

**Berekende en Gemeten Zandtransporten  
over dwarsraaien in de Westerschelde**

Onder begeleiding van Drs. C. Storm

door N.M. Kruyt

Januari 1992

## **Inhoudsopgave**

	Voorwoord	1
1.	Inleiding	1
1.2	geselecteerde raaien	1
1.3	zandtransportmodellen	2
2.	Werkwijze	6
2.1	schematisatie van het profiel	6
2.2	gemeten zandtransporten	7
	aannames	8
2.3	stroomsnelheden	9
	snelheidsvector	9
	debietmetingen	9
2.4	getijcoëfficiënten	10
2.5	berekende zandtransport	11
	aannames	11
2.6	korrelgrootte	12
3.	Meetresultaten	13
4.	Discussie	21
5.	Conclusie	27
6.	Aanbeveling	28
7.	Literatuur	29

## Lijst van figuren

Figuur 1	Ligging van de debietraaien in de Westerschelde	3
Figuur 2a	Aanname bij stroomsnelheidsverticaal	7
Figuur 2b	Aanname bij concentratieverticaal	8
Figuur 2c	Aanname bij de zandtransportverticaal	8
Figuur 3	Ontbinding van de stroomsnelheidsvector $V$ in $V_{\sin}$ en $V_{\cos}$	9
Figuur 4	Zandtransport volgens Engelund-Hansen, van Rijn en gemeten zandtransport (AZTM)	14
Figuur 5	Zandtransport volgens Engelund-Hansen, van Rijn en gemeten zandtransport (AZTM) in één figuur	15 13
Figuur 6	Onderlinge vergelijking van het zandtransport volgens Engelund-Hansen bij verschillende getijcoëfficiënten	17
Figuur 7	Zandtransport per vloed-en ebgeul	19
Figuur 8	Relatief zandtransport ten opzichte van het diepste punt in het profiel volgens Engelund-Hansen en van Rijn	20

## Lijst van tabellen

Tabel 1	Debietraaien met getijde omstandigheden	2
Tabel 2	Schematisatiefouten	6
Tabel 3	Meetresultaten	13
Tabel 4	Evenwichtsstroomsnelheden	21
Tabel 5	Correlatiecoëfficiënten	23

## Lijst van bijlagen

Bijlage I	Formules Engelund-Hansen en van Rijn
Bijlage II	Schematisaties van de profielen
Bijlage III	Stroomsnelheid Diepteschema
Bijlage IV	Effectieve ruwheid $K_s$
Bijlage V	Evenwichtsstroomsnelheden volgens Gerritsen en de Jong (1983)

## VOORWOORD.

In het kader van het doctoraal examen Fysische Geografie aan de Rijksuniversiteit Utrecht is een stage gedaan bij de Directie Zeeland van Rijkswaterstaat. De stage omvat een studie naar het zandtransport in de Westerschelde. Er wordt een inventarisatie gemaakt hoe het verloop van het totale zandtransport in verschillende dwarsraaien in de Westerschelde (zowel bodemtransport als suspensief transport) bij eb en vloed is.

### 1. INLEIDING.

Om een beeld van de ruimtelijke verdeling van het zandtransport in de Westerschelde te krijgen, wordt op verschillende lokaties in de Westerschelde bekeken hoe groot dat zandtransport is.

Om een beeld te krijgen van de nauwkeurigheid van de zandtransporten worden de gemeten zandtransporten vergeleken met de berekende zandtransporten.

Aan de hand van de ruimtelijke verdeling van de zandtransporten wordt uiteindelijk gekeken of er een relatie is tussen de geologie en het zandtransport voor de Westerschelde.

Er wordt enkel naar zandtransporten gekeken; het slibtransport wordt buiten beschouwing gelaten.

#### 1.2. Geselecteerde raaien.

Het berekende zandtransport is aan de hand van debietmetingen in de Westerschelde over 8 raaien bepaald (Figuur 1).

De inventarisatie is gebaseerd op de meest recente meetgegevens. Er kan niet worden voorkomen dat verschillende datasets gebruikt zijn waar enige jaren tussen zitten.

De gemeten zandtransporten zijn ook aan de hand van de debietraaien bepaald. Met uitzondering voor raai 9 en raai 11. Voor deze debietraaien zijn geen zandtransportmetingen uitgevoerd.

De geselecteerde dwarsraaien staan vermeld in tabel 1.

Aan de codering van raai 3 en 5a is een 'd' of een 's' toegevoegd om aan te geven of de meting tijdens respectievelijk dood- danwel

springtij is uitgevoerd.

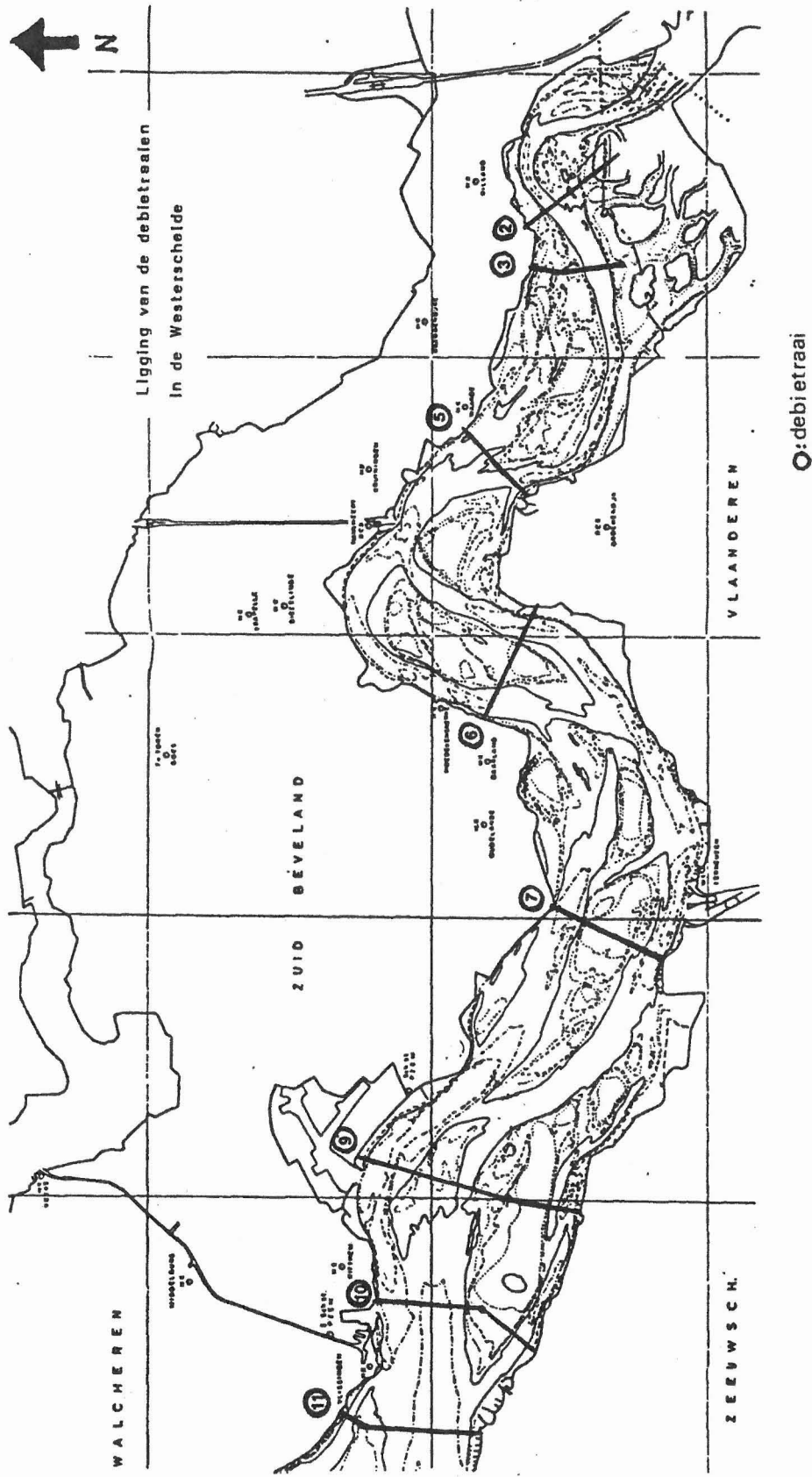
raai	datum	getijverschil in m	gem. getij- coëfficiënt	soort meting	notanummer
2	4-4-1989	eb 4.98	1.04842	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD-89.N.063
		vloed 5.36	1.12842		
		eb 5.32	1.12000		
3d	30-8-1990	vloed 2.99	0.66890	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD-90.N.111
		eb 3.02	0.67562		
		vloed 2.80	0.62640		
3s	5-9-1990	eb 4.80	1.07383	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD-90.N.116
		vloed 4.67	1.04474		
		eb 5.08	1.13647		
5ad	31-8-1990	vloed 2.66	0.59508	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD.90.N.121
		eb 2.79	0.62416		
		vloed 3.22	0.72036		
5as	6-9-1990	eb 4.99	1.11633	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD.90.N.122
		vloed 5.24	1.17226		
		eb 5.11	1.14318		
6	3-10-1989	eb 4.80	1.07383	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD-90.N.118
		vloed 4.54	1.01566		
		eb 4.82	1.07830		
7	6-4-1989	eb 5.41	1.30048	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD-89.N.069
		vloed 5.67	1.36298		
		eb 5.10	1.22596		
9	10-6-1986	eb 4.38	1.14660	stroomsnelheid	V8609A33
		vloed 4.66	1.21990		
		eb 4.47	1.17016		
10	10-4-1989	eb 4.75	1.24346	stroomsnelheid & zandtransport	ZLMD-89.N.079
		vloed 4.37	1.14398		
		eb 4.17	1.09162		
11	21-5-1985	eb 4.41	1.15445	stroomsnelheid	WWKZ-85V023
		vloed 4.29	1.12304		
		eb 4.36	1.14136		

Tabel 1 Debietraaien met getijde omstandigheden tijdens de meting en soort meting die verricht is.

### 1.3. Zandtransportmodellen.

Aan de hand van gemeten stroomsnelheden kunnen zandtransporten berekend worden met behulp van zandtransportmodellen. Het totale zandtransport geldt over de gehele breedte van de raai gedurende een gehele getijfase (eb of vloed).

Dit totaal zandtransport is dus van de gedaante:



Figuur 1

$$Q_{\text{getijfase}} = b \int_0^T s(t) d(t).$$

Waarbij  $b$  = geulbreedte

$T$  = eb- of vloedduur

$s(t)$  = zandtransport afhankelijk van de tijd

Er bestaat geen eenduidigheid welk model het meest geschikt is. Immers alle modellen zijn gericht op unidirectionele stromingen; de westerschelde is een estuarium met bidirectionele stromingen (eb en vloed).

De uitkomsten van een zandtransportmodel kan niet als een absoluut getal worden gezien. Voor het berekende zandtransport worden twee modellen gebruikt. Door met twee zandtransportmodellen te werken wordt aangegeven wat de marges zijn waarbinnen waarden van zandtransport nog aannemelijk zijn. Het is niet de bedoeling een uitspraak te doen welk model het meest van toepassing is op het zandtransport in de Westerschelde.

Er is gekozen voor de transportformule van Engelund-Hansen (1967) voor totaaltransport (suspensief transport en bodemtransport):

$$q_{t,c} = 0.05 \int_s U^5 / (s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3$$

en van van Rijn (1984) voor totaaltransport (suspensief transport en bodemtransport):

$$q_t = s_b + s_s$$

$$s_b = 0.053 \int_s (1,65 g)^{0.5} (d_{50})^{1.5} (D_*)^{-0.3} (t)^{2.1}$$

$$s_s = F \int_s U h c_a$$

Zie voor de verdere toelichting van de gebruikte symbolen bij Engelund-Hansen en van Rijn bijlage I.

De keuze van de twee modellen is gedaan op grond van voorgaande ervaringen en studies naar zandtransporten in de Westerschelde (van Rijn, 1985a,b). Volgens onderzoek uitgevoerd in de Oosterschelde vertonen de zandtransportformules van Engelund-Hansen en van Rijn goede overeenkomsten (van Rijn, 1985a). Deze overeenkomst geldt zowel voor onderling vergelijk van de formules als voor een vergelijking met gemeten zandtransporten.

Dit geldt voor verticaal gemiddelde stroomsnelheden tussen 0.5 en 2.0 m/s en  $d_{50}$  -waarden tussen 0.200 en 0.250 mm. Soortgelijke omstandigheden gelden ook in de Westerschelde. Echter bij hogere verticaal gemiddelde stroomsnelheden ( $u > 2.0$  m/s) geven beide modellen een overschatting van het zandtransport.

Waar is dit te zien



## 2. WERKWIJZE.

### 2.1. Schematisatie van het profiel.

Ieder meetpunt is representatief gesteld voor een deel van het totale doorstroomprofiel. Hiertoe is het doorstroomprofiel eerst geschematiseerd tot een rechthoekig profiel welk representatief geacht wordt (zie bijlage II). De geschematiseerde vakken sluiten op elkaar aan zodat het gehele doorstroomprofiel wordt bestreken. In enkele gevallen liggen de meetpunten ver van elkaar vandaan, bijvoorbeeld daar waar het bodemprofiel steil is. Het kan dan voorkomen dat de vakken niet op elkaar aansluiten. Hiermee wordt voorkomen dat er extreem grootte vakken gecreëerd worden die niet meer representatief zijn voor de bijhorende stroomverticalen. Er blijft echter gelden dat het geschematiseerde oppervlak niet teveel mag afwijken van het werkelijke oppervlak van het profiel ten opzichte van NAP. In onderstaande tabel zijn de afwijkingen van de schematisaties weergegeven in procenten ten opzichte van het werkelijke doorstroomoppervlakte.

raai	werkelijk $A_c$ (in $m^2$ )	geschematiseerde $A_c$ (in $m^2$ )	schematisatie fout in %
2	17488	17065	2.4
3d	18636	18534	0.5
3s	18636	18534	0.5
5ad	29386	30628	-4.2
5as	29386	31306	-6.5
6	36973	38482	-4.1
7	46283	46759	-1.0
9	78500	76545	2.5
10	77575	75025	3.3
11	82000	78605	- 4.1

met  $A_c$  = Oppervlakte doorstroomprofiel

Tabel 2 Vergelijk van geshematiseerde oppervlak met het werkelijke oppervlak van het doorstroomprofiel ten opzichte van NAP.

In beginsel wordt het natte oppervlak aan weerszijden van de meetpunt even groot gemaakt. Komt het voor dat meetpunten te dicht bij elkaar of te ver van elkaar vandaan liggen, dan zijn de oppervlakken aan weerszijde van de stroomverticaal niet van

gelijke grootte.

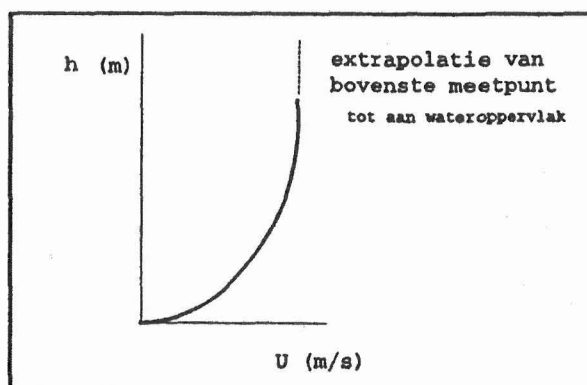
Een ander probleem dat zich voordoet is dat een stroomverticaal niet altijd tot het diepste punt van de bodem van het profiel reikt. In dat geval wordt het betreffende deel (dat onder het onderste meetpunt ligt) niet bij het oppervlak meegenomen. De ondergrens van het geschematiseerde oppervlak is altijd het laagste punt van de stroomverticaal.

Daarnaast is er gelet op extreme punten (bijvoorbeeld drempels tussen twee meetpunten, knikpunten in het profiel) tot waar een schematisering van het profiel nog realistisch is. In dat geval kan vaak niet meer aan de eis van gelijke oppervlakken aan weerszijde van de stroomverticaal worden voldaan.

## 2.2 Gemeten zandtransporten.

Voor de bepaling van het zandtransport is gebruik gemaakt van zandconcentratiemetingen met behulp van een akoestisch zandtransportmeter (AZTM). Deze zandconcentratiemetingen zijn al verwerkt tot zandtransporten in  $g/m*s$ .

De verticaal gemiddelde zandtransporten worden over het gehele oppervlak van het doorstroomprofiel en het getij geïntegreerd. Het aantal locaties in een raai waar zandtransport wordt gemeten ligt meestal rond de 4 à 5. De schematisatie is hierop aangepast. Het gevolg is dat zeer grote geschematiseerde vlakken ontstaan welke wellicht niet goed representatief voor het meetpunt zijn.



figuur 2a Aanname bij snelheidsverticaal  
 $h$  is waterdiepte,  $U$  = stroomsnelheid

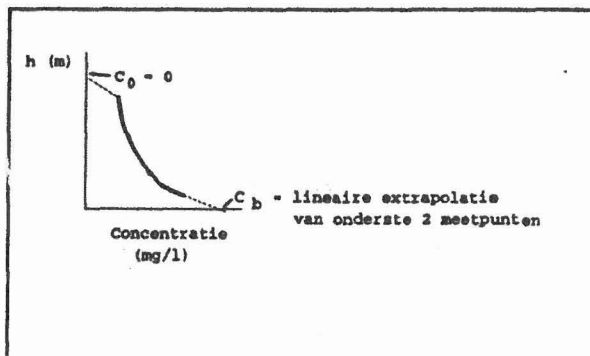
**Aannames**

Bij de omrekening van zandconcentratieverticalen naar zandtransportverticalen zijn een aantal aannames gedaan.

De snelheid aan het oppervlak wordt gelijk verondersteld aan de snelheid van het bovenste meetpunt. De snelheid aan de bodem is 0 (figuur 2a). *Wat is de bodem?*

*kan*

De concentratie aan het oppervlak wordt 0 verondersteld. De zandconcentratie aan de bodem is een lineaire extrapolatie van de onderste twee meetpunten in de verticaal (figuur 2b).

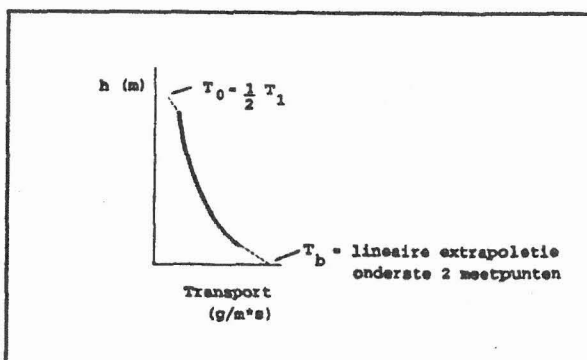


figuur 2b Aannames bij concentratieverticaal met  $C_0$  als concentratie bij het oppervlak en  $C_b$  als concentratie bij de bodem.

Het zandtransport aan het oppervlak is ter grootte van de helft van het zandtransport in het bovenste meetpunt in de verticaal.

De gemeten zandtransporten beslaan alleen het suspensief transport. De laagste waarneming is op 1m boven de bodem gedaan;

er wordt dus een deel van het suspensief zandtransport niet gemeten en het bodemtransport wordt verwaarloosd. Om toch het suspensief zandtransport in de onderste meter en het bodemtransport erbij te betrekken is vanuit dit laagste punt de zandtransportkromme lineair tot de bodem geëxtrapolerd (figuur 2c). Dit brengt het risico met zich mee dat het zandtransport bij de bodem slecht geschat wordt.



figuur 2c Aannames bij zandtransportverticaal met  $T_0$  als transport bij het wateroppervlak,  $T_1$  in het bovenste meetpunt en  $T_b$  bij de bodem.

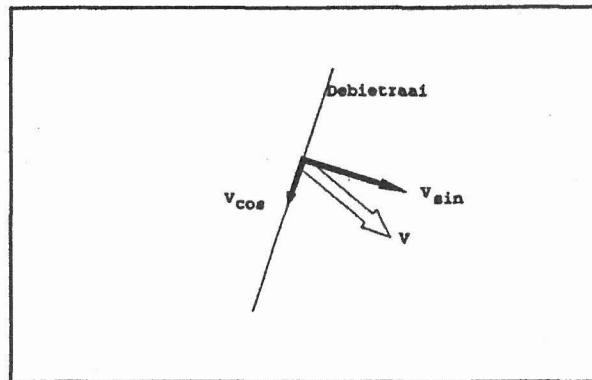
Uit de transportverticaal wordt een over de verticaal gemiddeld transport bepaald.

### 2.3. Stroomsnelheden.

#### *snelheidsvector*

De stroomsnelheden worden op verschillende dieptes gemeten volgens een vast patroon, zie bijlage III. Uit een dergelijke verticaal met stroomsnelheden wordt een diepte-gemiddelde stroomsnelheid over de des-

betreffende verticaal bepaald. De stroomverticaal heeft een richting en kan derhalve als een vector worden beschouwd. De snelheidsvector kan ontbonden worden in een  $V_{sin}$ , welke loodrecht op de debietraai staat en  $V_{cos}$ , welke evenwijdig is aan de ligging van de debietraai (figuur 3). Voor



het zandtransport door de Wes-

figuur 3 Ontbinding van de snelheidsvector  $V$  in  $V_{sin}$  en  $V_{cos}$ .

terschelde wordt alleen gekeken naar het netto resultaat van het zandtransport door de geulen. Hiervoor wordt de component van de snelheid,  $V_{sin}$  gebruikt. Het zandtransport dwars op de geulas wordt buiten beschouwing gelaten. Zodoende wordt getracht om de omstandigheden voor het zandtransport zo uniform mogelijk te houden. Op deze wijze wordt getracht de fout bij het vergelijken van zandtransporten te minimaliseren.

#### *Debietmetingen*

Zandtransporten kunnen berekend worden aan de hand van modellen zoals hiervoor is aangegeven. Voor deze modellen worden debietmetingen gebruikt.

Debietmetingen zijn stroommetingen over de waterdiepte, welke gelijktijdig in een aantal meetpunten, verdeeld over het

dwarsprofiel, in een raai worden uitgevoerd.

Een debietmeting is een 13 uurs meting waarbij gedurende een geheel getij (een volledige eb- en vloedcyclus) de stroomsnelheid wordt gemeten. Uit praktisch oogpunt is het niet altijd mogelijk om tijdens kentering te beginnen met meten. Er wordt op een willekeurig moment begonnen met meten totdat een volledige getijperiode gemeten is.

#### 2.4. Getijcoëfficiënt.

De dagelijkse ongelijkheid van het verticale getij vindt zijn weerslag in de stroomsnelheden. Bij een kleiner getij amplitude zijn de maximale stroomsnelheden kleiner dan bij een groter getij amplitude. Deze ongelijkheid kan gecorrigeerd worden met behulp van het getijcoëfficiënt.

Om de metingen vergelijkbaar te maken wordt het getijamplitude van iedere getijfase (in dit opzicht bevat een getijfase een gehele eb- of vloedperiode) omgerekend naar een gemiddeld getijamplitude. De verhouding van het momentane getijamplitude (tijdens de meting) ten opzichte van de gemiddelde getijamplitude is het getijcoëfficiënt. Het gemiddelde getij is het gemiddelde van alle getijgegevens over de periode van 1971-1980 van een bepaald getijstation (Bath, Hansweert of Terneuzen) afhankelijk van de ligging van de debietraai.

De correctie wordt aan de hand van het getijcoëfficiënt gedaan. De stroomsnelheden van de betreffende getijfase worden vermenigvuldigd met het getijcoëfficiënt. Op deze wijze zijn de stroomsnelheden onderling vergelijkbaar. Metingen van verschillende dagen kunnen zodoende met elkaar vergeleken worden. Derhalve zal alleen naar gemiddelde getijomstandigheden gekeken worden.

De momentane getijcoëfficiënt is de omrekeningsfactor van de tweede getijamplitude van een etmaal naar de eerste getijamplitude van dat etmaal. De stroomsnelheden van de tweede getijfase wordt dan vermenigvuldigd met de momentane getijcoëfficiënt. Op deze wijze zijn de stroomsnelheden van een etmaal

onderling vergelijkbaar.

Bij het gemeten zandtransport is de stroomsnelheid, bij toelevring van de data, zodanig verwerkt dat deze niet meer voor het getij gecorrigeerd kan worden. De zandtransporten gelden momentane getijomstandigheden.

### 2.5. Berekende zandtransporten.

Zoals bij debietmetingen is vermeld, zijn de berekende zandtransporten gebaseerd op diepte-gemiddelde stroomsnelheden.

Als gevolg van het getij, verandert de snelheid continu. Om deze niet-continue stroming zo goed mogelijk te modelleren, zijn er zoveel mogelijk waarnemingen gedaan met slechts een korte tijdsduur tussen de waarnemingen in. De diepte-gemiddelde snelheid wordt over zo'n periode constant verondersteld. Deze periode is vanaf het tijdstip waarop de eerste meting van een verticaal begint tot aan het tijdstip waarop de volgende meetreeks begint. Op deze wijze wordt getracht het stromingspatroon in model te brengen.

#### *Aannames*

De effectieve bodemruwheid varieert in een getijdegebied als gevolg van de veranderende beddingvormen bij de sterk wisselende stroomsnelheden. Dit heeft gevolgen voor de  $k_s$ , welke voor zandtransport berekeningen nodig is.

De relaties die voor  $k_s$  bestaan komen voort uit situaties waarbij beddingvormen in evenwicht zijn met hydraulische omstandigheden. Als gevolg van veranderlijke stroomsnelheden in een getijdemilieu spelen traagheidseffecten een rol. De beddingvormen ijlen na ten opzichte van die veranderende stroomsnelheden. Dit levert situaties op waarbij de beddingvormen niet in evenwicht zijn met de hydraulische omstandigheden.

Om een effectieve ruwheid ( $k_s$ ) in een dergelijk milieu te hanteren heeft van den Berg (1987) een compromis gesloten tussen veldmetingen en stroomgootmetingen (bijlage IV).

Voor  $k_s$  geldt:

$$\begin{aligned}k_s &= 0.1 \text{ m.} && \text{voor } U < 0.5 \text{ m/s} \\k_s &= 10e^{-4.6U} \text{ m.} && \text{voor } 0.5 \text{ m/s} < U < 2.0 \text{ m/s} \\k_s &= 1.0 \text{ m.} && \text{voor } U > 2.0 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Voor  $U < 0.5$  is er geen eenduidige relatie tussen  $U$  en  $k_s$ . Bij  $U < 0.5$  wordt er weinig verandering van de beddingvormen verondersteld, zodat de ruwheid hier constant wordt verondersteld. Uit extrapolatie van de dikke lijn in bijlage IV volgt dat  $k_s = 1.0$ . Voor  $U > 2.0$  is er vlak bed. Ook dan blijft  $k_s$  constant,  $k_s = 0.001$ .

#### 2.6. Korrelgrootte.

De korrelgrootte ( $D_{50}$ ) is een parameter die in beide zandtransportmodellen voorkomen. Op het moment dat de debietraaien werden doorgemeten, zijn er geen korrelgroottes bepaald. Derhalve zijn de gegevens omtrent de korrelgroottes onttrokken aan bodembemonsteringskaarten uit 1973-1979 voor het westelijk deel (De Looff, 1980) en 1975 voor het oostelijk deel (De Looff, 1978). Alleen bij de raaien 3 en 5a zijn tijdens de metingen ook bodemmonsters genomen. Daarbij zijn ook de  $D_{90}$  en  $D_{10}$  geanalyseerd welke voor het model van Van Rijn zijn gebruikt. Bij de overige raaien is voor het model van Van Rijn dezelfde korrelgrootte verdeling gebruikt zoals die bij raai 3 en raai 5a is aangetroffen.

Daar zowel het model van Van Rijn als het model van Engelund-Hansen weinig gevoelig zijn voor korrelgrootte lijkt gebruik van de verouderde korrelgrootte geoorloofd (van Rijn, 1989).

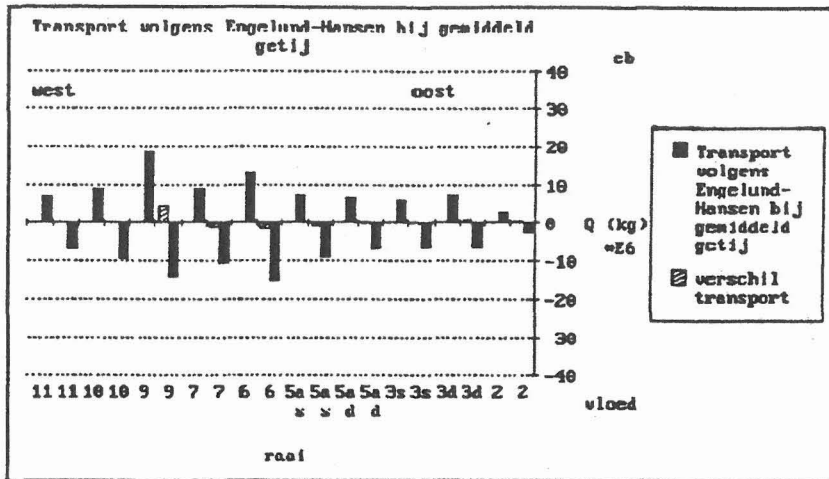
### 3. MEETRESULTATEN

Aan de hand van de modellen van Engelund-Hansen en van Rijn voor zandtransport en de gemeten zandtransporten is er per raai het zandtransport voor eb en vloed bepaald. In tabel 3 zijn de betreffende hoeveelheden vermeld. Om een duidelijker beeld te krijgen hoe het zandtransport van de ene raai tenopzichte van andere raaien verschilt zijn de waarden uit tabel 3 in figuur 4 en 5 uitgezet.

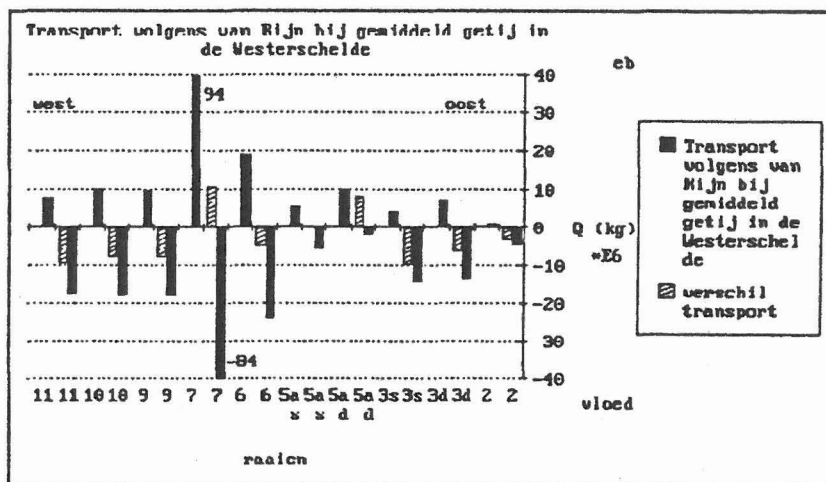
Zandtransport per raai				
raai	Engelund-Hansen momentaan getij	Engelund Hansen gemiddeld getij	Van Rijn gemiddeld getij	gemeten transport (AZTM) momentaan getij
<b>VLOED</b>				
2	-2.5	-2.4	-4.3	-8.8
3 dood	-1.3	-6.4	-13	-1.1
3 spring	-6.8	-6.5	-14	-10
5a dood	-1.7	-6.9	-1.9	-0.6
5a spring	-15	-8.9	-5.7	-20
6	-15	-15	-24	-14
7	-29	-11	-84	-78
9	-31	-14	-18	
10	-17	-9.4	-18	-34
11	-10	-7.0	-17	
<b>EB</b>				
2	4.2	3.0	1.3	5.0
3 dood	2.1	7.7	7.3	1.3
3 spring	7.7	6.0	4.5	11
5a dood	1.5	6.7	10	1.1
5a spring	12	7.9	5.6	20
6	17	14	19	19
7	23	9.2	94	66
9	31	19	9.9	
10	17	9.3	10	30
11	15	7.4	8.0	

Tabel 3 Zandtransporten (eb en vloed) voor momentaan getijde omstandigheden (Engelund-Hansen en AZTM) en voor gemiddelde getijomstandigheden (van Rijn en Engelund-Hansen) [in miljoenen kg].

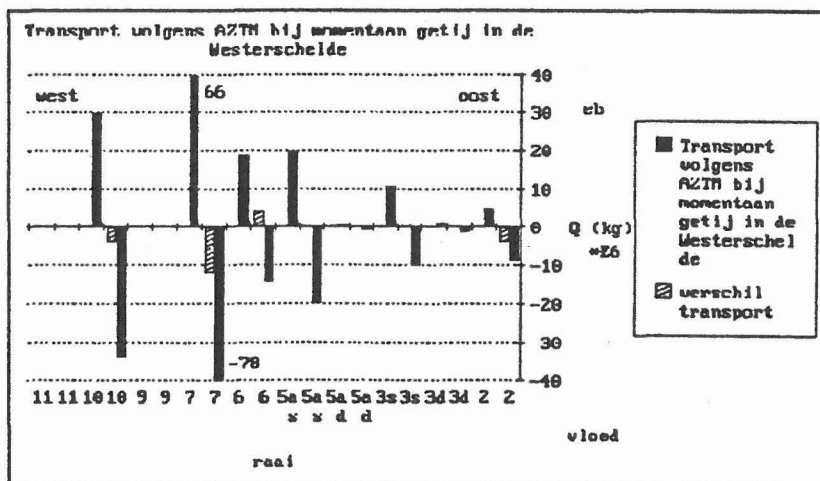




(a)



(b)



(c)

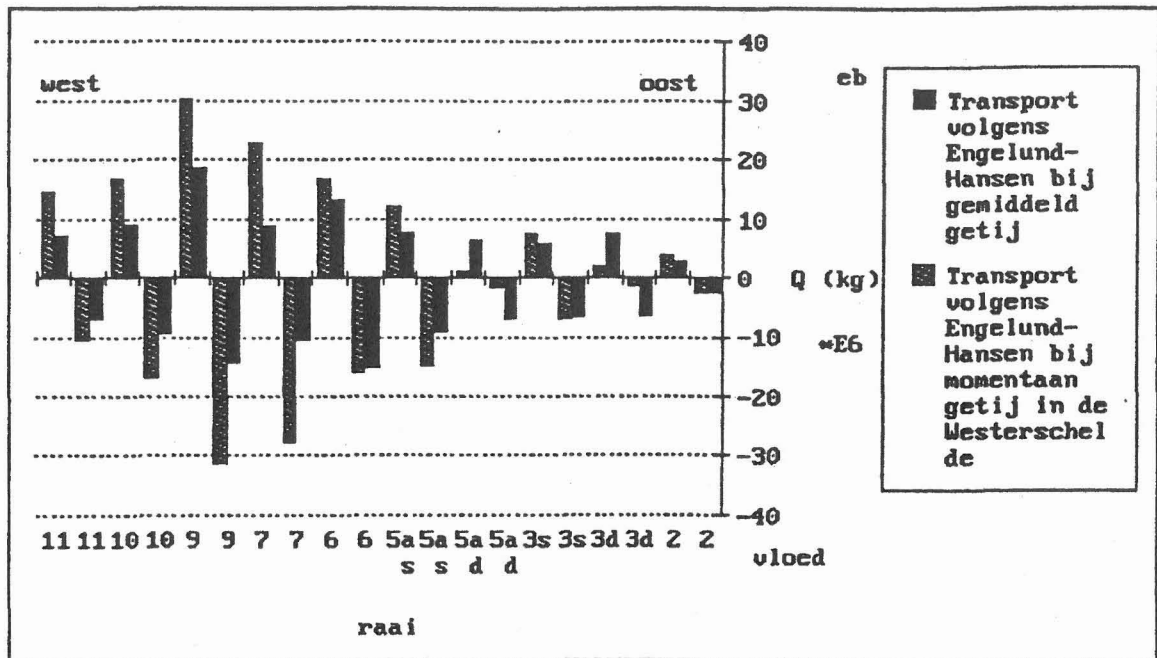
figuur 4 zandtransport bij gemiddeld getij volgens  
a) Engelund-Hansen, b) van Rijn, c) gemeten zandtransport (AZTM).

Als de ruimtelijke verdeling van het zandtransporten over de westerschelde wordt bekeken, blijkt dat er van oost naar west aanvankelijk een toename is in het zandtransport (figuur 4 en 5). Echter na raai 7 is het berekende zandtransport voor de raaien 9,10 en 11 in dezelfde orde van grootte. Het zandtransport in raai 9, 10 en 11 is beduidend lager dan dat bij raai 7 wordt waargenomen. Tevens vindt voor het zandtransport van raai 7 ten opzichte van raai 6 een grotere toename plaats dan bij andere raaien het geval is.

Volgens het model van Van Rijn vindt bij raai 7 een uitzonderlijk hoog zandtransport plaats (ongeveer een factor 2) in vergelijking met andere raaien, zowel voor eb als voor vloed. Dit is ook waargenomen bij de gemeten zandtransporten. Hierbij is het verschil nog veel groter, ongeveer een factor 3. Zandtransporten welke met behulp van het model van Engelund-Hansen zijn bepaald geven niet zo'n opvallend groot zandtransport bij raai 7.

Bij de gemeten zandtransporten zijn de zandtransporten alleen voor momentane getijomstandigheden.

Uit figuur 6 blijkt dat bij het momentaan getij de zandtransporten hoger zijn dan bij gemiddeld getij. De zandtransporten bij momentaan getij zijn rond springtij gemeten. Bij de twee doodtijmetingen (raai 3d en 5ad) zijn de zandtransporten voor momentaan getij lager dan bij gemiddeld getij. Uit figuur 6 blijkt dat na correctie voor het momentaan getij het zandtransport bij springtijmetingen en doodtijmetingen (3d, 3s, 5ad, 5as) in dezelfde orde van grootte liggen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de omrekening aan de hand van het getijcoëfficiënt redelijk werkt en bij de overige raaien toegepast mag worden.



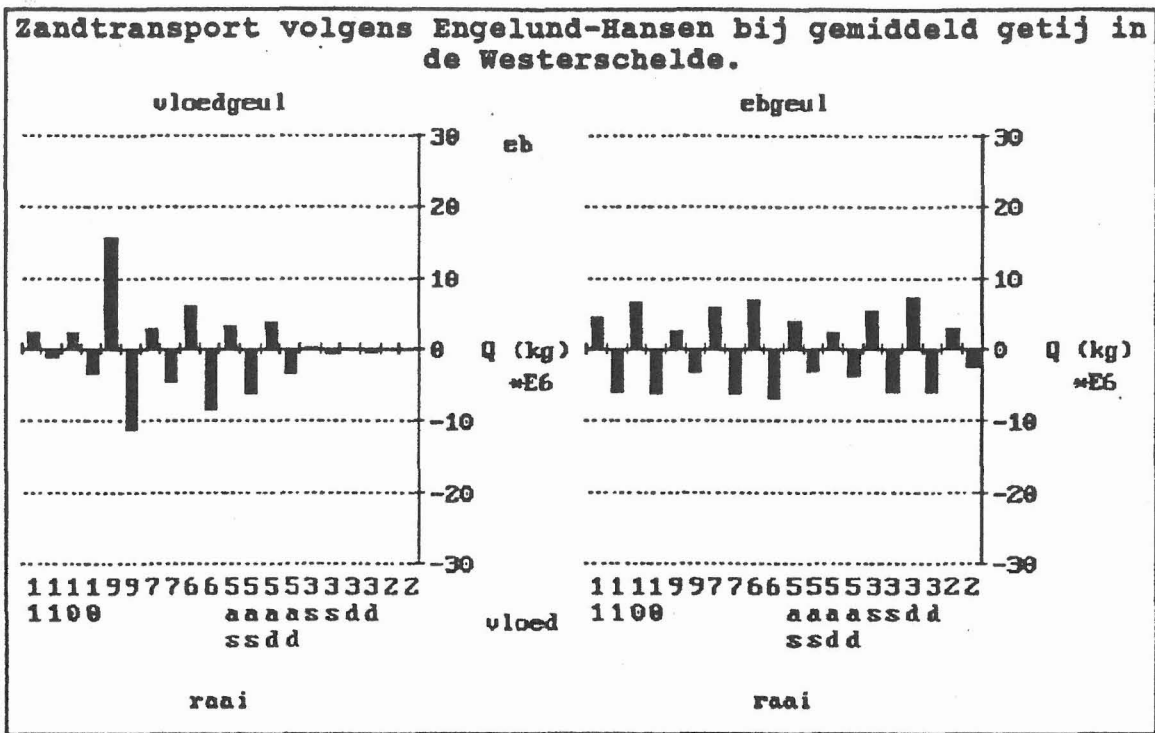
figuur 6 Zandtransport volgens Engeland-Hansen bij zowel gemiddeld getij als momentaan getij.

Er is ook gekeken naar het zandtransport dat door een ebgeul of een vloedgeul gaat (figuur 7). Een ebgeul is een geul met een overwegend ebdebiet. De ebgeul is in de Westerschelde meestal de diepste geul die tevens als vaargeul fungeert. De ebgeul meandert van de ene oever naar de andere oever van de Westerschelde. De vloedgeulen hebben een overwegend vloeddebiet en zijn vaak ondieper dan de ebgeulen (Berben, 1985). Uit figuur 7 blijkt daadwerkelijk dat in de vloedgeulen het zandtransport vloedgedomineerd is. Voor de ebgeul geldt dat het zandtransport, zij het in mindere mate, ebgedomineerd is.

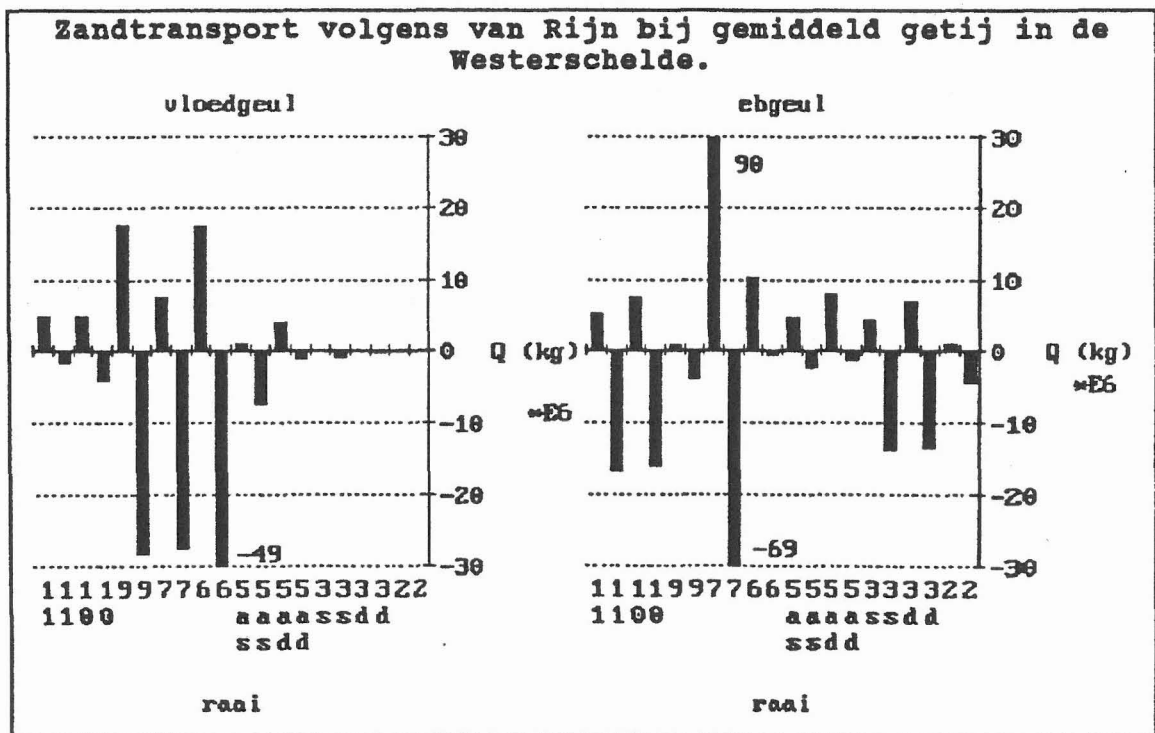
In figuur 8 wordt bekeken hoe de relatieve zandtransporten zich verhouden ten opzichte van de maximale profieldiepte (diepste punt in het profiel ten opzichte van NAP). Hierin zijn de meetpunten van alle debietraaien uitgezet.

Het relatieve zandtransport omvat het zandtransport van een meetpunt uit een raai gedeeld door het totale zandtransport van de desbetreffende raai ( $Q_{mp}/Q_{tot}$ ). De lagere aandelen in het zandtransport (tot 10% van het totale zandtransport) bij een raai

komen zowel bij de ondiepe als de diepe geulen voor. Uit figuur 8 blijkt dat tot een diepte van 6,5 m -NAP het zandtransport een kleiner aandeel in het totale zandtransport door een raai heeft dan dat dit bij grotere dieptes het geval is.

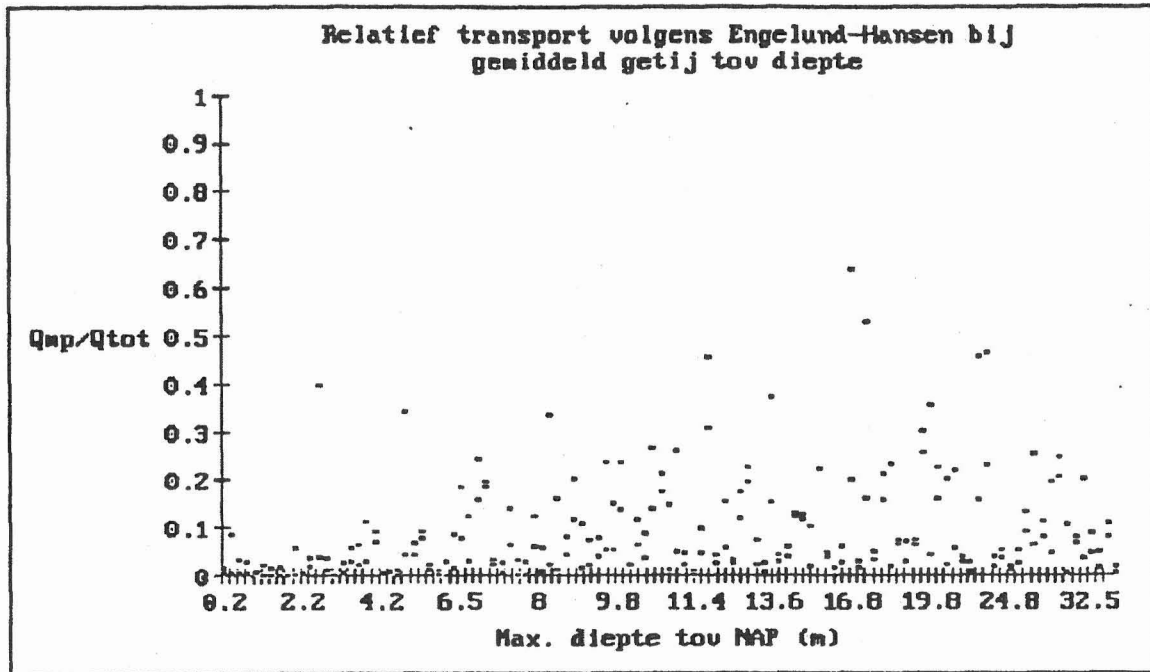


(a)

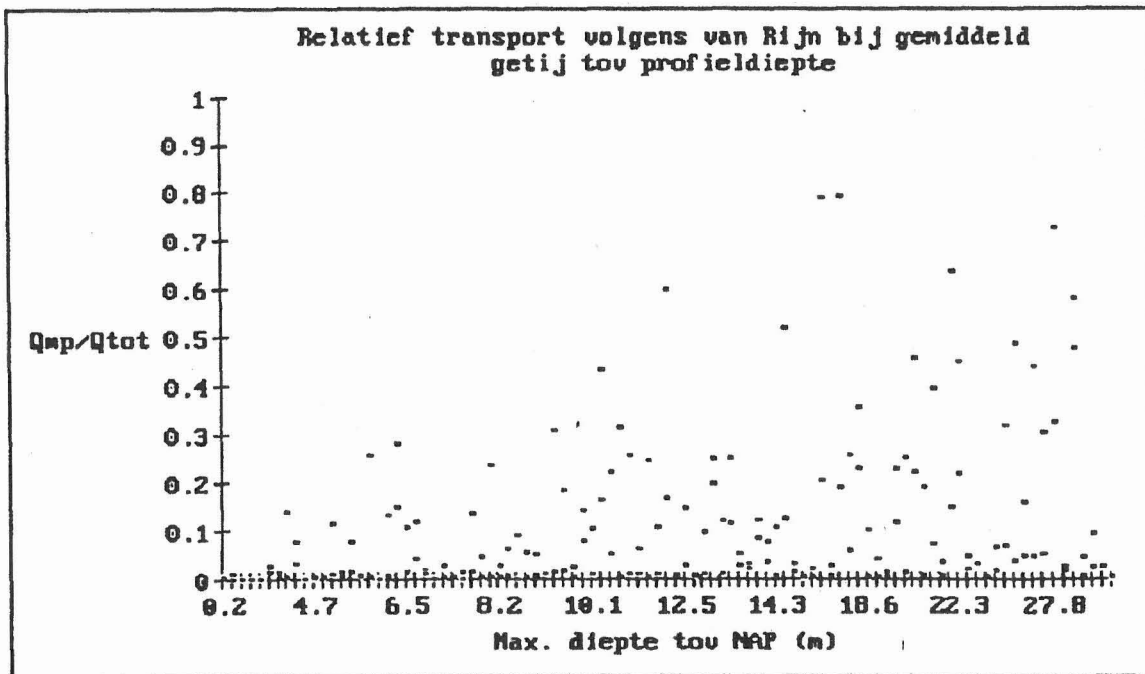


(b)

figuur 7 Zandtransport volgens Engelund-Hansen en van Rijn bij gemiddelde getijomstandigheden in de Westerschelde uitgesplitst per getijdegul.



(a)



(b)

figuur 8 Aandeel van het totale zandtransport ten opzichte van de maximale diepte per meetpunt

#### 4. DISCUSSIE

Uit het verloop van het zandtransport in de Westerschelde zoals in figuur 5 naar voren komt is er sprake van een herverdeling van het sediment tussen de verschillende raaien. Aan de hand van de evenwichtsrelatie (zie bijlage V) van Gerritsen en de Jong (1983) kan inzicht worden verkregen in de vraag of een geul in evenwicht is met het maximale debiet.

Als de maximale stroomsnelheid in een geul groter is dan de evenwichtsstroomsnelheid, dan is de geul te nauw en zal erosie optreden. Indien de maximale stroomsnelheid in een geul kleiner is dan de evenwichtsstroomsnelheid dan is de geul te breed en zal sedimentatie optreden (Gerritsen en de Jong, 1983).

Evenwichtsstroomsnelheden  $U^e$  voor de eb- en vloedgeulen welke berekend zijn aan de hand van evenwichtsrelatie van Gerritsen en de Jong (1983) en de doorstroom oppervlakken van de geulen in de Westerschelde staan in onderstaande tabel vermeld.

raai	ebgeul			vloedgeul		
	$A_c$ ( $m^2$ )	$U^e$ (m/s)	$U_{max}$ (m/s)	$A_c$ ( $m^2$ )	$U^e$ (m/s)	$U_{max}$ (m/s)
2	17488	0.72	0.71			
3d	15260	0.69	0.99	3376	0.69	0.53
3s	15260	0.69	0.85	3376	0.69	1.24
5ad	18231	0.73	*	11155	0.96	*
5as	18231	0.73	*	11155	0.96	*
6	18790	0.74	0.87	18183	1.01	1.59
7	21830	0.77	1.16	24458	1.03	1.52
9	42200	0.86	0.88	36300	1.04	1.00
10	67785	0.90	0.89	9790	0.94	1.16
11	82000	0.96	0.90			

$A_c$  = oppervlakte doorstroomprofiel in de Westerschelde t.o.v. NAP  
 $U^e$  = evenwichtsstroomsnelheid  
 $U_{max}$  = maximale verticaal gemiddelde stroomsnelheid in de gehele geul

Tabel 4 Evenwichtsstroomsnelheden in de eb- en vloedgeulen van de Westerschelde volgens Gerritsen en de Jong (1983). De maximale stroomsnelheden zijn herleid naar gemiddeld getij.  $U_{max}$  is berekend uit  $Q_{max}$  (de Jong, 1989). Voor de geulen van raai 5a is geen  $U_{max}$  voorhanden.

Voor bijna alle vloedgeulen (met uitzondering van de vloedgeul in raai 3d) in de Westerschelde zijn de maximale verticaal gemiddelde stroomsnelheden groter dan de evenwichtsstroomsnelheden  $U^e$ . Een mogelijke reden hiervoor is dat bij vloed het oppervlak van het doorstroomprofiel ten opzichte van NAP bepaald wordt. In werkelijkheid is het doorstroomoppervlak veel groter. In de berekening wordt dus met een te klein doorstroomoppervlak rekening gehouden zodat er gesuggereerd wordt dat de geul te smal is.

Ook voor de ebgeulen zijn de maximale verticaal gemiddelde stroomsnelheden groter dan de evenwichtsstroomsnelheden. De verschillen tussen  $U^e$  en  $U_{max}$  nemen naar het westen toe af. In westelijke richting gaan de ebgeulen steeds dichter naar een evenwicht tussen het doorstroomprofiel en het ebdediet. De verruimingsprocessen (erosie) zal in westelijke richting afnemen. Echter bij raai 7 is er een groot verschil tussen  $U^e$  en  $U_{max}$ . Volgens Gerritsen en de Jong zou deze ebgeul te nauw en aan erosie onderhevig zijn. Uit figuur 5 blijkt bij raai 7 ook een beduidend hoger zandtransport te zijn. Mogelijk heeft de erosie van de ebgeul een weerslag op het zandtransport.

De grotere maximale stroomsnelheid  $U_{max}$  in de ebgeul van raai 3a ten opzichte van raai 3b is het gevolg van het herleiden van de debieten naar gemiddeld getij.

Als een getijdegolf een estuarium binnendringt, nemen de getijvolumina (debieten) af doordat de kombergingsgebieden van de Westerschelde geleidelijk gevuld worden. Als gevolg van de afnemende debieten zou volgens de verwachting de zandtransporten van west naar oost in het estuarium in eveneens afnemen. Echter ten westen van raai 7 (raai 9, 10 en 11) heeft het zandtransport dezelfde orde van grootte. De sleutel van in dit fenomeen zou wellicht in de geometrie van de geul kunnen zitten. De evenwichtsstroomsnelheden  $U^e$  volgens tabel 3 zijn voor de raaien 9, 10 en 11 veel hoger dan bij de andere raaien.

*het is ook  
fen  
phenomeni  
p. 10 en 11*

Eventueel zou er een samenhang kunnen zijn met de vele zandbanken die juist in het oostelijk deel (raai 6 t/m 2) van de Westerschelde liggen. In dat geval zou het een sedimentatiegebied zijn.



De intensieve baggerwerkzaamheden in het oostelijk deel van de Westerschelde zou eventueel ook een rol kunnen spelen.

$r^2$	Engelund-Hansen momentaan getij	Engelund-Hansen gemiddeld getij	van Rijn gemiddeld getij	gemeten zandtrans- port momentaan getij
Engelund-Hansen momentaan getij	1	0.85	nxt.	0.89 (0.93)*
Engelund-Hansen gemiddeld getij		1	0.39 (0.85)*	0.53 (0.68)*
van Rijn gemiddeld getij			1	0.87 (0.61)*
gemeten zandtransport momentaan getij				1

\* exclusief raai 7

Tabel 5 correlatiecoëfficiënt  $r^2$  voor de verschillende methodes waarmee het zandtransport wordt bepaald.

Zoals uit tabel 4 blijkt, bestaat tussen het model van Engelund-Hansen en van Rijn een correlatiecoëfficiënt van 0.85 mits raai 7 buiten beschouwing wordt gelaten. Indien raai 7 wel in de beschouwing wordt meegenomen, dan is de correlatiecoëfficiënt 0.39. Ook bestaat er voor van Rijn een goede correlatie met de gemeten zandtransporten,  $r^2=0.87$ . De correlatie tussen Engelund-Hansen en de gemeten zandtransporten is aanzienlijk minder,  $r^2=0.53$ . Hierbij dient opgemerkt te worden dat bij Engelund-Hansen en van Rijn het zandtransport uit zowel suspensief als bodemtransport bestaat terwijl het gemeten zandtransport (AZTM) allen suspensief transport omvat. Tevens blijkt dat de gemeten zandtransportgegevens momentaan zijn en de resultaten van Van Rijn en Engelund-Hansen beide getij gemiddelde waarden zijn. Indien ook voor Engelund-Hansen een momentaan getij situatie wordt verkre-

gen, dan is  $r^2=0.89$  hetgeen beter is omdat dan bij beide dezelfde getijomstandigheden heersen.

*↓ deze rijkte bestond al in 1970.*

Volgens van den Berg (1987) kan het suspensief zandtransport als een functie van de stroomsnelheid worden gezien,

$$S_s = a u^b$$

waarin  $S_s$  = suspensief zandtransport,  $u$  = diepte-gemiddeld stroomsnelheid,  $a, b$  = coëfficiënten, de waarde van de coëfficiënten vast (Engelund-Hansen) of variabel (van Rijn) zijn.

Bij een waterdiepte van 5m, een effectieve ruwheid  $k_s=0.02$  een korrelgrootte van  $D_{50} = 0.175\mu\text{m}$  kan bij een range voor de stroomsnelheid tussen 0.75 en 2.0 m/s kunnen voor  $a$  en  $b$  de volgende gemiddelde waarden bepaald worden:

	a	b
Engelund-Hansen	0.36	5.00
van Rijn	0.67	5.01

Op grond van deze aanname zou het transport volgens Engelund-Hansen in dezelfde orde van grootte moeten liggen als het transport van Van Rijn.

Echter uit figuur 5 blijkt dat het zandtransport volgens van Rijn veel groter is dan volgens Engelund-Hansen. Blijkbaar zijn er nog een andere factor(en) die bepalend zijn voor het verschil in de betreffende zandtransporten, zoals de waterdiepte en de laagdikte 'a' van het bodemtransport.

Bij het model van Van Rijn (1984) is de dikte van het referentie niveau van groot belang. Bij gebrek aan parameters zoals ribbelhoogte en ribbellenlengte, is het referentie niveau van bodemtransport a gelijkgesteld aan de effectieve bodemruwheid  $k_s$ . Echter als gevolg van de veranderlijke stroomsnelheden zal de effectieve bodemruwheid en daarmee de laagdikte  $a$  ook veranderen waarbij traagheidseffecten en naijling een verstorende factor kunnen zijn.

De resultaten van van Rijn zijn voor de raaien 3, 5, 6 en 9 aan de lage kant omdat vanwege software technische reden bij deze raaien een meetpunt niet in de berekening meegenomen is. Hierdoor

wordt de correlatie iets minder gunstig dan dat deze in werkelijkheid zal zijn.

Bij Engelund-Hansen is alleen voor  $k_s$  een aanname gedaan. Dat wil niet zeggen dat dit het meest betrouwbare model is dat moet worden gebruikt. Het model reageert voornamelijk op de stroomsnelheid, voor de overige parameters is het model minder gevoelig. Voor beide modellen is overigens dezelfde  $K_s$  gebruikt.

Er kan niet zondermeer geconcludeerd worden dat het model van Van Rijn betere waarden oplevert dan het model van Engelund-Hansen omdat er de nodige aannames zijn gedaan zoals bij de werkwijze vermeld is.

Daarnaast zijn de gemeten zandtransporten niet geheel betrouwbaar gezien de grote spreiding in de meetresultaten. Er zijn voor de verwerking van de gemeten zandtransportgegevens een aantal aannames gedaan (zie werkwijze). Belangrijk hierin is dat voor de bepaling van het totaal gemeten zandtransport een schematisatie gemaakt is op basis van minder meetpunten dan bij de stroomsnelheden het geval is. De gemeten zandtransporten worden voor een te groot doorstroomoppervlak representatief gesteld zodat er een overschatting van het zandtransport wordt gemaakt (zie bijlage II).

De verdeling in het zandtransport voor eb- en vloedgeulen laat zien dat de diepe ebgeulen een groter volume zand transporteren dan de vloedgeulen, ondanks de lagere stroomsnelheden bij de ebgeul.

Dit effect kan enigszins teruggevonden worden in figuur 8 waar het zandtransport per meetpunt als aandeel van het totale zandtransport door de raai ( $Q_{mp}/Q_{tot}$ ) wordt bekeken bij maximale profieldiepte. Er is op het eerste gezicht geen duidelijke voorkeurdiepte waarbij het zandtransport het grootst is. Zowel bij ondiepe geulen als bij diepe geulen is er een relatief zandtransport van ongeveer 10%. Bij de diepte dieper dan 6,5m -NAP neemt het aandeel in het zandtransport toe (ca 40%). Het lijkt er op dat het zandtransport op grotere diepte effectiever is.

Bij raai 7 wordt ook de grootste maximale diepte bereikt, 37m beneden NAP. Met het model van van Rijn en met de metingen met de AZTM komt ook naar voren dat bij raai 7 het zandtransport in ieder geval groter is dan bij andere raaien (figuur 2e). Mogelijk heeft het hoge zandtransport van raai 7 met de profieldiepte te maken.

## 5. CONCLUSIE

1. In het oostelijke deel van de Westerschelde (tot aan raai 7) lijkt een trend aanwezig in het zandtransport over de dwarsprofielen. Bij afnemend debiet (in oostelijke richting) wordt eveneens het totale zandtransport kleiner. Raai 7 heeft een beduidend hoger zandtransport (zowel berekend als gemeten) dan de overige raaien. Voor de raaien 9, 10 en 11 is er geen trend waarneembaar. De zandtransporten liggen in dezelfde orde van grootte.
2. Er is geen goede verklaring gevonden waarom het zandtransport van raai 7 zoveel hoger is dan bij andere raaien. Mogelijk hebben verruimingsprocessen van de geul (erosie) een effect op de hoge zandtransporten.
3. De diepe ebgeulen transporteren een grotere hoeveelheid zand dan de ondiepere vloedgeulen. De ebgeulen zijn effectievere zandtransporteurs dan vloedgeulen.
4. Indien naar het aandeel van het zandtransport ten opzichte van de maximale diepte gekeken wordt is er een relatie aanwezig. Tot een diepte van 6.5m -NAP is het aandeel ten aanzien van het totale zandtransport door de dwarsraai klein. Bij grotere dieptes is het zandtransport effectiever. Klaarblijkelijk is naast de stroomsnelheid ook de profiel diepte van belang voor de effectiviteit van het zandtransport.
5. De methode van omrekenen van stroomsnelheden met behulp van de getijcoëfficiënt lijkt goed te werken gezien de resultaten van de dood- en springtijmetingen in de raaien 3 en 5a.
6. Aan de hand van deze gegevens kan geen conclusie worden getrokken na aanleiding van een betere voorspellingsmogelijkheid van ofwel het model van EngelundHansen ofwel het model van van Rijn.
7. Bij de concentratiemetingen met een AZTM wordt het werkelijke alleen grof benaderd. Het laagste meetpunt met de AZTM ligt op 1m boven de bodem. Een belangrijk deel van het suspensief transport wordt niet in de metingen meegenomen.

Wat is het  
voor  
opmerkbare  
aan?

## **6. AANBEVELINGEN**

1. Volgens de evenwichtsrelatie van Gerritsen en de Jong (1983) is de mate van het zandtransport afhankelijk van de vorm van de geul. Op grond hiervan zou onderzocht kunnen worden of er een verband is tussen het optimale zandtransport en de geometrie van de geul. Er is een goede inventarisatie nodig om te bepalen welke geometrische parameters hiervoor nodig zijn.
2. Daarnaast is het nodig dat er gerichter stroomsnelheden gemeten moeten worden waarbij de locatie voor het meetpunt gebaseerd is op het profiel zodat schematisatiefouten en aannames tot een minimum gereduceerd worden.

## 7. LITERATUUR

- Berben, F., 1985. Meandergeometrie en morfodynamisch gedrag van estuariumgeulen. Nota Rijkswaterstaat Directie Zeeland
- Berg, J.H. van der, 1987. Konfrontatie sedimenttransportformules met metingen van het suspensiefzandtransport in de Westerschelde en de Eendracht. Nota ZL-87.00002 Rijkswaterstaat Directie Zeeland
- Engelund, F. and Hansen, E., 1967. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Nordic Hydrology 7
- Gerritsen, F en Jong, H de, 1983. Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde. Nota WWKZ-83.V008, Rijkswaterstaat Studiedienst, Vlissingen
- Jong, H. de, 1989. Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932. Nota GWAO-89.1004 Rijkswaterstaat Directie Zeeland
- Looff, D. de, 1975. Bemonsteringskaart Oostelijk deel van de Westerschelde. Nota WWKZ80-V.009 Rijkswaterstaat Directie Zeeland
- Looff, D. de, 1978. Bemonsteringskaart Westelijk deel van de Westerschelde. Nota WWKZ - 78.V013 Rijkswaterstaat Directie Zeeland
- Rijn, L.C. van, 1984. Sediment transport, Part II: suspended load transport. Journal of Hydraulic Engineering 110, 1613-1641.
- Rijn, L.C. van, 1985a Zandsluiting compartimenteringsdammen Oosterschelde. Vergelijking zandtransportformules van Morra-Kalinske, Engelund-Hansen, Ackers-Wite en van Rijn. Verslag onderzoek Waterloopkundig Laboratorium Delft.
- Rijn, L.C. van, 1985b. Vergelijking zandtransportformules van Morra-Kalinske, Engelund-Hansen, Ackers-Wite en van Rijn. Rapport R2142 Waterloopkundig Laboratorium Delft.
- Werkgroep Waterschap Westerschelde, 1989. Beleidsplan Westerschelde. Deelrapport 4 Morfologische Structuur en Dynamiek. Rijkswaterstaat Directie Zeeland.

## BIJLAGE I

De totaal (= bodem- en suspensie) transportformule van Engelund-Hansen (1967) luidt:

$$s_t = \frac{0,05 \rho_s \bar{u}^5}{\Delta^2 g^{0.5} d_{50} C^3} \quad (A2)$$

waarin:

$s_t$	= totaal transport	(kg/sm)
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
$\Delta$	= relatieve dichtheid (= 1,65)	(-)
$g$	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s <sup>2</sup> )
$d_{50}$	= mediane korreldiameter van het bodemmateriaal	(m)
$C$	= Chézy-koëfficiënt	(m <sup>0.5</sup> /s)
$\rho_s$	= sediment dichtheid (=2650)	(kg/m <sup>3</sup> )

De totaal transportformule ( $s_t$ ) van Van Rijn (1984 a,b) luidt:

$$s_t = s_b + s_s \quad (A4)$$

$$s_b = 0,053 \rho_s (\Delta g)^{0.5} (d_{50})^{1.5} (D_*)^{-0.3} (T)^{2.1} \quad (A5)$$

$$s_s = F \rho_s \bar{u} h c_a \quad (A6)$$

waarin:

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{\Delta g}{v^2} \right]^{1/3} \quad = \text{korreLPARAMETER} \quad (-)$$

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2} \quad = \text{bodemschuifspanningsparameter} \quad (-)$$

$$c_a = 0,015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad = \text{bodemkoncentratie} \quad (-)$$

$$F = \frac{\left(\frac{a}{h}\right)^{Z'} - \left(\frac{a}{h}\right)^{1.2}}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^{Z'} (1,2 - Z')} \quad = \text{korrektiecoëfficiënt} \quad (-)$$

$$Z' = Z + \psi \quad = \text{suspensiegetal} \quad (-)$$



$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*} \quad = \text{suspensiegetal} \quad (-)$$

$$\varphi = 2,5 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^{0,8} \left(\frac{c}{c_0}\right)^{0,4} \quad = \text{korrektiecoëfficiënt gerelateerd aan demping turbulentie door materiaal in suspensie} \quad (-)$$

$$w_s = \frac{10v}{d_s} \left[ \left(1 + \frac{0,01 \Delta g d_s^3}{v^2}\right)^{0,5} - 1 \right] \quad = \text{bezinksnelheid van representatieve korreldiameter van suspensiemateriaal} \quad (\text{m/s})$$

$$d_s = (1 + 0,011 (\sigma_s - 1) (T-25)) d_{50} \quad = \text{representatieve korreldiameter van suspensiemateriaal} \quad (\text{m})$$

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{u_*}\right)^2 \quad = \text{verhouding van diffusiecoëfficiënten van sediment en water} \quad (\beta_{\max} = 2) \quad (-)$$

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left( \frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \quad = \text{gradatiecoëfficiënt van het bodemmateriaal} \quad (-)$$

$$u_{*,cr} = (\Delta g d_{50} \theta_{cr})^{0,5} \quad = \text{kritieke schuifspanningssnelheid bij begin van beweging volgens Shields} \quad (\text{m/s})$$

$$\theta_{cr} = 0,24 D_*^{-1} \quad \text{als} \quad D_* < 4$$

$$\theta_{cr} = 0,14 D_*^{-0,64} \quad \text{als} \quad 4 < D_* < 10$$

$$\theta_{cr} = 0,04 D_*^{-0,1} \quad \text{als} \quad 10 < D_* < 20 \quad \text{Shields' curve}$$

$$\theta_{cr} = 0,013 D_*^{0,29} \quad \text{als} \quad 20 < D_* < 150$$

$$\theta_{cr} = 0,055 \quad \text{als} \quad D_* > 150$$

$$u_*' = \frac{g^{0,5}}{C'} \frac{-}{u} \quad = \text{effektieve schuifspanningssnelheid} \quad (\text{m/s})$$

$u_* = \frac{\rho \cdot u_*^3}{C} \bar{u}$	= totale schuifspannings- snelheid	(m/s)
$C' = 18 \log\left(\frac{12h}{3 d_{90}}\right)$	= Chézy-koëfficiënt betrokken op korrels	(m <sup>0.5</sup> /s)
$C = 18 \log\left(\frac{12 h}{k_s}\right)$	= totale Chézy-koëfficiënt	(m <sup>0.5</sup> /s)
$s_t$	= totaal transport	(kg/sm)
$s_b$	= bodemtransport	(kg/sm)
$s_s$	= suspensietransport	(kg/sm)
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
$d_{50}$	= mediane korreldiameter van bodemmateriaal	(m)
$d_{16}, d_{84}, d_{90}$	= korreldiameters van bodemmateriaal	(m)
$h$	= waterdiepte	(m)
$k_s$	= effectieve bodemruwheid van Nikuradse	(m)
$g$	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s <sup>2</sup> )
$a$	= laagdikte van bodemtransport (is gelijk verondersteld aan effectieve bodemruwheid, dus $a = k_s$ , $a_{max} = 0,05h$ , $a_{min} = 0,01h$ )	(m)
$c_0$	= maximum concentratie (=0,65)	(-)
$\Delta$	= relatieve dichtheid (=1,65)	(-)
$\nu$	= kinematische viskositeitskoëfficiënt	(m <sup>2</sup> /s)
$\kappa$	= konstante van Von Karman (= 0,4)	(-)
$\rho_s$	= sediment dichtheid (=2650)	(kg/m <sup>3</sup> )

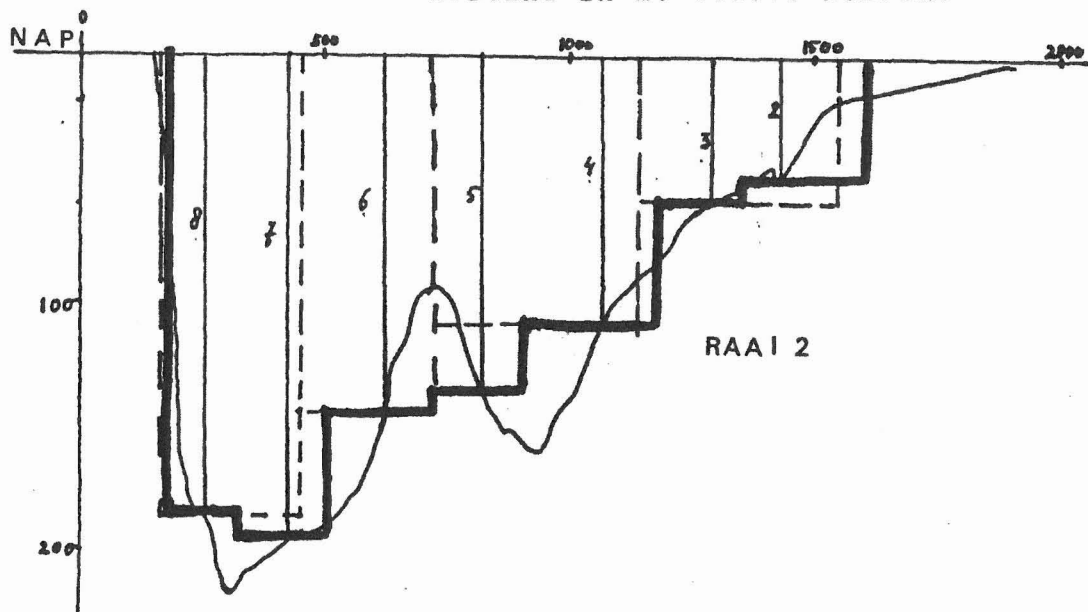
## BIJLAGE II

### Schematisatie van de profielen

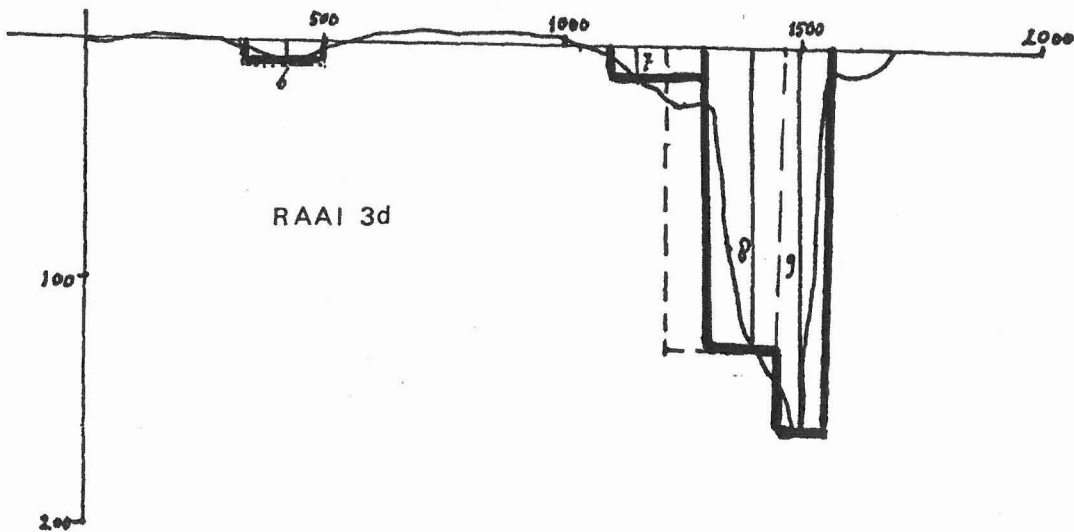
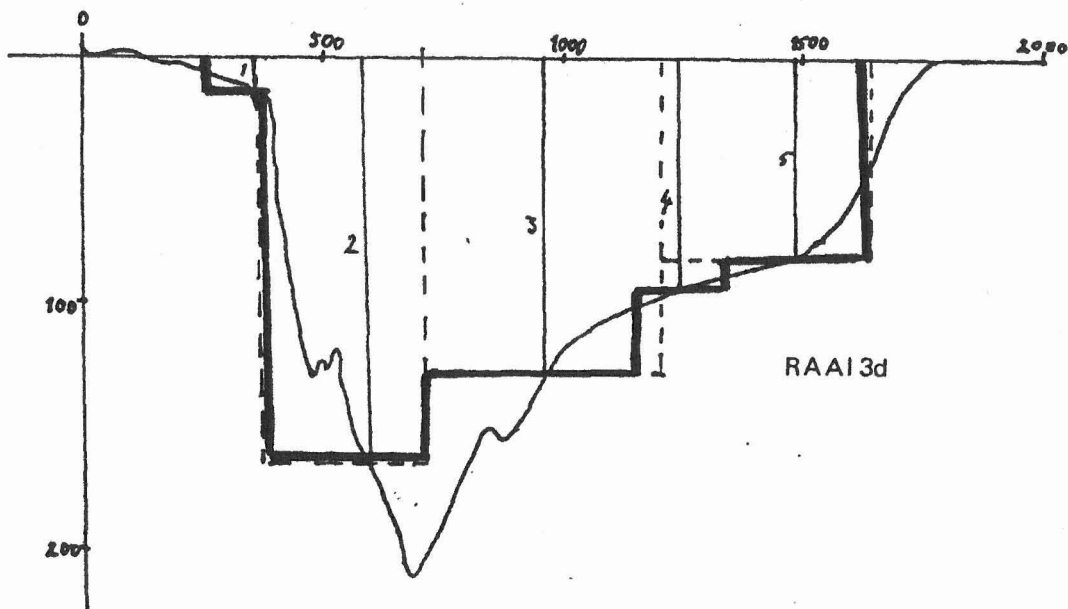
#### Legenda

-  5 Locatie meetpunt
-  Schematisatie voor stroomsnelheidsmetingen
-  Schematisatie voor gemeten zandtransport (AZTM)

Afstand in m. t.o.v. NULPUNT

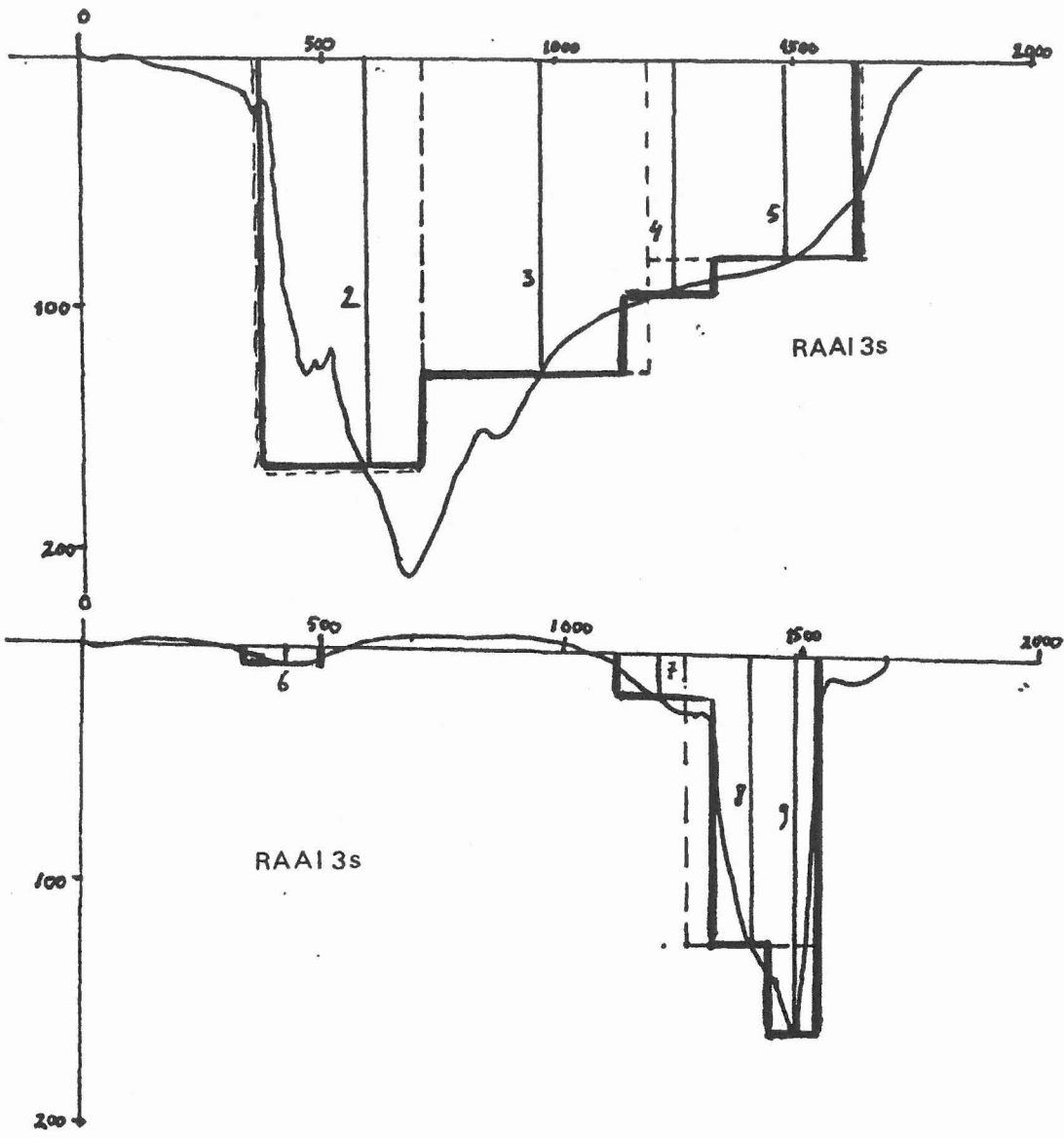


diepte in dm. t.o.v. N.A.F.

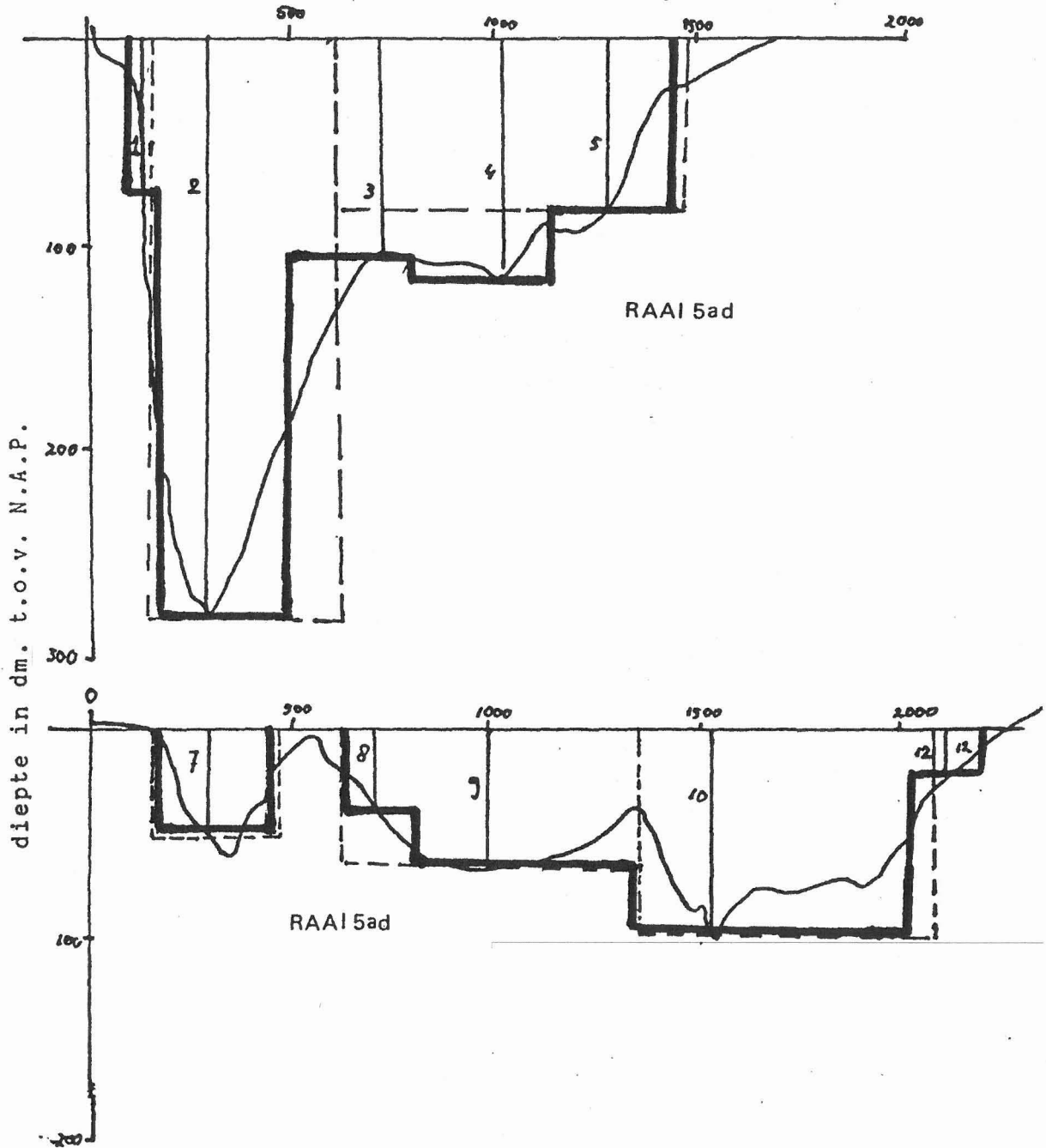


Afstand in m. t.o.v. NULPUNT

diepte in dm. t.o.v. N.A.P.

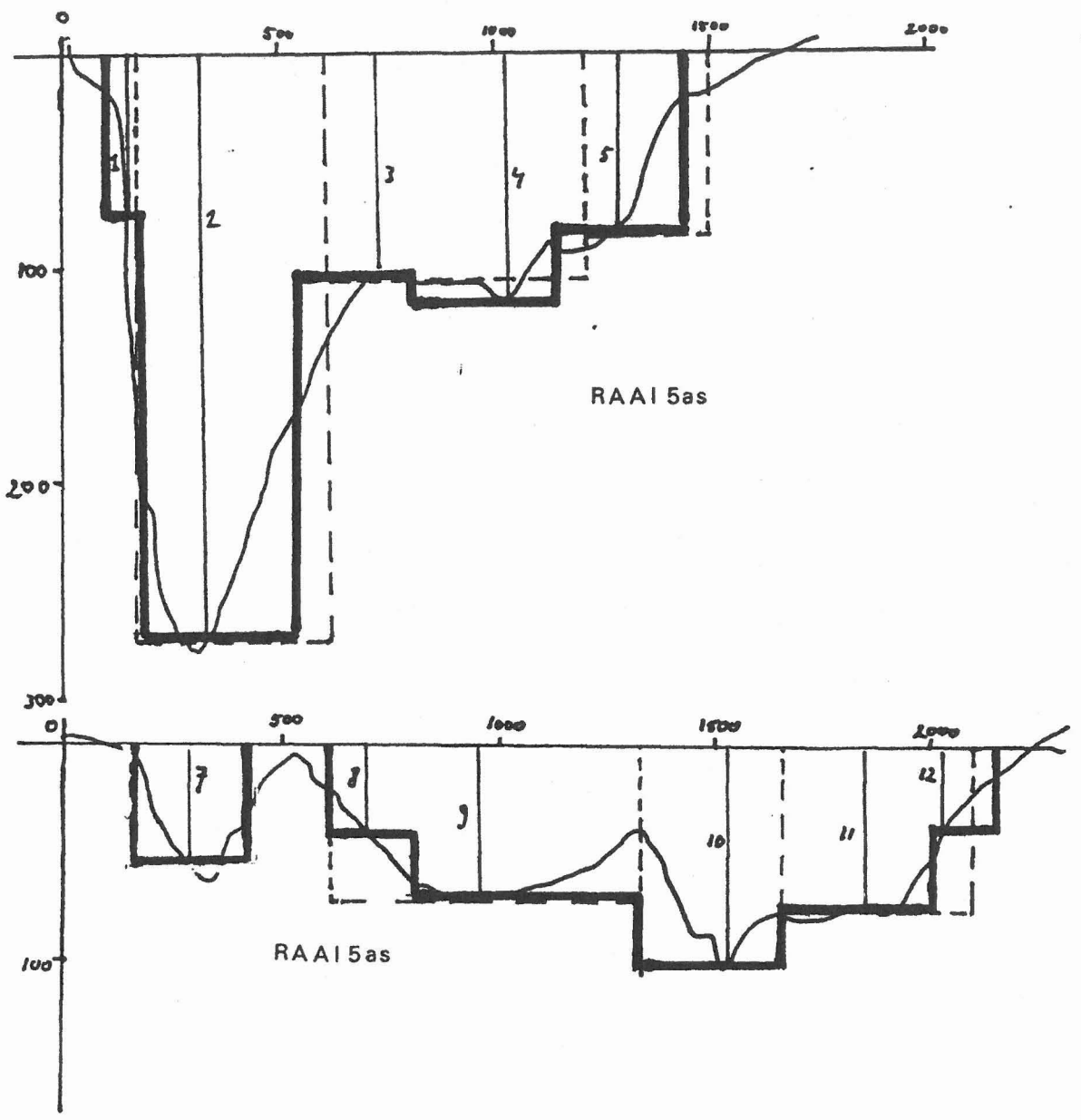


Afstand in m. t.o.v. NULPUNT

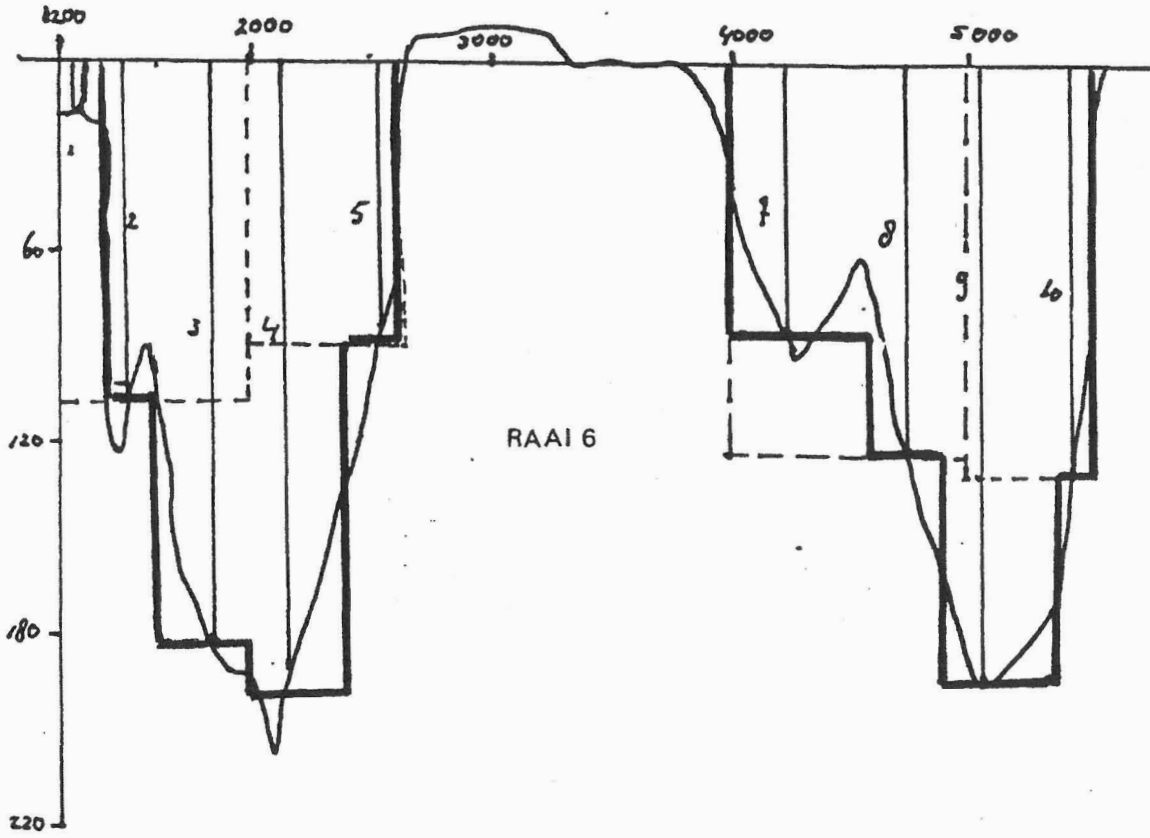


Afstand in m. t.o.v. NULPUNT

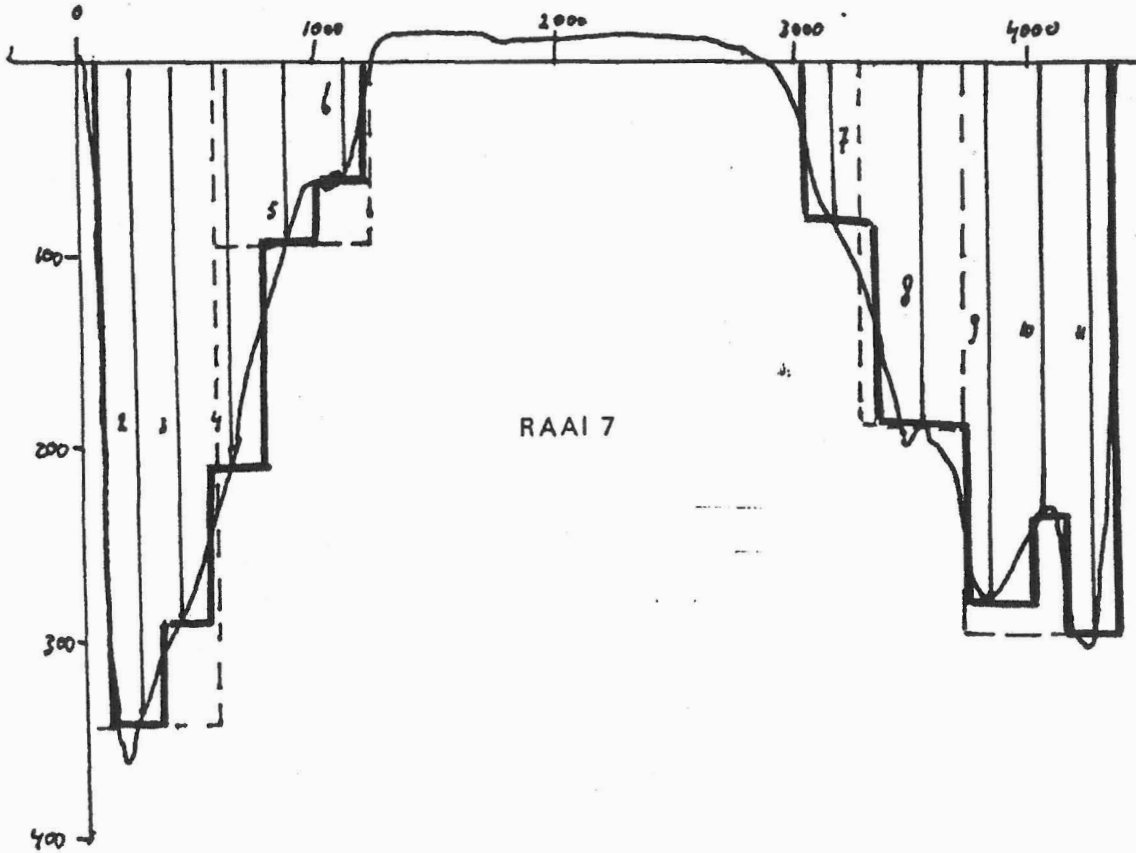
diepte in dm. t.o.v. N.A.P.



Afstand in m. t.o.v. NULPUNT

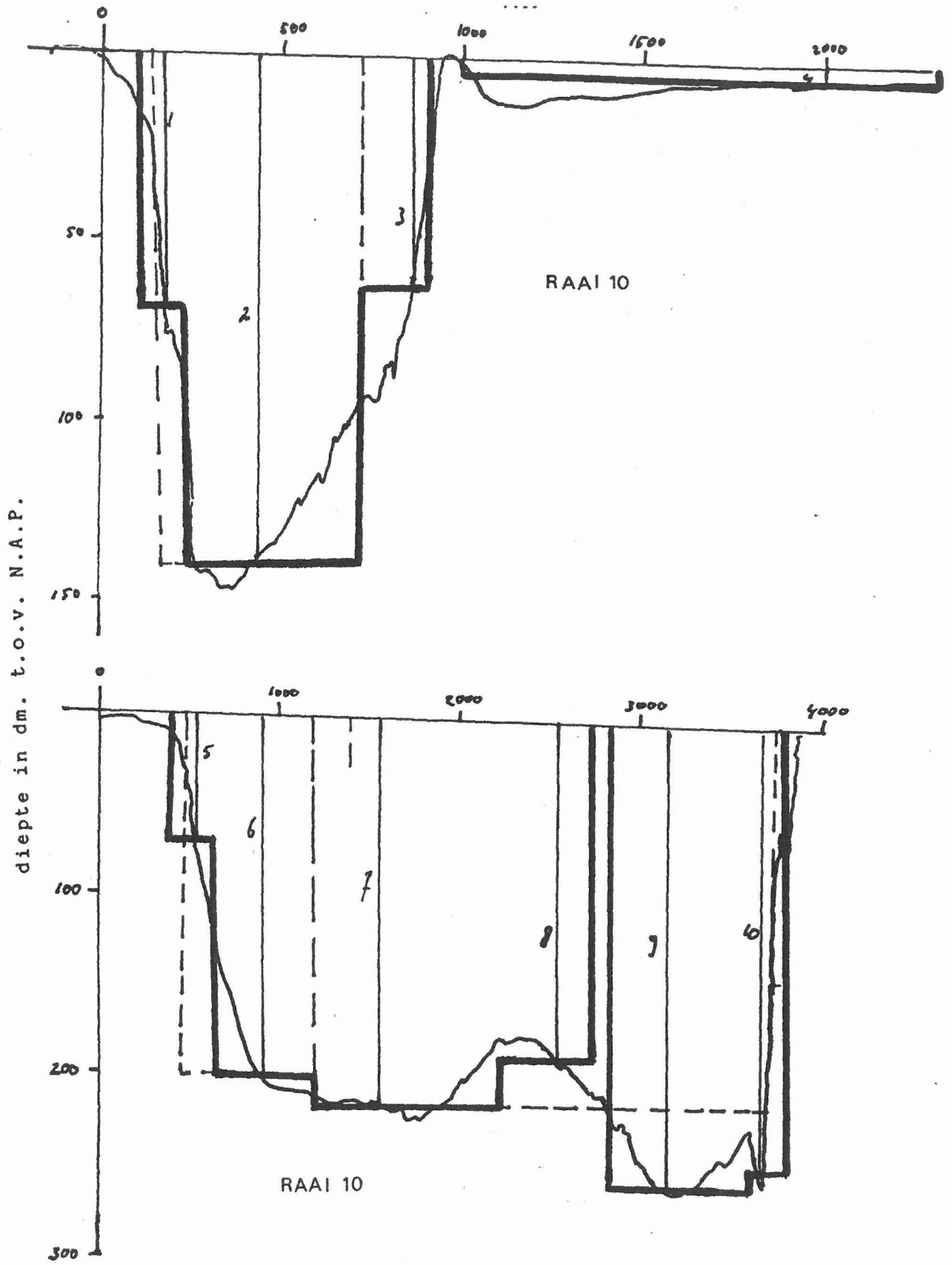


diepte in dm. t.o.v. N.A.P.



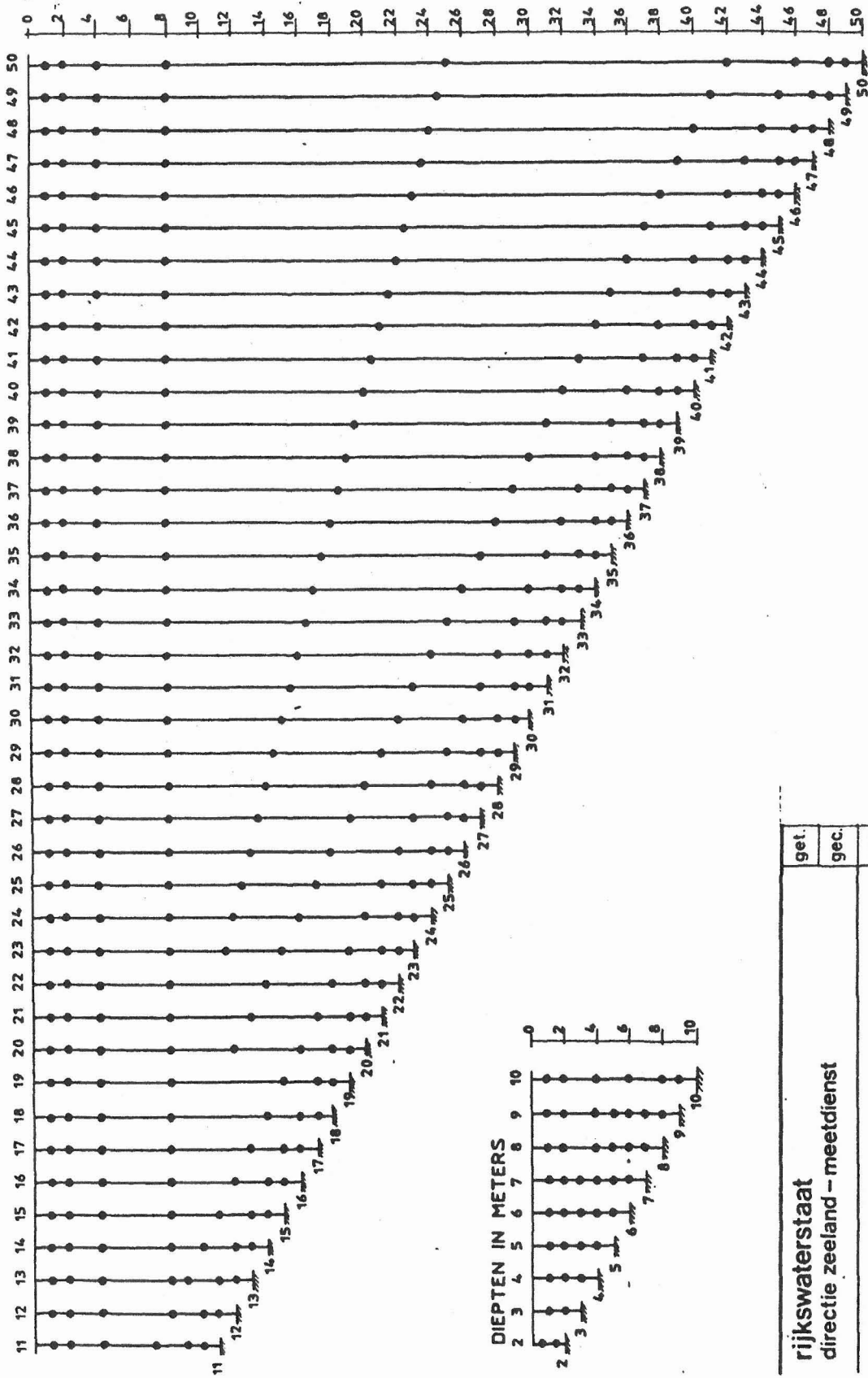


Afstand in m. t.o.v. NULPUNT

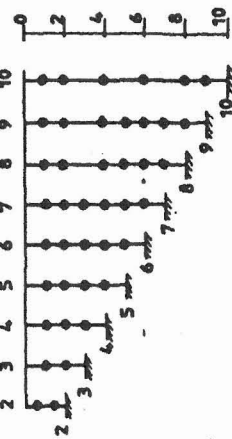


**BIJLAGE III**

**DIEPTEN IN METERS**

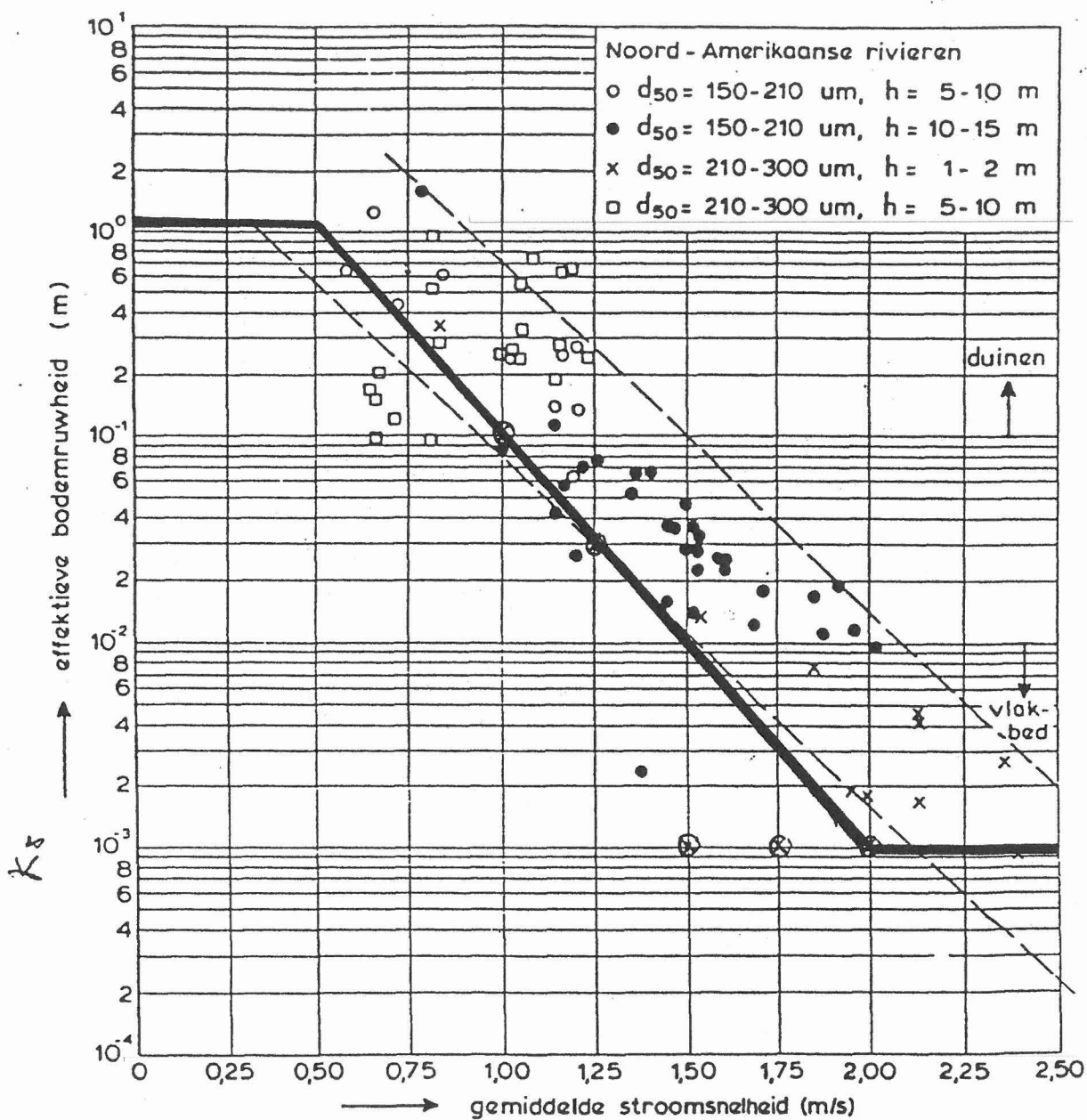


**DIEPTEN IN METERS**



rijkswaterstaat directie zeeland - meetdienst	get.
	gec.
ELMAR DIEPTESHEMA ● MEETNIVEAU	gez.
	akk.

BIJLAGE IV



⊗ aanname onderzoek rapport M 2127

— aanname bij berekeningen in deze nota

$$k_s = 10 e^{-4U}$$

EFFEKTIEVE BODEMRUWHEID ALS FUNKTIE  
VAN STROOMSNELHEID

NOTA ZL.07.0002

uit: R 2142

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Fig 0

De evenwichtsstromsnelheid,  $U^e$ , is een belangrijke parameter. Is de maximale stroomsnelheid in een geul, tijdens eb of vloed, gelijk aan deze evenwichtsstromsnelheid, dan is het doorstroomprofiel van de geul "in evenwicht" met het maximale eb- respectievelijk vloeddebiet. Als de optredende maximale stroomsnelheid beneden deze evenwichtswaarde ligt, betekent dit dat de geul te ruim is voor het optredende maximale debiet en onderhevig zal zijn aan netto sedimentatie. Is de maximale stroomsnelheid hoger dan deze waarde, dan is de geul te nauw en zal per saldo erosie optreden. Deze aanzandings- of verruimingsprocessen zullen voortduren totdat een evenwichtssituatie bereikt is tussen het doorstroomprofiel en het maximale debiet.

Voor de vloedgeulen in de Westerschelde is uit debietmetingen de volgende regressie afgeleid tussen maximaal debiet,  $Q_{\max}$  en het doorstroomprofiel,  $A_c$ , bij evenwicht :

$$Q_{\max} = 1,08 \cdot A_c - 1330 \quad (1)$$

De maximale stroomsnelheden in de eb- of vloedfase,  $U_{\max}$ , kunnen berekend worden uit de vergelijking :

$$U_{\max} = Q_{\max} / A_c \quad (2)$$

De maximale stroomsnelheid voor de evenwichtsligging kan vervolgens afgeleid worden door de leden van vergelijking (1) te delen door  $A_c$  :

$$U^e = 1,08 - 1330 / A_c \quad (3)$$

Voor de ebgeulen kan de vergelijking voor de evenwichtsstromsnelheid op dezelfde wijze worden afgeleid uit de basisvergelijking :

$$Q_{\max} = 0,96 \cdot A_c - 4118 \quad (4)$$

De maximale stroomsnelheid in een geul wordt bepaald uit metingen van het maximale debiet en het uit lodingen berekende doorstroomprofiel. De uitkomst kan vervolgens vergeleken worden met de evenwichtsstromsnelheid om te bepalen of de geul in evenwicht verkeert, te ruim is, of te nauw.

Onderstaande tabel geeft de variabelen met hun dimensies.

Variabele	Omschrijving	Dimensie
$A_c$	Oppervlakte doorstroomprofiel	$m^2$
$Q_{\max}$	Maximale eb- c.q. vloeddebiet	$m^3/s$
$U_{\max}$	Maximale eb- of vloedstromsnelheid	$m/s$
$U^e$	Evenwichtsstromsnelheid	$m/s$



