiënte manier in de hand wordt gehouden.*

*Om meer inzicht te krijgen in de processen die de ontwikkeling van de geulwandsuppletie sturen, is met behulp van MEDUSA in het najaar van 2003 een kartering uitgevoerd om de sedimentologie van het Molengat gebiedsdekkend in kaart te brengen. De veldmeting met MEDUSA en de analyse van de sedimentmonsters levert voldoende betrouwbare informatie over sedimentverdeling in het Molengat. De metingen laten zien dat de korrelgrootte, bodemruwheid en zware mineraalgehalte in het Molengat sterk varieert.*

*Dit onderzoek tracht antwoord te geven op een aantal vragen:*

### **Hoe is de geulwandsuppletie ontwikkeld?**

*De kartering laat zien dat de sedimenten op de geulwandsuppletie grover zijn dan omliggende sedimenten. Op basis van de kaart en korrelgrootte informatie van het suppletiezand kunnen we vaststellen dat het suppletiezand niet naar het noorden is getransporteerd of in de geul terecht is gekomen.*

### **Wat is de sedimentologische opbouw van het Molengat?**

*De sedimenten in het Molengat vertonen een duidelijke sortering op basis van korrelgrootte en dichtheid van het sediment. De korrelgrootte varieert van van 225  $\mu\text{m}$  in de as van de geul tot  $\sim 375 \mu\text{m}$  in de ondiepere delen nabij het strand. De bodemruwheid is sterk verhoogd op een "knik" tussen de ondiepe vooroever en de diepe geul. Dit wijst waarschijnlijk op het voorkomen van een harde, resistente laag (bijvoorbeeld schelpen, keien, keileem).*

### **Welke processen sturen het gedrag van de geulwandsuppletie?**

*De gebiedsdekkende kaarten van morfologie, korrelgrootte, zware mineraalgehalte en bodemruwheid laten zien dat het Molengat in drie sedimentologische eenheden kan worden opgedeeld:*

*In het gebied ten noorden van de geulwandsuppletie is kustdwars sedimenttransport een belangrijk transport mechanisme.*

*Rondom de geulwandsuppletie zorgt kustdwars sedimenttransport sortering van het sediment. De aard van de sedimentsortering duidt niet op sterke erosie als gevolg van insnijden van een getijdengeul.*

*De landwaartse positie van het diepste deel van de geul van het Molengat lijkt op de plaats te worden gehouden door een resistente laag.*



**Inhoud**

<b>SAMENVATTING</b>	<b>4</b>
<b>INHOUD</b>	<b>6</b>
<b>1 INTRODUCTIE</b>	<b>8</b>
1.1 Kader	8
1.2 Gebied	8
1.3 Dit rapport	10
<b>2 METEN MET MEDUSA</b>	<b>11</b>
2.1 Het MEDUSA principe	11
2.2 Veldmetingen	12
2.3 Data analyse en modellering	13
2.3.1 Korrelgrootte	13
2.3.2 Gehalte zware mineralen	15
2.3.3 Bodemruwheid	16
<b>3 MEETGEGEVENS</b>	<b>19</b>
3.1 Datasets	19
3.2 Geostatistische analyse	19
3.3 Interpolatie en analyse van de onzekerheden	22
<b>4 SEDIMENTOLOGIE IN HET MOLENGAT</b>	<b>24</b>
4.1 Morfologie van het molengat	24
4.2 Korrelgrootte	25
4.3 Zware mineralen	26
4.4 Bodemruwheid	26
4.5 Model	27
4.6 Het strand	31
4.7 Ontwikkeling van de geulwandsuppletie	32
<b>5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>34</b>
5.1 Sedimentologische kartering	34
5.2 Onderzoek- en beheersvragen	34
5.3 Aanbevelingen	35
<b>6 REFERENTIES</b>	<b>36</b>

FIGUREN

Aparte Bijlage



# 1 Introductie

## 1.1 Kader

De morfologische verandering van de kustlijnen van de kop van Noord-Holland en van Zuidwest Texel worden mede gestuurd door morfologische ontwikkelingen op de buitendelta van het Zeegat van Texel. Bij de kop van Noord-Holland wordt de morfologische ontwikkeling voor een belangrijk deel bepaald door de ontwikkelingen van het Nieuwe Schulpengat, bij zuidwest Texel door de getijdengeul Molengat en de ondiepte, Noorderhaaks.

Binnen het programma KUST2005 van RWS wordt kennis vergaard om optimale strategieën te ontwikkelen voor het handhaven van de kustlijn onder andere bij deze eilandkoppen.

De sedimentologie in de geul van het Molengat is complex. Naar verwachting komen resistente en minder resistente lagen in de ondergrond voor en varieert de korrelgrootte van het sediment over een kleine afstand. Om de kustlijn te beschermen tegen deze erosie wordt regelmatig zand gesuppleerd. In de zomer van 2003 is een geulwandsuppletie uitgevoerd in het Molengat. Deze geulwandsuppletie moet ervoor zorgen dat de erosie van de kustlijn op een efficiënte manier in de hand wordt gehouden.

Om meer inzicht te krijgen in de processen die de ontwikkeling van de geulwandsuppletie sturen, is een MEDUSA kartering uitgevoerd. Dit onderzoek tracht antwoord te geven op een aantal vragen:

- Hoe is de geulwandsuppletie ontwikkeld?
- Wat is de sedimentologische opbouw van het Molengat?
- Welke processen sturen het gedrag van de geulwandsuppletie?

## 1.2 Gebied

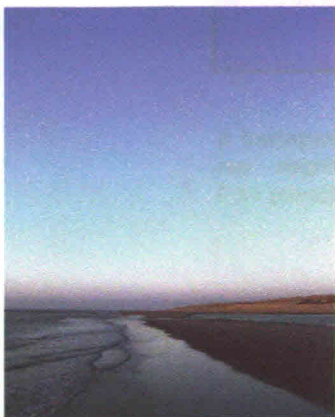
Het onderzoeksgebied (figuur 1) ligt net ten westen voor de kust van Texel en wordt in het zuiden begrensd door een diepe doorgang tussen de intergetijde plaat Noorderhaaks en de vlakte de Hors. In het noorden wordt het onderzoeksgebied begrensd door strandpaal 13.

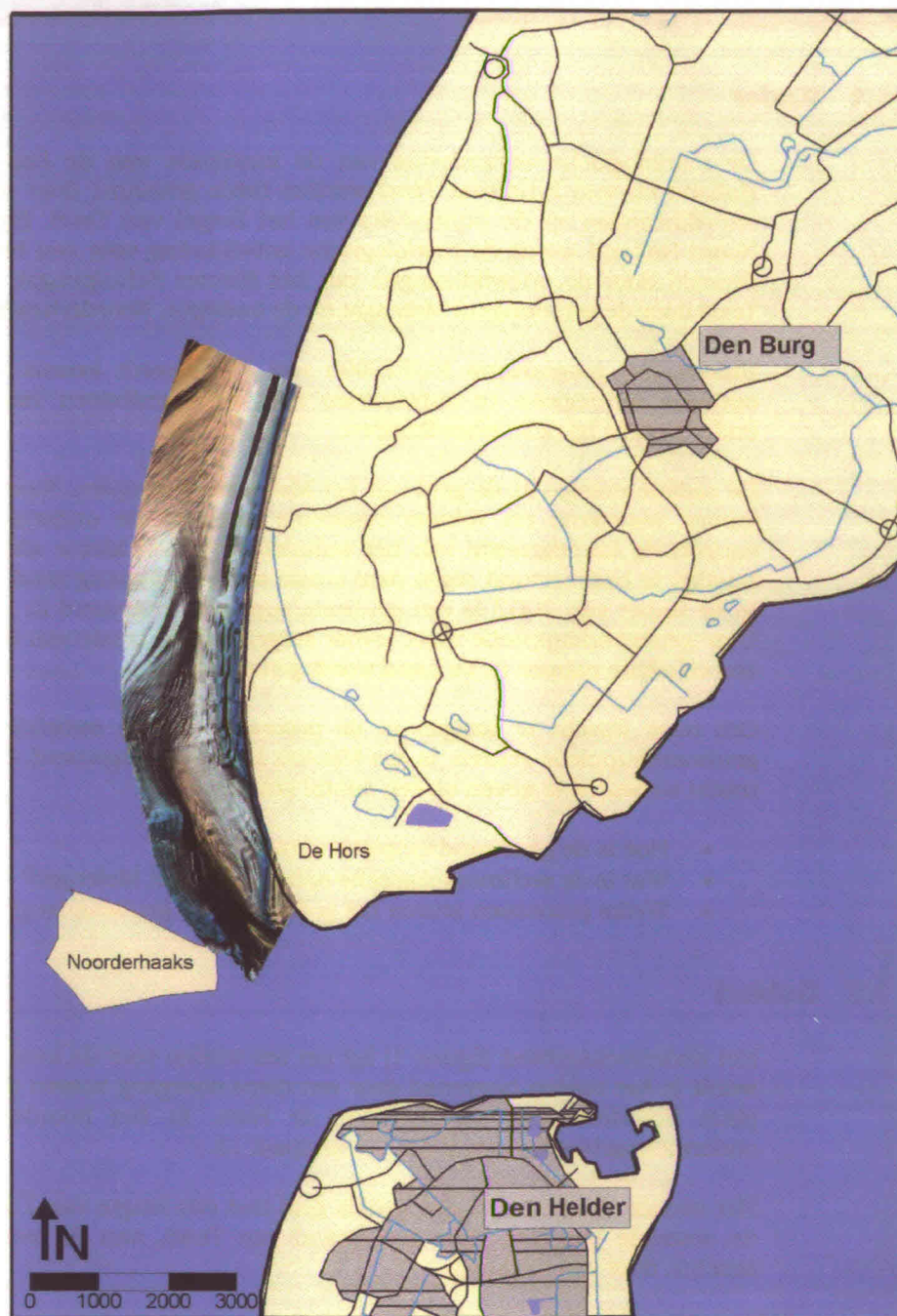
Het onderzoeksgebied is een getijde geul met een lengte van 7 km en is aan de oostzijde begrensd door het strand van Texel, aan de westzijde is het beschermt door een ondiepte.

De suppletie is geplaatst tussen raai 9 en raai 11. Op basis van deze raaien en de kaart van de morfologie zijn de coördinaten van de suppletie bepaald:

tabel 1: coördinaten van de hoekpunten van de geulwandsuppletie.

X (RD; m)	Y (RD; m)
108947	560560
109088	558061
109476	558132
109355	560601
108947	560560





figuur 1: Overzichtskarta van het onderzoeksgebied "Molengat". Het onderzoeksgebied is weergegeven als een 3-dimensionele dieptekaart (afkomstig van lodingen van Rijkswaterstaat, directie Noord Holland) variërend van -20 m (grijs-wit), -10 m (bruin) tot 0 m (blauw).



### 1.3 Dit rapport

De basis van de gebiedsdekkende kaarten van de sedimentologie in het Molengat ligt in een kartering die in het najaar van 2003 is uitgevoerd. De uitvoering van de metingen, analyse van de ruwe meetgegevens en borging van de kwaliteit van de data is in een aparte datarapportage vastgelegd (Koomans, 2003). Het concept van deze metingen, de meetprocedure en gevolgde data analysestappen staan uitgelegd in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt de dataset beschreven en worden de onzekerheden in de resultaten geanalyseerd.

De kartering in het Molengat is uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de processen die de ontwikkeling van de geulwandsuppletie sturen. Hiertoe zijn de gebiedsdekkende kaarten van de morfologie en sedimentologie beschreven en wordt een model gepresenteerd waarin de sedimenttransportprocessen in het Molengat uit de kaarten worden afgeleid (hoofdstuk 4). In hoofdstuk 5 worden de conclusies gepresenteerd.

De overzichtskaarten, zijn opgenomen in de appendix. In de tekst worden uitsneden en detailopnames gebruikt.



## 2 Meten met MEDUSA

### 2.1 Het MEDUSA principe

Het MEDUSA systeem is een geofysisch meetsysteem ontwikkeld voor de bepaling van textuur, korrelgrootte en chemische samenstelling van de toplaag (bovenste 30-50 cm) van de waterbodem (Hendriks, 2003). Het meetsysteem is gebaseerd op een gekalibreerde meting van een aantal radioactieve sporenelementen, zowel in het veld als in het laboratorium en bevat daarnaast een sensor voor meting van waterdiepte en een sensor voor bodemruwheid. Volgens het MEDUSA principe worden veldmetingen en een laboratorium analyse gebruikt om gebiedsdekkende kaarten van sedimentologie en chemie te creëren (figuur 2).

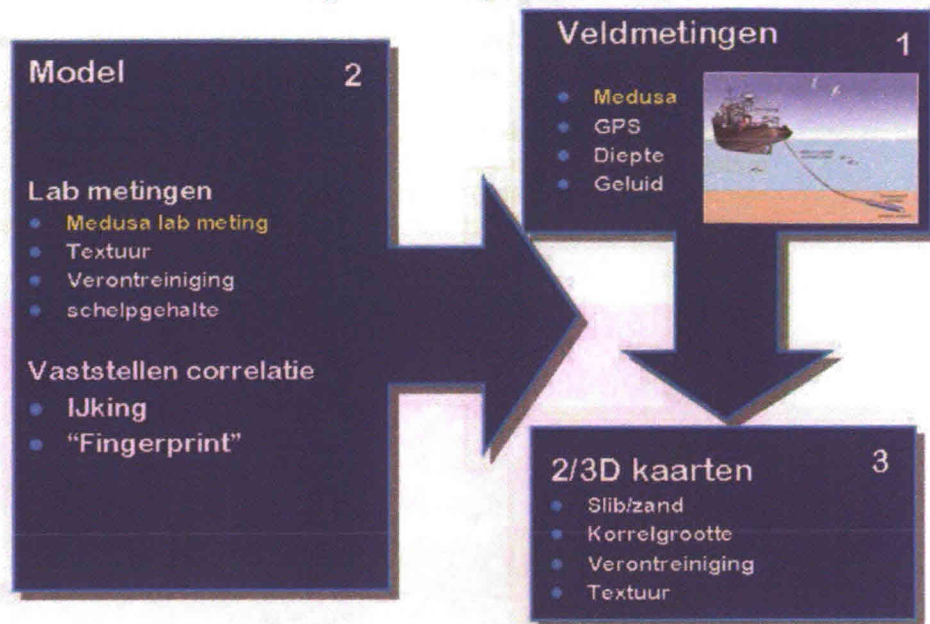
Bij de **veldmetingen** wordt het MEDUSA systeem achter een boot over de waterbodem gesleept. Bij deze meting wordt de data afkomstig van een aantal sensoren geïntegreerd en aan GPS coördinaten gekoppeld (1 in figuur 2).

Met behulp van een (beperkt) aantal sedimentmonsters uit het gebied wordt een **model** opgesteld om de MEDUSA parameters (gemeten in het veld) te vertalen naar informatie over de bodemsamenstelling (2 in figuur 2). Hiervoor worden de sedimentmonsters in het laboratorium onder gecontroleerde omstandigheden geanalyseerd op de concentraties radioactieve sporenelementen (MEDUSA meting) en de doelparameter (in dit geval korrelgrootte, gehalte zware mineralen en bodemruwheid). Met de correlatie tussen de MEDUSA laboratorium metingen en de doelparameter wordt de fingerprint van de sedimenten bepaald.

Deze fingerprint van de sedimenten wordt vervolgens gebruikt om de gebiedsdekkende veldmetingen te vertalen naar 2 of 3 dimensionale **kaarten** van de doelparameter (3 in figuur 2). Met behulp van veldmetingen en een bijpassende laboratoriumanalyse levert het MEDUSA systeem gebiedsdekkende kaarten van:

- Sedimentologie/ textuur
  - Korrelgrootte (D50)
  - Bodemruwheid
  - Zware mineraalgehalte
- Waterdiepte

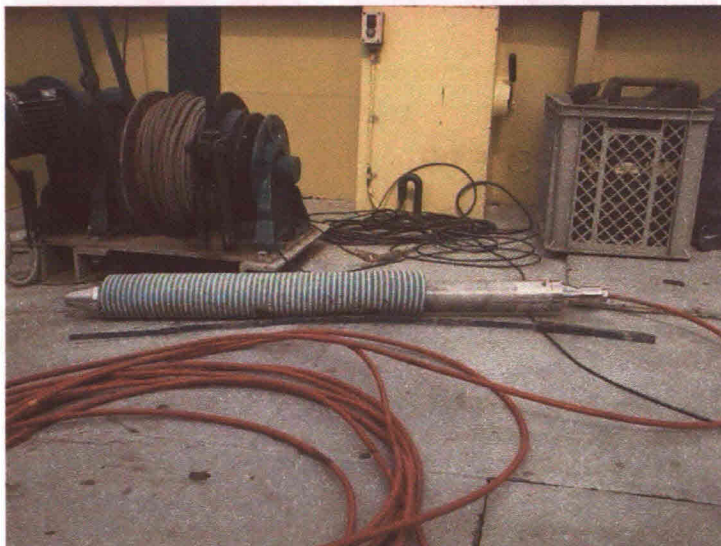
## Het Medusa principe



figuur 2: Schematische weergave van het MEDUSA principe.

### 2.2 Veldmetingen

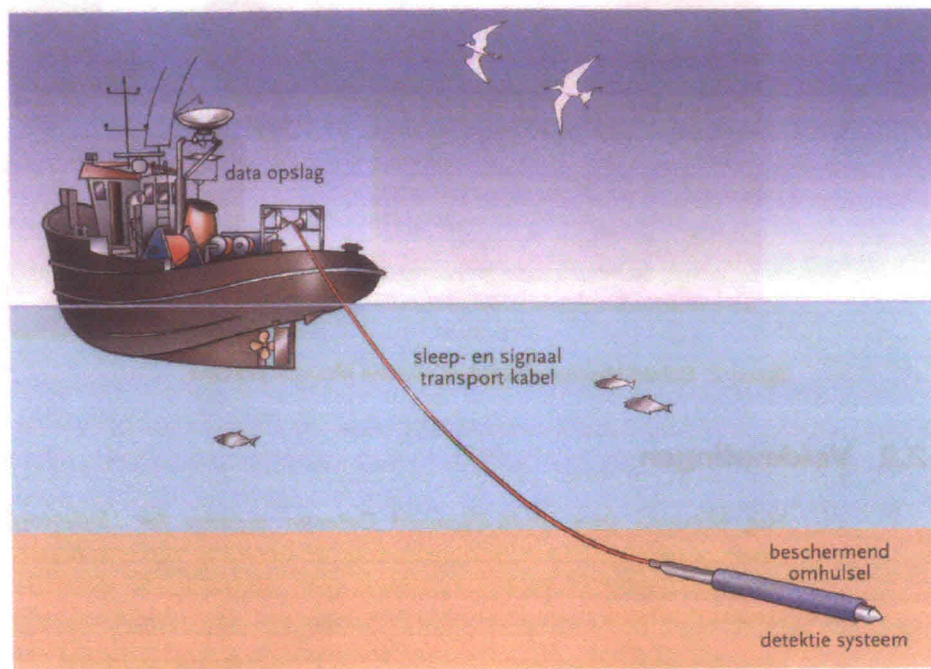
Het MEDUSA (het *Multi-Element Detector system for Underwater Sediment Activity*) systeem bevat sensoren voor de bepaling van een aantal radioactieve sporenelementen, voor de meting van waterdiepte en een sensor voor bodemruwheid.



figuur 3: De MEDUSA-detector in een gedeelte van de blauwe PVC-buis.

Het MEDUSA-meetsysteem is geplaatst in een aluminium buis van ongeveer 100 cm lengte en een diameter van 7 cm (zie figuur 3). Deze buis is door een met kevlar versterkte coaxkabel via een lier met een computer verbonden.

Bij metingen aan de onderwaterbodem wordt MEDUSA in een beschermende PVC-buis achter een schip over het sediment gesleept (figuur 4). Voor een goede meting is het van belang dat het meetsysteem in contact met de waterbodem is. Dit wordt bereikt door voldoende gewicht aan de kabel vast te maken. Met een vaarsnelheid tussen 5 en 10 km/uur kan in een dag tijd gemiddeld 60 km raai in kaart worden gebracht. Tijdens de meting wordt de positie van het schip en de sensor bepaald met behulp van een dGPS systeem.



figuur 4: Het MEDUSA-systeem achter een schip gesleept.

## 2.3 Data analyse en modellering

Na de veldmeting worden de ruwe meetgegevens (diepte, dGPS, gamma spectra, geluid) samengevoegd en worden de gamma spectra geanalyseerd met behulp van spectrum analyse. Vervolgens worden de MEDUSA gegevens met behulp van een model vertaald naar de doelparameters. Voor de huidige studie zijn modellen gebruikt om de volgende doelparameters te analyseren:

- Korrelgrootte (D50)
- Gehalte zware mineralen
- Bodemruwheid

Hierop wordt in de volgende paragrafen nader ingegaan

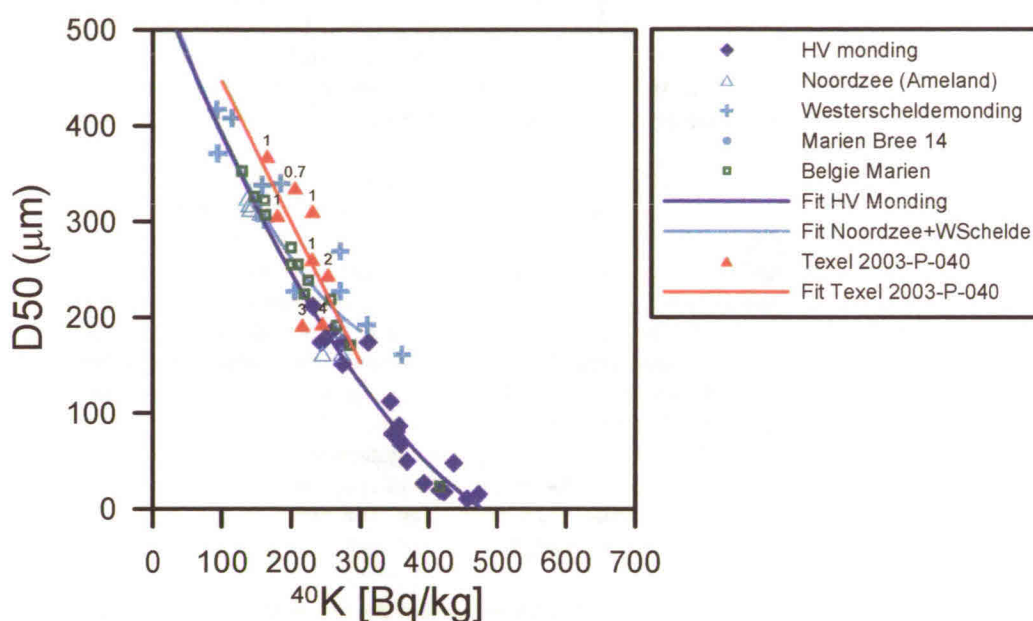
### 2.3.1 Korrelgrootte

In verschillende studies (de Meijer et al., 2002a; Koomans, 2000; Koomans en Oosterhoff, 2002) is aangetoond dat MEDUSA metingen gebruikt kunnen worden om gebiedsdekkende kaarten te maken van de mediane korrelgrootte van het sediment. Bij deze analyse maken we gebruik de correlaties tussen

de concentratie kalium (<sup>40</sup>K) en de korrelgrootte van het sediment (figuur 5). Deze correlatie is het gevolg van het feit dat de verhouding K-veldspaat/kwarts varieert met korrelgrootte (Odom, 1976). Bepalingen van het kaliumgehalte in verschillende sedimentmonsters laat zien dat het gehalte K-veldspaat toeneemt bij afnemende korrelgrootte.

Voor deze studie is een calibratie gemaakt tussen de mediane korrelgrootte (D50) en het <sup>40</sup>K gehalte van monsters uit het Molengat (rode datapunten in figuur 5). De monsters zijn voor analyse van de korrelgrootte met behulp van een Malvern Particle sizer niet voorbehandeld. Deze monsters laten een negatieve correlatie zien tussen de mediane korrelgrootte en het <sup>40</sup>K gehalte. Om een beeld te krijgen van variaties in het schelpgehalte van het sediment is het percentage kalk bepaald (zwarte labels bij de rode punten in figuur 5) door het kalk uit te gloeien. Deze resultaten laten zien dat twee datapunten die enigszins afwijken van de lineaire trend in de data verhoogde kalkgehalten hebben. Een lineaire fit tussen de datapunten is gebruikt om de <sup>40</sup>K gehalten te vertalen naar de mediane korrelgrootte van het sediment:

$$D50 = 593 - 1.47K \quad (R^2=50\%) \tag{1}$$



figuur 5: Correlatie tussen korrelgrootte (D50) en gehalte <sup>40</sup>K voor sedimentmonsters met een mariene herkomst. De monsters Texel 2003-P-040 zijn genomen in het Molengat en geanalyseerd door NITG-TNO met behulp van een Malvern Particle sizer. De labels bij de rode punten geven het kalkpercentage in de monsters aan. De rode lijn is de "best fit", gebruikt voor de calibratie van de Molengat sedimenten<sup>a</sup>).

Om de monsterresultaten te valideren, zijn sedimentmonsters uit eerdere studies van verschillende locaties op en langs de Noordzee in dezelfde grafiek geplott (figuur 5). Sedimentmonsters met een fluviatiele herkomst zijn uit de analyse weggelaten. Deze monsters laten zien dat de trend (de helling van de lineaire fit) in de monsters uit Texel vergelijkbaar is met de trend in de

<sup>a</sup> Alle monsters zijn geanalyseerd zonder voorbehandeling. De korrelgrootte van de monsters uit de HV monding is bepaald met een Malvern particle sizer (uitgevoerd door NITG-TNO), de monsters België Noordzee zijn geanalyseerd door de Rijksuniversiteit Gent met een Coulter Counter particle sizer. De monsters uit de Westerscheldemonding zijn geanalyseerd door RIKZ Middelburg met behulp van een Malvern Particle sizer. De monsters Marien Bree 14 zijn afkomstig uit het Noordzeebekken en geanalyseerd door het NIOZ (met een Malvern Particle sizer).

monsters uit andere delen van de Noordzee. De absolute schaal vertoont een afwijking van ~50  $\mu\text{m}$ . Deze spreiding kan het gevolg zijn de verschillende methoden die voor de analyse van de korrelgrootte gebruikt zijn, of een natuurlijke oorzaak hebben omdat langs de kust sediment met verschillende herkomst voor kunnen komen. Het feit dat in de correlaties geen geografische trend waarneembaar is maakt dit echter niet waarschijnlijk. Waarschijnlijk is de spreiding het gevolg van de verschillende meetmethoden en de meetfout in de bepaling van korrelgrootte.

### 2.3.2 Gehalte zware mineralen

Zware mineralen worden gekenmerkt door hoge concentraties uranium en thorium en lage concentraties kalium (de Meijer et al., 1990). Om de concentratie zware mineralen te bepalen, is een ijking nodig. In deze ijking wordt het MEDUSA signaal met behulp van een "fingerprint" omgezet naar de zware mineraalfraction (de Meijer et al., 1997). De fingerprint van een sedimenttype is de concentratie van de nucliden in sediment.

In het onderzoeksgebied zijn voor de studie naar zware mineralen geen sedimentmonsters genomen. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de verdeling van deze sedimenten zijn (oude) monstergegevens uit aangrenzende gebieden genomen. De zo verkregen resultaten geven een *indicatief* beeld. Een extra analyse van sedimentmonsters uit het gebied zal het patroon niet veranderen, de absolute waarden kunnen echter nauwkeuriger worden.

In het verleden zijn een groot aantal sedimentmonsters verzameld langs de kust van de Noordzee vanaf Denemarken (Skagen) tot aan Frankrijk (Calais) (Oost, 1998). Voor deze studie zijn in 1996 monsters genomen van sedimenten langs de kustlijn van Noord-Holland. Deze monsters zijn gescheiden in een lichte en zware-mineraal fractie met behulp van een overloop centrifuge en de oplossing van natrium polytungstate ( $\rho = 2.8 \text{ kg/l}$ ). Van de zware en de lichte fracties is vervolgens de concentraties natuurlijke radionucliden bepaald met behulp van gammaspectrometrie (tabel 2). In andere studies (de Meijer et al., 1990; de Meijer et al., 1997) zijn ook (strand)monsters uit dit gebied genomen. Van deze sedimentmonsters zijn de gehalten aan natuurlijke radionucliden en is het gehalte zware mineralen bepaald. In tabel 2 is voor deze monsters de Th en de U concentratie in de zware fractie berekend.

tabel 2: Concentraties Th en U voor de zware en lichte fractie van sedimenten voor de kust van Texel (monsters afkomstig uit: (Oost, 1998; Tanczos, 1996)).

Locatie	Lichte fractie		Zware fractie		Referentie
	Th (Bq/kg)	U (Bq/kg)	Th (Bq/kg)	U (Bq/kg)	
Texel	1.1	2.7	385	395	Tanczos
Texel Noord	0.9	4.2	338	240	Oost
Texel Zuid	1.1	2	296	147	Oost
Gemiddelde	1.0	3	340	261	
Spreiding	0.1	1	45	125	

De gegevens in tabel 2 laten zien dat de concentraties thorium en uranium variëren voor de zware mineraalfraction. De gemiddelde concentratie thorium is 340 Bq/kg met een standaardafwijking van 45 Bq/kg. De gemiddelde concentratie uranium is 261 Bq/kg met een standaardafwijking van 125

Bq/kg. Deze variaties in de activiteitsconcentraties van de verschillende monsters kunnen het gevolg zijn van:

- Onzekerheden in de bepaling van de concentraties Th en U
- Onzekerheden in de bepaling van de fractie zware mineralen
- Sortering van zware mineraaltypen binnen de zware mineraalfractie

Onzekerheden in de bepaling van de U en Th concentraties zijn klein (<5% relatief) en kunnen de spreiding niet verklaren. De onzekerheid in de bepaling van de fractie zware mineralen in de sedimentmonsters van de studies uit 1998 en 1996 wordt geschat op 25% (Oost, 1998).

De concentraties thorium en uranium variëren per type mineraal (de Meijer en Donoghue, 1995). Monaziet bevat bijvoorbeeld hogere concentraties thorium dan zirkoon. De thorium en uranium concentraties van de bulk fractie "zware mineralen" worden dus ook sterk bepaald door de samenstelling van deze bulkfractie. Door sortering van zware mineralen binnen de bulkfractie zware mineralen, zal ook de fingerprint variëren.

In de analyse van de fractie zware mineralen zal daarom rekening worden gehouden met de spreiding in de fingerprint van het sediment.

De fractie zware mineralen ( $f_{HM}$ ) is bepaald met behulp van de concentratie thorium en uranium ( $A_{Th}$ ,  $A_U$ ), de fingerprint van de lichte fractie ( $A_{light}$ ) en de fingerprint van de zware fractie ( $A_{zwaar}$ ) (de Meijer et al., 1997):

$$f_{HM} = \left( \frac{(A_{Th} + A_U) - (A_{light,Th} + A_{light,U})}{(A_{heavy,Th} + A_{heavy,U}) - (A_{light,Th} + A_{light,U})} \right). \quad (2)$$

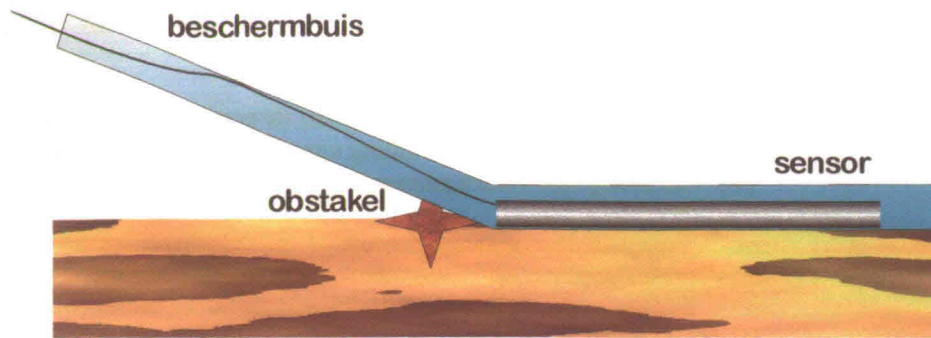
### 2.3.3 Bodemruwheid

De bodemruwheid ( $k$ ) is een parameter die de weerstand tussen (stromend) water en het sediment beschrijft. De bodemruwheid ( $k_{bodem}$ ) is opgebouwd uit ruwheid afkomstig van golf- en stroomribbels ( $k_{ribbel}$ ) en uit een ruwheid afkomstig korrelgrootte ( $k_{korrelgrootte}$ ) (van Rijn, 1993):

$$k_{bodem} = k_{ribbel} + k_{korrelgrootte}. \quad (3)$$

In verschillende studies wordt aangetoond dat de bodemruwheid een belangrijke parameter is in de berekening van sedimenttransport in het kustgebied (Black en Oldman, 1999; Davies en Villaret, 2002). Deze studies laten tevens zien dat in geval van een geribbeld (golf- en stroomribbels) bed, de ruwheid van ribbelstructuren ( $K_{ribbel}$ ) een factor groter is de ruwheid van korrelgrootte ( $K_{korrelgrootte}$ ). Alleen in gebieden met megaribbels is de korrelgrootte bepalend voor de bodemruwheid.

Een van de parameters die met het MEDUSA systeem wordt gemeten is de ruwheid van de waterbodem. In de MEDUSA buis zit een geluidssensor die de wrijving tussen de bodem en de detector registreert (figuur 6). Deze geluidsmeting is consistent en herhaalbaar. De resultaten van deze geluidsmetingen worden gebruikt om het gehalte schelpen of de hoeveelheid puin in het sediment in kaart te brengen (Limburg en de Vries, 2003; Oosterhoff et al., 2003).



figuur 6: De MEDUSA sensor in de beschermende buis glijdt over een obstakel (bijvoorbeeld schelpen, ribbelstructuren)

Het geluid dat met Medusa gemeten wordt, kan door verschillende bodemvormen en sedimenttypen gegenereerd worden. Het geluid kan een functie zijn van:

- Korrelgrootte van het sediment
- Type sediment (schelpen, zand)
- Afgerondheid sediment (afgerond vs hoekig)
- Harde objecten (stenen en puin)
- Ribbelstructuren (“wasbord effect”)

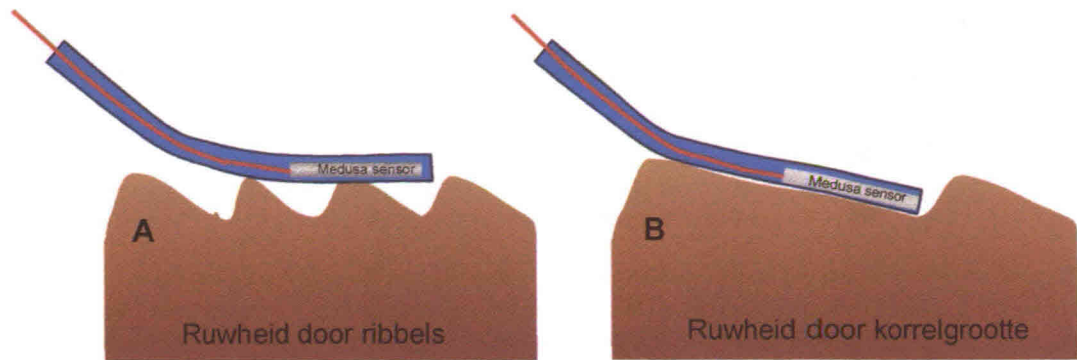
Men kan het proces dat leidt tot het geluid vergelijken met het aanslaan van bijvoorbeeld een orgelpijp: wanneer de meetbuis over zand (met een oppervlak zonder ribbels) getrokken wordt, zal de “orgelpijp” een schurend geluid voortbrengen dat intenser wordt naarmate de korrelgrootte van het sediment toeneemt. In proeven (Koomans, 2000) is gebleken dat de intensiteit van het geluid in zulke gevallen schaal met de mediane korrelgrootte (D50) van het sediment. Tevens blijkt uit de experimenten dat het frequentiespectrum van het geluid *niet* afhangt van de korrelgrootte. Oftewel: verschillen in korrelgrootte leiden wel tot verschil in geluidsterkte, maar niet in verschillende klank. Verder is aangetoond dat de geluidsterkte nauwelijks afhangt van de snelheid waarmee de sensor wordt voortgesleept.

In verschillende studies (Limburg en de Vries, 2003; Oosterhoff et al., 2003) is onderzocht in hoeverre de geluidssensor gebruikt kan worden om een kwalitatief en kwantitatief beeld te krijgen van het schelpgehalte en gehalte aan grote objecten in het sediment.

Ook de morfologie van de bodem speelt een rol in de variaties in geluidsterkte. Een gladde bodem produceert immers een ander geluid dan een bodem waarop kleinschalige ribbelstructuren voorkomen (vergelijkbaar met het schuren over een ouderwets wasbord). De MEDUSA sensor (met een lengte van 1 m) zit in een, 15 m lange, semi-flexibele PVC buis. De lengte van het contactoppervlak van deze buis is enkele meters. Ribbelstructuren met een golflengte groter dan enkele meters worden door MEDUSA niet als “ribbel” gevoeld; ribbelstructuren met een golflengte kleiner dan enkele meters geven naar verwachting een verhoging van het geluidssignaal (figuur 7).

De studies naar het bepalen van het gehalte van puin in het sediment hebben laten zien dat de geluidsterkte schaal met de grootte van het object (zandkorrel, schelp, puinbrok). Lage waarden (<~20%) in de geluidsterkte zijn het gevolg van korrelgrootte, grote waarden in de geluidsterkte zijn het gevolg van ribbelstructuren, puin en schelpen.





figuur 7: Effect van ribbelvorm op de bodemruwheid. A. kleinschalige ribbelstructuren genereren een "wasbord" effect, de ruwheid wordt door ribbelvorm gedomineerd. B. De sensor glijdt over de ribbels heen, de ruwheid wordt door korrelgrootte gedomineerd.

Het MEDUSA systeem meet de ruwheid van de *toplaag* van het sediment. De bodemruwheid wordt gerapporteerd als percentage van het maximum te meten signaal. Deze waarde is arbitrair en geeft de relatieve variatie in de bodemruwheid weer.

## 3 Meetgegevens

### 3.1 Datasets

#### MEDUSA meting Molengat

De metingen zijn uitgevoerd eind september 2003. Bij de metingen is gebruik gemaakt van de het vaartuig De Breesem van directie Noord-Holland. Tijdens de metingen is het MEDUSA systeem achter het schip over de bodem gesleept. De positie van het MEDUSA systeem is bepaald door middel van een DGPS (Trimble). Tijdens de survey is elke 3 m een datapunt gemeten

De uitvoering van de kartering is succesvol. In totaal is 133.5 km onder water in kaart gebracht. In de datarapportage (Koomans, 2003) zijn de analysestappen en is de kwaliteit van de meetgegevens beschreven.

#### Meting strand

Op zaterdag 25 oktober 2003 is een additionele meting op het strand uitgevoerd. Bij deze meting is de MEDUSA detector op een auto gemonteerd en zijn vier parallelle raaien met een totale lengte van 17 km op het strand gemeten.



figuur 8: Impressie van de meting op het strand, met de MEDUSA detector gemonteerd op een 4WD. De rechter foto laat duidelijk de scherpe duinovergang na de storm zien.

In de datarapportage (Koomans, 2003) zijn de analysestappen en de kwaliteit van de meetgegevens beschreven.

De meting op het strand is ongeveer 4 weken na de onderwater metingen uitgevoerd. In de week vóór de meting op het strand is een zware storm over het gebied getrokken en is de morfologie van het strand sterk veranderd. Vanwege deze grote verschillen zijn de strandmetingen niet geïntegreerd met de onderwatermetingen.

#### Diepte meting

Voor de gegevens van de morfologie in het molengat is gebruik gemaakt van lodingen die door de meetdienst van de directie Noord Holland zijn uitgevoerd. Deze metingen zijn in augustus 2003 (na het aanleggen van de suppletie!) uitgevoerd.

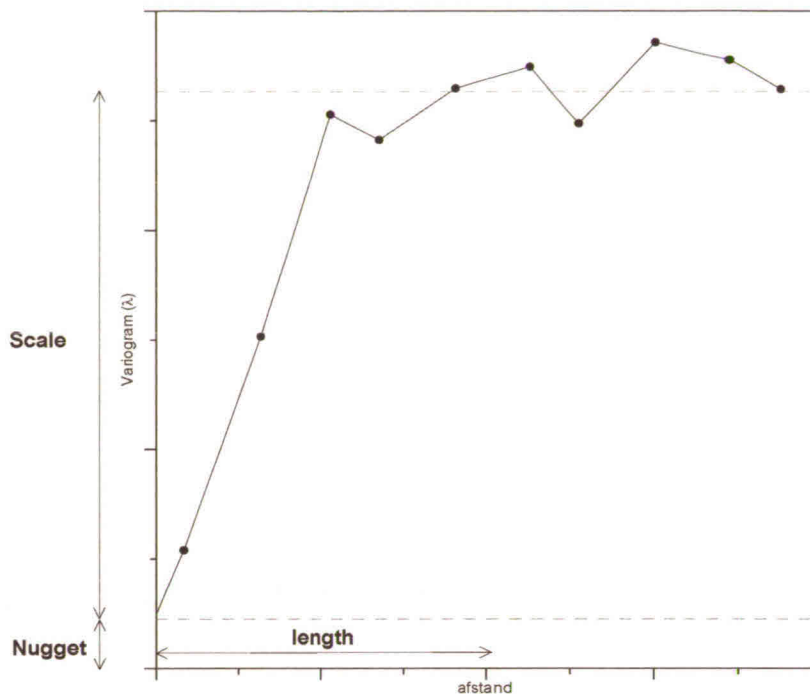
### 3.2 Geostatistische analyse

Voor de interpolatie van de meetgegevens is gebruik gemaakt van de kriging methode (Webster en Oliver, 2001). Kriging is een interpolatiemethode waarin

de meetwaarden tussen de meetpunten wordt geschat. Des te dichter de meetpunten bij elkaar liggen des te beter kan een schatting worden gemaakt. Om zo goed mogelijk te schatten wil de kriging software weten welke trends er in het gebied redelijkerwijs te verwachten zijn, anders gezegd; wat de onderlinge relatie is tussen de meetpunten. Hiertoe dient het semivariogram.

### Het variogram

Het semivariogram (figuur 9) beschrijft de mate waarin waarneming gerelateerd zijn, als functie van de afstand tussen deze waarnemingen. Het is te verwachten dat de onderlinge relatie van punten dicht bij elkaar groter is dan van punten die verder van elkaar af liggen, voor elke dataset en parameter kan de schaal van deze afstand echter variëren. Door het experimenteel bepaalde variogram te "fitten" met een variogram model, kunnen een aantal eigenschappen van de dataset bepaald worden.



figuur 9: Voorbeeld van een variogram van de geluidsintensiteit in het Molengat.

**De nugget** parameter uit de semivariantie-analyse is een maat voor de onzekerheid van de (interpolatie)waarde op een punt uit de kaart. Deze waarde presenteert de gemiddelde variantie in het kwadraat en is samengesteld uit de stochastische variatie (volgens uit de MEDUSA metingen en de calibratiecurve) ruimtelijke variatie op een schaal kleiner dan de raai-afstand die gekozen is bij de meting. Voor een oneindig dichte raai-afstand is de nugget gelijk aan de meetfout van ieder data punt. Wanneer de nugget waarde groter is dan de meetfout van ieder data punt, is het raaienpatroon niet dicht genoeg om alle variatie te beschrijven.

**De length** parameter geeft aan vanaf welke afstand de datapunten geen correlatie meer vertonen. Als de afstand tussen twee datapunten groter is dan de lengthparameter, zullen deze gegevens geen zinvolle informatie geven bij de interpolatie van de meetgegevens (zie bijvoorbeeld: Burrough, 1986).

**De Scale** parameter is simpelweg een schaalfactor in het variogram tussen de minimale variatie die gevonden wordt in de datapunten (gelijk aan de

nuggetparameter), en de variogramwaarde waarop de datapunten ongecorrleerd zijn (daar waar de getrokken lijn in de figuren 4 en 5 vlak gaat lopen). De Scaleparameter is afhankelijk van het aantal datapunten dat in het semivariogram wordt meegenomen. De *som van de nuggetparameter en de scaleparameter* is ongeveer gelijk aan de *variantie* van de totale dataset.

**Anisotropie.** In een kustgebied is te verwachten dat de onderlinge relatie tussen meetpunten dwars op de kustlijn kleiner is dan in de lengterichting van de kust. De richting van de variatie in een dataset wordt bepaald met behulp van anisotropie.

#### Analyse van de dataset

De geostatistische parameters van de dataset zijn bepaald met behulp van het analysepakket "Surfer". Deze parameters zijn gebruikt om de resultaten met behulp van Kriging te interpoleren daarnaast kunnen de parameters worden gebruikt om globale informatie uit de meetgegevens te extraheren.

Voor alle variogram modellen is gebruik gemaakt van een nugget model en een sferisch variogram model. De fitparameters zijn in tabel 3 gepresenteerd.

De anisotropie van de datasets laat zien dat de variatie in alle parameters het grootst is dwars op de geul. In de richting van de geul (in N-Z richting) vertonen de metingen de minste variatie.

In tabel 3 staan de berekende nugget waarden en de kwadraten van de statistische onzekerheid in de meetpunten weergegeven. Voor alle parameters (behalve voor U) komen deze waarden overeen. Dit geeft aan dat de raaiafstand goed is geweest. Voor uranium is de nugget groter dan de statistische fout in het kwadraat. Kennelijk komen variaties in het uranium gehalte voor op afstanden kleiner dan de raaiafstand.

tabel 3: Fitparameters uit een nugget en sferisch variogram model van de MEDUSA dataset. De waarde van  $\sigma^2$  geeft de statistische onzekerheid in de meetparameters.

	Nugget	$\sigma^2$	scale	Length (m)	aniso richting
K	800	770	1075	670	360
U	14	9.3	10	1300	360
Th	4.6	4.2	9	1400	360
Tc	10	11	400	1400	360

tabel 4: Nugget parameter van de korrelgrootte, zware mineraalgehalte en de bodemruwheid. Het gemiddelde geeft de gemiddelde waarde in het gehele gebied. De  $\sigma$  parameter geeft de berekende onzekerheid per meetpunt.

	Nugget	Gemiddelde	$\sigma$
Korrelgrootte	2500	309 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Zware mineralen	1.3	0.9 %	1.1 %
Bodemruwheid	0.5	3.1	0.7

Met behulp van de nugget parameter kan de onzekerheid in de berekende sedimentologische parameters worden bepaald. In tabel 4 zijn de nugget parameters van de korrelgrootte, zware-mineraal gehalten en bodemruwheid, de gemiddelde waarde en de berekende fout in de bodemtextuur

weergegeven. Deze analyses laten zien dat de gemiddelde fout in de korrelgrootte *per meetpunt* 50  $\mu\text{m}$  is. De onzekerheid per meetpunt in het zware mineraalgehalte is ongeveer even groot als de gemiddelde concentratie zware mineralen. De onzekerheid per meetpunt van de bodemruwheid is 0,7, het gemiddelde van de bodemruwheid is 3,1.

### 3.3 Interpolatie en analyse van de onzekerheden

De meetgegevens zijn met behulp van de Kriging methode geïnterpoleerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de gegevens uit het variogram (tabel 3 en tabel 4). Wanneer de nugget parameter wordt gebruikt bij interpolatie, zal de Kriging methode de meetgegevens (die een spreiding vertonen als gevolg van statistische onzekerheden) uitsmeren ("smoothing"). Bij de interpolatie van de meetgegevens worden toevallige onzekerheden gemiddeld. Hierdoor zullen de onzekerheden in de gridpunten kleiner zijn dan de waarde die door de nuggetparameter in de meetpunten gegeven wordt (tabel 4).

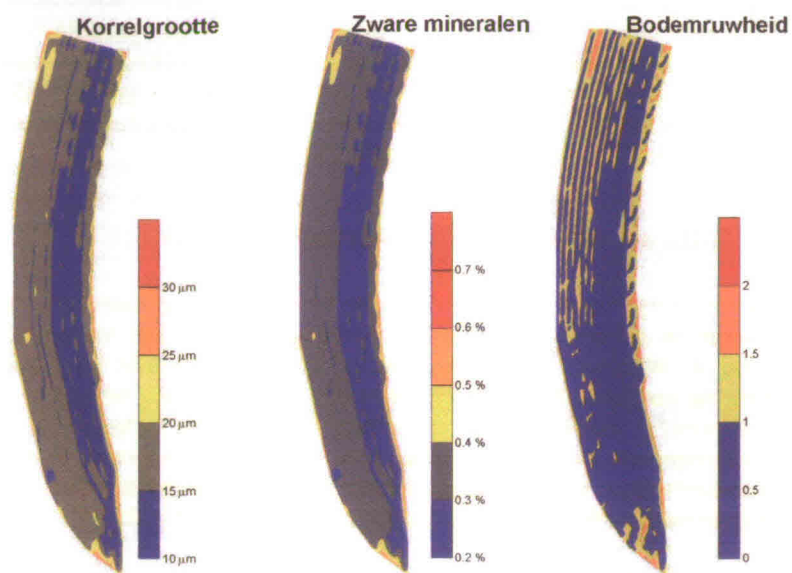
De onzekerheden in de gegevens na interpolatie worden als gridbestand bewaard (figuur 10). Deze onzekerheden zijn lager dan de onzekerheden per meetpunt (tabel 4) en laten een duidelijk structuur zien. Voor de korrelgrootte en het gehalte zware mineralen zijn de onzekerheden in het oosten van het gebied (waar twee keer zoveel raaien zijn gevaren) lager. In het westelijk deel van het onderzoeksgebied is de raaiafstand de beperkende factor in de kwaliteit van de meetgegevens. Voor de bodemruwheid is deze trend minder duidelijk en worden de kleinste onzekerheden ook in het zuidwesten van het gebied gevonden. In het noordoosten van het gebied is de onzekerheid in de meetgegevens groter tussen de raaien in. De gemiddelde onzekerheid in de kaarten van de mediane korrelgrootte is 16  $\mu\text{m}$ .

tabel 5: Gemiddelde waarden, spreiding in de data en onzekerheden ( $\sigma$ ) van de korrelgrootte, zware mineraalgehalte en de bodemruwheid in de resulterende kaarten.

	Gemiddelde	$\sigma$
Korrelgrootte	309 $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$
Zware mineralen	0.9 %	0.3 %
Bodemruwheid	3.1	0.8

De interpolatiefout is maximaal een factor 2 groter in gebieden waar minder raaien gevaren zijn, deze interpolatiefout is echter in alle gebieden kleiner dan de fout per meetpunt. Deze resultaten geven aan dat:

- Interpolatie van de meetgegevens de kwaliteit per meetpunt verbetert.
- De raaiafstand bepaalt de resulterende onzekerheid. De raaiafstand in toekomstige studies moet niet groter worden genomen dan de gebruikte raaiafstand (50 m nabij het strand, 100 m in het westen van het gebied).



figuur 10: Interpolatiefout na Kriging voor drie sedimentologische parameters.

De fouten in de korrelgrootte, zwارة mineraalgehalte en bodemruwheid zijn kleiner dan de (natuurlijke) variatie in de kaart.

De kleurenintervallen in de kaarten zijn groter dan de fout in de metingen. De trends die in de kaarten zichtbaar zijn, zijn significant.

## 4 Sedimentologie in het Molengat

De gemeten waarden van korrelgrootte, zware mineraalgehalte en bodemruwheid zijn met behulp van Kriging geïnterpoleerd naar gebiedsdekkende kaarten met een gridresolutie van 5×5 m. Deze kaarten zijn in de appendix op drie manieren weergegeven:

- De eerste kaart geeft de contouren van de drie sedimentologische parameters weer.
- In de tweede kaart zijn de korrelgrootte en zware mineralen gehalte gedrapeerd over een bovenaanzicht van een 3 dimensionale (3D) weergave van de waterdiepte.
- In de derde set kaarten zijn de sedimentologische parameters over een 3D kaart van de waterdiepte gedrapeerd. De kaart is echter geroteerd en geeft een blik schuin vanuit het noorden van het gebied. In deze kaarten zijn een aantal kenmerkende structuren met lijnen en namen weergegeven.

Voor de beschrijving van de variatie in de sedimentologie worden de kaarten door elkaar heen gebruikt.

### 4.1 Morfologie van het molengat

#### Zuidelijk deel

Het Molengat is een getijdengeul voor de zuidwestkust van Texel. In het westen is het Molengat begrenst door de zandplaat Noorderhaaks, in zuiden mond het Molengat uit in het Marsdiep. De positie van het Molengat is sterk aan verandering onderhevig. In een rapportage over de erosieproblemen voor de kust van zuidwest Texel (Cleveringa, 2001) zijn deze veranderingen in detail beschreven.

Het Molengat (zie figuur 11) wordt gekenmerkt door een zeer grote diepte in het zuiden van de geul. Op deze locatie snijdt de geul in het sediment tot een diepte van 28 m (onder NAP). De geul verondiept noordwaarts tot een diepte van ongeveer 10 m.

De Noorderhaaks is een zandplaat en ondiepte ten westen van het molengat. Het "bankje" (figuur 11) is een noordelijke uitloper van de Noorderhaaks (genaamd "noordelijke uitloper" in Cleveringa, 2001) en zorgt voor een langgerekte ondiepte voor de kust van zuidwest Texel.

#### Midden

In het midden van het onderzoeksgebied is de geulwandsuppletie uitgevoerd. De suppletie bestaat uit een langgerekte bank van zand, die op een diepte van is ongeveer - 5 m (tov NAP) op de vooroever is neergelegd. In het midden van het gebied is de geul ondieper (~10 m waterdiepte), zeewaarts van de geul komt een ondiepte ("bankje") voor.

#### Noordelijk deel

In het noordelijk deel van het onderzoeksgebied heeft kust een zeewaarts aflopend profiel (tot ongeveer 30 m waterdiepte). Vlak voor de kust komt een duidelijke brekerbank (Roelvink en Stive, 1989) voor.



figuur 11: Overzicht van de morfologie in het Molengat (op basis van lodingen en een schematisatie (Cleveringa, 2001)).

## 4.2 Korrelgrootte

De mediane korrelgrootte in het gebied varieert van 225  $\mu\text{m}$  in het centrale deel van de geul tot 350  $\mu\text{m}$  in het diepste deel van het Molengat.

### Zuidelijk deel

Wat opvalt is dat de korrelgrootte in het diepste deel van het molengat grof is. In dit zuidelijke deel van het Molengat zijn geen duidelijke trends in de korrelgrootte zichtbaar. De korrelgrootte varieert tussen 300 en 350  $\mu\text{m}$ , maar vertoont geen correlatie met waterdiepte in de geul ("lijn B" in de 3D figuren in de bijlage).

### Midden

In het midden van het meetgebied is een duidelijke driedeling te zien in de korrelgrootteverdeling. In het westen van het molengat is de korrelgrootte grof (>300  $\mu\text{m}$ ) in het midden is de korrelgrootte fijner (~250  $\mu\text{m}$ ) en in het meest ondiepe deel in het oosten is de korrelgrootte weer grof.

De grove sedimenten nabij de kustlijn liggen op de locatie van de geulwandsuppletie. Deze suppletie vormt hier een kunstmatige brekerbank. Het grove sediment komt achter en op de geulwandsuppletie voor.



Het grove deel in het oosten van het molengat valt samen met een ondiepte ("bankje" in de 3D figuren in de bijlage). In dit gebied is het sediment zo gesorteerd dat de grofste sedimenten op te toppen van twee grote zandgolven voorkomen.

Het fijnere sediment ("lijn A" in de 3D figuren in de bijlage) ligt min of meer in het midden van de geul. Deze zone loopt om het "bankje" heen.

#### **Noordelijk deel**

In het noorden liggen de grove sedimenten in de opdiepte tussen de kustlijn en de brekerbank. Aan de zeezijde van de brekerbank zijn de sedimenten weer fijner.

In het meest noordwestelijke deel van het gebied is het sediment neemt de korrelgrootte van het sediment in zeevaartse richting toe. Op deze locatie laat de morfologie een verdieping zien.

### **4.3 Zware mineralen**

Zware mineralen komen in het gebied voornamelijk in het noordoosten van het gebied voor. De grootste concentratie van zware mineralen wordt gevonden op het "bankje". Tijdens de kartering bleek dat de golfslag in dit gebied het hevigst was.

De sorteringspatronen van de zware mineralen en korrelgrootte op en rond het "bankje" zijn niet identiek, de hoogste concentraties zware mineralen worden noordelijker dan de grove sedimenten gevonden.

### **4.4 Bodemruwheid**

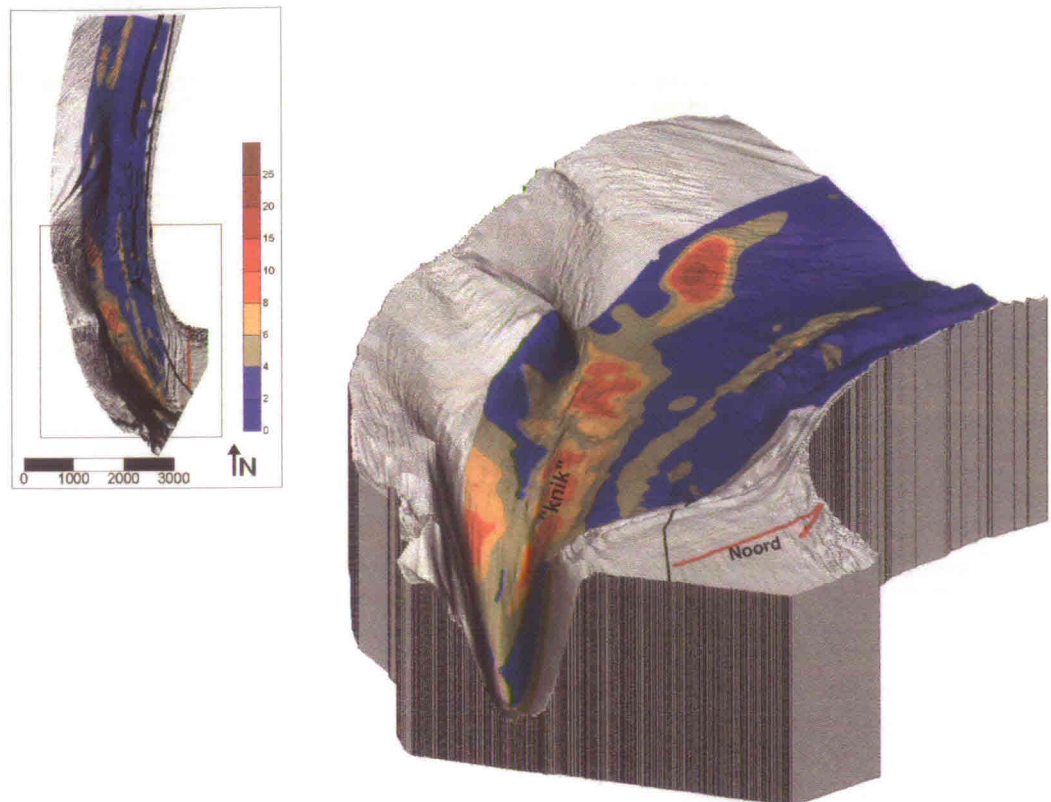
De bodemruwheid in het gebied vertoont patronen die afwijken van de patronen in korrelgrootte en zware mineraalconcentraties.

Ruwheid van de bodem wordt door verschillende parameters bepaald. Variaties in bodemruwheid kunnen worden veroorzaakt door variaties in de korrelgrootte, kleinschalige ribbelstructuren of variaties in het schelpgehalte en zeer grof materiaal. De kaarten laten zien dat de bodemruwheid niet alleen wordt bepaald door de korrelgrootte van het sediment (zie ook sectie 2.3.3): de kaart met bodemruwheid is niet sterk gecorreleerd met de korrelgroottekaart.

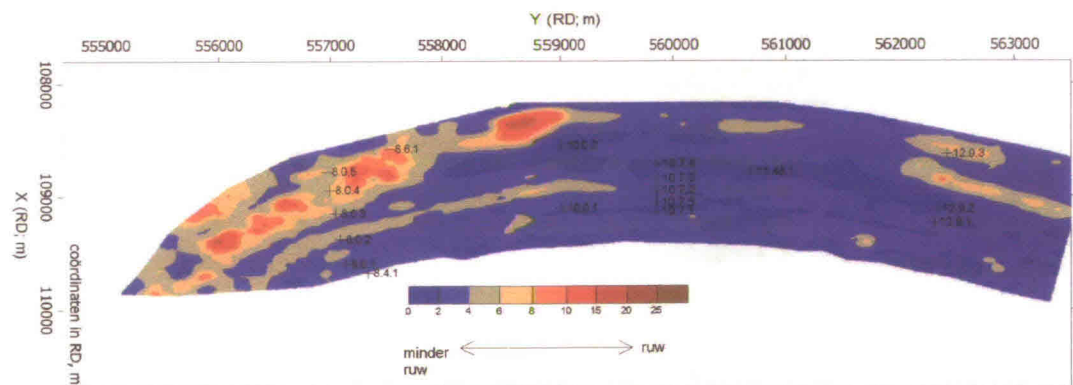
In figuur 12 is het gebied met verhoogde bodemruwheid uitvergroot. In deze figuur is de bodemruwheid (in kleur) over de waterdiepte (in 3D) heen gedrapeerd. Deze figuur laat zien dat de bodemruwheid niet verhoogd is in de bodem van de geul, maar dat de bodemruwheid sterk verhoogd is op een "knik" tussen de ondiepe vooroever en de diepte geul. Het samenvallen van de verhoogde bodemruwheid en de kink in het kustprofiel wijst waarschijnlijk op het voorkomen van een harde, resistente laag (bijvoorbeeld schelpen, keien, keileem). Waar deze harde laag exact uit bestaat kan op basis van de metingen niet bepaald worden. Hiervoor zullen aanvullende monsters moeten worden genomen.

Door directie Noord Holland zijn kernen gestoken in het gebied. Deze kernen worden door NITG-TNO beschreven en geanalyseerd. Mogelijk kunnen de resultaten van deze analyses meer duidelijkheid verschaffen over de aard en samenstelling van de ruwe gebieden. In figuur 13 zijn de locaties van de

kernen over de kaart met bodemruwheid geplot. Hierin is de zien dat kernen 8.0.4, 8.0.4 en 8.5.1 in de buurt van de ruwe sedimenten zijn genomen.



figuur 12: 3Dimensionale weergave van de bodemruwheid en de waterdiepte in het zuidelijk deel van het studiegebied. De uitvergroting (rechter figuur) is het vierkant in de figuur linksboven. De rode pijl wijst naar het noorden.



figuur 13: Kaart van bodemruwheid en locaties van kernen die door Directie Noord Holland zijn genomen.

#### 4.5 Model

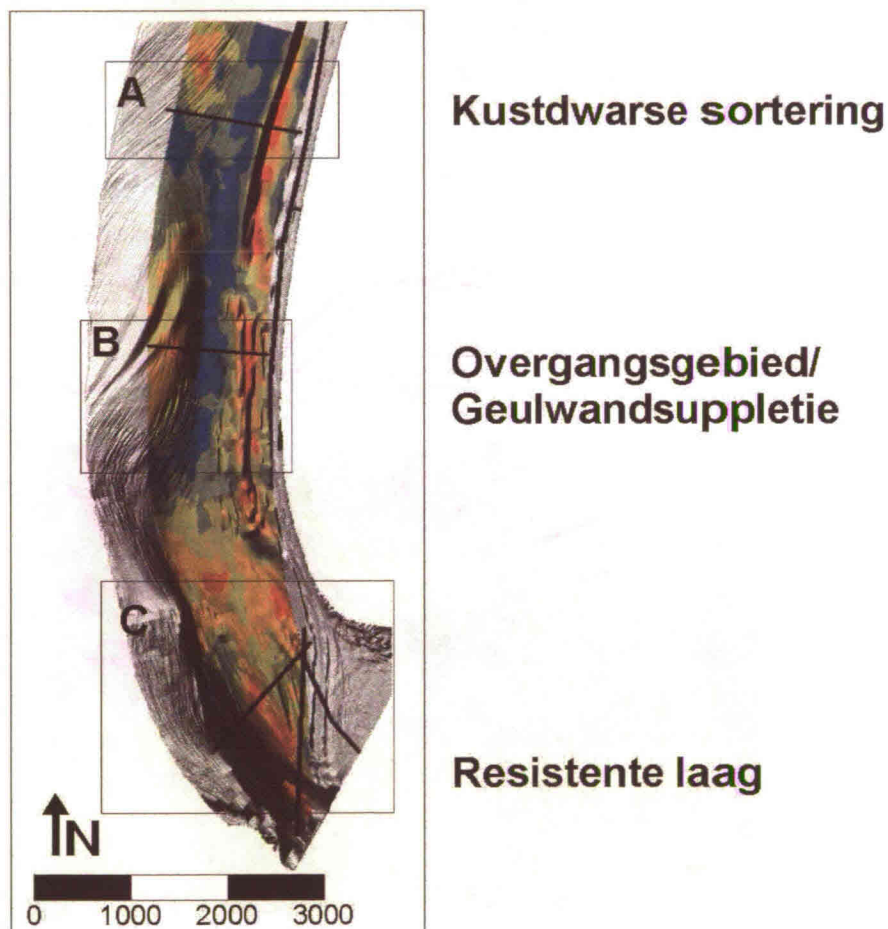
Op basis van de gegevens van waterdiepte, korrelgrootte, gehalte zware mineralen en de bodemruwheid is het onderzoeksgebied opgedeeld in 3 sedimentologische eenheden (figuur 14). Elk van deze eenheden wordt gekarakteriseerd door verschillen in sturende processen voor sedimenttransport.

**Kustdwarse sortering**

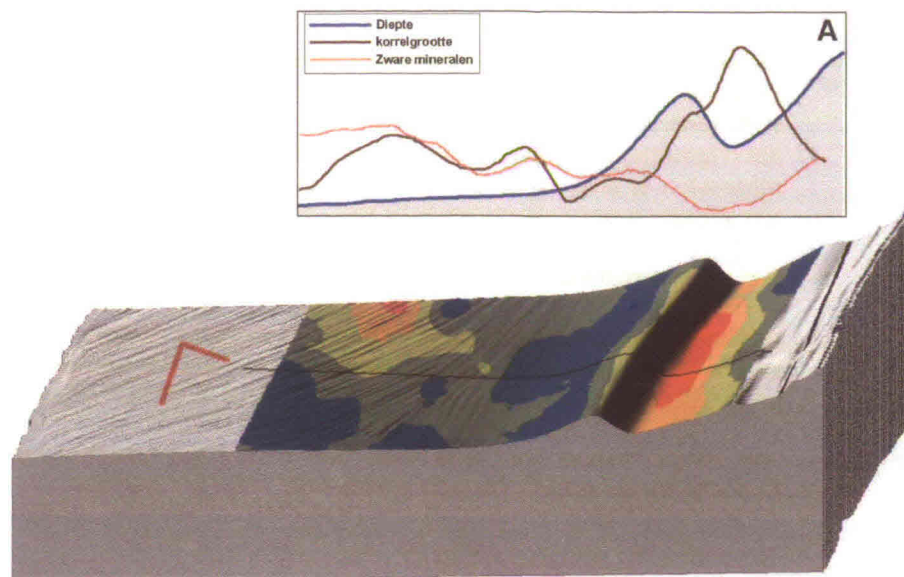
Gebied A (figuur 15) wordt gekenmerkt door een kustprofiel waarop een brekerbank voorkomt. Tussen het strand en de brekerbank zijn de sedimenten grof, op de brekerbank en zeewaarts van de brekerbank is de korrelgrootte fijner om verder zeewaarts weer toe te nemen. Het gehalte zware mineralen is laag nabij de brekerbank, zeewaarts van de brekerbank neemt het gehalte zware mineralen licht toe.

Het voorkomen van een brekerbank en de patronen van sedimentsortering in korrelgrootte en gehalte zware mineralen, wijst duidelijk op kustdwars sedimenttransport (Koomans, 2000; Wijnberg en Kroon, 2002). Op deze locatie speelt golfasymmetrie de belangrijkste rol in de verdeling van sediment op de vooroever.

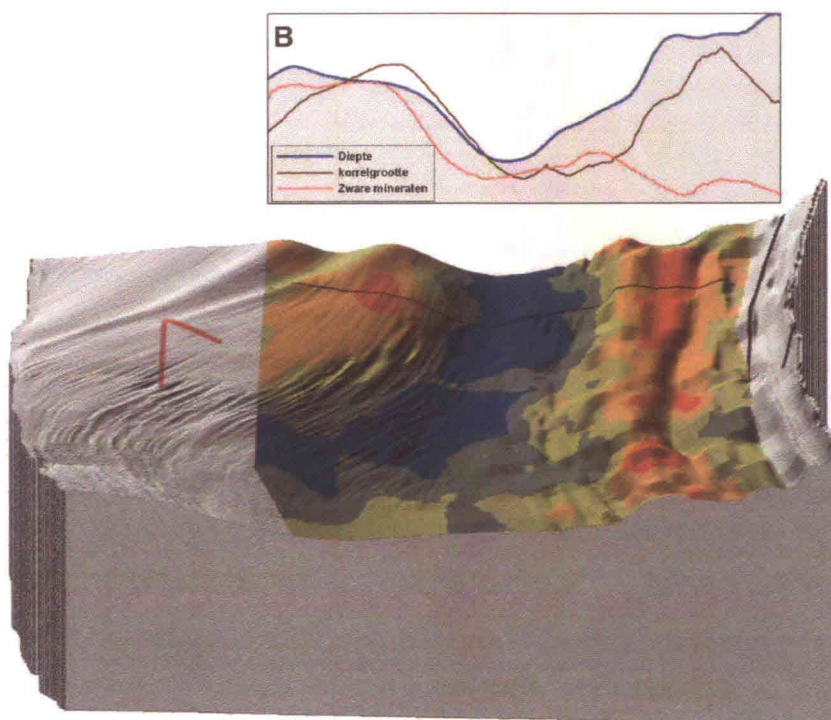
Het (diepe) gebied met grof materiaal in het noordoosten van het gebied bestaat waarschijnlijk uit relict materiaal.



figuur 14: Opdeling van het onderzoeksgebied in 3 sedimentologische gebieden.



figuur 15: 3D weergave en transect (zwarte lijn) van korrelgrootte, zware mineralen en bathymetrie in gebied A. De rode pijl wijst naar het noorden.



figuur 16: 3D weergave en transect (zwarte lijn) van korrelgrootte en bathymetrie in gebied B. De rode pijl wijst naar het noorden.

#### Overgangsgebied en geulwandsuppletie

In gebied B is de geulwandsuppletie uitgevoerd. Deze zone wordt gekenmerkt door een "brekerbank" voor de kust (de zandsuppletie). De korrelgrootte op deze brekerbank is grof. Vervolgens laat het profiel een verdieping zien waarbij de korrelgrootte afneemt. Naar het oosten verondiept de geul tot het "bankje" (zie kaarten in de appendix) waar de korrelgrootte grof wordt en het zware mineraalgehalte toeneemt. In de dwarsdoorsnede in figuur 16 is het

sorteringspatroon aan de landzijde van de geul vergelijkbaar met de sortering van de sedimenten in het noordelijk gebied: grof zand op de brekerbank, fijn sediment aan de voet van de brekerbank. Het is echter niet duidelijk of de grove sedimenten door de suppletie in het gebied zijn gekomen, of dat de grove sedimenten door golfwerking zijn gesorteerd.

Opvallend is de kleine korrelgrootte van het sediment in de geul (geul A in figuur 11). In het diepste deel van het Molengat (maar ook in de getijdegeul van het Oostgat nabij Vlissingen (Koomans en Oosterhoff, 2002)) komen in de geul juist grove sedimenten voor ("channel lag") als gevolg van de erosie. De kleine korrelgrootte geeft aan dat kustlangse getijdestroming in deze ondiepte (geul A in figuur 11) geen grote rol speelt in de sortering van het sediment; waarschijnlijk zijn de sedimenten door kustdwars sedimenttransport gesorteerd.

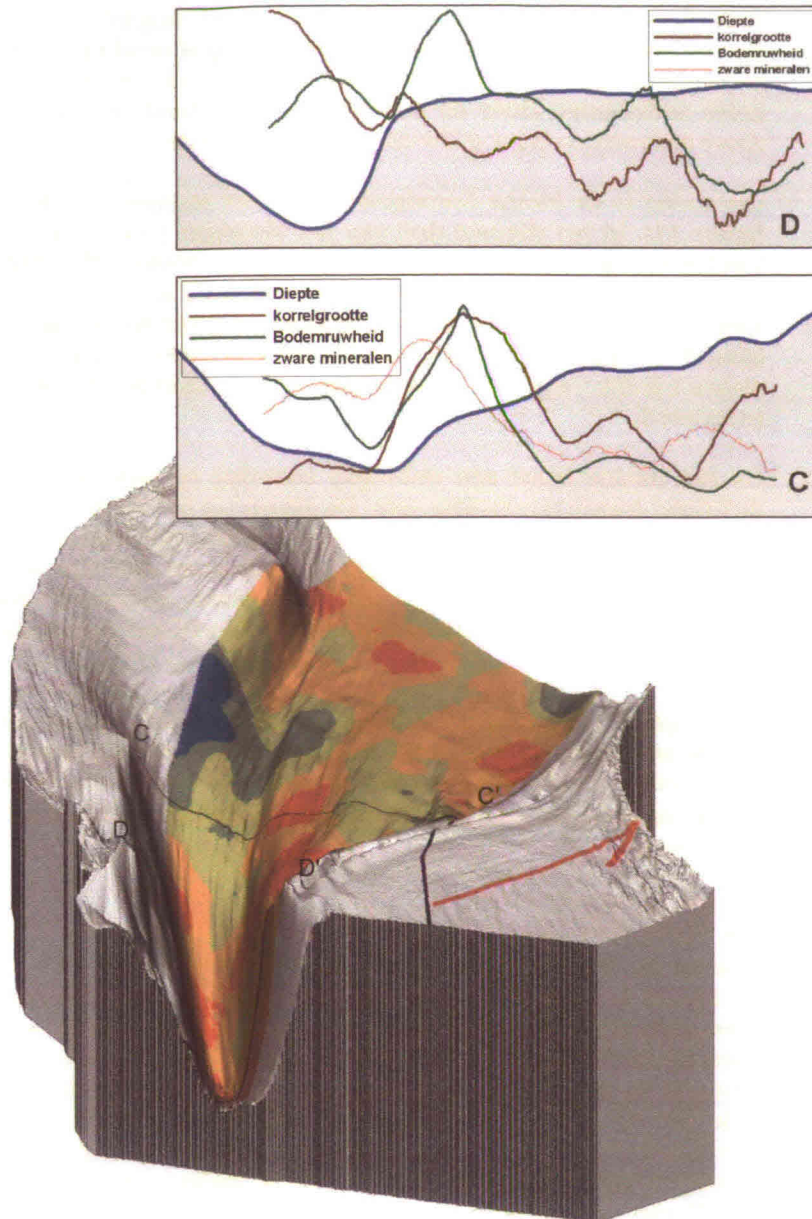
Op het bankje komt een duidelijke sortering op basis van korrelgrootte en dichtheid (zwarte mineralen) voor. De golven uit het westen verliezen een groot deel van hun energie op het bankje en zorgen voor een splitsing van fijn en grof sediment op het bankje. Aangezien een groot deel van de energie op het bankje wordt gedissipeerd, zal kustdwars sedimenttransport op de brekerbank en bij het strand kleiner zijn dan in het noordelijk deel van het gebied.

De suppletie is uitgevoerd vanwege de sterke erosie op het strand. De aard van de sedimentsortering duidt niet op sterke erosie als gevolg van insnijden door een getijdengeul. Het kustdwarse sedimenttransport (waarin golfasymmetrie een belangrijke rol speelt) zorgt waarschijnlijk voor erosie van het strand.

#### **Resistente laag**

Het Molengat is een diepe geul tussen de Noorderhaaks (zandplaat in het westen) en Texel en wordt in gebied C gekenmerkt door een zeer steile geulwand. In figuur 17 is een 3D weergave van het gebied aangegeven met twee grafieken van dwarsdoorsneden van korrelgrootte, bodemruwheid en waterdiepte. Transect D loopt door het diepste deel van de geul en laat duidelijk de steile geulwand (met een helling van 1:50 m) aan de oostelijke zijde van de geul zien. De korrelgrootte neemt geleidelijk toe in westelijke richtingen vertoont een maximum op de bodem van de geul. De ruwheid van de bodem laat een ander patroon zien: de bodemruwheid is op de oostelijke "rand" van de geul lokaal sterk verhoogd. In profiel C zijn korrelgrootte en bodemruwheid ook verhoogd op de laatste "knik" voor de geul.

Het grootschalige patroon van verhoging in de bodemruwheid op de morfologische "kink" (in figuur 12) en de duidelijke verhoging in bodemruwheid op de rand van de geul in transect D geeft aan dat de rand van de geul wordt gevormd door een ruwe harde laag. Deze ruwe laag bestaat niet geheel uit grof materiaal (zoals keien en grind), maar bevat mogelijk schelpen, keileem of andere harde structuren. Het is waarschijnlijk dat deze harde, resistente laag erosie aan de oostelijke zijde van de geul voorkomt. De positie van de oostelijke geulwand in gebied C lijkt dan ook door de resistente lagen te worden bepaald. Informatie over de dikte en samenstelling van deze resistente laag (bijvoorbeeld uit kernen) kan helpen om de levensduur van de resistente laag te bepalen, om zo inzicht te krijgen in maatregelen die nodig kunnen zijn om de geul op haar plaats te houden.



figuur 17: 3D weergave en twee transecten (zwarte lijnen) van korrelgrootte en bathymetrie in gebied C. De rode pijl wijst naar het noorden.

## 4.6 Het strand

Op het strand zijn een beperkt aantal raaien gemeten, waardoor een gebiedsdekkend overzicht van de sortering dwars op het strand niet met grote nauwkeurigheid kan worden bepaald. De metingen laten echter wel duidelijk zien hoe de sedimenten in kustlangse richting zijn gesorteerd. De figuur in de appendix laat zien hoe de korrelgrootte en het gehalte zware mineralen op het strand is gesorteerd.

De korrelgrootte op het strand is over het algemeen grof en duidelijke structuren zijn niet duidelijk aanwezig. Het gehalte zware mineralen laat een duidelijk sortering zien dwars op het strand: de hoogste gehalten zware mineralen komen voor aan de duinvoet. Deze sortering van zware mineralen

is een bekend fenomeen en is het gevolg van selectief transport van zware mineralen als gevolg van golfasymmetrie tijdens storm (de Meijer et al., 2002b; Koomans, 2000) en van selectieve erosie van duinzanden (zie bijvoorbeeld Bonka, 1982; Borresware, 1957; Stapor, 1973).

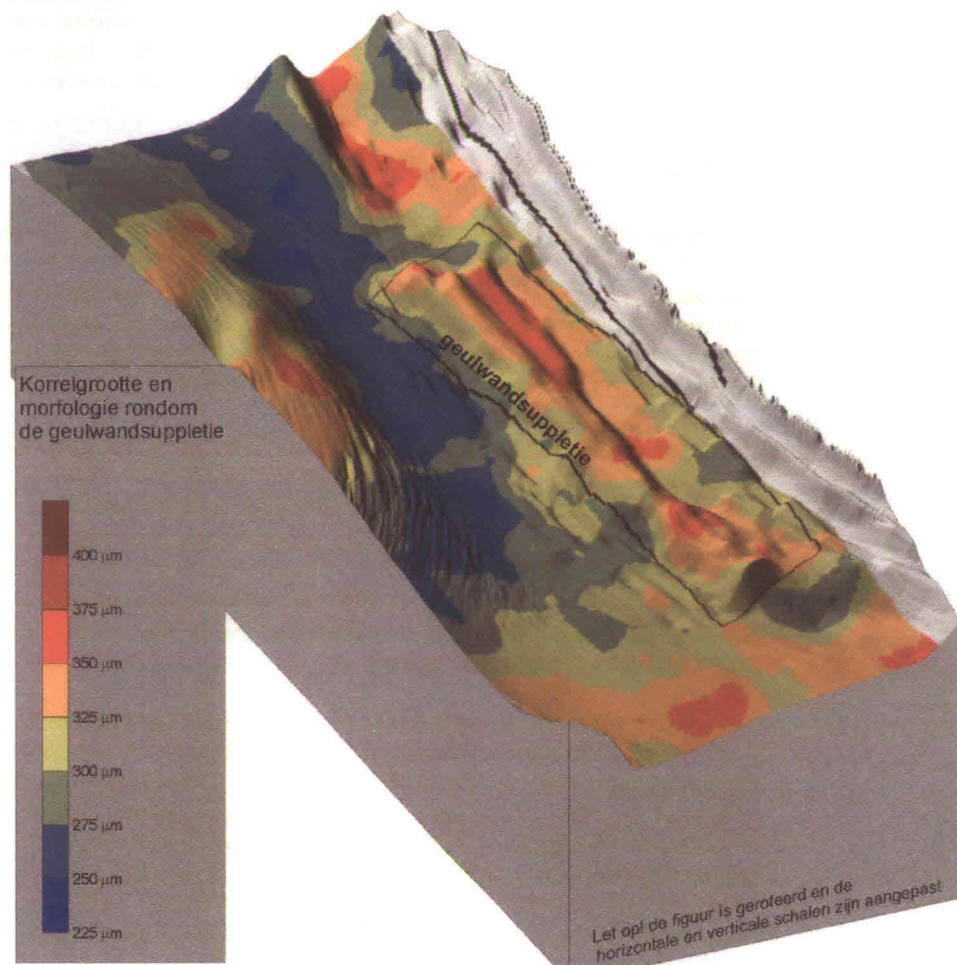
#### 4.7 Ontwikkeling van de geulwandsuppletie

Op basis van één kartering, zoals die in tot rapport beschreven is, kan niet worden bepaald hoe de geulwandsuppletie ontwikkeld is. Veranderingen kunnen niet worden bepaald. De huidige situatie van de suppletie is echter wel nauwkeurig in kaart gebracht. Op basis van een aantal aannames kan daarom wel een *beschrijving* worden gegeven van het gedrag van de suppletie. De kwaliteit van deze beschrijving hangt af van de gedane aannames.

De analyse van de gegevens (in sectie 4.4) laat zien dat de geulwandsuppletie is uitgevoerd in het overgangsgebied tussen het door geulontwikkeling gedomineerde zuidelijk deel het en het door brandingsbanken en golfwerking gedomineerde noordelijke deel. De suppletie is duidelijk in het kustprofiel zichtbaar als een "brekerbank" van zand vlak voor de kust (figuur 18). Het sediment is overwegend grover dan het omringende sediment. Het sediment is duidelijk gesorteerd naar korrelgrootte: op de top en aan de landzijde van deze bank is het sediment grover.

De suppletie is aan de noord- en zuidzijde duidelijk begrensd; in het noorden is de "bank" vlakker en neemt de korrelgrootte sterk af. In het zuiden is de suppletie begrensd in de morfologie, in de korrelgrootte is geen duidelijke overgang te zien. Of het grovere sediment ten zuiden van de suppletie daar van nature voorkomt of dat het grove sediment afkomstig is van de suppletie als gevolg van een zuidelijke getijdenstroming (gelijk aan het zandtransport vanaf de geulwandsuppletie in het Oostgat nabij Vlissingen (Koomans en Oosterhoff, 2002)), kan op basis van deze éne meting niet worden bepaald.

Korrelgrootte analyses van het suppletiezand geven aan dat het gesuppleerde materiaal grof is (gemiddelde korrelgrootte 450  $\mu\text{m}$ ) (Dienstkring\_Texel, 2003). In het noorden van de suppletie is een zone van fijn sediment tussen het grove suppletiezand en het grove sediment op de top van de brekerbank (figuur 18). Ten westen van de suppletie is het sediment in de geul fijn. Dit geeft aan dat het suppletiezand niet naar het noorden is getransporteerd en niet niet in de geul terecht is gekomen. Omdat geen  $t_0$  meting is uitgevoerd (en dus de oorspronkelijke korrelgrootte van het sediment ten zuiden van de suppletie niet bekend is) kan niet worden vastgesteld of het suppletiemateriaal naar het zuiden is getransporteerd.



figuur 18: Korrelgrootte en morfologie rondom de geulwandsuppletie in het Molengat. De bovenkant van de figuur wijst naar het noorden.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Sedimentologische kartering

De veldmeting met MEDUSA en de analyse van de sedimentmonsters levert voldoende betrouwbare informatie over sedimentverdeling in het Molengat. De metingen laten zien dat de korrelgrootte, bodemruwheid en zware mineraalgehalte in het Molengat sterk varieert.

Naast de kartering van de vooroever is een kartering op het strand uitgevoerd. Beide karteringen geven waardevolle informatie over sedimentologie en processen van sedimentsortering. Bij de huidige studie zijn de metingen op het strand een maand later dan de metingen onderwater uitgevoerd. Doordat in de tussenliggende periode een storm over het gebied is getrokken zijn de metingen niet één op één te vergelijken.

### 5.2 Onderzoek- en beheersvragen

#### Hoe is de geulwandsuppletie ontwikkeld?

Om inzicht te krijgen in de verandering van een systeem moeten meerdere karteringen worden vergeleken. Op basis van een aantal aannames kan echter wel een beschrijving worden gegeven van het gedrag van de suppletie.

De kartering laat zien dat de sedimenten op de geulwandsuppletie grover zijn dan omringende sedimenten. De sedimenten van de suppletie zelf vertonen duidelijke sorteringen. Het gestorte suppletiezand is grover dan omringende sedimenten. Hiermee kunnen we vaststellen dat het suppletiezand niet naar het noorden is getransporteerd of in de geul verplaatst. Of de sedimenten van de geulwandsuppletie naar het zuiden zijn getransporteerd, is niet te bepalen op basis van deze meting alleen.

#### Wat is de sedimentologische opbouw van het Molengat?

De sedimenten in het Molengat vertonen een duidelijke sortering op basis van korrelgrootte en dichtheid van het sediment. De korrelgrootte varieert van van 225  $\mu\text{m}$  in de as van de geul tot  $\sim 375 \mu\text{m}$  in de ondiepere delen nabij het strand. De bodemruwheid is sterk verhoogd op een "knik" tussen de ondiepe vooroever en de diepe geul. Dit wijst waarschijnlijk op het voorkomen van een harde, resistente laag (bijvoorbeeld schelpen, keien, keileem). Waar deze harde laag exact uit bestaat kan op basis van de metingen niet bepaald worden. Hiervoor zijn aanvullende monsters genomen die nader worden geanalyseerd.

#### Welke processen sturen het gedrag van de geulwandsuppletie?

De gebiedsdekkende kaarten van morfologie, korrelgrootte, zware mineraalgehalte en bodemruwheid laten zien dat het Molengat in drie sedimentologische eenheden kan worden opgedeeld:

1. Een gebied ten noorden van de geulwandsuppletie waar kustdwars sedimentsortering een belangrijk transport mechanisme is.
2. Een gebied rondom de geulwandsuppletie waar kustdwars sedimenttransport (waarin golfasymmetrie een belangrijke rol speelt) zorgt sortering van het sediment. De aard van de sedimentsortering

duidt niet op sterke erosie als gevolg van insnijden van een getijdengeul.

3. Het diepste deel van de geul. De landwaartse positie van dit deel van het Molengat lijkt op de plaats te worden gehouden door een resistente laag. Sedimenttransport vindt vooral plaats als gevolg van getijdenstroming door de geul.

### 5.3 Aanbevelingen

Het strand en de vooroever behoren tot één sedimentologisch systeem. Wanneer onderzoek naar zandtransport in het kustgebied wordt uitgevoerd, moeten het strand en onderwaterprofiel als één geheel worden onderzocht. De MEDUSA metingen van de vooroever en de metingen op het strand laten zien dat zowel onder water als op het strand de korrelgrootte en zware mineraalgehalte kan worden bepaald. De grote tijdsspanne tussen beide metingen maakt het echter moeilijk om deze resultaten te vergelijken. Voor toekomstige studies strekt het tot aanbeveling om beide metingen in één meetcampagne te combineren, bijvoorbeeld door beide metingen met de WESP uit te voeren. Door MEDUSA achter de WESP aan te slepen kan in één raai het strand en kustprofiel worden ingemeten.

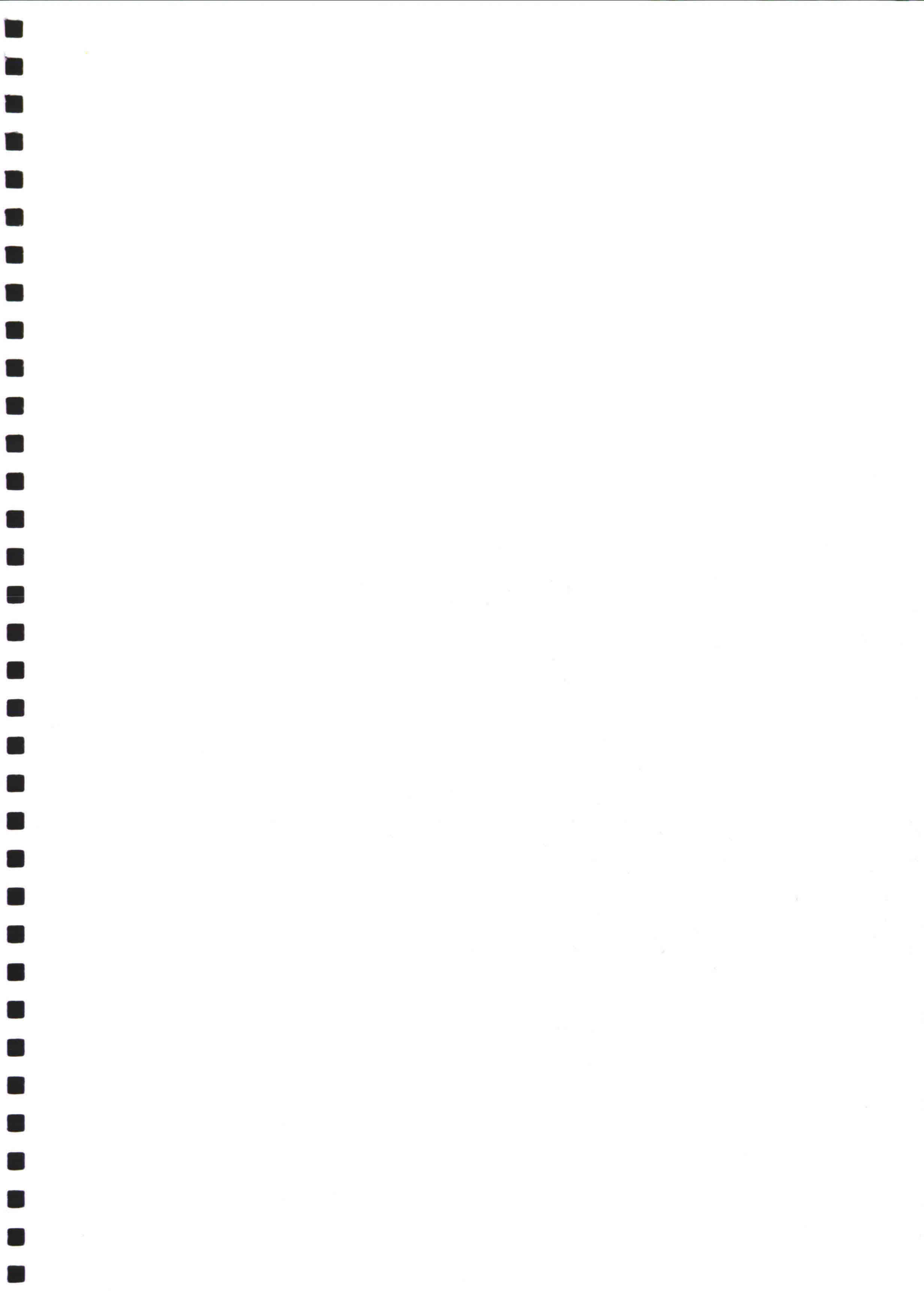
Om een uitspraak te kunnen doen over het zandtransport op en rondom de geulwandsuppletie is aangenomen dat het sediment van de geulwandsuppletie grover is dan het antropogene sediment. Omdat er geen kartering is uitgevoerd vóór de suppletie is de validiteit van deze aanname niet bekend. Bij toekomstige studies kan met meer zekerheid een uitspraak worden gedaan wanneer ook een  $t_0$  meting wordt uitgevoerd.

De kaarten van samenstelling, waterdiepte en bodemruwheid laten zien dat de oostzijde van de diepe geul op zijn plaats wordt gehouden door een meer resistente laag. Om de samenstelling (en mogelijk levensduur) van deze resistente laag te bepalen zijn op deze locaties aanvullende kernen gestoken. De analyse van deze kernen kan mogelijk meer informatie geven over de opbouw van de harde laag.

## 6 Referenties

- Black, K.P. en Oldman, J.W.** 1999. Wave mechanisms responsible for grain sorting and non-uniform ripple distribution across two moderate-energy, sandy continental shelves. *Marine Geology*, **162**: 121-132.
- Bonka, H.** 1982. Enhanced natural radiation exposure due to enriched heavy minerals at the coast of Northern Germany. *Natural Radiation Environment* 58-66 (and references therein).
- Borresware, R.** 1957. Beach erosion and concentration of heavy mineral sands. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**: 143-147.
- Burrough, P.A.** 1986. *Principles of geographical information systems for land resources assesment*. Monographs on soil and resources survey, **12**. Oxford Science Publications, 193 pp.
- Cleveringa, J.** 2001. Zand voor zuidwest Texel - Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. RIKZ/OS/2001.031, Min. van Verkeer en Waterstaat / RWS / RIKZ.
- Davies, A.G. en Villaret, C.** 2002. Prediction of sand transport rates by waves and currents in the coastal zone. *Continental Shelf Research*, **22**: 2725-2737.
- de Meijer, B.A., Limburg, J. en Koomans, R.L.** 2002a. Onderzoek naar een meettechniek voor snelle bepaling van de zandfractie in baggerspecie (Neptune). 2001-P-014/R1, Medusa Explorations BV, Groningen.
- de Meijer, R.J., Bosboom, J., Cloin, B., Katopodi, I., Kitou, N., Koomans, R.L. en Manso, F.** 2002b. Gradation effects in sediment transport. *Coastal Engineering*, **47**: 179-210.
- de Meijer, R.J. en Donoghue, J.F.** 1995. Radiometric fingerprinting of sediments on the Dutch, German and Danish coasts. *Quaternary International*, **26**: 43-47.
- de Meijer, R.J., Lesscher, H.M.E., Schuiling, R.D. en Elburg, R.D.** 1990. Estimate of the Heavy Mineral Content in Sand and its Provenance by Radiometric Methods. *Nuclear Geophysics*, **4**: 455-460.
- de Meijer, R.J., Stapel, C., Jones, D.G., Roberts, P.D., Rozendaal, A. en Macdonald, W.G.** 1997. Improved and New Uses of Natural Radioactivity in Mineral Exploration and Processing. *Exploration Mining Geology*, **6**: 105-117.
- Dienstkring Texel** 2003. Notitie zeef analyses van zandmonsters uit suppletie materiaal.
- Hendriks, P.G.H.M.** 2003. *In-depth gamma-ray studies: Borehole measurements*. PHD thesis, University of Groningen, Groningen, 189 pp.
- Koomans, R.L.** 2000. *Sand in motion: effects of density and grain size*. Phd thesis, RUG, Groningen, 218 pp.
- Koomans, R.L.** 2003. Sedimenten in het Molengat - Datarapport van een Medusa meting. 2003-P-042/R1, Medusa Explorations BV, Groningen.

- Koomans, R.L. en Oosterhoff, E.** 2002. Medusa metingen in het Oostgat: de effectiviteit van een geulwandsuppletie. 2001-P-015-R4, Medusa Explorations BV, Groningen.
- Limburg, J. en de Vries, K.** 2003. Puinkartering - Een nieuwe in-situ methode voor bepaling puingehalte van baggerspecie. 2003-P-037/R1, Medusa Explorations BV, Groningen.
- Odom, I.E.** 1976. Nature of feldspar-grain size relations in some quartz-rich sandstones. *Journal of Sedimentary Petrology*, **46**: 862-870.
- Oost, A.P.** 1998. The influence of selective transport and provenance on the radiometric fingerprint method. Project no. 750-19-418 NWO, RUG.
- Oosterhoff, E., de Meijer, B.A. en Nicolaas, J.F.** 2003. Het meten van schelpenvoorkomens met MEDUSA- syntheserapport. 2003-P-031-R2, Medusa Explorations BV, Groningen.
- Roelvink, J.A. en Stive, M.J.F.** 1989. Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach. *Journal of Geophysical research*, **94**: 4785-4800.
- Stapor, F.W.** 1973. Heavy mineral concentrating processes and density/shape/size equilibria in the marine and coastal dune sands of the Apalachicola, Florida, region. *Journal of Sedimentary Petrology*, **43**: 396-407.
- Tánczos, I.C.** 1996. *Selective transport phenomena in coastal sands*. Ph.D., University of Groningen, Groningen, the Netherlands, 184 pp.
- van Rijn, L.** 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam, 614 pp.
- Webster, R. en Oliver, M.** 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. Statistics in practice. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 271 pp.
- Wijnberg, K.M. en Kroon, A.** 2002. Barred beaches. *Geomorphology*, **48**: 103-120.



Medusa Explorations BV

Postbus 623

9700 AP Groningen

The Netherlands

**t** +31(0)50-577 02 80

**f** +31(0)50-577 25 34

**w** [www.medusa-online.com](http://www.medusa-online.com)

