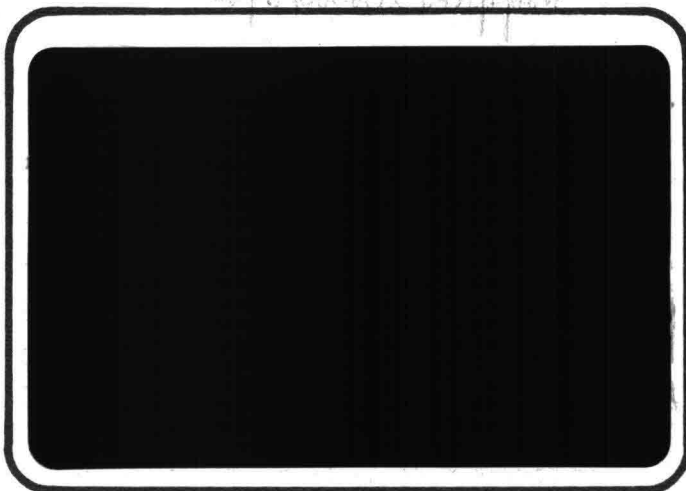


kon. ned. akademie
van wetenschappen

rijkswaterstaat

Afsluitingspunt



balans

delta instituut
voor hydrobiologisch
onderzoek

dienst
getijdewateren

Valsnelheids- en vertikaal
slibtransportmetingen in de
Westerscheldemonde en bere-
kening van de horizontale
slibtransporten in de
Oosterschelde

Balans Transport

Balansnota 1987-30
GWA0.87.113

Boere P.W.

Auteur: P.W. Boere

BALANS
samenwerkingsprojekt van:

Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek, Yerseke
Dienst Getijdewateren, Middelburg

Voorwoord

De voor u liggende nota is het resultaat van een 16 maanden durende studie naar de slibtransporten in de Oosterschelde. Deze studie omvat eveneens het afstudeerproject van de auteur van deze nota. De meeste aandacht is tijdens dit onderzoek uitgegaan naar de valsnelheid van het slib omdat erg veel onduidelijkheid bestond omtrend de grootte van deze valsnelheid en het belang van deze valsnelheid in de slibtransportmodellen.

Naast het literatuuronderzoek zijn er metingen uitgevoerd in de natuur. Deze metingen waren mogelijk door de inzet van de medewerkers van de volgende diensten van Rijkswaterstaat:

- Dienst Getijdewateren
- Direktie Zeeland
- Direktie Noord Holland

Daarnaast zijn er veel suggesties en opbouwende kritiek geleverd door verschillende collegas van de Dienst Getijdewateren, het Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek, leden van de vakgroep Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft en medewerkers van het Waterloopkundig Laboratorium in Delft. Zonder hen had deze nota niet tot stand kunnen komen.

Wskelbouwen de

Afstudeerhoogleeraar : prof. dr. in J.P.Th. Kellumgh

INHOUDSOPGAVE

blz.

VOORWOORD**INHOUDSOPGAVE**

1

LIJST VAN BIJLAGENNutdin?

3

SAMENVATTING

4

Hst. 0 INLEIDING

6

Hst. 1 HET MATERIAAL SLIB

8

Hst. 2 SLIBTRANSPORTEN

11

- § 2.1 Inleiding
- § 2.2 Slibtransportvormen
- § 2.3 Slibtransport in de Hollandse Delta
- § 2.4 Slibtransportmodellen
 - 2.4.1 Sprongtype transport volgens Postma
 - 2.4.2 $\mu\lambda$ -model
- § 2.5 CoBBlusies

Hst. 3 VALSNELHEID SLIB

25

- § 3.1 Inleiding
- § 3.2 Valsnelheid volgens Stokes
- § 3.3 Flocculatie
 - 3.3.1 Flocculatie in organismen
 - 3.3.2 Flocculatie in de waterkolom
- § 3.4 Verdelingen en hun karakteristieken
 - 3.4.1 Mediane valsnelheid
 - 3.4.2 Transportvalsnelheid
 - 3.4.3 Discussie
- § 3.5 Valsnelheidsbepaling met behulp van valbuizen
- § 3.6 Valsnelheid volgens Krone
- § 3.7 Valsnelheidsbepaling met behulp van slibmassabalans
 - 3.7.1 Slibmassabalans
 - 3.7.2 Situatie Westerscheldemon
 - 3.7.3 Afweging balanstermen
 - 3.7.4 Metingen en gegevensverwerking

- 3.7.5 De slibinhouds veranderingen in de waterkolom
- 3.7.6 Advectief transport
- 3.7.7 Turbulentie metingen
- 3.7.8 Foutenanalyse
- § 3.8 Conclusies

Hst. 4 SLIBTRANSPORT IN DE OOSTERSCHELDE 63

- § 4.1 Inleiding
- § 4.2 Invoergegevens voor $\mu\lambda$ -model
- § 4.3 Resultaten slibtransportbepaling
- § 4.4 Discussie

LITERATUURLIJST

68

BIJLAGEN

LIJST VAN BIJLAGEN

1. Meetdagen in de doodtij-springtijcyclus
- 2.1-2.3 Meetprogramma
3. Gevoeligheid van de troebelheidsmeter Monitek 160/131 voor de deeltjesgrootte
4. Relatie tussen het zwevend stofgehalte en de slibconcentratie op 870312
5. Waterdiepte en oppervlaktestroomsnelheidsverloop op 870312
6. Ongemiddeld slibconcentratieverloop op 870312
7. Gemiddeld slibconcentratieverloop op 870312
8. Naar snelheid getransformeerd slibinhoudsveranderingsverloop op 870312
9. Naar snelheid getransformeerde verticale slibtransporten op 870312
10. Turbulentieintensiteit in de hoofdstromingsrichting op 870312
11. Relatie tussen het zwevend stofgehalte en de slibconcentratie op 870319
12. Waterdiepte en oppervlaktestroomsnelheidsverloop op 870319
13. Ongemiddeld slibconcentratieverloop op 870319
14. Gemiddeld slibconcentratieverloop op 870319
15. Naar snelheid getransformeerd slibinhoudsveranderingsverloop op 870319
16. Naar snelheid getransformeerde verticale slibtransporten op 870319
17. Turbulentieintensiteit in de hoofdstromingsrichting op 870319
18. Troebelheidsmeter Monitek 160/131
19. Troebelheidsmeter Partech 7000 rp
20. Valbuis/monstername apparaat
21. Overzicht van de hoofdgeulen waarvan de slibtransporten zijn berekend met het $\mu\lambda$ -model
22. Indeling van de Oosterschelde zoals gebruikt in de koolstofbalans van de Oosterschelde
23. Berekende slibtransporten aan de hand van erosie en sedimentatiegegevens door Tenbrinke
24. Berekende slibtransporten met het $\mu\lambda$ -model door Boere
25. Indikatie van de vlokafbraak door monstername
26. Bepaalde turbulentie grootheden op 870312
27. Bepaalde turbulentie grootheden op 870319

SAMENVATTING

X De grootte van de slibtransporten ^{zijn} waren noodzakelijke invoergegevens voor de koolstofbalans voor de Oosterschelde. Bij de bepaling van deze slibtransporten ontstonden onduidelijkheden over de grootte van de valsnelheid van slib. De valsnelheid is een zeer belangrijke parameter in de slibtransportbepaling.

De horizontale slibtransporten in een bekken als de Oosterschelde blijken bijna recht evenredig te zijn met de valsnelheid van het slib rond de stroomkenteringen. Gezien de importantie is gedurende de periode september '86 tot en met december '87 onderzoek verricht naar de valsnelheid van het slib. Dit onderzoek bestond deels uit een literatuurstudie en voor een groot deel uit veldmetingen.

Het onderzoek resulteerde onder andere in een nieuwe definitie van één valsnelheid welke het transport door het vallen beschrijft van een totale deeltjesverdeling. Deze valsnelheid, de transportvalsnelheid, moet in slibmassabalansen gebruikt worden om de slibtransporten te bepalen. Uit de veldmetingen volgde dat rond de stroomkenteringen de transportvalsnelheid ongeveer 10 maal groter is dan de mediane valsnelheid. Uit de literatuur blijkt dat deze snelheid gebruikt werd/wordt om het transport door het vallen te bepalen. Dit gaf aanleiding tot grote verschillen in de resultaten ten opzichte van realiteit.

De gebruikte valbuis/monstername apparatuur bleek tevens niet geschikt om de transportvalsnelheid te bepalen. Er is een verschil van een faktor 3-4 geconstateerd in vergelijking met de resultaten uit de massabalansen. Dit verschil kan grotendeels verklaard worden uit de vlokafbraak welke ontstaat tijdens de monstername. Om de tot nu toe gebruikte mediane valsnelheid te bepalen bleek de apparatuur goed geschikt.

De transportvalsnelheid is zeer gevoelig voor de aanwezigheid van slibdeeltjes/vlokken met grote valsnelheden terwijl slibdeeltjes met valsnelheden kleiner dan de mediane valsnelheid nauwelijks invloed hebben op de grootte van de transportvalsnelheid. Flocculatie zal de transportvalsnelheid in grote mate beïnvloeden. Uit de metingen blijkt dat voornamelijk de tijdsduur waarin sterke flocculatie optreedt van belang is voor de transportvalsnelheid. De transportvalsnelheid boven de bodem, welke waarde in de meeste modellen gebruikt moet worden, bedraagt rond de stroomkentering in diepe geulen ongeveer 2,0-3,0 mm/s. Het gaat hierbij om geulen waarin de stroomkentering snel plaatsvindt en er maximaal ongeveer 1-1,5 uur bezinking plaatsvindt.

gedurende de gehele getijcyclus?

Met behulp van deze resultaten en andere meetdata zijn horizontale slibtransporten berekend met een eendimensionaal transportmodel voor de Oosterschelde. Voor de transportvalsnelheid is een waarde van 2,0 mm/s in het model gesubstitueerd. Deze resultaten geven een indicatie van de slibstromen in de Oosterschelde van voor en van na de sluiting. De resultaten van voor de sluiting komen goed overeen met de resultaten van W. Ten Brinke die zijn bepaald aan de hand van sedimentatie- en erosiegegevens van de afgelopen 20 jaar. De resultaten van na de sluiting duiden op een nieuw evenwicht met slibimport vanuit de Noordzee en voornamelijk sedimentatie in de Kom en het Keeten-Mastgat. De slibconcentraties in de waterkolom zullen hierbij lager zijn dan voor de sluitingen met een afname van de Noordzee naar het Middengebied van de Oosterschelde.

Hst. 0 INLEIDING

Naar aanleiding van de bouw van de stormvloedkering in de Oosterschelde is door de Dienst Getijdewateren in samenwerking met het Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek het projekt BALANS opgezet. Dit projekt heeft als doel het opstellen van een voedselbalans voor de Oosterschelde. Zowel voor de situatie van voor en na de sluiting dient deze voedselbalans opgesteld te worden. Deze balansen zijn een hulpmiddel voor het oplossen van milieu en visserijproblemen die in de Oosterschelde spelen.

De voor u liggende nota is een van de rapportages van het deelprojekt BALANS-TRANSPORT. Dit deelprojekt heeft als doelstelling het bepalen van de voedsel(koolstof)transporten in de Oosterschelde. Slibtransporten hebben een belangrijk aandeel in de voedseltransporten. Deze nota handelt over de slibtransporten waarbij de nadruk ligt op sedimentatieprocessen van slib die rond kentering plaatsvinden. In 1986/1987 is hierna experimenteel onderzoek verricht. Dit was noodzakelijk gezien de grote onzekerheden in de sedimentatieprocessen van slib en de grote importantie van de sedimentatie op de slibtransporten. De grootste onzekerheden bestaan in de waarde van de valsnelheid van slib.

De opbouw van deze nota is als volgt. Hoofdstuk 1 zal gewijd zijn aan de definiëring van slib. In hoofdstuk 2 zal ingegaan worden op de slibtransportprocessen die optreden in bekkens als de Oosterschelde en de rol van de sedimentatie/erosie rond kentering in deze processen. Tevens zullen twee modeleringen besproken worden. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 verslag gedaan van het experimentele onderzoek naar de valsnelheid van slib en van de processen die van invloed zijn op de valsnelheid. Dit experimentele werk heeft noodgedwongen plaatsgevonden in de Westerscheldemonde, omdat in de onderzoeksperiode de slibconcentraties in de Oosterschelde te gering waren om de processen (bezinking, flocculatie) rond de kentering goed te kunnen bestuderen. Deze resultaten worden vergeleken met de resultaten van andere onderzoekers. Aan de hand van de resultaten uit hoofdstuk 3 en met gebruikmaking van de in hoofdstuk 2 beschreven modellen zullen slibtransporten bepaald worden voor de Oosterschelde. Deze berekende transporten zullen vergeleken worden met resultaten van andere onderzoekers (hoofdstuk 4).

De slibtransporten zullen op bepaalde plaatsen in de Oosterschelde bepaald worden zodat ze gebruikt kunnen worden voor het ecologisch computermodel dat een van de

resultaten van het projekt BALANS-MODEL is. In dit computermodel worden de verschillende voedsel(koolstof)stromen berekend. De invoergegevens voor dit model komen van de verschillende deelprojekten binnen het BALANS-projekt. Uiteindelijk zal het model gebruikt moeten worden om de invloed van bepaalde ingrepen op de voedselbalans te kunnen voorspellen.

Hst. 1 HET MATERIAAL SLIB

Van het materiaal slib zijn verschillende definities in gebruik. De meeste definities gaan uit van de korrelverdeling van de anorganische delen (zie tabel 1 en fig. 1). Er zijn ook definities in gebruik waarbij een deel van het organische materiaal onder slib geclassificeerd wordt. In deze nota zal een definitie van slib in de waterkolom gebruikt worden met behulp waarvan het slibtransport goed beschreven kan worden.

Tabel 1 Fractie-indeling naar korrelafmetingen van anorganische deeltjes

Naar N209 en N210	Naar L.G.M. (Lab. v. Grondmechanica)
Slibfractie : $< 16 \mu\text{m}$ (= 0,016 mm)	Lutumfractie: $< 2 \mu\text{m}$
Leemfractie : $< 50 \mu\text{m}$	Siltfractie : $2 \mu\text{m} - 60 \mu\text{m}$
Zandfractie : $16 \mu\text{m} - 2000 \mu\text{m}$	Zandfractie : $60 \mu\text{m} - 2000 \mu\text{m}$
Grindfractie: 2 mm-64 mm	Grindfractie : 2 mm- 60 mm
Steenfractie : $< 64 \mu\text{m}$	Steenfractie : 60 mm-200 mm

Een belangrijk doel van slibtransportmetingen en modellen is om aan te geven waar en hoeveel slib er erodeert of sedimenteert. Met behulp van deze resultaten kan men bijvoorbeeld aangeven waar slib gebaggerd moet worden om de scheepvaartwegen open te houden of waar verontreinigd slib sedimenteert. In de baggerwereld wordt onder slib in bodemonsters het anorganische materiaal met een diameter kleiner dan $60 \mu\text{m}$ verstaan. Deze definitie dient als uitgangspunt voor de in deze nota te gebruiken definitie. Indien men met behulp van slibtransportmetingen of -modellen wil bepalen hoe groot de sedimentatie is, dan moet dat materiaal in ogenschouw genomen worden dat na sedimentatie en eventueel mineralisatie in een bodemonster als slib wordt geclassificeerd. Voor het zwevend materiaal in de waterkolom betekent dit dat onder slib ook moet worden verstaan:

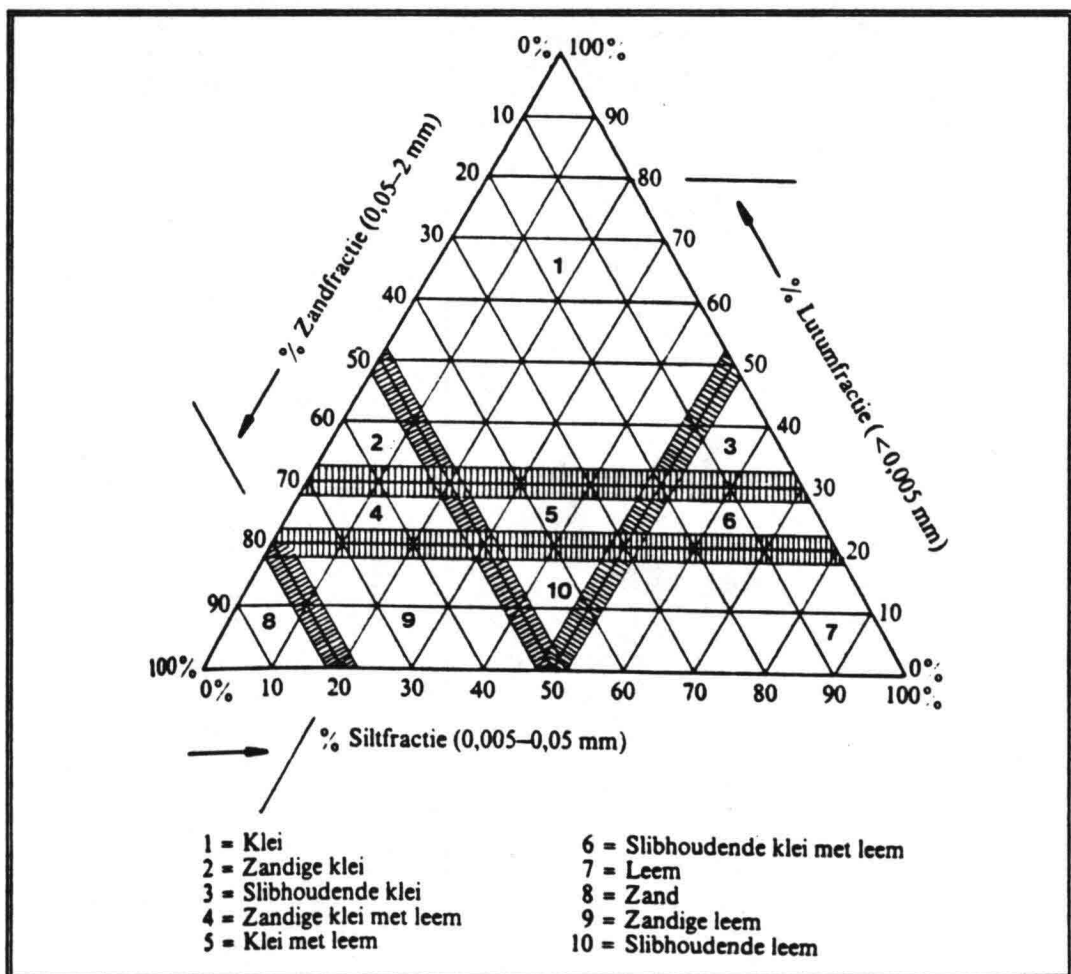
- organische aggregaten (samenstel van verschillende type organische en/of anorganische deeltjes gebundeld in een organische matrix; o.a. dood plankton en excretieproducten)
- anorganische aggregaten (samenstel van verschillende anorganische deeltjes)
- (an)organische vlokken (samenstel van één type deeltjes)

dit rand is inbegrepen?

Anorganische (losse deeltjes met diameter tussen 16-2000 µm)

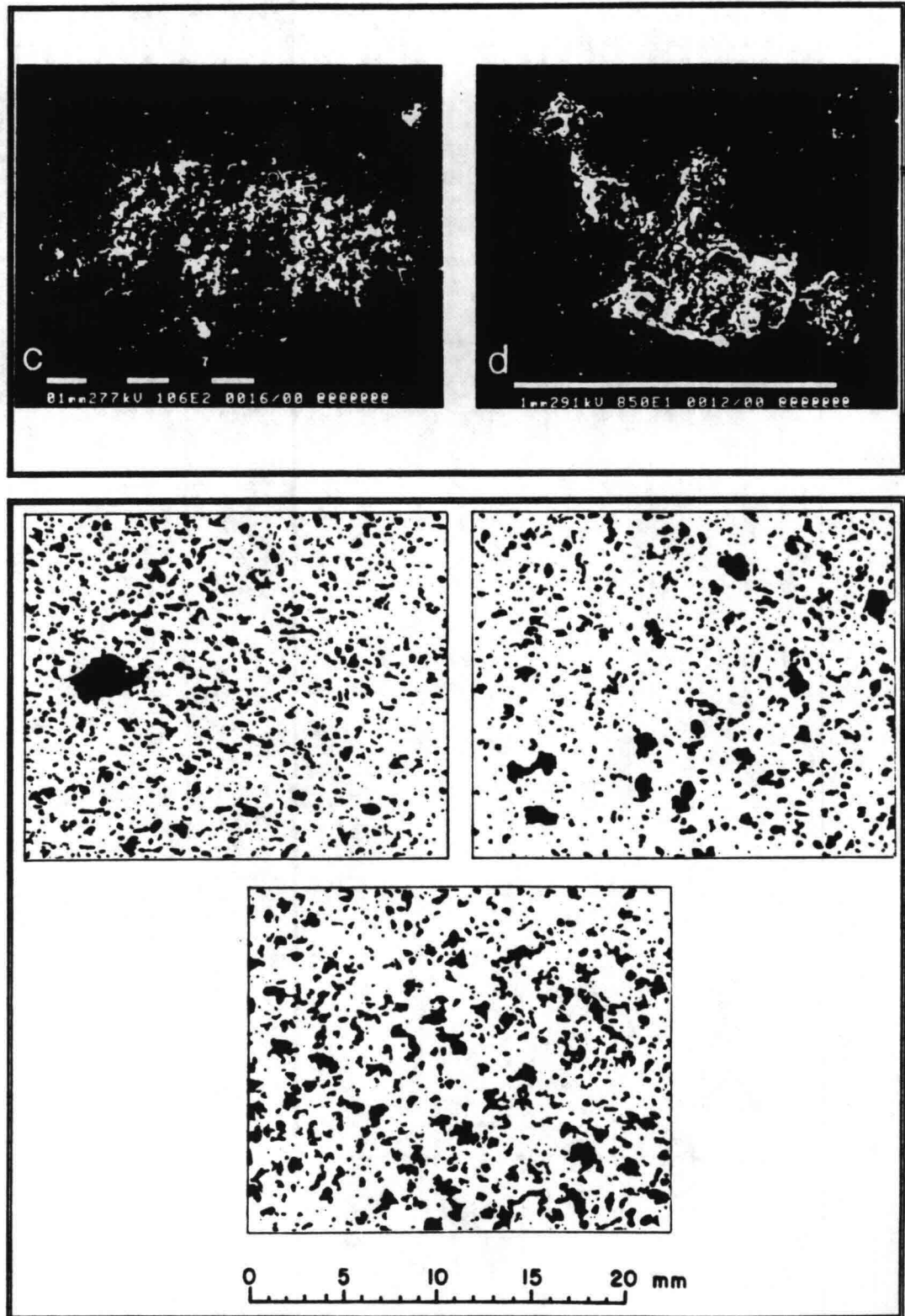
In het vervolg van deze studie zal onder slib in de waterkolom worden verstaan het materiaal met een diameter kleiner dan 2 cm, het zand en het levend plankton niet inbegrepen. Het levende plankton is via de fractie dood plankton in de definitie verdisconteerd. Dit in tegenstelling tot de definitie van Elgershuizen[1] die de fractie levend plankton wel tot het slib rekent. Dit levende plankton doet echter niet duidelijk mee aan erosie en sedimentatie processen zoals die in hoofdstuk 2 beschreven zullen worden.

Fig. 1 Classificatie volgens Bureau of Soils (USA)
voor anorganische deeltjes



Volgens de in deze nota te hanteren definitie kunnen slibdeeltjes in de waterkolom grote afmetingen hebben hetgeen in fig. 2 geïllustreerd wordt.

Fig. 2 Vlokken/aggregaten gefotografeerd in het Rijn en
het Ems estuarium [Eisma; 2]



Hst. 2 SLIBTRANSPORTEN

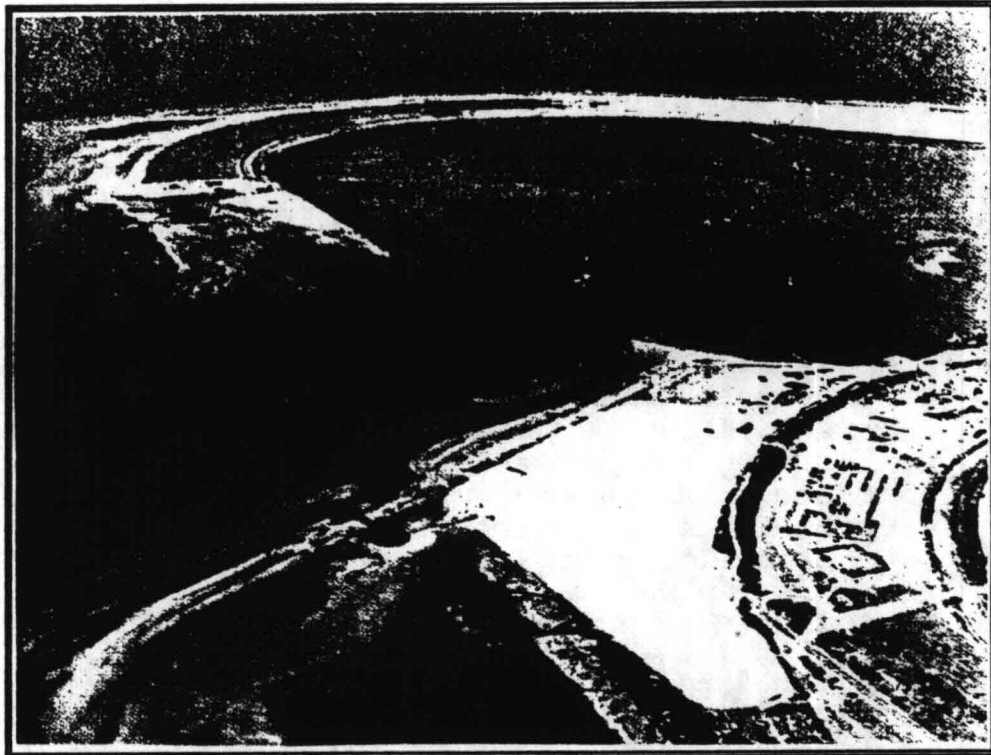
§ 2.1 Inleiding

Na vele jaren waarin het onderzoek naar sedimenttransport in Nederland zich voornamelijk richtte op het materiaal zand is er de laatste jaren steeds meer onderzoek verricht naar het transport van slib. De redenen hiertoe zijn de grote economische- en milieubelangen die in nauwe relatie staan met de slibtransporten. Voorbeelden zijn het op diepte houden van de Nieuwe Waterweg voor de scheepvaart en de problemen met de opslag van dit vervuilde slib. De verontreinigingsgraad van het in de slibklassen 2-4 ingedeelde slib is zo hoog dat dumpen in open zee niet verantwoord is. In Rotterdam wordt dit vervuilde slib in van open zee afgesloten bekkens opgeslagen. Hieronder volgt een indicatie van de hoeveelheden slib die per jaar uit het Rotterdamse havengebied gebag-
 gerd worden [Oosterbaan; 3].

	m ³ /jaar
onderhoudsbaggerwerk (slibklasse 1 - 4)	24.500.000
Slufterprojekt(opslag slibklasse 2 en 3)	10.000.000
Papagaaienbek(opslag slibklasse 4)	1.500.000

Gezien de hoge kosten van het onderhoud en de opslag is interesse vanuit de beheerdershoek voor de slibtransportproblematiek een logische zaak.

In dit hoofdstuk wordt een klein overzicht van verschillende slibtransportvormen gegeven (§ 2.2). De in de Zeeuwse Delta voorkomende slibtransportvorm zal vervolgens nader bekeken worden in § 2.3. Eendimensionale slibtransportmodellen komen in § 2.4 aan de orde. Hierin zal ook een tijdens deze studie ontwikkelde aanpassing besproken worden. Tot slot zal de waarde van deze modellen voor de beschrijving van het slibtransport in de Zeeuwse Delta geanalyseerd worden (§ 2.5).

Fig. 3 *Shifter in aanbouw*[3]

§ 2.2 Slibtransportvormen

De vorm waarin slibtransport plaatsvindt, hangt af van de hydraulische omstandigheden, de hoeveelheid slib die beschikbaar is voor transport en de eigenschappen van het slib. Meestal wordt slib getransporteerd in suspensie. Transport in een slibdeken over de bodem komt veel minder voor. Afhankelijk van de hydraulische omstandigheden en de slibeigenschappen bestaat er een maximum aan de hoeveelheid slib in suspensie. De hoeveelheid slib die beschikbaar is voor transport zal in suspensie zijn als deze hoeveelheid kleiner is dan het maximum aan de hoeveelheid slib in suspensie (in Nederland meestal voorkomend) en het materiaal in suspensie kan komen door opwerveling.

De grote verscheidenheid in geografische, geologische en klimatologische omstandigheden, welke de slibeigenschappen, de hoeveelheid te transporteren slib en de hydraulische omstandigheden bepalen, is de oorzaak van

de vele vormen waarin slibtransport plaatsvindt. Verschillen in hydraulische omstandigheden vindt men onder andere in en tussen:

rivieren
estuaria
kustzone

Hieronder zal een kleine opsomming en beschrijving van enkele transportvormen gegeven worden.

- suspensietransport in een stationaire, uniforme stroming waarin het slib continue in suspensie is en met het water mee verplaatst. Dit soort stromingen zijn vaak aanwezig in kanalen.
- suspensietransport in estuaria met afhankelijk van het getij resuspensie en sedimentatie. Het slib wordt niet continue met het water mee verplaatst.
- transport in een slibdeken waarbij de verplaatsings snelheid afhankelijk is van de aandrijvende krachten als de schuifspanning ten gevolge van stroming en/of de zwaartekracht ten gevolge van de bodemhelling.
- niet continu suspensietransport langs kusten in de vorm van modderbanken.

Gezien het doel van het onderzoeksproject zal dieper ingegaan worden op gesuspendeerd slibtransport in estuaria daar dit de belangrijkste transportvorm in de Zeeuwse Delta is. Enige aandacht zal aan slibtransport in rivieren geschonken worden, omdat rivieren meestal slib de estuaria in transporteren.

§ 2.3 Slibtransport in de Zeeuwse Delta

De slibconcentraties in de Zeeuwse Delta zijn gering, in de orde 100 mg/l. De verwachting is dat de transporten ook niet zo groot zijn. Een aanwijzing daarvoor is het feit dat er geen modderkusten aan de Noordzee zijn.

Daar het slib voornamelijk in suspensie getransporteerd wordt, zou het in principe bepaalt kunnen worden aan de hand van onderstaande transportformule en meetgegevens.

$$S = \sum_{T=1}^T \sum_{A=1}^A u c dA dT$$

{1}

S = totaal slibtransport per
getij [kg]
 A = opp. stroomdoorsnede [m²]
 u = stroomsnelheid [m/s]
 c = slibconcentratie [kg/m³]
 T = getijperiode [s]

eb vloed scharen

Voor (bijna)stationaire stromingen, zoals in vele benedenrivieren, is het slibtransport op deze wijze goed te bepalen. Het aantal metingen per tijdseenheid (1-10 maal per dag) en het aantal meetpunten in de dwarsdoorsnede zal niet groot hoeven te zijn voor het behalen van een acceptabele nauwkeurigheid. Voor estuaria zal er minstens een getijperiode doorgemeten moeten worden. De sneller veranderende stroomsnelheid in estuaria vereist meer metingen per tijdseenheid (1-5 maal per uur) en de grotere stroomdoorsneden in estuaria vereisen meer meetpunten waarin de stroomsnelheid en de slibconcentratie gemeten moeten worden om een zelfde nauwkeurigheid per tijdseenheid te behalen. Daarnaast is in estuaria het netto slibtransport per getij een sommatie over de getijcyclus van positieve en negatieve slibtransporten per tijdseenheid. De som van de positieve termen (bruto import in estuarium) is ongeveer evengroot als de som van de negatieve termen (bruto export uit estuarium). De grootte van het netto slibtransport is ongeveer $1/10$ van de bruto slibtransporten. De fout blijft van dezelfde orde als bij de bruto transporten. De relatieve fout zal hierdoor onacceptabel groot zijn terwijl de fouten in de transporten per tijdseenheid acceptabel zijn. Het resultaat voor een meting in de Oosterscheldemonnd is $(-1,3 \pm 2,0) \cdot 10^6$ kg/getij (= export) [Dronkers; 4]. Resumerend kan men zeggen dat gebruik van relatie {1} met meetgegevens voor de Zeeuwse Delta onvoldoende nauwkeurig resultaat oplevert.

Naast de grote onnauwkeurigheid van de hiervoor beschreven slibtransportbepaling geven de bepaling en de resultaten geen inzicht in de fysische processen die het slibtransport bepalen. Postma [6] en Dronkers [4] hebben hieraan onderzoek verricht en getracht de fysische processen die het slibtransport in de Hollandse Delta bepalen in model te brengen.

De modellen beschrijven het proces van sedimentatie van slib tijdens de kentering en de resuspensie na de kentering. De modellen gaan uit van een estuarium/bekken met kleine rivierafvoer tov het getijdeprisma/getijperiode ($< 1\%$). Enkele parameters waarbij in de modellen rekening wordt gehouden zijn:

- geuldiepte en doorstroomprofiel
- stroomsnelheden (rond kentering)
- tijdstippen, intervallen waarin erosie en sedimentatie plaatsvindt
- snelheid van sedimentatie en erosie

Een beschrijving van de modellen zal in de volgende paragraaf gegeven worden. De modellen zijn gebruikt voor de bepaling van slibtransporten in de Oosterschelde en de Waddenzee en geven bevredigende resultaten gezien hun

ondanks

hoe kan je dat zeggen?

om

waarop

eenvoud.

De raaimetingen[Dronkers; 4] wijzen in de richting van een geringe export van slib uit de Oosterschelde. Dit zou het gevolg zijn van de geringe aanvoer van de rivieren die uitmonden in de Oosterschelde. Importen behoren zelfs tot de mogelijkheden gezien de noordwaartse slibtransporten langs de frans/belgische kust in de Kanaalzone en het grote getijprisma. Deze noordwaartse transporten zijn het gevolg van de grote slibexporten uit de estuaria van de Noordfranse rivieren als de Seine en de Somme[zie Terwindt; 5]. Voor de zuidelijker gelegen Westerschelde is een geringe slibimport bepaald[Steyaert en v. Maldegem; 25]. De import, $0,8 \cdot 10^6$ kg/getij, is kleiner dan de export uit de Oosterschelde.

Westerschelde

§ 2.4 Slibtransportmodellen

De modellen die in deze paragraaf beschreven worden zijn van toepassing op estuaria/bekkens waarin geen of zeer geringe bovenafvoer aanwezig is en waarin veel verticale menging plaatsvindt. Dichtheidsstromen zullen in deze estuaria/bekkens nauwelijks voorkomen. Het transport van slib kan gekarakteriseerd worden als het sprongtype transport [zie Postma; 6]. Dit sprongkarakter wordt veroorzaakt door het sedimenteren en resuspenderen rond de kenteringen. Uitgangspunt bij deze 1D-modellen is een over de stroomdoorsnede uniforme stroomsnelheid in de hoofdstromingsrichting. Een verticale dunne laag water loodrecht op de hoofdstroming zal in deze modellen uniform verplaatsen in de hoofdstromingsrichting. Voor estuaria/bekkens zonder bovenafvoer is er in deze modellen geen netto verplaatsing per getijcyclus voor zo'n verticale laag, uitgaande van een constant getijdeprisma.

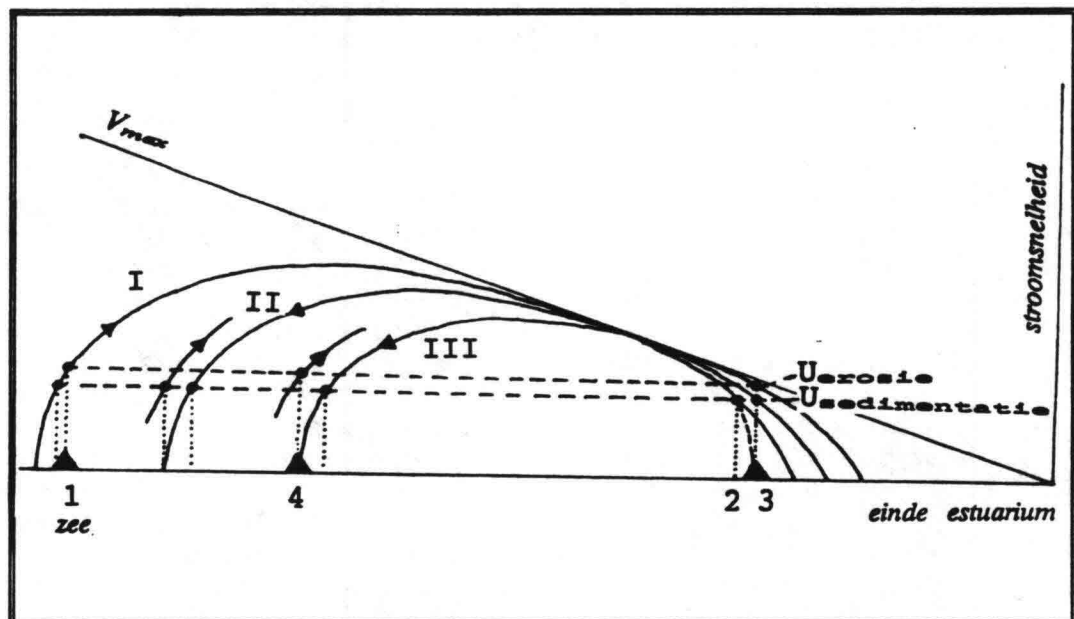
Aannamen welke betrekking hebben op sedimentatie en erosie zijn de volgende. Het slib sedimenteert, als de snelheid in de stroomdoorsnede kleiner is dan een waarde, welke in het vervolg de kritische sedimentatiesnelheid (U_d) wordt genoemd. Het slib erodeert, als de snelheid in de stroomdoorsnede groter is dan een waarde, welke in het vervolg de kritische erosiesnelheid (U_e) wordt genoemd. Sedimentatie vindt continue plaats wanneer de stroomsnelheid lager is dan de kritische sedimentatiesnelheid. Erosie van het gesedimenteerde materiaal rond kentering vindt momentaan plaats wanneer de stroomsnelheid toegenomen is tot de kritische erosiesnelheid.

In fig. 4 is de verplaatsing van één slibdeeltje tijdens een getijcyclus beschreven. De krommen beschrijven de verplaatsingen en de bijbehorende snelheden van

*Waarom?
i.h.o. Waaier
logaritmisch
snelheids-
verdeling
aangenomen*

drie verticale lagen tijdens eb en vloed in een bekken zonder bovenafvoer. Het slibdeeltje dat bij punt 1 op de bodem ligt, wordt door laag I gerodeerd en in suspensie genomen. Laag I bereikt ter plaatse van punt 1 de kritische erosiesnelheid. Het slibdeeltje wordt in laag I met de vloedstroom meegenomen tot punt 2. In punt 2 is de stroomsnelheid van laag I afgenomen tot de kritische sedimentatiesnelheid. Het deeltje zal uit de laag zakken en sedimenteren. Het uitzakken vergt enige tijd zodat het slibdeeltje ter plaatse van punt 3 sedimenteert. Het slibdeeltje wordt vervolgens door laag III geerodeerd en zal sedimenteren in punt 4. De netto verplaatsing per getijcyclus is het estuarium inwaarts voor deze zeer eenvoudige simulatie. De verplaatsing is het gevolg van ongelijke sedimentatie- en erosiesnelheden in combinatie met de valtijd en de plaatsafhankelijke horizontale getijkrommen. De afgelegde weg van het slibdeeltje is 1-3-4.

Fig. 4 Verplaatsing slibdeeltje (1-4) in het waterbekken zonder bovenafvoer per getijcyclus[6].



§ 2.4.1. Sprongtype transport volgens Postma

Bij de modellering van slibtransport in estuaria en getijdenbekkens heeft Postma een aantal aannamen gedaan waarvan een aantal in de vorige paragraaf al ter sprake kwamen. Postma ging er onder andere vanuit dat de

X bovenafvoer $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ was. Er ^{werd} zal eveneens uitgegaan worden van een sinusvormige horizontaal getij en een uniforme dwarsdoorsnede. ^{primitief en herinnert}

De snelheden in het bekken worden bepaald met behulp van de kombergingsbeschouwing. Er wordt dus uitgegaan van een horizontale waterspiegel in het bekken en er wordt geen rekening gehouden met de traagheid en de weerstand. Het horizontale getij neemt landinwaarts af, maar blijft sinusvormig terwijl het vertikale getij uniform over het hele bekken is. Uitgaande van een uniforme snelheid voor elke stroomdoorsnede is de waterbeweging in het bekken nu beschreven. Voor een niet sinusvormig getij kan op deze manier eveneens de waterbeweging beschreven worden.

Indien men uitgaat van een bepaalde hoeveelheid te transporteren slib die sedimenteert als de snelheid onder de kritische sedimentatiesnelheid komt en in suspensie is als de snelheid boven de kritische erosiesnelheid ligt, en er geldt kritische erosiesnelheid $>$ kritische sedimentatiesnelheid (Oosterscheldegeulen $U_{\text{erosie}} \approx 0,5 \text{ m/s}$; $U_{\text{sedimentatie}} \approx 0,2 \text{ m/s}$ [Dronkers; 4]) dan betekent dit een bekkeninwaarts transport (zie fig. 4)

Voor kleine bekken met een eenvoudig geulenstelsel zullen deze modelbeschrijvingen voldoende zijn. Voor complexere systemen met geulstelsels, niet sinusvormig getij, grote veranderende getijkrommen in het bekken als gevolg van traagheid en weerstand is deze beschrijving onvoldoende. In het hierna te bespreken model zijn een aantal verbeteringen aangebracht in de beschrijving van het sprongtype transport [Dronkers; 4].

§ 2.4.2 $\mu\lambda$ model

Het $\mu\lambda$ model heeft als belangrijkste uitgangspunt het sprongtype transport. Er wordt in tegenstelling tot het model van Postma ook met de volgende aspecten rekening gehouden:

- de tijds- en plaatsafhankelijkheid van het horizontale en het vertikale getij
- de hoeveelheid rond de kentering te

sedimenteren slib(μ) $\rightarrow$

De erosiehoeveelheden kunnen groter/kleiner zijn dan de sedimentatiehoeveelheden(μ) voor een vertikale laag. $\mu^{+(-)}$ is de hoeveelheid rond HW(LW)-kentering gesedimenteerd slib. $\lambda^{+(-)}$ is de horizontale afstand tussen de punten waar het slib uit de vertikale laag sedimenteert en waar het slib door dezelfde laag geërodeerd wordt tijdens HW(LW)-kentering. Het transport door een raai welke ligt op het midden van het afgelegde traject van een vertikale laag

tijdens vloed- of ebstroom wordt door Dronkers beschreven volgens:

$$S = \mu^+ \lambda^+ - \mu^- \lambda^- \quad \{2\}$$

$S = \text{totaal transport [kg/getij]}$
 $\mu \quad [\text{kg/m}]$
 $\lambda \quad [\text{m/getij}]$

Alle variabelen behoren bij dezelfde laag. Elke laag heeft zijn eigen waarden afhankelijk van de plaats van de laag in de lengterichting van het bekken.

Van groot belang is het horizontale getij waarmee de verplaatsingen(λ) van het slib ten opzichte van het water per getij (netto waterverplaatsing per getij = 0,0 m) en het interval waarin sedimentatie plaatsvindt bepaald worden. Dit gebeurt aan de hand van de tijdstippen rond HW(+) en LW(-)-kentering waarvoor geldt:

- snelheid is gelijk aan de kritische sedimentatiesnelheid $t_{a^+} \quad t_{a^-}$
- snelheid is gelijk aan de kritische erosiesnelheid $t_{e^+} \quad t_{e^-}$ (zie fig. 5)

Met behulp van deze waarden wordt de verplaatsing van het slib ten opzichte van het water en dus ten opzichte van een vast punt bepaald volgens

$$\lambda = \frac{1}{2} U_c \Delta t_c \quad \{3\}$$

$U_c \quad [\text{m/s}]$
 $\Delta t_c \quad [\text{s/getij}]$

Aanamen bij deze bepaling zijn:

- De sedimentatiehoeveelheden(μ) sedimenteren op de plaats waar de meevoerende verticale laag een stroomsnelheid gelijk aan nul bereikt
- De snelheidstoename van de laag van nul tot de kritische erosiesnelheid is lineair

Het sedimentatieinterval(Δt_a) is het tijdsinterval waarin de snelheid kleiner is dan de kritische sedimentatiesnelheid. De grootte van dit interval kan rechtsreeks uit fig. 5 afgeleid worden.

De sedimentatiehoeveelheden zijn in het model afhankelijk van:

- de grootte van het sedimentatieinterval
- de gemiddelde geuldiepte en het doorstroomprofiel
- de maximale hoeveelheid slib in suspensie
- de valsnelheid van slib

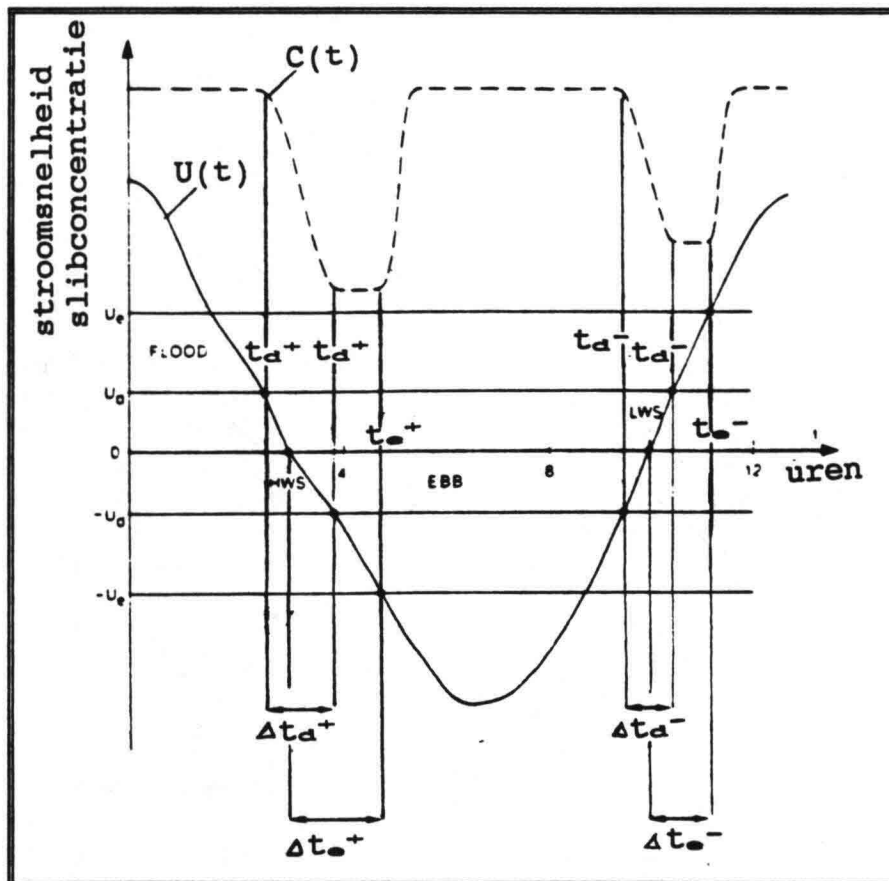
Deze bepalen $\mu^+ \quad \mu^-$ in het model volgens:

$$\mu = C_{max} A_s (1 - \exp(-w \Delta t_d / h)) \quad \{4\}$$

μ = hoeveelheid te sedimenteren slib [kg/getij]
 C_{max} = maximale gemiddelde concentratie over dwarsdoorsnede [kg/m³]
 A_s = dwarsdoorsnede [m²]
 w = valsnelheid * $C_{bodem} / C_{vertikaalgem}$
 Δt_d = sedimentatieinterval [s/getij]
 h = diepte [m]

De e-macht is in het model gebruikt om afname van sedimentatie/tijdseenheid te beschrijven. Deze afname is het gevolg van de concentratieafname.

Fig. 5 Karakteristieke snelheden en tijdstippen in het horizontaal getij volgens μ model[4]



de orde 10 verschillen
van wel de factor 100
kunnen betekenen.

Een onzekere faktor in het model is de valsnelheid voor de bepaling van de sedimentatiehoeveelheden. Uit verschillende onderzoeksresultaten volgen verschillen in de grootte van de valsnelheid van minstens een orde 10 (zie ook § 3.1). Voor de transporten betekent dit eveneens verschillen in de grootte van een orde 10 voor de Hollandse Delta. Dit wordt verduidelijkt in tabel 2 waar de bezinkingsfracties (bf) van het totaal per verticale laag gesuspendeerde slib bepaald is volgens (zie ook {4}):

$$bf = 1 - \exp(-w_s \Delta t_d / h) \quad \{5\}$$

Voor de gemiddelde geuldiepte is 20 m aangenomen en voor het sedimentatieinterval 30 minuten. De valsnelheid (w_s) is gegeven in mm/s. De verhouding tussen de gemiddelde concentratie en de concentratie boven de bodem wordt op 3 gesteld.

Tabel 2 Valsnelheden met bijbehorende bezinkingsfracties volgens {5} met $h=20$ m en $t_d=30$ min. w_s in mm/s

ws_1	ws_2	bf_1	bf_2
0,1	1,0	0,027	0,24
0,3	3,0	0,078	0,56

De verhoudingen in de bezinkingsfracties zijn bijna gelijk aan de verhoudingen in de valsnelheden. Uit {4} volgt dat bf recht evenredig is met μ . Dit beide combinerend met {2} resulteert in een berekend slibtransport dat bijna recht evenredig is met de valsnelheid volgens het $\mu\lambda$ model. De grote onduidelijkheid in de grootte van de valsnelheid en de verwachting dat het slibtransport in een bekken in de Oosterschelde bijna recht evenredig is met de valsnelheid zoals in het $\mu\lambda$ -model zijn de aanleiding voor het in deze nota gepresenteerde experimentele onderzoek naar het proces van bezinken van slib in de waterkolom (zie Hst. 3)

Zoals eerder vermeldt is het $\mu\lambda$ -model een beschrijving van slibtransport in bekkens met weinig of geen bovenafvoer en veel verticale menging. Dit heeft een aantal voordelen: -geen lagenstromen ten gevolge van de horizontale saliniteitsgradienten -geen troebelheidsmaximum dat ontstaat door zoetwaterbovenafvoer (zie fig. 7)

Het snelheids- en saliniteitsverloop in de vertikaal komt

W_s fungeert als
parameters

alleen is dit
project!
en daarom
is ook het
volgende dubbius

dan goed overeen met het verloop in de vertikaal zoals geïllustreerd in fig. 6.

Fig. 6 Saliniteits- en snelheidsverdeling in goed vertikaal gemengde estuaria met bovenafvoer.

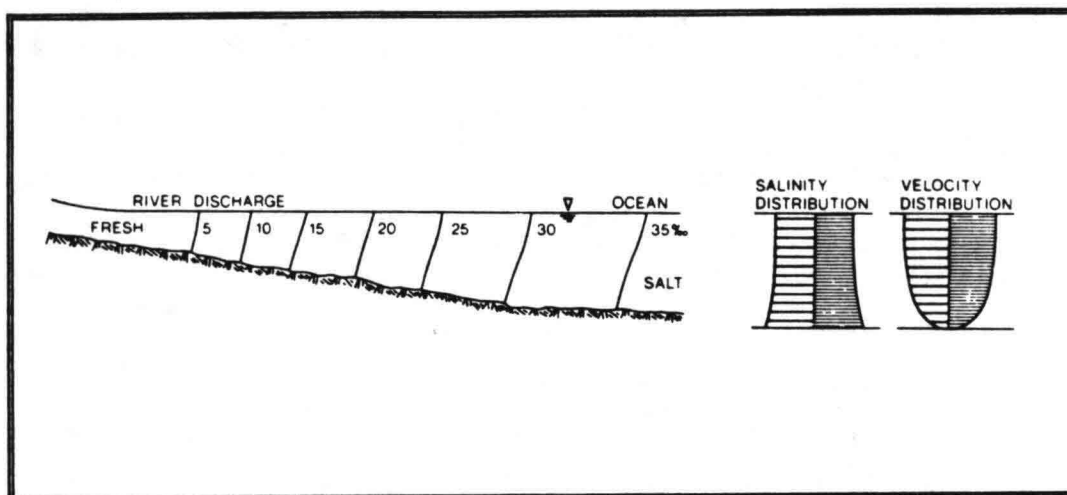
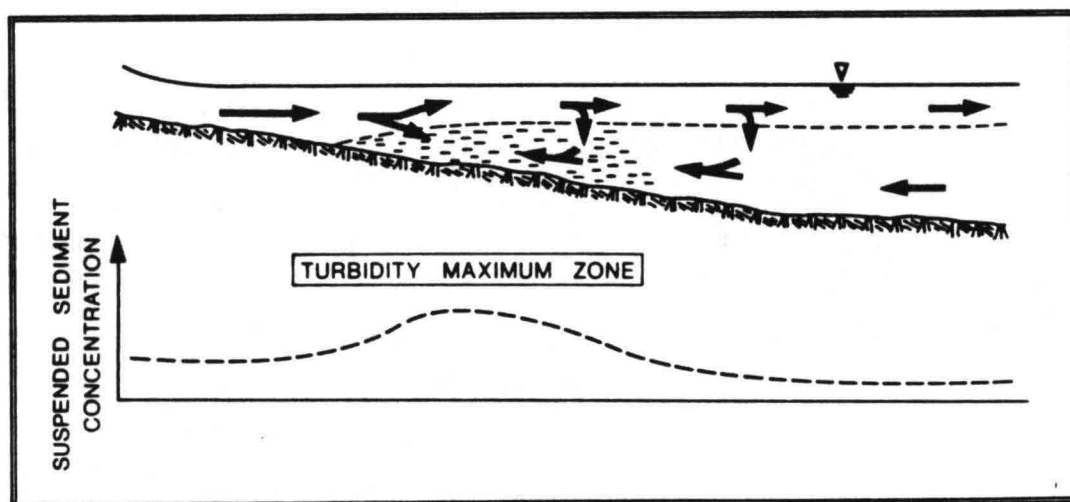


Fig. 7 Troebelheidsmaximum in estuaria met bovenafvoer en met lagenstroming



In estuaria met bovenafvoer komen normaal troebelheidsmaxima voor ter hoogte van saliniteitsgehalten van 5‰. . Een troebelheidsmaximum is een plaatselijke verhoging van de slibconcentratie. Deze ontstaat door de aanvoer van slib door de rivier en vanuit zee. De verticale

circulaties in combinatie met het saliniteitsgehalte ter plaatse van het troebelheidsmaximum scheppen goede omstandigheden voor het optreden van flocculatieprocessen. Hierdoor zal het aangevoerde slib ter plaatse van het troebelheidsmaximum kunnen sedimenteren. Deze verschijnselen worden niet beschreven door het $\mu\lambda$ -model.

Indien geen verticale menging optreedt is het snelheidsverloop als in fig. 7. Dit snelheidsverloop in de vertikaal is niet te combineren met een uniforme snelheid in de stroomdoorsnede zoals in het $\mu\lambda$ -model gebruikt wordt om het slibtransport te beschrijven. Voor goed vertikaal gemengde estuaria met bovenafvoer kan het $\mu\lambda$ model wel gebruikt worden buiten het troebelheidsmaximum indien het enigzins is aangepast. Dit is in het gebied met saliniteitsgehalten $<3\%$ en $>10\%$. In deze studie is hiervoor een aanpassing ontwikkeld. Deze aanpassing is nodig omdat $\lambda^{+(-)}$ ten gevolge van de bovenafvoer niet meer de verplaatsingen ten opzichte van een vast punt zijn. De verplaatsingskrommen van de verticale lagen als in fig. 4 verplaatsen zich bij boven afvoer namelijk in zeewaartse richting. Het slibtransport bij bovenafvoer kan bepaald worden volgens:

$$S = \mu^{+}\lambda^{+} - \mu^{-}\lambda^{-} - \mu^0\lambda^0 \quad \{6\}$$

waarin

$$\lambda^0 = (Q_{rivier} T_{getij}) / A_s$$

$$\mu^0 = C_{gem} A_s$$

$$C_{gem} = \text{getijgemiddelde concentratie dwarsdoorsnede [kg/m}^3\text{]}$$

$$T_{getij} = \text{getijperiode [s]}$$

λ^0 is de verplaatsing van een verticale laag per getijcyclus die het gevolg is van de bovenafvoer. μ^0 is de hoeveelheid slib die gemiddeld aanwezig is per getijcyclus in een verticale laag met een dikte van 1 m.

$\mu^0\lambda^0$ is een exportterm en de grootte varieert in het estuarium, evenredig met C_{gem} , omdat geldt

$$\mu^0\lambda^0 = \text{constante} * C_{gem} \text{ waarin constante} = Q_{rivier} * T_{getij}$$

De 'constante' is echter afhankelijk van de bovenafvoer maar bij gegeven bovenafvoer voor het hele esuarium gelijk. De grootte van deze transportterm neemt in het algemeen in zeewaartse richting af als we het troebelheidsmaximum buiten beschouwing laten (zie fig. 7). De verhouding tussen $(\mu^{+}\lambda^{+} - \mu^{-}\lambda^{-})$ en $\mu^0\lambda^0$ zal tot nul naderen daar waar de getijinvloed gereduceerd is tot nul. Daar geldt:

$$S = \mu \lambda^0 = Q_{\text{rivier}} T_{\text{getij}} C_{\text{gem}} \quad [\text{kg/getij}] \quad \{7\}$$

Dit moet gelijk zijn aan het transport bepaalt aan de hand van formule {1} op pagina 13.

$$S = \sum \sum_{uc} \frac{TA}{dAdT} = \sum C_{\text{gem}} \sum_u \frac{T}{dAdT} = \sum C_{\text{gem}} Q_{\text{rivier}} \frac{T}{dT} =$$

$$T_{\text{getij}} Q_{\text{rivier}} C_{\text{gem}}$$

§ 2.5 Conclusies

- * Het bepalen van het netto slibtransport in estuaria door middel van een raaimeting geeft een grote spreiding. Voor benedenrivieren is deze methode beter geschikt.

X

- * ^{Onderzoek} Gezien de eenvoud van het $\mu\lambda$ -model is dit model redelijk geschikt voor slibtransportbepaling in de geulen van de Zeeuwse Delta [Dronkers; 4]. Het model houdt echter geen rekening met:

- de consolidatie van slib op de geulbodem waardoor materiaal onttrokken wordt aan het systeem
- de processen die zich afspelen ter plaatse van het troebelheidsmaximum
- de slibuitwisseling tussen de geulen en de platen, slikken en schorren

- * Op deze platen, slikken en schorren vindt seizoensafhankelijke sedimentatie/erosie plaats. Met rustig weer in combinatie met hoogwater zal er slib op de platen, slikken en schorren sedimenteren. Er verdwijnt op deze wijze slib uit het transportsysteem, de geulen. Tijdens stormen en hoogwater kan dit materiaal opgewerveld worden op de platen, slikken en schorren. Het stroomt dan weer de geulen in. Indien deze sedimentatie- en erosiehoeveelheden per jaar aan elkaar gelijk zouden zijn, betekent dit een vertraging in het transport voor deze hoeveelheden. Waarschijnlijker is een jaarlijkse erosie of sedimentatie ofwel een netto onttrekking/toevoeging van/aan het transportsysteem op jaarbasis.

- * De valsnelheid is bijna recht evenredig met het slibtransport in het $\mu\lambda$ -model. Over de grootte van de valsnelheid welke in het model gesubstitueerd moet worden is nog grote onduidelijkheid.

Wat doet die e -mocht dan eigenlijk?

voorkomt dat
meer bezinkt (in model)
dan aanwezig is en
geeft Athame bezinking

Hst. 3 VALSNELHEID SLIB

§ 3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is uiteengezet dat het sedimentatieproces rond kentering een essentiële faktor in het longitudinale transportproces van slib in estuaria is, indien de getijinvloed groot is en het estuarium goed vertikaal gemengd is. Indien de mixing parameter α kleiner dan 0,1 is, mag verondersteld worden dat het estuarium goed gemengd is.

$$\alpha = Q_{river} T_{getij} / \Omega < 0,1 \text{ [Smith;7] \{8\}}$$

α = mixing parameter

Ω = getijdeprisma m^3

Ondanks de importantie van het sedimentatieproces in vele estuaria bestaan er nog veel onduidelijkheden over de snelheid van de sedimentatie. Een belangrijke oorzaak hiervan is de onduidelijkheid over de valsnelheid van het slib in stilstaand water. In tabel 3 zijn een aantal valsnelheden gegeven, welke zijn bepaald in verschillende estuaria volgens verschillende methoden door verschillende onderzoekers.

Tabel 3 *Vergelijking onderzoeksresultaten valsnelheids
onderzoek[Amos & Mosher;8] bij verschillende
slibconcentraties*

ws m/s	c mg/l	onderzoeker	beschrijving
$6,6 \cdot 10^{-6}$	100-1000	Krone(1962)	tank experiment
$2-6 \cdot 10^{-5}$	1000	Migniot(1968)	valbuis(zeewater)
$2,5 \cdot 10^{-4}$	300	Owen(1970)	bottom withdrawal (zeewater)
$1,8 \cdot 10^{-3}$	300	Odd&Owens(1972)	Thames estuarium insitu valbuis
$1,5 \cdot 10^{-4}$	300	HRS Wallingford (1980)	Schelde estuarium valbuis
$1,0 \cdot 10^{-4}$	300	HRS Wallingford (1981)	Bristol Channel valbuis
$3-6 \cdot 10^{-3}$	300	Cole&Miles (1983)	Haven v Brisbane Conway estuarium
$2,1 \cdot 10^{-3}$	100-500	Amos&Mosher (1985)	Windsor Causeway insitu mas.balans
$2,7 \cdot 10^{-4}$	470-930	' '	bottom withdrawal

Gezien de grote verschillen en de importantie voor

het transportmodel[Dronkers; 4] is in het kader van dit afstudeerproject een kwantitatieve studie verricht naar de valsnelheden van slib in situ in de Westerschelde.

De valsnelheid in situ is op drie manieren bepaald. Aan de hand van de twee verschillende massabalansen in de waterkolom en met behulp van een valbuis/monsternameapparaat. De resultaten van deze metingen worden in § 3.5, § 3.6 en § 3.7 besproken. De in die paragrafen bepaalde valsnelheden zijn karakteristiek voor de bijbehorende deeltjesgrootteverdeling. In § 3.2 en § 3.3 zal echter eerst worden ingegaan op de valsnelheid van één enkel slibdeeltje. Tevens zullen de processen zoals flocculatie, die de valsnelheid van een deeltje beïnvloeden, beschreven worden. In § 3.4 wordt met behulp van deze kennis de relatie tussen de deeltjesgrootte- en de valsnelheidsverdeling geanalyseerd en wordt de relatie tussen de te bepalen valsnelheden (§ 3.5-3.7) en de valsnelheidsverdeling bepaald.

§ 3.2 Valsnelheid volgens Stokes

Stokes heeft in het verleden al een relatie gevonden tussen de valsnelheid van een deeltje en een aantal karakteristieken van het water en het deeltje. Voor deeltjes met Reynoldsgetallen kleiner dan 0,5 is de weerstandscoefficient van het deeltje onafhankelijk van de vorm van het deeltje en mag de wet van Stokes gebruikt worden. Voor deeltjes met grotere Reynoldsgetallen voldoet de relatie indien de deeltjes rond zijn. De enige belangrijke vormfactor is dan de equivalente boldiameter. De definitie van het Reynoldsgetal is:

$$Re = ws D/\nu$$

$$\begin{aligned} ws &= \text{valsnelheid} \quad \{9\} \quad [m/s] \\ D &= \text{equivalente boldiameter} \quad [m] \\ \nu &= \text{kinematische viscositeit} \quad [m^2/s] \quad (\approx 1.0 \cdot 10^{-6}) \end{aligned}$$

De wet van Stokes is:

$$ws = (\Delta \rho / 18 \nu) D^2$$

$$\begin{aligned} \Delta &= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w \quad \{10\} \\ g &= 9.81 \quad [m/s^2] \\ \rho_w &= \text{dichtheid water} [kg/m^3] \\ \rho_s &= \text{dichtheid slib} [kg/m^3] \end{aligned}$$

Substitutie van {10} in {9} en gelijkstelling van Re aan 0,5 geeft voor een zanddeeltje met een dichtheid

van 2650 kg/m³ een equivalente boldiameter van 80 µm. Dit betekent volgens Stokes dat indien de equivalente boldiameter kleiner is dan 80 µm de weerstandscoefficient van een zanddeeltje onafhankelijk is van de vorm. Gezien de vorm van zand zal Stokes ook voor grotere equivalente boldiameters goed voldoen. In het algemeen wordt de wet van Stokes gebruikt tot zand van 200 µm [Schoemaker;9]

Toepassing van de wet van Stokes op een slibdeeltje is minder eenvoudig omdat de dichtheid van een slibdeeltje in het algemeen afneemt bij een toenemende equivalente boldiameter. Hieronder volgt een overzicht met relaties tussen de valsnelheid en de equivalente boldiameter van een slibdeeltje/vlok volgens verschillende onderzoekers.

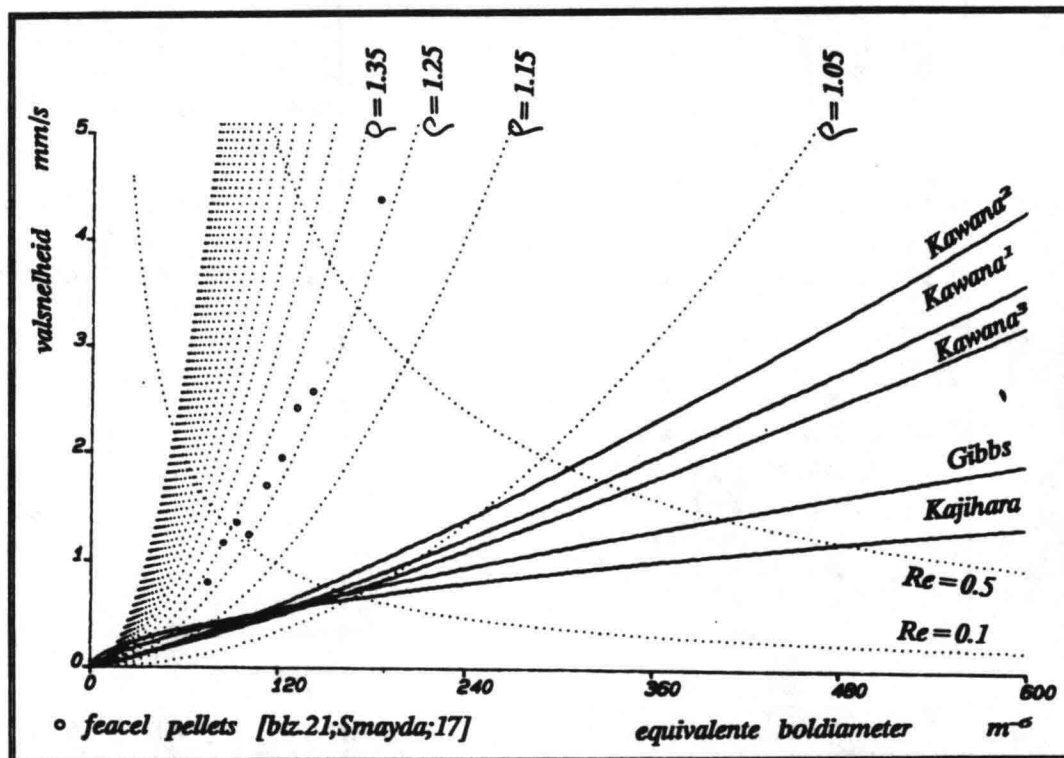
Tabel 4 Relaties tussen de valsnelheid en equivalente boldiameter van slibdeeltjes

ws = 0,67*D ^{0,57}	[Kajihara;10]	
ws = 1,73*D ^{0,78}	[Gibbs ;11]	
ws = 10,63*D ^{1,20}	}	[Kawana&Tanimoto;12]
ws = 14,17*D ^{1,24}		
ws = 8,66*D ^{1,17}		

Substitutie van de relaties uit tabel 4 in {9} en gelijkstelling van Re aan 0,5 geeft als resultaat dat de wet van Stokes geldig is voor slibdeeltjes/vlokken met equivalente diameters kleiner dan 300-400 µm (zie fig. 8). De oorzaak van de afnemende dichtheid bij een toenemende equivalente diameter zal in de volgende paragraaf aan de orde komen.

In figuur 8 zijn de relaties uit tabel 4 grafisch uitgezet. Tevens zijn de lijnen van gelijke deeltje/vlok dichtheid en van gelijke Reynoldsgetallen in de grafiek gezet. De valsnelheden van feacel pellets, de excretieprodukten van zooplankton, zijn eveneens uitgezet tegen de equivalente boldiameter. Voor een slibdeeltje/vlok (uitgezonderd feacel pellets) is te zien dat bij toename van de equivalente boldiameter de valsnelheid toeneemt terwijl de dichtheid van het deeltje/vlok juist afneemt. Bij de feacal pellets blijft de dichtheid ondanks de toenemende equivalente boldiameter tussen de 1250-1350 kg/m³ liggen. De valsnelheden van de feacel pellets zijn in het algemeen ook groter dan bij slibdeeltjes/vlokken met eenzelfde equivalente diameter. De rol van de feacal pellets in het sedimentatieproces zal in de volgende paragraaf besproken worden.

Fig. 8 Valsnelheid slibdeeltjes/vlokken afhankelijk van equivalente boldiameter volgens tabel 4.



§ 3.3 Flocculatie

Onder flocculatie wordt verstaan het samengaan van twee of meerdere slibdeeltjes/vlokken tot één nieuw slibdeeltje/vlok. Dit samengaan kan op meerdere manieren gebeuren waarbij een verdeling valt te maken naar de plaats van het samengaan:

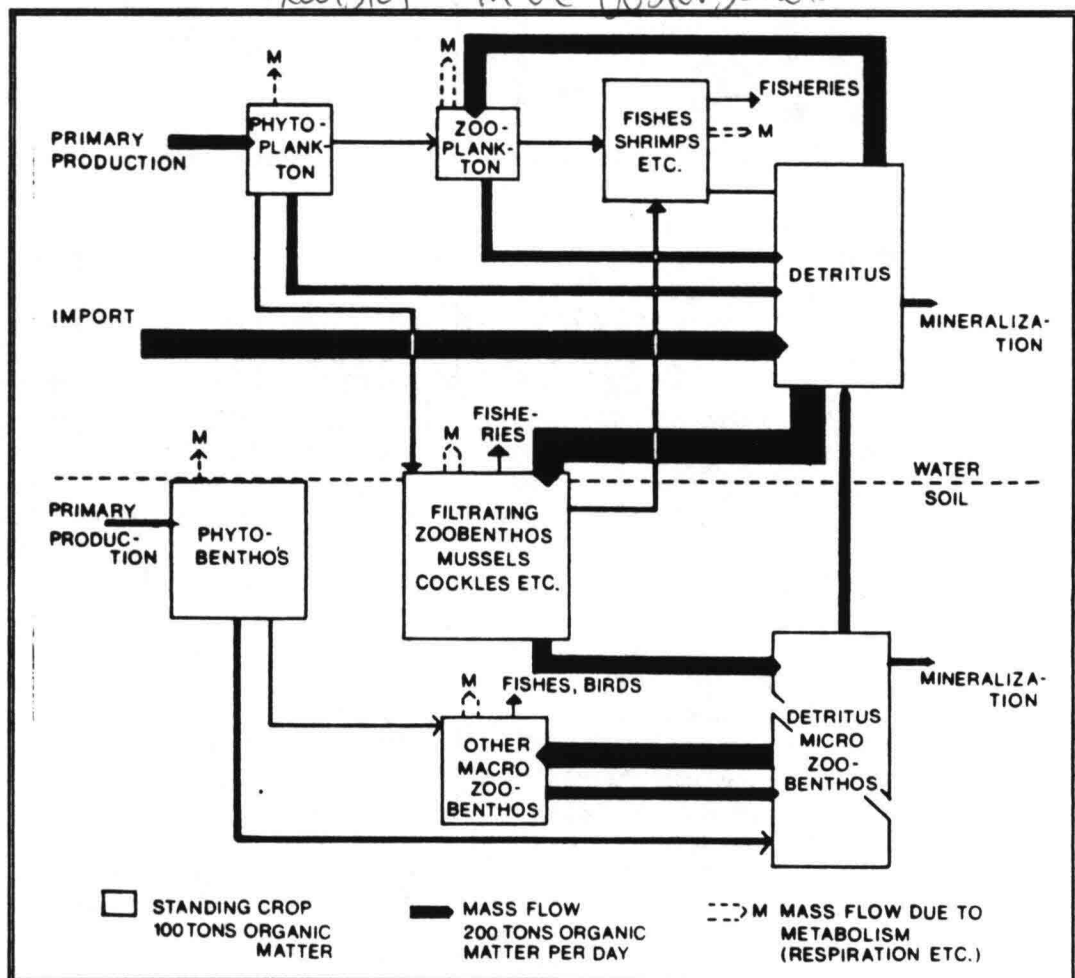
- in het water
- in organismen

Dat op beide plaatsen flocculatie plaatsvindt staat buiten discussie. Over de importantie hiervan ten opzichte van het totale flocculatieproces bestaan verschillende meningen. Puls[13] vindt dat de rol van samengaan in het water veruit het belangrijkste was, daarentegen vonden Schubel&Kana[14] dat het samengaan in organismen het belangrijkste was.

§ 3.3.1 Flocculatie in organismen

Biologische activiteit kan flocculatie tot gevolg hebben indien het gaat om suspensie-eters. Gedacht moet worden aan zooplankton [Tackx et al; 15] en mosselen [Stortelder; 16]. De excretieprodukten van deze organismen zijn compacte pakketjes, faecal pellets genoemd, die bestaan uit samengebonden slibdeeltjes die grote valsnelheden kunnen bereiken (zie fig. 8 en [Smayda; 17]). In fig. 9 zijn de organische massastromen te zien. Deze organische massastromen zijn recht evenredig met de slibmassastromen, afhankelijk van de fractie organisch materiaal in het slib. In de Oosterschelde is deze fractie ongeveer 0,06. De organische massastromen naar het zooplankton en de mosselen zijn in fig. 9 relatief groot hetgeen dus ook voor de slibmassastromen geldt.

Fig. 9 organische kringloop [Bigelow; 28]



De invloed van suspensie-eters op het flocculatiepro-

ces is afhankelijk van hun aanwezigheid en zal seizoensafhankelijk zijn. In combinatie met de viscositeitsverschillen zou dit voor de Oosterschelde de lagere slibconcentraties in het zomerseizoen (factor 2) kunnen verklaren. De viscositeit is in het zomerseizoen lager als gevolg van een hogere watertemperatuur. Een lagere viscositeit betekent een grotere valsnelheid^{10}. Voor de Oosterschelde zou de slibconcentratie ongeveer met een factor 1,5 afnemen ten gevolge van de lagere viscositeit. De resterende afname zou het gevolg kunnen zijn van de grotere dichtheid van suspensie-eters tijdens het zomerseizoen ten opzichte van het winterseizoen.

§ 3.3.2 Flocculatie in de waterkolom

De flocculatie in de waterkolom is afhankelijk van twee factoren:

- de tref/botskans van slibdeeltjes
- de onderlinge krachten

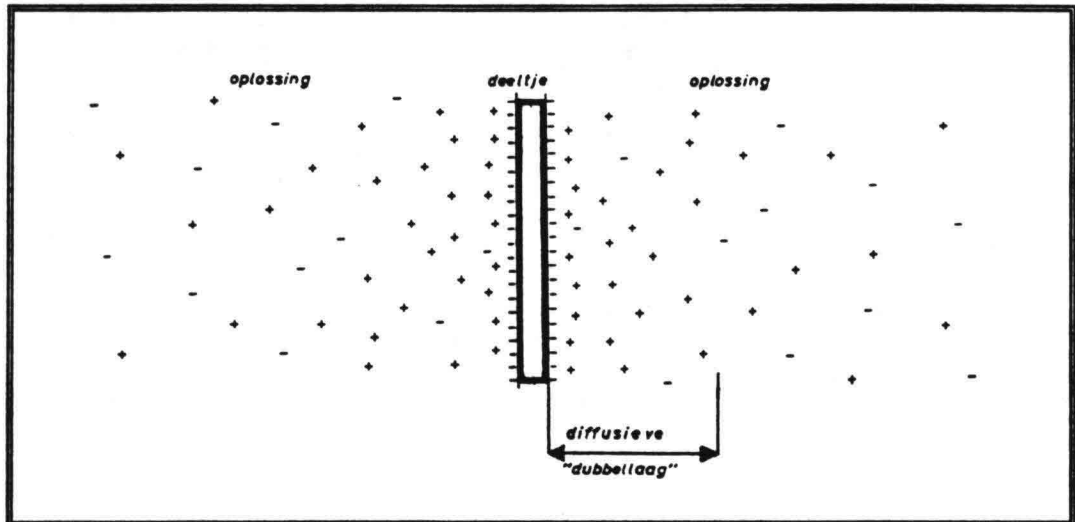
De botskans wordt bepaald door een aantal processen:

- Brownse beweging (1)
- turbulentie (2)
- differential settling (3)

Voor estuariene systemen kan de invloed van de Brownse beweging in het algemeen verwaarloosd worden ten opzichte van de turbulentie en differential settling. De Brownse beweging is belangrijk voor de vorming van vlokken met een diameter kleiner dan 10 μm .

Of de deeltjes na een botsing als gevolg van turbulentie(2) en/of differential settling(3) een nieuw deeltje vormen is afhankelijk van de aantrekkende en afstotende krachten. Voor estuaria kunnen de electrostatische aantrekkingskrachten belangrijke krachten zijn. Een slibdeeltje heeft normaal een negatieve lading. De negatieve slibdeeltjes worden omringd door een laag positieve zoutionen welke de dubbellaag genoemd wordt (zie fig. 10). De dikte van de dubbellaag neemt af bij hogere saliniteit omdat het aantal positieve ionen in de oplossing groter wordt. De aantrekkende krachten zullen door deze diktevermindering groter worden dan de afstotende krachten. Een botsing tussen deeltjes zal door de diktevermindering bij een hogere saliniteit vaker tot vorming van een nieuw deeltje leiden. Dit verschijnsel kan uitvlokking van slib veroorzaken bij de instroming van zoet in zout water. De flocculatie kan ook in het zoete rivierwater plaatsvinden. Hierbij spelen micro-biologische factoren een belangrijke rol [Uiterwijk-Winkel; 29]

Fig. 10 De dubbellaag rond een slibdeeltje ten gevolge van de positieve zoutionen [v Leussen; 21]



Het samengaan van meerdere deeltjes tot één nieuw deeltje volgens de hierboven beschreven principes gebeurt onder insluiting van water. De dichtheid van het nieuwe deeltje/vlok zal daarom lager zijn. Er geldt voor de dichtheid van het nieuwe deeltje/vlok

$$\rho_{vlok} = (\rho_s V_s + \rho_w V_w) / V_{vlok}$$

{11}
 V = volume $[m^3]$
 ρ = dichtheid $[kg/m^3]$
 s is primair deeltje
 w is water

De twee processen die in estuaria de botskans bepalen vinden beide tegelijk plaats. De invloed van elk proces is getijafhankelijk. Turbulentie heeft als uitgangspunt snelheidsverschillen van het water waarin het slib wordt meegevoerd. Botsingen van waterpakketjes leiden tot botsingen van slibdeeltjes wat tot flocculatie kan leiden. Door de snelheidsverschillen zijn er in het water ook schuifspanningen. Deze werken onder andere op de slibdeeltjes/vlokken waardoor die vlokken afgebroken kunnen worden. De turbulentie kan dus ook een beperking van de vlogroei zijn. Differential settling van deeltjes toev water kan tot gevolg hebben dat deeltjes/vlokken met een hoge valsnelheid op deeltjes/vlokken met een lage valsnelheid botsen.

De rol van differential settling is relatief het grootst rond de kentering omdat er dan weinig turbulentie en dus ook weinig vlokafbraak is. De mate waarin valsnelheidsverschillen zullen optreden, welke belangrijk zijn voor het

differential settling proces, is afhankelijk van de vlokaafbraak/opbouw en dus de turbulentie.

Dat de botskans van de concentratie afhangt, is aannemelijk. Meer deeltjes betekent meer botsingen per deeltje bij onderling gelijke omstandigheden. Dit betekent meer kans op flocculatie en een grotere valsnelheid. Voor gevonden relaties in monsters met deeltjesgrootteverdelingen zie tabel 5.

Tabel 5 Overzicht van de relaties tussen de concentratie en de mediane valsnelheid

$WS_{50} = 2,655 \cdot 10^{-7} c^{2,55}$	Puls ;13
$WS_{50} = 1,341 \cdot 10^{-4} c^{1,37}$	Burt ;18
$WS_{50} \propto c^{2,2}$ [doodtij]	$c^{1,1}$ [springtij] Owen ;19
$WS_{50} \propto c^{1,33}$	Krone;20
c in mg/l WS_{50} in mm/s	

§ 3.4 Deeltjesgrootte- en valsnelheidsverdelingen en hun karakteristieken

In de voorafgaande paragrafen in dit hoofdstuk heeft men het voornamelijk over één slibdeeltje gehad. In de waterkolom bevindt zich echter een hele verzameling deeltjes met verschillende diameters, vormen en dichtheden. Als we in een transportmodel slechts een valsnelheidswaarde kunnen substitueren, dan moet deze waarde van de valsnelheid karakteristiek zijn voor de hele verdeling van slibdeeltjes. De valsnelheid die voor het transportmodel de sedimentatie van de hele verzameling deeltjes goed weergeeft zal dus afhankelijk zijn van de deeltjesgrootteverdeling.

Is de deeltjesgrootteverdeling en de relatie tussen de equivalente boldiameter en de valsnelheid bekend dan kan de bijbehorende valsnelheidsverdeling bepaald worden (zie fig. 11). Theoretisch zou met behulp van valbuisproeven ook de valsnelheidsverdeling bepaald kunnen worden. In praktijk levert dit problemen op in verband met de afbraak van slibvlokken tijdens de monsterneming (zie ook bijlage 25).

Bij elke valsnelheidsverdeling behoren twee karakteristieke valsnelheden die in de literatuur veel gebruikt worden. Dit zijn de mediane valsnelheid ws_{50} en de

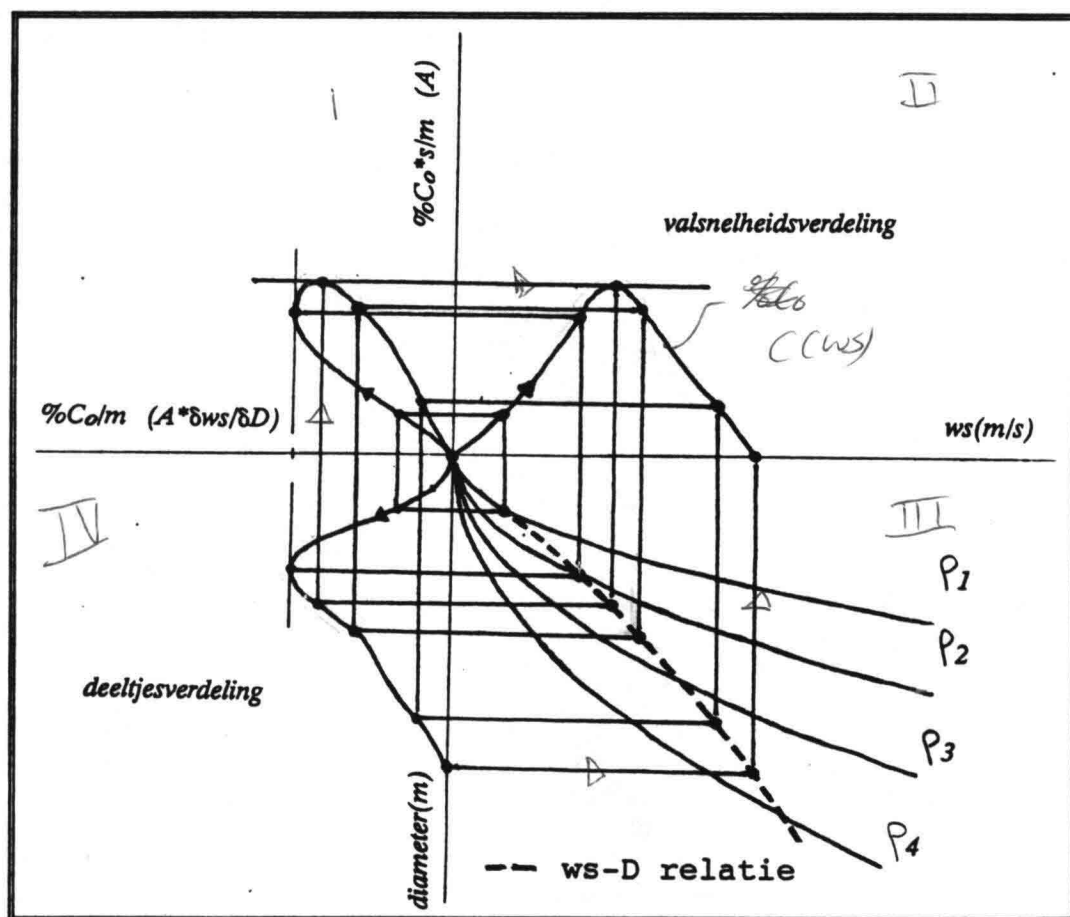
is dat de
aankomst

enige belichting
bij fig. 11 is op zijn
plaats

opmerking: in termen van statistiek zou ik spreken over kansdichtheid; dus hier kansdichtheid
vermenigvuldigd met een concentratie

transportvalsnelheid $w_{\text{transport}}$. Deze snelheden worden onterecht vaak met elkaar vergeleken als zijnde dezelfde karakteristieke snelheden. In deze studie is onderzoek gedaan naar de verschillen tussen deze valsnelheden en is de transportvalsnelheid gedefinieerd aan de hand van de valsnelheidsverdeling. In het vervolg van deze paragraaf zullen eerst de definities van de karakteristieke valsnelheden gegeven worden. Hierna zullen deze waarden voor verschillende valsnelheidsverdelingen worden berekend en met elkaar worden vergeleken.

Fig. 11 Relatie tussen deeltjes- en valsnelheidsverdeling
De oppervlakken onder de verdelingen zijn gelijk
aan de totale slibconcentratie C_0



§ 3.4.1 Mediane valsnelheid

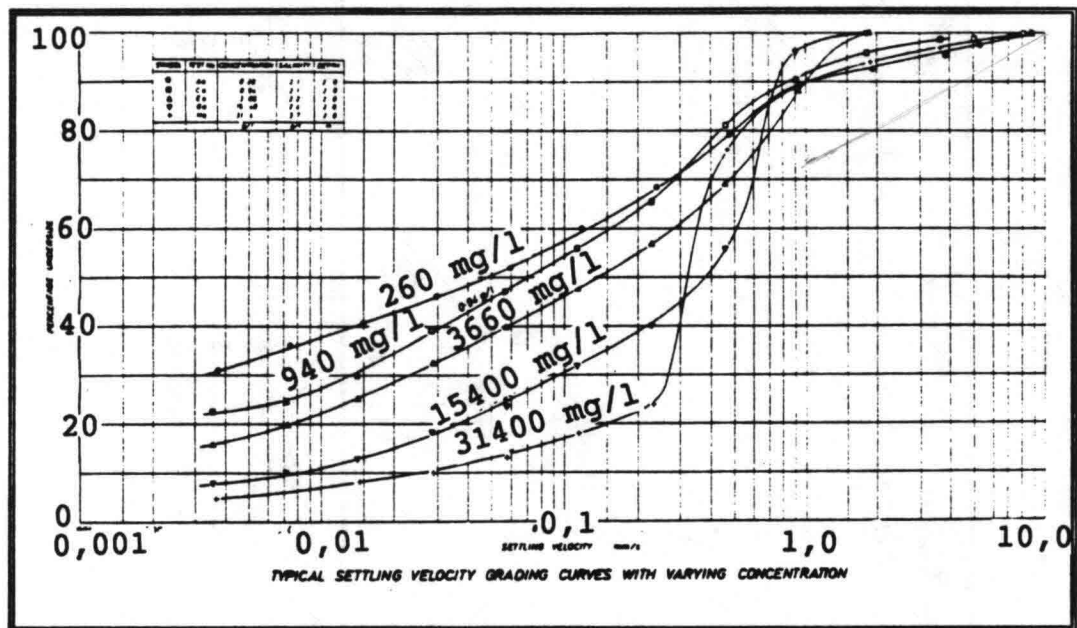
De mediane valsnelheid is die valsnelheid in de valsnelheidsverdeling waarvoor geldt dat 50% van de deeltjesmassa een valsnelheid heeft die lager resp. hoger

$$Pr(\underline{x} < x)$$

$$Pr(x < \underline{x} < x + \Delta x) = \frac{\partial Pr(\underline{x} < x)}{\partial x}$$

is dan die valsnelheid. In de valsnelheidsverdeling betekent dit gelijke oppervlakken links en rechts van de mediane valsnelheid. Vaak worden cumulatieve verdelingen gepubliceerd waaruit eenvoudig de mediane valsnelheid af te lezen is (zie fig. 12). De mediane valsnelheid is de valsnelheid van de deeltjes met een mediane korreldiameter.

Fig. 12 Cumulatieve valsnelheidsverdeling slib in Royal Edwards Dock in Avonmouth [Leussen; 21/data HRS Wallingford]



§ 3.4.2 Transportvalsnelheid

De transportvalsnelheid is de valsnelheid die in massabalansvergelijkingen en oa het $\mu\lambda$ model voorkomt. Deze karakteristieke valsnelheid is duidelijk anders dan de mediane valsnelheid. De transportvalsnelheid vermenigvuldigt met de slibconcentratie geeft het valtransport. De definitie van de transportvalsnelheid is:

-de concentratiegewogen gemiddelde valsnelheid van de valsnelheidsverdeling
ofwel uitgaande van fig. 11 in formulevorm

$$WS_{transport} = \left(\sum_{WS_{min}}^{WS_{max}} WS \%C_o dws \right) / 100 \quad \{12\}$$

$\%C_o$ = percentage van de totale slibconcentratie per valsnelheidsinterval'

De transportvalsnelheid is dus het eerste orde oppervlaktemoment van de valsnelheidsverdeling (zie fig. 11) gedeeld

door 100. Afhankelijk van de vorm en de range van de valsnelheidsverdeling zal de transportvalsnelheid meestal groter zijn dan de mediane valsnelheid.

Dit komt omdat de transportvalsnelheid voornamelijk wordt bepaald door het deel van de valsnelheidsverdeling met valsnelheden welke groter zijn dan de mediane valsnelheid. De 'staart' van de valsnelheidsverdeling loopt meestal tot waarden welke tientallen malen groter zijn dan de mediane valsnelheid. De 'staart' van de valsnelheidsverdeling is de belangrijkste oorzaak van het verschil tussen de mediane en de transportvalsnelheid.

§ 3.4.3 Discussie

Zoals vermeld wordt in de literatuur de mediane valsnelheid regelmatig vergeleken met de transportvalsnelheid (bijv. bepaald volgens Krone;12). Dit kan aanleiding geven tot vreemde verschillen. Deze verschillen zijn deels verklaarbaar uit de verschillende definities en deels uit de methode waarmee de valsnelheid is bepaald, bijvoorbeeld als gevolg van de vlokafbraak ten gevolge van monsternamen. Bij valbuisproeven kan de invloed van differential settling in de valbuis ook bijdragen tot de verschillen. Differential settling heeft een verhoogde valsnelheid in de valbuis als resultaat. Voor fig. 12 zijn de mediane en transportvalsnelheden bepaald uit de cumulatieve valsnelheidsverdelingen. Deze snelheden staan in tabel 6. De verhouding tussen de transportvalsnelheid en de mediane valsnelheid blijkt voornamelijk afhankelijk te zijn van de helling van de cumulatieve valsnelheidsverdeling bij valsnelheden groter dan de mediane valsnelheid. Deze helling is namelijk afgeleid uit de staart van de valsnelheidsverdeling.

Tabel 6 *Vergelijking transport- en mediane valsnelheden*
uit fig.12 ws in mm/s

Co mg/l	WS ₅₀	WS _{transport}	WS _{transport} /WS ₅₀
260	0,05	0,58	11,6
940	0,07	0,44	6,3
3660	0,14	0,40	2,9
15400	0,37	0,45	1,2
31400	0,31	0,66	2,1

Voor valsnelheidsverdelingen welke zijn bepaald in de Oosterschelde [v Leussen, Hayes, Elgershuizen; 22] betekent dit:

Co mg/l	WS ₅₀	WSt _{transport}	WSt _{transport} /WS ₅₀
26	0,4	1,5	3,8
24	0,8	1,8	2,2

§ 3.5 Valsnelheidsbepalingen uitgevoerd met behulp van een valbuis/monsternameapparaat

Wil men een juiste cumulatieve valsnelheidsverdeling bepalen met behulp van een valbuis dan moet aan een aantal voorwaarden voldaan worden:

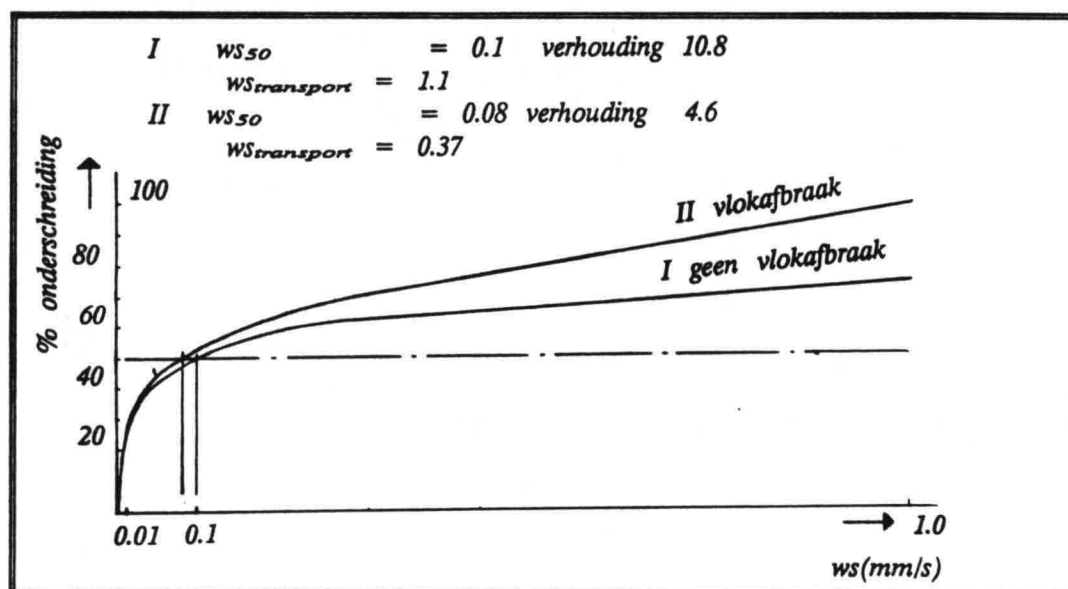
- de lengte van de valbuis moet zo klein mogelijk zijn om in de buis het differtiaal settling proces te voorkomen en moet groot zijn om een goed inzicht te geven in de valsnelheidsverdeling in de hogere valsnelheidsregionen (1 meter is daarvoor voldoende)
- in het monster moet eenzelfde deeltjesgrootteverdeling als in de waterkolom zijn. Monstername mag geen invloed (vlokaafbraak) op de deeltjesgrootteverdeling hebben [Eisma: 2].

Tevens zal men geen zand in het monster willen hebben. Dit laatste is mogelijk door net nadat de kentering heeft plaatsgevonden een monster te nemen. Het zand is dan al uitgezakt. De slibvlokken met hoge valsnelheden zijn dan ook deels uitgezakt zodat een deel van de deeltjesverdeling niet in het monster zit.

De voorwaarden zijn voornamelijk van belang voor de deeltjes met een hoge valsnelheid en nodig voor een juiste weergave van het bovenste deel van de cumulatieve valsnelheidsverdeling en van de staart van de valsnelheidsverdeling. Indien aan de voorwaarden niet voldaan kan worden betekent dit meestal dat de transportvalsnelheid die uit de bepaalde valsnelheidsverdeling volgt veel te klein is. De afwijking van de mediane valsnelheid zal veel kleiner zijn. Dit is geïllustreerd in fig.13. Lijn I een aangenomen cumulatieve valsnelheidsverdeling in situ. Lijn II is de cumulatieve valsnelheidsverdeling in een monster. Deze lijn volgt uit lijn I bij de aannamen dat de deeltjes met valsnelheden groter dan 1,0 mm/s (25%) ten gevolge van monstername worden afgebroken en dat het afgebroken percentage zich uniform verdeelt over het resterende valsnelheidsinterval ($ws < 1,0$ mm/s). Voor beide cumulatieve

ve valsnelheidsverdelingen zijn de mediane en de transportvalsnelheid bepaald.

Fig. 13 Invloed vlokafbraak en te korte valbuis op WS_{50} en $WS_{transport}$



In maart 1987 zijn er gedurende twee getijcycli monsters genomen met een valbuis/monstername apparaat (zie fig. 14 en bijlage 20) in de mond van de Westerschelde. Situatie:

saliniteit 25-28%.
 temperatuur 4 Gr.C
 concentratie 30-300 mg/l
 stroomsnelh -2 - 2 m/s

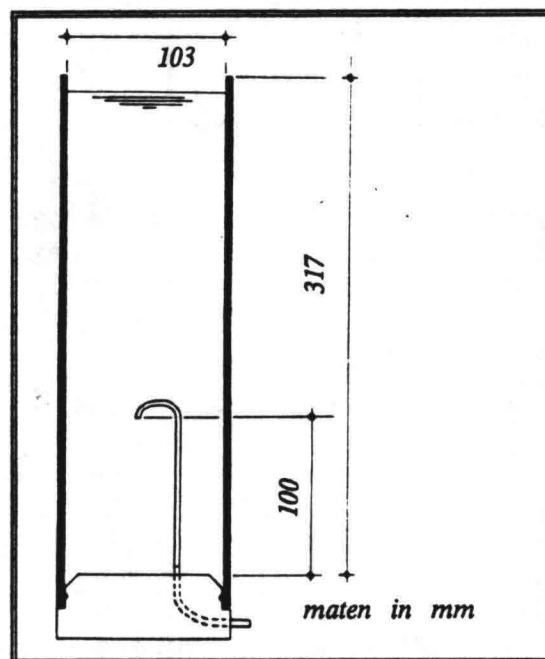
Een maal per uur werd een monster genomen op 60% van de waterdiepte. Op 6 tijdstippen na monstername (1,3,6, 20,40,60 min.) werd de concentratie op een vaste hoogte boven de bodem in de valbuis bepaald. Dit gebeurde door middel van het aftappen van monsters van ± 200 ml. Het volume van het totale monster bedroeg ongeveer 3 l.

Hieruit zijn de cumulatieve valsnelheidsverdelingen bepaald. Het bepalen van de beginconcentratie was niet goed mogelijk (zie ook v. Leussen, Hayes, Elgershuizen; 22). Daarom is aangenomen dat de concentratie 1 min. na monstername 95% is van de beginconcentratie. De mediane valsnelheden en de transportvalsnelheden staan in tabel 7.

De valbuis is te kort om de 'staart' van de valsnelheidsverdeling goed te bepalen terwijl de monstername vlokafbraak tot gevolg heeft (zie bijlage 25). De transportvalsnelheden bepaald met behulp van de valbuisproeven

zijn kleiner dan de transportvalsnelheden welke in situ bepaald zijn met behulp van de valsnelheidsbepaling volgens Krone (zie § 3.6). Dit komt redelijk overeen met de conclusies uit fig. 13 welke gebaseerd zijn op aannamen. De mediane valsnelheid komt daarentegen goed overeen met de mediane valsnelheid zoals in 1980 door Hydraulic Research Station Wallingford in de Westerschelde is bepaald (zie tabel 3). Geconcludeerd kan worden dat de gebruikte apparatuur wel geschikt is om de mediane valsnelheid te bepalen, maar ongeschikt om de transportvalsnelheid te bepalen vanwege de afwijkingen in hoge valsnelheidsregionen.

Fig. 14 Valbuis van het valbuis/monstername apparaat



Tabel 7 De mediane en transportvalsnelheden bepaald
in de Westerschelde met behulp van
valbuis/monstername apparaat. ws in mm/s

2½ dag na doodtij		2 dagen na springtij	
WS ₅₀	WS _{transport}	WS ₅₀	WS _{transport}
0,05	0,28	0,09	0,53
0,06	0,35	0,06	0,38
0,09	0,58	0,06	0,46
0,07	0,32	0,06	0,38
0,10	0,27	0,05	0,18
0,12	0,30	0,08	0,06
0,07	0,48	0,06	0,40
0,12	0,71	0,04	0,22
0,09	0,47	0,08	0,55
0,08	0,50	0,05	0,53
0,17	0,80		
0,07	0,40		
0,04	0,11		
0,087±0,035	0,43±0,19	0,063±0,016	0,41±0,13

§ 3.6 Valsnelheid volgens Krone

De valsnelheidsbepaling volgens Krone maakt gebruik van een massabalans waarin uitgegaan wordt van de evenwichtsconcentratievertikaal volgens Krone. Er wordt ~~ddar~~ van uitgegaan dat het valtransport gelijk is aan het vertikale turbulente transport. Een voorwaarde voor het gebruik van de evenwichtsvertikaal en de valsnelheidsbepaling volgens Krone is dat er geen stratificatie aanwezig is. Uitgangspunt bij de bepaling van zijn evenwichtsvertikaal is dat er menging optreedt in de hele vertikaal. De valsnelheidsbepaling kan alleen rond kentering gebruikt worden omdat de stroomsnelheden dan klein zijn. De balans houdt namelijk geen rekening met de invloed van advectief transport op de evenwichtsvertikaal.

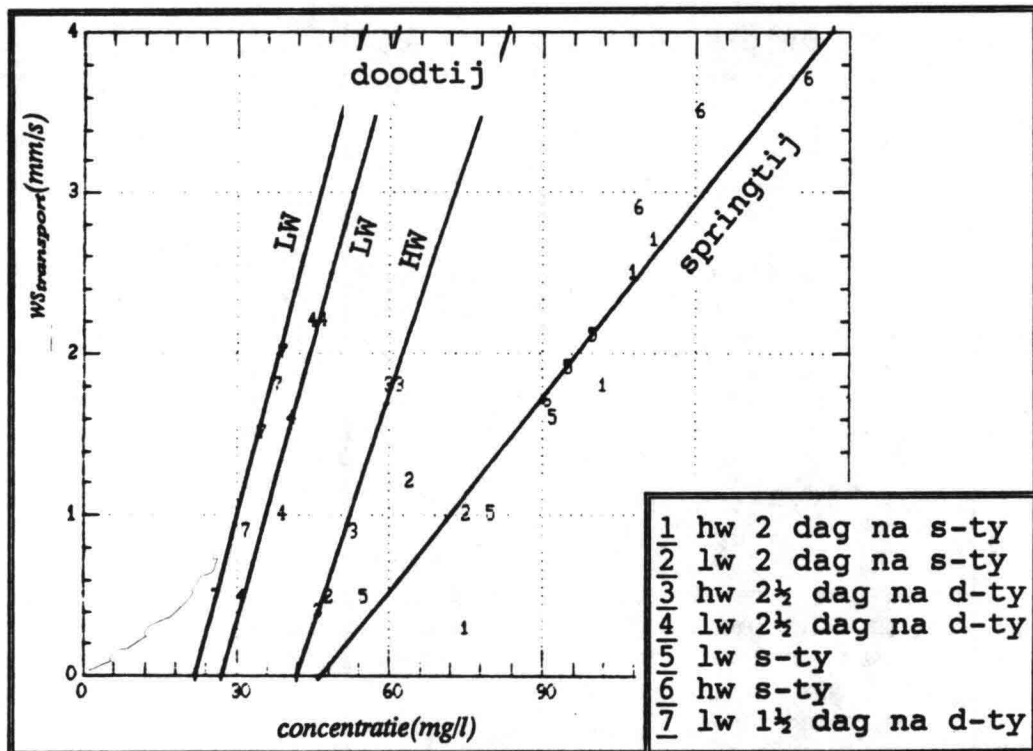
Het Richardson getal in de Westerscheldemond bedraagt 0,025. Het estuarium mag nu als goed gemengd beschouwd worden [Kranenburg;23]. Indien rond kentering het concentratieverloop op een bepaalde diepte bekend is dan wordt de transportvalsnelheid volgens Krone:

$$w_{\text{transport}} = -\frac{y}{(p \cdot t)} \ln(c/c_0) \quad \{13\}$$

met $p = 1 - \tau_b / \tau_d$
 $\tau_b(\tau_d)$ bodemschuifspanning
 (bij begin sedimentatie(d))
 $[N/m^2]$
 y = diepte [m]
 t = tijd tov t_0 [sec]
 c = conc op $t=t$ [mg/l]
 C_0 = conc op $t=t_0$ [mg/l]

Bij metingen in de Westerscheldemondblijkt dat de concentratievertikaal rond de kenteringsperiode niet helemaal overeenkomt met de evenwichtsvertikaal volgens Krone. Toepassing van de valsnelheidsbepaling volgens Krone met de meetgegevens van de Westerscheldemondblijkt desondanks een goed inzicht (zie fig. 15). De situatie op de meetlokatie is al beschreven bij de valbuisproeven in § 3.5.

Fig. 15 Transportvalsnelheid volgens Krone afhankelijk van concentratie(diepte) bij verschillende getijomstandigheden tijdens metingen in de Westerschelde mondb(voor meetdagen zie bijlage 1)



hw(lw) = hoog(laag)waterkentering
 s(d)-ty=spring(dood)ty

In fig. 15 zijn de transportvalsnelheden uitgezet tegen de slibconcentratie. Dit is gedaan voor verschillende hoog- en laagwaterkenteringen in de doodtij-springtijcyclus. Voor de verschillende perioden bestaat er een lineair verband tussen de slibconcentratie en de transportvalsnelheid. Per periode is de transportvalsnelheid op verschillende diepten bepaald. Zo is voor periode 7 (1w 1½ dag na doodtij) de transportvalsnelheid op 5 diepten bepaald. Een hogere concentratie komt overeen met een grotere diepte.

De verschillen in de relatie tussen de transportvalsnelheid en de slibconcentratie voor de verschillende perioden zouden te verklaren zijn met behulp van de verschillen in flocculatie in de verschillende perioden. De grote deeltjes/vlokken die ten gevolge van flocculatie ontstaan bepalen grotendeels de transportvalsnelheid. Meer flocculatie rond doodtij zou kunnen verklaren dat ondanks de lagere slibconcentratie de transportvalsnelheid rond doodtij weinig afwijkt van de transportvalsnelheid rond springtij.

Flocculatie treedt op indien de schuifspanningen laag zijn. Rond de kentering zijn de schuifspanningen laag genoeg om flocculatie op te laten treden. De periode rond kentering bij doodtij waarin flocculatie op kan treden is langer dan deze periode bij springtij. Dit kan de relatief hoge transportvalsnelheden bij lage slibconcentraties rond doodtij verklaren.

De grootte van het tijdsinterval waarin flocculatie optreedt is moeilijk precies te bepalen omdat onvoldoende informatie beschikbaar is over de waarde van de schuifspanningen welke limiterend is voor sterke flocculatie. Deze zal optreden bij stroomsnelheden onder de 0,1-0,4 m/s. Aangenomen wordt dat de schuifspanning een functie is van de oppervlaktestroomsnelheid. Indien tevens aangenomen wordt dat de oppervlaktestroomsnelheid rond de stroomkentering lineair met de tijd verloopt dan is du/dt een maat voor de lengte van het tijdsinterval waarin sterke flocculatie optreedt. u is hierin de oppervlaktestroomsnelheid.

Indien men du/dt voor de verschillende stroomkenteringen uitzet tegen de slibconcentratie welke volgens de relaties in fig. 15 behoren bij een transportvalsnelheid van 0,0 mm/s dan blijkt er een duidelijke relatie te bestaan (zie fig. 15.1). De gevonden relaties in fig. 15 zijn te beschrijven volgens

$$\text{slibconcentratie} = A + B \text{ transportvalsnelheid}$$

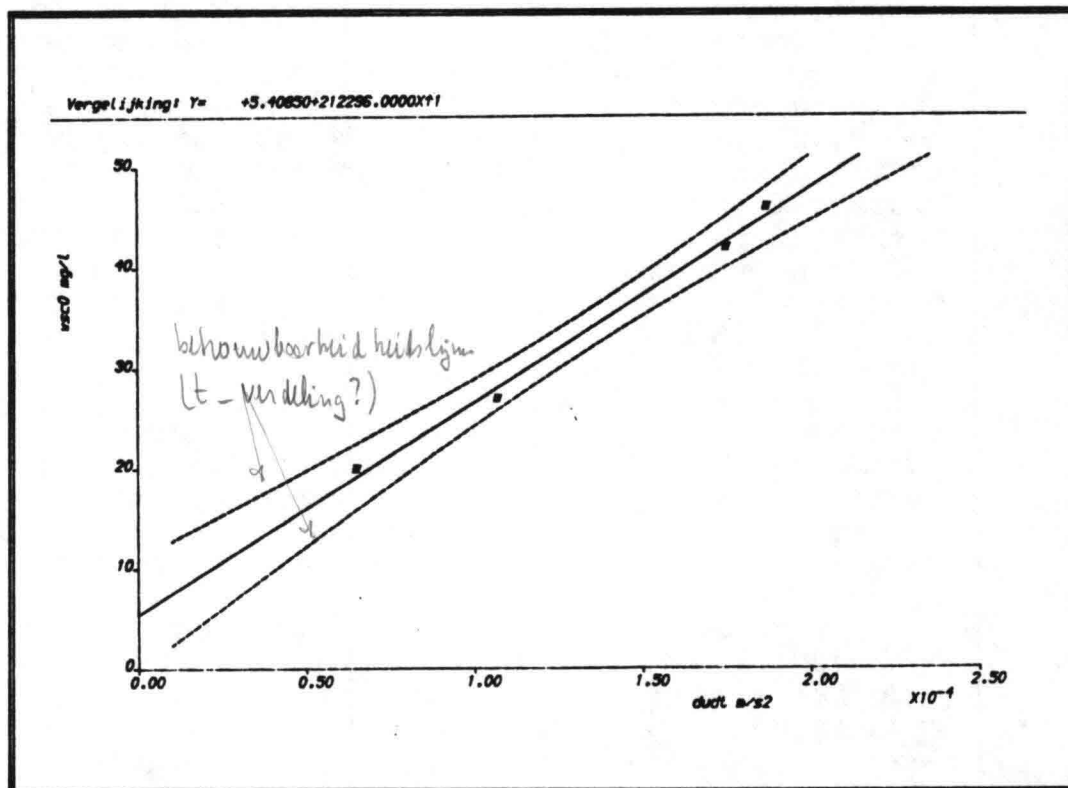
Uit fig. 15 volgen voor B 2 waarden, één voor rond doodtij en één voor rond springtij. A is te beschrijven volgens

$$A = 5,4 + 2,1 \cdot 10^{-5} du/dt$$

verklaring, dat $w_s = 0$ voor $c \neq 0$?

Zowel A als B zullen plaats- en seizoensafhankelijk zijn.

Fig. 15.1 De relatie tussen du/dt en de slibconcentratie
bij een transportvalsnelheid van 0,0 mm/s
volgens de relaties in fig. 15



§ 3.7 Valsnelheidsbepaling met behulp van de slibmassabalans

Deze wijze van valsnelheidsbepaling komt er op neer dat wanneer van een gedefinieerde ruimte (Euler) de inhoudsveranderingen en de import- en exporttermen bekend zijn, de resterende term in de balans de import of de export is ten gevolge van het valproces van de slibdeeltjes ten opzichte van het water. In het vervolg zal deze term het 'valtransport' genoemd worden.

Dit valtransport is de som van de verschillende valtransporten door de verschillende grenzen van de gedefinieerde ruimte. Een valtransportterm is het produkt van het horizontale oppervlak (A_1) van een deel van het grensvlak, de slibconcentratie (C_1) in het (deel)vlak en de transportvalsnelheid ($w_{\text{transport}1}$) die hoort bij de deeltjes-

grootteverdeling in het (deel)vlak. (zie fig. 16)

Fig. 16 Valtransport afhankelijk van gedefinieerde ruimte
met de zijden 1 tot 4 en een breedte loodrecht op
het vlak van tekening van 1 m.

Stel diepte = 1.0 m. dan

$$A_1 = X_1 \text{ m}^2$$

$$A_2 = X_2 \text{ m}^2$$

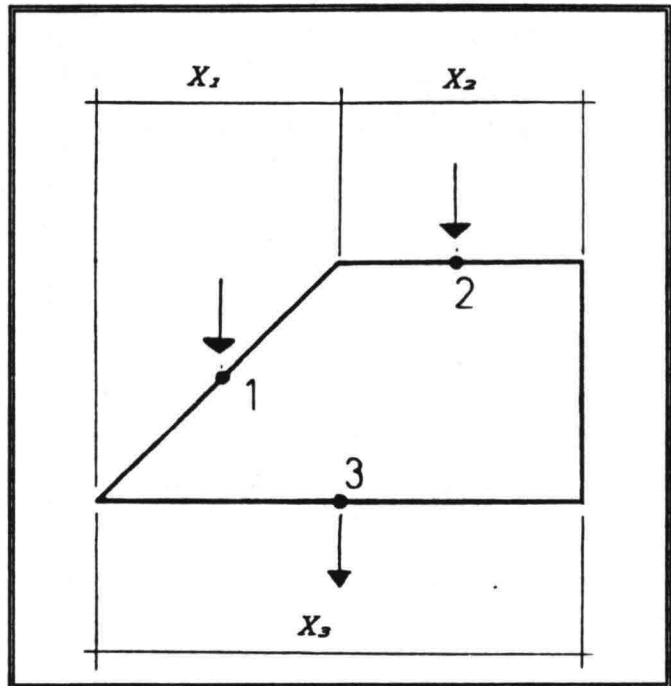
$$A_3 = X_3 \text{ m}^2$$

valimport =

$$WS_{transport1} * C_1 * A_1 +$$

$$WS_{transport2} * C_2 * A_2 -$$

$$WS_{transport3} * C_3 * A_3$$



De andere import- en exporttermen zijn de transporten als gevolg van:

- in- en uitstroming
- turbulente uitwisseling

De hier op te stellen valsnelheidsbepaling moet in tegenstelling tot de valsnelheidsbepaling volgens Krone gedurende de gehele getijcyclus gebruikt kunnen worden. Net als bij de valsnelheidsbepaling volgens Krone kan hiermee alleen de transportvalsnelheid bepaald worden en niet de mediane valsnelheid.

In het vervolg van deze paragraaf zal eerst de balans opgesteld worden voor een klein elementje met de afmetingen dx, dy en dz . Hierna wordt dit voor de meetgegevens in de Westerscheldemonnd toegepast op een waterzuil met een oppervlakte van 1 m^2 , en een hoogte van het wateroppervlak tot een variabele diepte. De situatie tijdens de metingen is dezelfde als bij de valbuisproeven (§ 3.5).

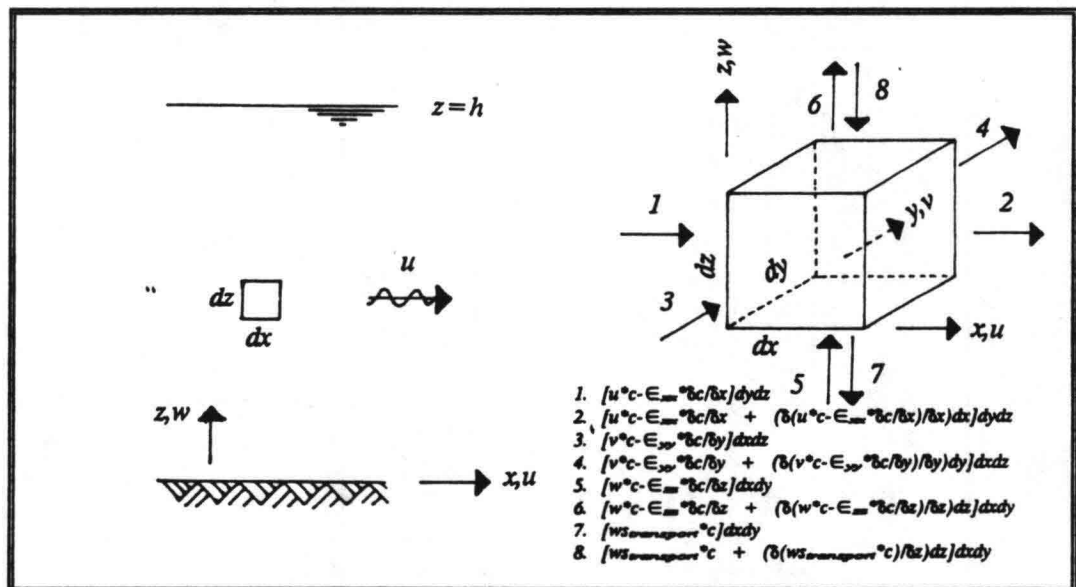
§ 3.7.1 Slibmassabalans

De slibmassabalans wordt eerst opgesteld voor een

kleine gedefinieerde ruimte met de afmetingen dx , dy en dz . De z -as is vertikaal en loopt van de bodem naar het wateroppervlak. De x -as heeft als richting de hoofdstroming in het horizontale vlak en de oorsprong ligt op de bodem. De y -as is horizontaal en loodrecht op de hoofdstroming volgens een rechtsdraaiend assenstelsel.

Voor elk vlak zijn er 2 transporttermen, namelijk een ten gevolge van de in/uit stroming, het advectioneel transport, en een ten gevolge van de turbulente uitwisseling. De turbulente uitwisseling wordt beschreven volgens het gradienttype transportmodel. Voor de horizontale vlakken komt daar nog een derde transportterm bij ten gevolge van het valtransport (zie fig. 17). De hoofdstromingsrichting verandert nauwelijks in de vertikaal en is dus continue in de x -richting. Aangenomen wordt nu dat de hoofdasen van de diffusietensor samenvallen met x, y en z -richting.

Fig. 17 Orientatie assen en bijbehorende
slibtransporttermen



Voor de slibbalans volgt nu

$$\frac{\partial c}{\partial t} = w s_{transport} \frac{\partial c}{\partial z} - u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [E_{xx} \frac{\partial c}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [E_{yy} \frac{\partial c}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [E_{zz} \frac{\partial c}{\partial z}] \quad \{14\}$$

$$\frac{\partial (wc)}{\partial z}$$

u, v, w = stroomsnelheden in
 x, y, z richting m/s
 E = uitwisselingscoëfficiënt in x, y, z richting
in m^2/s

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

even
nuttig

Integratie over de diepte van $z=z$ tot $z=h$ levert een vereenvoudiging op omdat de drie verticale import- cq exporttermen aan het wateroppervlak ($z=h$) nul zijn. De balans voor de waterzuil van 1 bij 1 bij $h-z$ m. wordt dan

$$\begin{aligned}
 [W_{transport} c]_z &= -\int_z^h \frac{\partial c}{\partial t} dz - \int_z^h u \frac{\partial c}{\partial x} dz - \int_z^h v \frac{\partial c}{\partial y} dz \\
 &+ [w c]_z + \int_z^h \frac{\partial}{\partial x} [E_{xx} \frac{\partial c}{\partial x}] dz + \int_z^h \frac{\partial}{\partial y} [E_{yy} \frac{\partial c}{\partial y}] dz \\
 &- [E_{zz} \frac{\partial c}{\partial z}]_z \quad \{15\}
 \end{aligned}$$

term links ^{VAK} = teken: valtransport

term 1 na = teken: inhoudsveranderingen

term 2-4 na = teken: advectie transport

term 5-7 na = teken: turbulent transport

Deze vergelijking is altijd geldig. Indien echter de transportvalsnelheid bepaald dient te worden met behulp van metingen in de natuur is het onmogelijk om alle parameters uit vergelijking {15}, waarvan sommige continue in $x; y; z$ en t , te bepalen. De situatie op de meetlocatie is echter dusdanig dat een aantal termen zeer klein zijn en verwaarloosd kunnen worden. Eerst zal nu de situatie in de Westerscheldemonnd besproken worden waarna met deze kennis de balans vereenvoudigd wordt door de te verwaarlozen termen uit de balans te nemen.

§ 3.7.2 Situatie Westerscheldemonnd

De meetlocaties zijn gesitueerd in de Westerscheldemonnd ter hoogte van de raai Vlissingen - Breskens. De breedte van het estuarium ter plaatse is 5 - 6 km en de diepte bedraagt 20 - 25 m. (zie fig. 18)

Getij

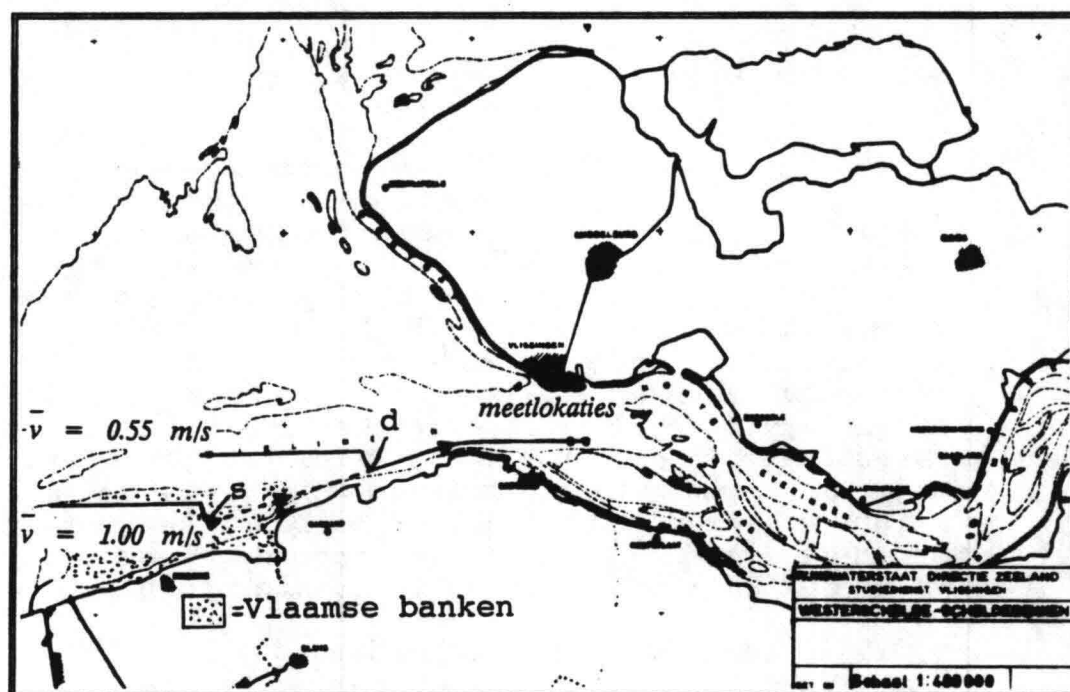
De getijsituatie is heel duidelijk afhankelijk van de doodtij-springtijcyclus. Dit komt duidelijk naar voren in de verschillen in het horizontale en verticale getij.

Doodtij:	horizontaal getij	$\pm 1,2$	m/s
	vertikaal getij	$(-1,2) - (+0,9)$	m. NAP
Springtij:	horizontaal getij	$\pm 2,0$	m/s
	vertikaal getij	$(-2,3) - (+2,5)$	m. NAP

Gelaagdheid

Het grote verticale getij is een van de voornaamste oorzaken dat het estuarium goed vertikaal gemengd is en er op de meetlokatie geen dichtheidsstromen waar te nemen zijn. Het Richardson getal daar bedraagt ongeveer 0,025.

Fig. 18 Meetlokaties en positie Vlaamse banken met het afgelegd traject per vloedstroom bij springtij(s) en doottij(d) tot de meetlokaties



Driedimensionale stroming

De stroming in de x-richting is reeds gegeven bij de getij gegevens. De stroming in de y-richting bedraagt plaatselijk in de stroomvertikaal maximaal 0,1 maal de hoofdstroomsnelheid. De stroming in de z-richting bedraagt ten gevolge van het verticale getij maximaal $\pm 0,5 \text{ mm/s}$.

Slibhoeveelheden

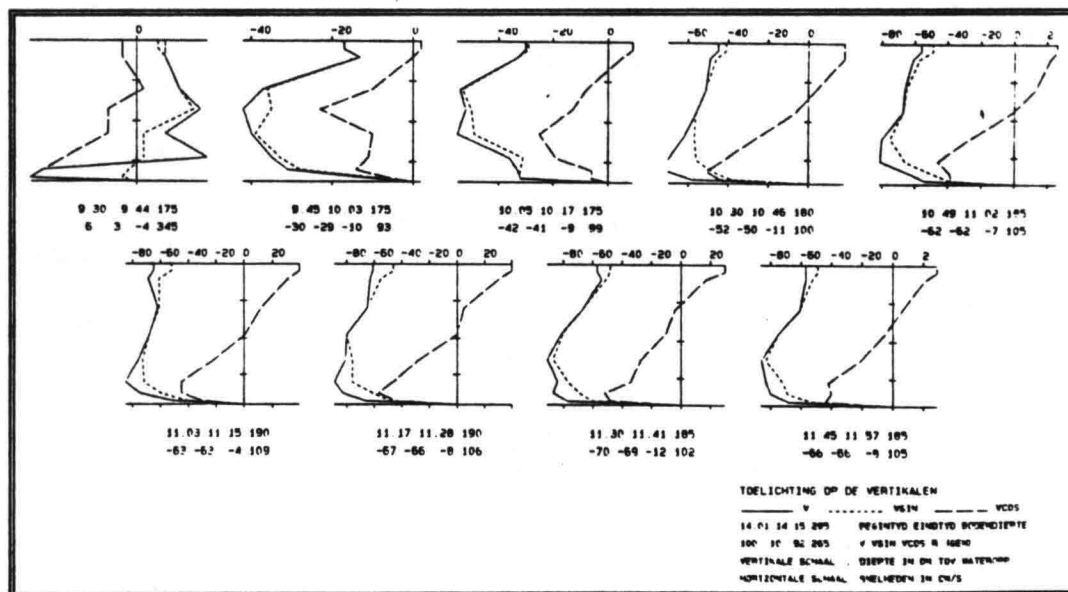
De concentraties variëren van 30-300 mg/l afhankelijk van de diepte en de periode in de dood-springtijcyclus. De verhouding tussen de concentraties rond springen en doottij is ongeveer 3. De maximale concentraties in een getijcyclus worden meestal bereikt als het water dat het slib op de Vlaamse banken in suspensie heeft genomen

de meetlokatie bereikt. Of dit water de meetlokatie bereikt is afhankelijk van de afgelegde weg van de vloedstroom tot de meetlokaties. Voor doodtij en springtij is de afgelegde weg en de positie van de Vlaamse banken in fig. 18 aangegeven. De concentratie gradiënten zijn het grootst in de z-richting en bedragen ongeveer 5000 mg/m^4 . De gradiënten in horizontale zin bedragen maximaal ongeveer 20 mg/m^4 .

Kentering

De LW-kenteringstijden in de dwarsraai Breskens-Vlissingen verschillen maximaal circa $1\frac{1}{2}$ uur. De ebstroom zet nog heel lang door in de noordelijke geul terwijl door de zuidelijkere geul de vloedstroom al loopt. Op de meetlokatie heeft dit tot gevolg dat de vloedstroom aan het oppervlak lange tijd geremd wordt door de langdoorzettende ebstroming in Honte (zie fig. 18). De stroomvertikaal heeft ongeveer tot twee uur na kentering de maximale stroomsnelheid niet aan het oppervlak maar in de vertikaal (zie fig. 19). Net na de kentering bevindt dit maximum zich net boven de bodem, het verplaatst zich vervolgens langzaam naar het oppervlak.

Fig. 19 Stroomvertikalen na LW-kentering ongeveer ter plaatse van de meetlokaties. De doorgetrokken lijn geeft de grootte van de snelheidsvektor



§ 3.7.3 Afweging balanstermen

De situatie rond de meetlokaties is in grote lijnen

bekend. Kwantificering van de verschillende balanstermen is nu mogelijk. Binnen bepaalde 'transportgroepen' (advectief, turbulent, valtransport en de inhoudsveranderingen) zal eerst bekeken worden hoe groot de verschillen zijn. Vervolgens zullen de verschillen tussen de groepen bekeken worden.

De balans is zo opgesteld dat het vertikaal getij en de daarbij behorende vertikale stroomsnelheidscomponent geen import- of export veroorzaken door middel van een vertikaal meebewegend assenstelsel. De vertikale stroomsnelheid kan dan worden verwaarloosd. Met de andere gegevens volgt hieruit dat het advectief transport in de x-richting een orde 10 groter is dan in de y-richting. Het advectief transport in de z-richting kan 0 gesteld worden.

Aangenomen wordt dat $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz}$. Uit § 3.7.2 volgt $\delta c / \delta z \approx 250 \delta c / \delta x \approx 250 \delta c / \delta y$. Voor de horizontale turbulente transporten moet van het produkt van de uitwisselingscoëfficiënt en de concentratiegradient de afgeleide genomen worden. Daarna dienen deze afgeleiden geïntegreerd te worden over het interval $z - h$ (zie {15}). Dit resulteert in een vertikaal turbulent transport dat circa orde 100 groter is dan de horizontale turbulente transporten.

Indien men het valtransport, de inhoudsverandering en de termen 2 en 7, de grootste transporten in hun groep, omzet in 'val'snelheden in de z-richting, door de transporten te delen door de slibconcentratie op een diepte z , resulteert dit in:

- 'valtransport'snelheid	(-1)	- (-2)	mm/s
- 'inhoudsverandering'snelheid	(-2)	- (+2)	mm/s
- 'advectieftransport'snelheid	(-0,5)	- (+1)	mm/s
- 'turbulenttransport'snelheid	(0)	- (+4)	mm/s

De 'valtransport'valsnelheid is de transportvalsnelheid. De snelheden zijn rechtevenredig met de bijbehorende transporten. De horizontale 'turbulente transport'snelheden zijn $0,0 - 0,04$ mm/s en kunnen verwaarloosd worden ten opzichte van de transportvalsnelheid. De 'advectieftransport'snelheid in de y-richting is ongeveer 20 maal kleiner dan in de x-richting. Deze snelheden, $(-0,025) - (+0,05)$ mm/s kunnen ook verwaarloosd worden ten opzichte van de transportvalsnelheid. De balans komt er nu als volgt uit te zien.

{16}

$$[w_{\text{transport}} c]_z = \int_z^h \delta c / \delta t \, dz - \int_z^h \delta c / \delta x \, dz - [\epsilon_{zz} \delta c / \delta z]_z$$

Deze balansvergelijking is de basis voor het uitgevoerde meetprogramma.

kan dat niet
so wie so

→
waaruit?

x - in stromings-
richting?

§ 3.7.4 Metingen en gegevensverwerking

De slibconcentraties zijn gelijktijdig bepaald op 2 meetlokaties die in het verlengde van de hoofdstromingsrichting liggen (zie fig. 18). Gedurende 13 uur is elke 20 min. de concentratie op 5 plaatsen in de waterkolom bepaald. Deze bepalingen zijn uitgevoerd met behulp van troebelheidsmeters (zie bijlagen 18 en 19) en door middel van monsternamen en laboratoriumbepalingen van het zwevend stof gehalte.

De stroomsnelheid en richting zijn bepaald met behulp van een Ott-molen en een Elmar. Beide zijn stroomsnelheidsmeters met het propellerprincipe. De Elmar heeft tevens een girokompas voor de bepaling van de stroomrichting. De stroomsnelheids- en -richting metingen vonden op dezelfde plaatsen en tijden als bij de concentratiebepaling plaats.

De turbulente uitwisselingscoëfficiënt kan bepaald worden aan de hand van de onderstaande relatie [Booy; 24].

$$\epsilon_z = V_r = \overline{(u' w')} / (\delta u / \delta z) \quad \{17\}$$

V_r = turbulente viscositeit [m^2/s]
 u' en w' = momentane snelheidsfluctuaties
 ten opzichte van de
 gemiddelde snelheid [m/s]

$\overline{u' w'}$ is bepaald met behulp van een Vektor Akwa (zie fig. 20).

Dit is een akoestische snelheidsmeter die een 3-dimensionaal snelheidsveld meet. Op dezelfde meetpunten als bij de concentratiebepaling (op een meetlokatie, niet op dezelfde tijden) werd hiermee per punt gedurende 10 min. met een monsterfrequentie van 10 Hz de snelheid in 4 richtingen bepaald (zie fig. 20). Zie voor de meetprogramma's de bijlagen 2.1-2.3.

De slibconcentraties zijn bepaald met behulp van ijkcurven. In deze ijkcurven is de troebelheid uitgezet tegen de slibconcentratie. Tijdens de metingen is de troebelheid bepaald met behulp van verschillende troebelheidsmeters, namelijk een Monitek 160/131 en een Partech rp 7000 (zie bijlage 18 en 19). Deze troebelheidsmeters geven een stroomsignaal af afhankelijk van de lichtdoordringing. De lichtdoordringing neemt voornamelijk af door de aanwezigheid van deeltjes met een kleine diameter. De hoeveelheid zand blijkt nauwelijks van invloed te zijn op de lichtdoordringing (zie bijlage 3).

De troebelheidsmeter, een Partech, welke op het

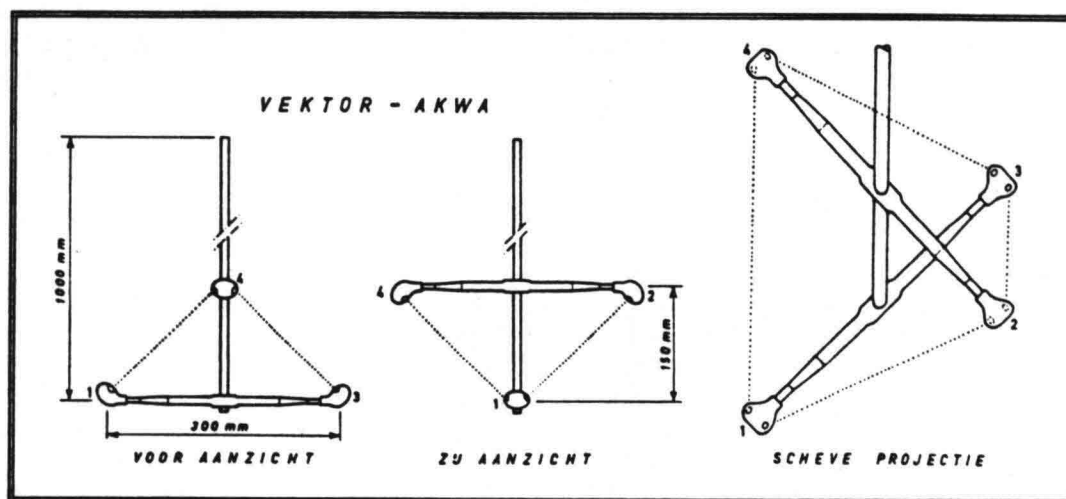
laatste moment op het meetschip Argus is geplaatst, gaf met behulp van de bijbehorende ijkcurve duidelijk afwijkende resultaten. Een juiste ijkcurve bepalen na de metingen was niet mogelijk in verband met de ontstane defecten aan de troebelheidsmeter. Om toch betrouwbare concentraties voor de meetlocatie van de Argus te verkrijgen is verondersteld dat de relatie tussen het zwevend stof gehalte (al het gesuspendeerd materiaal tussen 2-2000 μm) en de slibconcentratie voor de twee meetlocaties gelijk is. Gezien de geringe afstand tussen de meetlocaties in de geulen ($\pm 1000 \text{ m}$) is deze aanname realistisch. De slibconcentraties gemeten op de meetlocatie van de Argus zijn vervolgens zo getransformeerd dat eenzelfde relatie ontstond als tussen de slibconcentraties en de zwevend stofgehalten welke zijn gemeten op de meetlocatie van de Delta (bijlagen 4 en 11).

onnodig gedetailleerd
verhaal

Op 870319 moest het meetschip Argus in verband met de sterke stroming zoveel mogelijk in de stroom liggen. Daar dit meetschip op een voor- en achteranker lag is er rond kentering ongeveer 180 graden gedraaid. Tijdens de draaiing is er een luchtbel voor het venster van de troebelheidsmeter ontstaan. De gemeten waarden konden hierdoor niet meer gebruikt worden voor de slibconcentratiebepaling. De slibconcentraties voor dat gedeelte zijn bepaald uit het zwevend stofgehalte en door middel van interpolatie. Dat voor de slibconcentratiebepaling het zwevend stofgehalte is gebruikt is duidelijk te zien in bijlage 11. Hierin liggen de punten die voor de bepaling gebruikt zijn (zwevend stofgehalten van boven de 200 mg/l) bijna op de regressielijn.

Tijdens de troebelheidsmetingen werd per meetpunt de lichtdoordringing enige malen bepaald gedurende 10 seconden, en daarna gemiddeld. De hieruit bepaalde 'gemiddelde' slibconcentraties waren echter nog duidelijk afhankelijk van turbulente concentratiefluctuaties (zie bijlage 6 en 13). De middelingstijd was te kort. Om alsnog een gemiddeld concentratieverloop in de tijd te krijgen dat onafhankelijk van de turbulente concentratiefluctuaties is, is in de tijd het lopend-uurgemiddelde bepaald. Dit gaf een duidelijker beeld van het gemiddeld concentratieverloop (zie bijlagen 7 en 14). Deze lopend-uurgemiddelde concentraties zijn gebruikt voor de slibmassabalans en de valsnelheidsbepaling volgens Krone (§ 3.6).

Fig. 20 Vektor Akwa. De stippellijnen zijn de richtingen waarin de stroomsnelheid gemeten wordt.



§ 3.7.5 De slibinhouds veranderingen in de waterkolom

In het verloop van de slibconcentratie in de tijd (bijlage 7 en 14) zijn een aantal opvallende punten te ontdekken. De snelle concentratietoename net voor de HW-stroomkentering. (Zie voor de stroomkenteringen bijlagen 5 en 12 en de zwarte driehoekjes in bijbehorende bijlagen.) Deze concentratietoename is het gevolg van het advectief transport naar de meetlocaties van het op de Vlaamse banken opgewervelde slib (fig. 18). Deze concentratietoename is dan ook het eerste waarneembaar op de meest westerlijk gelegen meetlocatie. Eveneens een opvallend punt is de lange tijdsduur van concentratieafname aan het oppervlak bij LW-stroomkentering. Dit heeft duidelijk verband met de vorm van de stroomvertikaal tijdens de concentratieafname (zie fig. 19). Aan het oppervlak blijft de stroomsnelheid gedurende 2 uur lager dan in de vertikaal. Gezien de stroming nabij de bodem zal het materiaal dat uit de bovenlaag zakt niet snel of geheel niet kunnen sedimenteren. Dit materiaal zal in de onderlaag blijven, hetgeen deels de concentratietoename daar verklaart.

De hogere slibconcentraties aan het begin van de HW-stroomkentering ten opzichte van de LW-stroomkentering en de hogere slibconcentraties rond springtij ten opzichte van doodtij zijn ook opvallende punten. Deze

waarom opvallend?

laatste twee punten kwamen ook duidelijk naar voren in figuur 15 waarin $w_{transport}$ afhankelijk van de concentratie uitgezet staat.

De afgeleide van de slibconcentraties in de tijd worden gebruikt voor de bepaling van de inhoudsveranderingen in de waterkolom. Indien het advectioneel en turbulente transport te verwaarlozen is ten opzichte van de inhoudsveranderingen dan volgt uit {16} een transportvalsnelheid volgens:

$$[w_{transport}]_z = -1/[c]_z \sum_z^h \delta c / \delta t \, dz \quad \{18\}$$

Deze transportvalsnelheid bepaald volgens {18} staat tegen de tijd uitgezet in de bijlagen 8 en 15. Rond de stroomkenteringen zijn zowel de advectioneel als de turbulente transportterm klein en heeft de transportvalsnelheid volgens {18} een realistische waarde. Deze bepaling komt ongeveer overeen met de valsnelheidsbepaling volgens Krone. Het verschil is dat er nu niet wordt uitgegaan van de evenwichtsvertikaal volgens Krone maar van de gemeten concentratievertikaal. Indien de resultaten van de beide valsnelheidsbepalingen rond de kenteringen met elkaar worden vergeleken dan blijkt er een redelijke overeenstemming. De resultaten volgens Krone (fig. 15) geven iets hogere transportvalsnelheden. Bij de valsnelheidsbepaling volgens Krone is rekening gehouden met de turbulente transporten hetgeen soms een toename van 25% in de valsnelheid oplevert. De resultaten in de bijlagen 8 en 15 geven rond kentering een kleine onderschatting van de transportvalsnelheid. Buiten de kenteringen zijn de advectioneel en turbulente transporten niet te verwaarlozen hetgeen in de bijlagen 8 en 15 tot uiting komt in de onrealistische negatieve valsnelheden. Een negatieve valsnelheid houdt in dat de import van slib in de waterkolom ten gevolge van advectioneel en turbulent transport groter is dan de export ten gevolge van het valtransport, advectioneel en turbulent transport. Import van slib zijn in de waterkolom betekent dat de gemiddelde concentratie zal toenemen. Een positieve valsnelheid betekent export van slib uit de waterkolom en een afname van de gemiddelde concentratie. Vergelijk de bijlagen 7 en 14 met 8 en 15.

§ 3.7.6 Advectioneel slibtransport

In de Westerscheldemonde is advectioneel slibtransport in de waterkolom een belangrijke transportterm. In § 3.7.2 is hiernaar reeds verwezen bij de behandeling van de concentratiegradient in de stromingsrichting. Het advectioneel

transport in de waterkolom is het gevolg van een concentratiegradient in de stromingsrichting en de stroming. Ten gevolge van het advectief transport zal er import/export van slib in/uit de waterkolom plaatsvinden. Indien men het valtransport en de transportvalsnelheid wil bepalen moet dit advectief transport in de slibmassabalans meegenomen worden. Op de momenten dat het turbulente transport te verwaarlozen is ten opzichte van het valtransport blijkt uit {16} dat de op onderstaande wijze bepaalde transportvalsnelheid een realistische waarde heeft:

{19}

$$[w_{transport}]_z = -\frac{1}{[c]} \sum_z \frac{\delta c}{\delta t} dz - \frac{1}{[c]} \sum_z u \frac{\delta c}{\delta x} dz$$

moet er niet
gemiddeld
worden?

De gemeten slibconcentraties op de meetlokatie van de Delta zijn gebruikt voor het bepalen van de inhoudsveranderingen. De advectieve transportterm is bepaald met de gemeten of de uit het zwevend stofgehalte bepaalde slibconcentraties op de meetlokatie van de Delta en de Argus. De transportvalsnelheden die op deze wijze uit {19} volgen, zijn tegen de tijd uitgezet in de bijlagen 9 en 16. In bijlage 9 zijn duidelijk twee positieve pieken rond de stroomkenteringen en twee negatieve dalen net na de stroomkenteringen waar te nemen. Op de andere momenten liggen de waarden rond de nulgrens indien de eerste meetpunten buiten beschouwing gelaten worden. Deze afwijking van de nulgrens bij de eerste meetpunten is waarschijnlijk het gevolg van het inspelen van de troebelheidsmeters. Bijlage 16 toont een heel ander beeld. Dit is het gevolg van grote fouten in de advectieftransport bepaling na ± 12.00 uur. De slibconcentraties zijn toen bepaald uit het zwevend stofgehalte in plaats van uit de troebelheid (§ 3.7.5). In § 3.7.8 zal de grote van de fout bepaald worden. In deze paragraaf zal nu alleen bijlage 9 verder besproken worden.

De betekenis van de figuur in bijlage 9 is, nu het advectief transport in rekening is gebracht en verwaarlozing van de andere horizontale transporten (zie § 3.7.3), dat positieve waarden vertikaal slibexport en de negatieve waarden vertikaalslibimport inhouden. Het valtransport is een exportterm en het verticale turbulente transport is bijna altijd een importterm. 4 tot 1 uur voor de stroomkentering is er een stabiele situatie, de import is gelijk aan de export. Er zal geen slib van de bodem eroderen of sedimenteren. Dat er geen slib sedimenteert is te verklaren omdat de stroomsnelheid dan veel hoger is dan de kritische sedimentatiesnelheid. Dat er geen slib erodeert moet betekenen dat er op de bodem geen slib meer beschikbaar is omdat de stroomsnelheid veel hoger is dan

— kunnen
dan?

de kritische erosiesnelheid. Het water is namelijk nog lang niet verzadigd aan slib. Het geconsolideerde slib wordt in het hierbeschreven erosieproces buiten beschouwing gelaten. Uit een bodemanalyse van 1977[De Loof; 30], waarbij met behulp van een van Veenhapper een bodemonster van de bovenste 10-15 cm. genomen is, blijkt dat de bodem ter plaatse van de meetlokatie slibarm is. Vermeldt dient te worden dat de monsters random in de getijdencyclus genomen zijn.

resultaten bodembemonstering:

$D_{50} \approx 150 - 200 \mu m$

zandfractie $\approx 90 - 95\%$

slibfractie $\approx 1 - 3\%$

Aangenomen wordt dat het slib dat op de bodem ongeconsolideerd is op de meetlokatie en dat dit in suspensie zal komen. Rond de stroomkenteringen (1 uur voor tot 1 uur na) vindt men positieve waarden hetgeen overeenkomt met vertikaal slibexport (valtransport > turbulent transport). Het turbulent transport neemt immers rond stroomkentering af omdat de turbulentie afneemt. Net na de stroomkenteringen (1-2,5 uur) vindt men negatieve waarden. Er moet vertikaal slibimport zijn. De turbulentie neemt net na de stroomkentering toe en er is als gevolg van de sedimentatie rond de stroomkentering ongeconsolideerd slib beschikbaar op de bodem. Het turbulente transport wordt groter dan het valtransport totdat er geen ongeconsolideerd slib meer op de bodem aanwezig is.

Op 870312 is in de Westerscheldemond voornamelijk een concentratieafname in landwaartse richting waar te nemen. Dit betekent advectief voor de vertikaal slibimport tijdens de vloedstroom en advectief slibexport tijdens de ebstroom. De gevonden concentratiegradient geeft echter geen juist beeld van de concentratiegradient verder landinwaarts in het estuarium, waar voornamelijk een concentratieafname in zeewaartse richting waar te nemen is (zie ook fig. 7 voor estuaria in het algemeen).

Rond de kenteringen, als het turbulent transport zeer klein wordt, komt de transportvalsnelheid op de verschillende diepteniveaus goed overeen met de waarden bepaald volgens de valsnelheidsbepaling van Krone. Een toenemende transportvalsnelheid bij toenemende diepte oplopend van $\approx 0,5 \text{ mm/s}$ op 3 m. onder het wateroppervlak tot $\approx 2,0 \text{ mm/s}$ op 3 m. boven de bodem. Op 60% is de waarde ongeveer $1,2 - 1,3 \text{ mm/s}$. Deze waarden moeten vergeleken worden met de valbuismetingen omdat deze alleen op 60% diepte zijn uitgevoerd. Uit de valbuismetingen volgde een transportvalsnelheid van $0,43 \text{ mm/s}$ hetgeen een factor 3 verschilt met de hier bepaalde waarden. Dit verschil is te verklaren uit de vlokafbraak door monsternamen. Bij de aannamen behorend bij fig. 13 is eveneens een factor 3 verschil gevonden in de transportvalsnelheid als gevolg van vlokafbraak tijdens de monsternamen. De daar gebruik-

te aannamen voor vloekafbraak zijn realistisch (zie bijlage 25). De aangenomen cumulatieve valsnelheidsverdeling had eveneens een realistisch verloop wat onder andere blijkt uit de realistische transportvalsnelheid die daaruit bepaald is welke redelijk overeenkomt met de waarden welke zijn gevonden in § 3.3.5 voor 60% diepte.

§ 3.7.7 Turbulentie metingen

X Zoals reeds eerder is vermeld, zijn de turbulentie metingen uitgevoerd met behulp van de akoestische snelheidsmeter Vektor Akwa. Op verschillende punten in de vertikaal is gedurende 10 minuten met een bemonsteringsfrequentie van 10 Hz een driedimensionaal snelheidsveld gemeten. De frequentie is 10 Hz genomen opdat wervels die afmetingen hebben groter dan λ_{taylor} tijdens een stroomsnelheid van 2 m/s nog waargenomen worden.

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{\text{taylor}} \approx 0,1 \lambda \\ \lambda \approx 0,2 \text{ waterdiepte} \\ \text{waterdiepte} \approx 20 \text{ m} \end{array} \right\} \lambda_{\text{taylor}} \approx 0,4 \text{ m}$$

[Booij; 24]

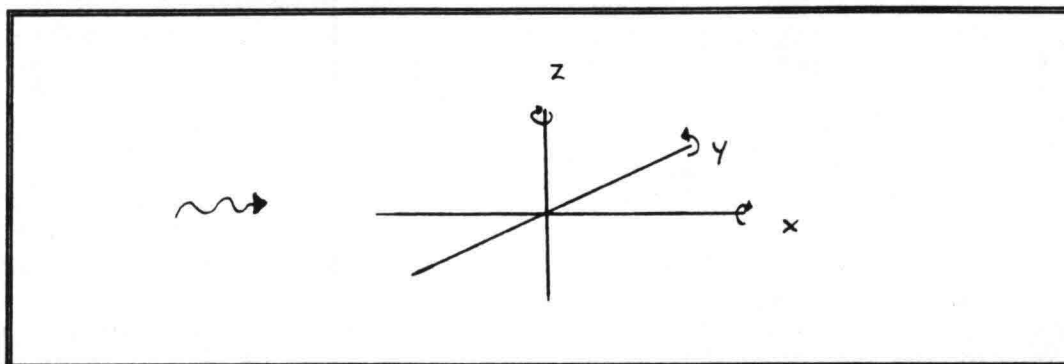
X Bij een stroomsnelheid van 2 m/s en uitgaande van de hypotese van de bevroren turbulentie wordt de frequentie van het aantal passerende wervels met de afmeting 0,4 m 5 Hz. Dit kan nog net waargenomen worden door te bemonsteren met een frequentie van 10 Hz. Het meetvolume (meetlijnen van 30 cm, zie fig. 20) is een beperking om in deze situatie met hogere frequenties, overeenkomend met wervels met kleinere afmetingen, te bemonsteren.

dit wervel met
Taylor meet
je niet meer

De Vektor Akwa was gemonteerd op een in de stroom richtend meetlichaam dat vanaf het meetschip door de vertikaal bewogen werd. Het meetinstrument had hierdoor geen gefixeerde positie zoals normaal bij turbulentie metingen gebruikelijk is. Om te komen tot een snelheidsverloop als waargenomen op een gefixeerde positie zijn de richting en de hellingen van het meetlichaam ook met een frequentie van 10 Hz geregistreerd (zie fig 20.1).

De translaties van het meetlichaam werden niet geregistreerd. Om deze translaties zoveel mogelijk te voorkomen is het meetlichaam verzwaard en heeft het een klein aanstroomoppervlak. Tevens zijn de metingen uitgevoerd tijdens zeer rustig weer zodat de scheepsbewegingen gering waren.

Fig. 20.1 Gemeten parameters bij de turbulentiemetingen



De resultaten voldoen op het moment van dit schrijven nog lang niet. Voornamelijk de voor de hellingen gecorrigeerde snelheden in de y en z-richting en de hieruit afgeleide parameters zoals de schuifspanningen hebben onrealistische waarden. Gemiddelde verticale snelheden van 0,1 m/s komen in de resultaten regelmatig voor (zie bijlagen 26 en 27). Twee factoren kunnen hiervan de oorzaak zijn namelijk:

1. Fouten in de computerverwerking door onjuiste correctie van de snelheden voor de hellingen
2. De optredende translaties

Gezien de grootte van de afwijkingen en het feit dat de gecorrigeerde snelheden in de y en z-richting erg gevoelig zijn voor fouten in de verwerking lijkt punt 1 voorlopig de belangrijkste oorzaak.

De enige parameters die een realistische waarde hebben zijn de parameters die betrekking hebben op de stroming in de x-richting (hoofdstroomrichting). Deze parameters zijn ook niet zo gevoelig voor fouten in de verwerking. De turbulentieintensiteit is daarom toch gebruikt om een indicatie te geven. De intensiteiten zijn voor de verschillende diepten tegen de tijd uitgezet in de bijlagen 10 en 17. Er zijn een aantal opvallende details namelijk:

- de hogere intensiteit met vloed ten opzichte van eb
- de ongeveer even hoge intensiteit rond doodtij en springtij ondanks de grote verschillen in de stroomsnelheden
- de relatief weinig afgenomen intensiteiten rond de stroomkenteringen.

Behalve bovenstaande resultaten lijkt het op het moment van schrijven niet zinvol meerdere bewerkingen met de gegevens, zoals het bepalen van de verticale turbulente transporten, uit te voeren.

onduidelijke
diepten?

§ 3.7.8 Foutenanalyse

De berekende transportvalsnelheden met de slibmassabalans bevatten fouten. Deze fouten ontstaan door aanamen in de modellering en ten gevolge van de meetfout-doorwerking in de berekening. In deze paragraaf zal globaal de doorwerking van de meetfouten in de transportvalsnelheid bekeken worden. De transportvalsnelheid is bepaald aan de hand van onderstaande relatie.

$$[WS_{transport}]_z = - \underbrace{(1/[c]_z) \int_z^h \delta c / \delta t \, dz}_{[1]} - \underbrace{(1/[c]_z) \int_z^h u \delta c / \delta x \, dz}_{[2]} +$$

$$(1/[c]_z) [\epsilon_{zz} \delta c / \delta z]_z$$

[3]

De berekening van de verschillende termen [1], [2] en [3] is discreet volgens:

$$[1] = \underbrace{(c_{t2} - c_{t1})}_{\text{in de}} \underbrace{\Delta z}_{\text{breedening}} / (\Delta t \, c_z)$$

c_{t1}, c_{t2} = slibconcentratie op $t1$
 respectievelijk $t2$ [kg/m^3]
 Δz = diepte punt onder water-
 oppervlak [m]
 Δt = $t2 - t1$ [s]
 c_z = concentratie op punt z
 meter onder het waterop-
 pervlak op $t=t1 + 1/2 \Delta t$ [kg/m^3]

$$[2] = (c_z - c_1) u \Delta x / (\Delta x \, c_z)$$

c_1, c_2 = concentratie op lokatie
 1(Delta), 2(Argus) [kg/m^3]
 u = stroomsnelheid op lokatie
 1 [m/s]
 Δx = afstand in stromingsrich-
 ting(x) tussen lokaties [m]

$$[3] = \overline{u'w'} \quad z(C_{z2} - C_{z1}) / ((u_{z2} - u_{z1}) \Delta z \quad C_x)$$

$\overline{u'w'}$ = covariantie op punt z meter onder oppervlak [m^2/s^2]

C_{z1}, C_{z2} = concentratie op punt $z \pm \frac{1}{2} z$ meter onder wateroppervlak [kg/m^3]

u_{z1}, u_{z2} = stroomsnelheid op boven vermeldde punten [m/s]

De fouten in x , z en t worden verwaarloosd. De fout in de stroomsnelheid wordt op 5% geschat en de fout in $\overline{u'w'}$ op 5% [West&Knight; 31]. De fout in de concentratie wordt geschat op 10%. Door 2 maal toepassing van een lopend-tijdsgemiddelde over 3 waarden zal deze fout afnemen. Voor de bepaling van deze fout wordt aangenomen dat het om een bepaling van het steekproefgemiddelde en de steekproefvariantie uit een normale verdeling gaat. Dan geldt

$$Var \quad \overline{c} \approx \sigma^2/n$$

$Var \quad \overline{c}$ = steekproefvariantie
 σ = standaardafwijking
 n = aantal proefnemingen

in verder rekening houden met t -verdeling a.w.m. geringe aantal waarnemingen?

Twee maal middeling over 3 waarden levert een verkleining van de standaardafwijking met een factor $\sqrt{3}$. In de foutenanalyse zal nu verder uitgegaan worden van een fout in de slibconcentratiebepaling van $10/3 \approx 3\%$.

Per term, [1], [2] en [3], zal eerst de relatieve fout bepaald worden. Vervolgens worden deze waarden gebruikt om de relatieve fout in de transportvalsnelheid te bepalen.

$$\frac{\Delta WS_1}{WS_1} = \sqrt{\frac{\Delta(C_{z2} - C_{z1})^2}{(C_{z2} - C_{z1})^2} + \frac{\Delta(\Delta t)^2}{\Delta t^2} + \frac{\Delta(\Delta z)^2}{\Delta z^2} + \frac{\Delta C_x^2}{C_x^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{\Delta C_{z2}^2 + \Delta C_{z1}^2}{(C_{z2} - C_{z1})^2} + \frac{\Delta C_x^2}{C_x^2}}$$

de kinematische fouten voorplantingswet moet gebruikt worden!

de rest is dus niet goed (bke 58,59,60)

Aangenomen wordt dat $\Delta C_{t2} = \Delta C_{t1}$ en $C_{t2} - C_{t1} = 0,1 C_{t1}$. Nu volgt

$$\frac{\Delta WS_1}{WS_1} = \sqrt{\frac{2(\Delta C_{t1})^2}{(0,1 C_{t1})^2} + \frac{\Delta C_x^2}{C_x^2}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,03^2}{0,1^2} + \frac{0,03^2}{1,0^2}} = 0,63 \sqrt{0,181} = 0,42$$

Voor de tweede term volgt uitgaande van dezelfde aannamen als bij de eerste term

$$\frac{\Delta WS_2}{WS_2} = \sqrt{\frac{\Delta(C_2 - C_1)^2}{(C_2 - C_1)^2} + \frac{\Delta u^2}{u^2} + \frac{\Delta(\Delta z)^2}{\Delta z^2} + \frac{\Delta(\Delta x)^2}{\Delta x^2} + \frac{\Delta c_x^2}{c_x^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{2\Delta C_1^2}{0,1^2} + \frac{\Delta u^2}{u^2} + \frac{\Delta c_x^2}{c_x^2}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,03^2}{0,1^2} + \frac{0,05^2}{1,0^2} + \frac{0,03^2}{1,0^2}} = 0,68 \sqrt{9,183} = 0,43$$

De slibconcentraties zijn op 870319 op de lokatie van de Argus bepaald aan de hand van de zwevende stof gehalten. In de op deze wijze bepaalde slibconcentraties kunnen grote fouten optreden die in de tweede term doorwerken. Aangenomen wordt dat de fout in de slibconcentraties bepaald uit de zwevend stof gehalten 20% is (zie bijlagen 4 en 11 voor de afwijkingen). Voor de relatieve fout in de tweede term volgt nu

$$\frac{\Delta WS_2}{WS_2} = \sqrt{\frac{(0,03c_x)^2 + (0,2c_x)^2}{0,1c_x^2} + \frac{0,05u^2}{u^2} + \frac{0,03c_x^2}{c_x^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,03^2 + 0,2^2}{0,1^2} + \frac{0,05^2}{1,0^2} + \frac{0,03^2}{1,0^2}} = 2,38 = \sqrt{6,09} = 2,02$$

De derde term geeft als relatieve fout

$$\frac{\Delta WS_3}{WS_3} = \sqrt{\frac{\Delta u'w'}{u'w'}^2 + \frac{\Delta(\Delta z)^2}{\Delta z^2} + \frac{\Delta(C_{x2}-C_{x1})^2}{C_{x2}-C_{x1}^2} + \frac{\Delta(\Delta z)^2}{\Delta z^2} + \frac{\Delta(u_{x2}-u_{x1})^2}{u_{x2}-u_{x1}^2} + \frac{\Delta c_x^2}{c_x^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{\Delta u'w'}{u'w'}^2 + \frac{\Delta(C_{x2}-C_{x1})^2}{C_{x2}-C_{x1}^2} + \frac{\Delta(u_{x2}-u_{x1})^2}{u_{x2}-u_{x1}^2} + \frac{\Delta c_x^2}{c_x^2}}$$

Aangenomen wordt dat $\Delta C_{x2} = \Delta C_{x1}$, $\Delta u_{x2} = \Delta u_{x1}$, $C_{x2} - C_{x1} = 0,1 C_{x1}$ en $u_{x2} - u_{x1} = 0,1 u_{x1}$ zodat volgt

$$\frac{\Delta WS_3}{WS_3} = \sqrt{\frac{\Delta u'w'}{u'w'}^2 + \frac{2\Delta C_{x1}^2}{0,1C_{x1}^2} + \frac{2\Delta u_{x1}^2}{0,1u_{x1}^2} + \frac{\Delta c_x^2}{c_x^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,05^2}{1,0^2} + \frac{2 \times 0,03^2}{0,1^2} + \frac{2 \times 0,03^2}{0,1^2} + \frac{0,03^2}{1,0^2}} = 1,68 \sqrt{0,86} = 0,93$$

Eerst zal de fout bepaald worden van de sommatie van WS_1 en WS_2 welke in de bijlagen 9 en 16 staan. Vervolgens zal bepaald worden hoe groot de fout in de berekende transportvalsnelheid geweest zou zijn indien met de

resultaten uit de turbulentie metingen de verticale turbulente transporten bepaald zouden zijn. Aannamen hierbij zijn dat $ws_2 = 0,5ws_1$ en $ws_3 = 2,0ws_1$ (zie § 3.7.3). De fout welke gemaakt is bij de bepaling volgens bijlage 9 is

$$\frac{\Delta ws}{ws} = \frac{0,02}{0,63ws_1} + \frac{0,03}{0,68ws_2} = \frac{0,03}{1,5ws_1} = 0,02 \quad 0,42$$

Voor bijlage 16 volgt

$$\frac{\Delta ws}{ws} = \frac{0,02}{0,63ws_1} + \frac{2,02}{2,38ws_2} = \frac{1,43}{1,5ws_1} = 1,21 \quad 0,95$$

Indien de turbulente transporten inbegrepen zouden zijn wordt de relatieve fout voor de meting rond doortij

$$\frac{\Delta ws}{ws} = \frac{0,02}{0,63ws_1} + \frac{0,03}{0,68ws_2} + \frac{0,03}{1,68ws_3} = \frac{2,49}{3,5ws_1} = 1,21 \quad 0,71$$

Voor de meting rond springtij volgt dan voor de relatieve fout

$$\frac{\Delta ws}{ws} = \frac{0,02}{0,63ws_1} + \frac{2,02}{2,38ws_2} + \frac{0,03}{1,68ws_3} = \frac{3,29}{3,5ws_1} = 1,48 \quad 0,94$$

De fouten zijn voornamelijk het gevolg van de doorwerking van de meetfouten in de stroomsnelheid en de slibconcentratie in hun afgeleiden naar t, x en z. Zouden de meetfouten in de stroomsnelheid en slibconcentratie afnemen tot 1% dan zouden de relatieve fouten de volgende grootte hebben.

$$\left. \begin{aligned} \Delta ws_1/ws_1 &= 0,21 \\ \Delta ws_2/ws_2 &= 0,23 \\ \Delta ws_3/ws_3 &= 0,25 \end{aligned} \right\} \quad 0,35 \quad 0,17, 9\%$$

De fout in de valsnelheid is afgenomen tot 35%. Ondanks dat de meetnauwkeurigheid 1% is voor de belangrijke parameters is de totale fout nog redelijk groot.

§ 3.8 Conclusies

Algemeen

*Om de bezinking te berekenen door middel van vermenigvuldiging van een valsnelheid, een concentratie en een oppervlak moet voor de valsnelheid de transportvalsnelheid gebruikt worden. Voor verdelingen met een grote range in de afzonderlijke valsnelheden van de deeltjes zoals oa bij gedeeltelijk geflocculeerd slib is dit een noodzaak (§ 3.4.2).

*De transportvalsnelheid is bijna altijd groter dan de mediane valsnelheid, welke onterecht vaak gebruikt wordt om de bezinking te berekenen (§ 3.4.2).

*De toename ten gevolge van flocculatie van de transportvalsnelheid is relatief veel groter dan de toename in de mediane valsnelheid (§ 3.5).

*De gebruikte valbuis/monstername apparatuur is ongeschikt om de transportvalsnelheid van sterk geflocculeerd slib te bepalen. De bepaling van de mediane valsnelheid in deze mengsels is wel goed mogelijk (§ 3.5).

Westerscheldemon

*De uit de gemeten concentratievertikalen bepaalde transportvalsnelheden (1,0-3,0 mm/s) rond de stroomkentering zijn het gevolg van de grote vlokvorming in de Westerscheldemon (§ 3.6 en 3.7.5).

*De mediane valsnelheid is ongeveer 0,1-0,2 mm/s (§ 3.5)

*Rond de stroomkentering is de transportvalsnelheid lineair afhankelijk van de slibconcentratie (cq de diepte). Deze relatie is afhankelijk van de tijdsafgeleide van de oppervlaktestroomsnelheid rond de stroomkentering. Deze tijdsafgeleide is een maat voor het tijdsinterval rond de stroomkentering waarin de sterke flocculatie plaatsvindt. (§ 3.5 figuur 15 en 15.1)

X *De turbulentieintensiteit is ongeveer even groot rond de stroomkenteringen in de springtij-doodtij cyclus. Ondanks de grote verschillen in de slibconcentraties zijn de transportvalsnelheden rond de stroomkentering met springtij slechts iets groter dan rond de stroomkentering met doodtij. De produktie van vlokken door turbulentie is een constante faktor in het flokkulatieproces rond de stroomkentering. Dit combinerend met de duidelijke relatie van de transportvalsnelheid met de tijdsafgeleide van de oppervlaktestroomsnelheid leidt tot de conclusie dat de tijdsduur waarin verminderde vlokafbraak plaatsvindt een belangrijke parameter is in het flocculatieproces rond de stroomkentering. Door deze afname in de vlokafbraak zal de range van de deeltjesverdeling groter worden waardoor er meer differential settling plaats zal vinden (§ 3.6 en 3.7).

*De slibconcentratie en de stroomsnelheid moeten zeer nauwkeurig gemeten worden om met behulp van een balans de valsnelheid met een aanvaardbare fout te bepalen. De fout in de meetwaarden zal ongeveer rond de 1% moeten liggen om de fout in de valsnelheid te beperken tot 35% (\$ 3.7.8) .

hervin

*De transportvalsnelheid net boven de bodem rond de stroomkentering, welke vaak in modellen gesubstitueerd moet worden bedraagt voor de Westerscheldmond tussen de 2,0 en 4,0 mm/s.

17%

Wat kort

7

De invloeden van de slibconcentratie en de grootte van het tijdsinterval, waarin sterke flocculatie optreedt, elimineren elkaar grotendeels zodat de transportvalsnelheid onder de verschillende omstandigheden tijdens de verschillende stroomkenteringen redelijk constant blijft.

Hst. 4 SLIBTRANSPORT IN DE OOSTERSCHELDE

§ 4.1 Inleiding

Met behulp van de kennis en waarden over de sedimentatie(val)snelheden beschreven in hoofdstuk 3 en met behulp van het $\mu\lambda$ -model beschreven in hoofdstuk 2 zullen voor de Oosterschelde enige slibtransporten berekend worden. De transporten zullen berekend worden voor de raaien, vakgrenzen overeenkomend met het ecologisch model van de Oosterschelde (zie bijlage 22). De transporten dienen als invoer voor dit model [Klepper; 26]. Zowel van voor 1986 als na 1986 zullen enige slibtransporten bepaald worden met behulp van de concentratiegegevens van uitgevoerde drijfvermetingen [Ten Brinke; 27] en met behulp van de stroomgegevens berekend met het IMPLIC model. IMPLIC is een 2-dimensionaal computermodel voor bepaling van debieten. Deling door de stroomdoorsnede geeft de gemiddelde stroomsnelheid in de stroomdoorsnede. Deze stroomsnelheid is ook een van de uitgangspunten bij de berekening volgens het $\mu\lambda$ -model is. De slibtransportbepalingen worden uitgevoerd voor verschillende valsnelheden.

De hieruit volgende resultaten zullen vergeleken worden met de resultaten van Ten Brinke. Deze heeft de slibtransporten bepaald aan de hand van een sedimentatie-erosie balans. De balans is opgesteld voor deeltjes in de bodem met een diameter kleiner dan 16 μm .

§ 4.2 Invoergegevens voor μ -model

De door W. Ten Brinke gebruikte drijfvermetingen zijn samen met de IMPLIC gegevens de basis voor de hier te bepalen slibtransporten. De parameters welke met deze gegevens voor het $\mu\lambda$ -model gebruikt worden zijn (zie {4}):

$$\begin{matrix} C_{\text{max}} \\ A_{\text{m}} ; h \end{matrix}$$

De bepaling van het snelheidsverloop uit de drijfvermetingen is erg onnauwkeurig [Ten Brinke; 27]. Dit is een reden dat hier gebruik gemaakt wordt van het IMPLIC-model. Voor de valsnelheid zullen de volgende waarden aangenomen worden, 1;2 en 3 mm/s. Voor de raai tussen de

X waarom zou je voor $\mu\lambda$ -model ook niet uitgaan van de balansvergelijking?

Noordzee en het mondingsgebied wordt het transport in de 3 hoofdgeulen bepaald. Voor de raai tussen het mondingsgebied en het middengebied en tussen het middengebied en het komgebied worden de transporten in de 2 hoofdgeulen bepaald. Tussen het middengebied en het Keeten-Mastgat wordt het transport voor de enige hoofdgeul bepaald. Om de verplaatsingssnelheid van een verticale laag loodrecht op de stromingsrichting te bepalen is gebruik gemaakt van een meebewegend assenstelsel.

§ 4.3 Resultaten slibtransportbepaling

De berekende slibtransporten voor respectievelijk na 1986 staan in bijlage 24. In alle geulen, met uitzondering van de vloedgeul bij de kom, is een zeewaarts slibtransport berekend.

De slibtransporten naar de kom in de vloedgeul zijn berekend met $U_s = 0,4$ m/s. Voor de andere geulen zijn de waarden gebruikt van $U_s = 0,5$ m/s. Voor de slibbalans van de Oosterschelde zullen alleen waarden worden gebruikt welke zijn berekend met een valsnelheid van 2 mm/s. Deze waarde voor de valsnelheid komt goed overeen met de resultaten in de Westerscheldemond waarin de omstandigheden overeenkomen met de Oosterschelde van voor 1986. De sommaties van de slibtransporten voor de verschillende geulen resulteren in netto transporten per jaar door de raaien/vakgrenzen zoals aangegeven in tabel 8.

Tabel 8 *Berekende slibtransporten door de vakgrenzen voor 1986*

van	naar	10 ⁴ ton/jaar
Mondinggebied	Noordzee	65
Middengebied	Mondingsgebied	54
Keeten-Mastgat	Middengebied	8
Middengebied	Komgebied	0,7

Deze waarden komen goed overeen met de waarden van Ten Brinke met uitzondering van de transporten vanuit het Keeten-Mastgat (bijlage 23). De cijfers van Ten Brinke zijn grotendeels bepaald door de sedimentatie en de erosie van de geulen. Deze erosie/sedimentatie blijkt een zeer grote rol te spelen in de slibbalans van de Oosterschelde. Indien met behulp van de in tabel 8 gegeven

transporten een slibbalans wordt opgesteld, resulteert dit in een netto sedimentatie en erosie in de vakken zoals aangegeven in de tabel 9.

Tabel 9 Berekende netto sedimentatie/erosie in de vakken voor 1986

vak	sedimentatie	erosie *10 ⁴ ton/jaar
Mondingsgebied		11
Middengebied		47
Keeten-Mastgat		8 minus aanvoer uit het Volkerak
Komgebied	0,7	

De erosie is het grootst in het Middengebied. Alleen in het Komgebied vindt (geringe) sedimentatie plaats. Ook deze waarden komen goed overeen met de resultaten van Tenbrinke.

Na 1986 zijn nog een klein aantal drijfvermetingen uitgevoerd. De slibconcentraties waren sterk afgenomen. Ondanks de concentratieafname zijn de hiermee berekende slibtransporten op enkele plaatsen sterk toegenomen. Dit is het gevolg van de afgenomen stroomsnelheden en de hieruit afgeleide verplaatsingen(λ). De berekende transporten(zie tabel 10) voor de situatie na 1986 zijn gebaseerd op slechts een drijfvermeting per raai.

Tabel 10 Berekende slibtransporten door de vakgrenzen na 1986 (gebaseerd op slechts een drijfvermeting * drijfvermeting is uitgevoerd voor de sluiting van de Philipsdam)

van	naar	10 ⁴ ton/jaar
*Mondingsgebied	Noordzee	41
*Middengebied	Mondingsgebied	91
Keeten-Mastgat	Middengebied	12
*Middengebied	Komgebied	88

De hieruit bepaalde sedimentatie en erosie hoeveelheden staan in tabel 11.

bij de deze cijfers past ook wel een nauwkeurigheid beschouwing

W

Tabel 11 Berekende netto sedimentatie/erosie in de vakken
na 1986 (gebaseerd op slechts een drijvermeting
*drijvermeting is uitgevoerd voor de sluiting
van de Philipsdam)

vak	sedimentatie	erosie *10 ⁴ ton/jaar
*Mondingsgebied	50	150
*Middengebied		
*Keeten-Mastgat	12	
*Komgebied	88	

De berekende erosie in het Middengebied is groter dan voor 1986. In het Mondingsgebied en het Keetenastgat zou op basis van deze berekeningen nu sedimentatie plaatsvinden terwijl voor 1986 erosie plaatsvond.

§ 4.4 Toekomstverwachting

Door de sluiting van de Oosterschelde en de compartimenteringsdammen is de waterbeweging in het bekken verandert. De verandering in de waterbeweging versterkt het slibexporterende karakter van de Oosterschelde indien uitgegaan wordt van het $\mu\lambda$ -model. Voor de sluitingen kwam het geëxporteerd slib hoofdzakelijk uit de geulbodems door erosie (Ten Brinke; 27). Voorspellingen over de morfologie na de sluitingen geven een bijna over het gehele bekken verspreide sedimentatie in de geulen te zien (Kohsiek; 32). Verwacht wordt dat de erosie van slib uit de geulbodems hierdoor zal verdwijnen. Indien de andere erosiebijdragen verwaarloosd worden betekent dit dat er geen export uit het bekken op kan treden ondanks het slibexporterende karakter van de waterbeweging. Om met behulp van het $\mu\lambda$ -model een indicatie te geven van de stationaire situatie met gelijkblijvende jaargemiddelde slibtransporten in het bekken zijn de volgende aannamen gedaan:

- het Komgebied en het Keeten-Mastgat zijn slibvangers. Dit zijn gebieden waar het slib sedimenteert. Er vindt daar geen bruto erosie plaats.

- in het Middengebied en het Mondingsgebied vindt geen netto erosie of sedimentatie plaats

Evenwicht is nu mogelijk als de import in het Middengebied gelijk is aan de export naar het Keeten-Mastgat en het Komgebied. De import van slib moet uit het Mondingsgebied plaatsvinden. Gezien het slibexporterende karakter van de waterbeweging is dit alleen mogelijk indien de

slibconcentratie in het Middengebied veel lager is dan in het Mondingsgebied. De concentratie in het Mondingsgebied zal lager moeten zijn dan in de Noordzee om tot import van slib in de Oosterschelde te komen. Uit de aannamen volgt dat het materiaal dat in het Komgebied en het Keeten-Mastgat zal sedimenteren uit de Noordzee moet komen. Gezien de vele aannamen zal het hier geschetste beeld niet geheel overeenkomen met de werkelijke stationaire transportsituatie die in de toekomst in de Oosterschelde zal zijn, maar het geeft een indicatie van de toekomstige situatie.

LITERATUURLIJST

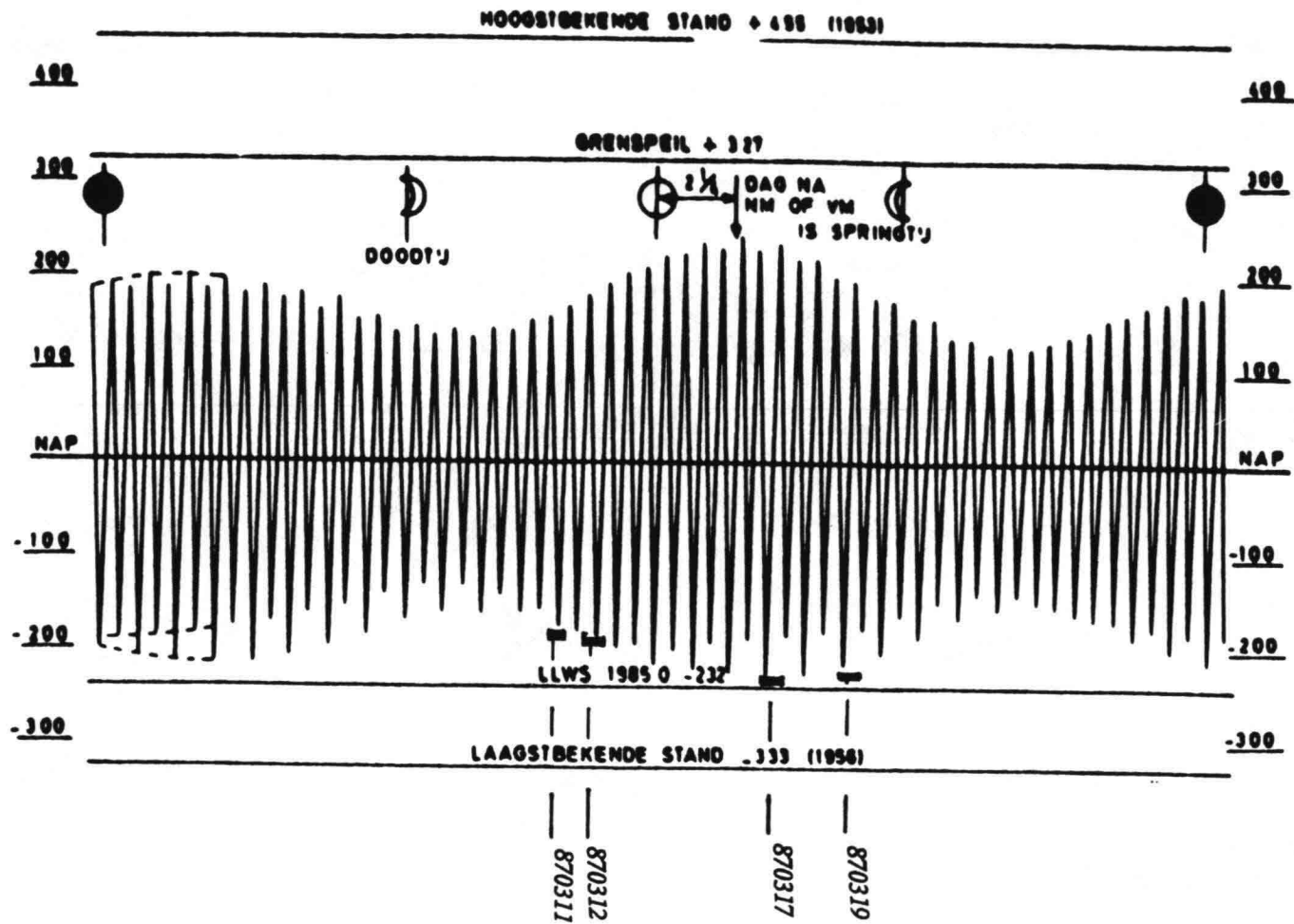
1. Elgershuizen, J.H.B.W.;1982 Eerste interimrapport van het deelprojekt BALANS-TRANSPORT
2. Eisma, D.;1986 Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries, Netherlands Journal of Sea Research 20 : 183-199
3. Oosterbaan, N.;1986 Working with nature on the Slufter disposal site, Terra et Aqua 33 : 7-12
4. Dronkers, J.;1985 Tide-induced residual transport of fine sediment, Proceedings International Symposium Physics of Shallow Estuaries and Bays, Miami 228-244
5. Terwindt, J.H.J.;1967 Mud transport in the Dutch delta area and along the adjacent coastline, Netherlands Journal of Sea Research 3 : 505-531
6. Postma, H.;1967 Sediment transport and sedimentation in the marine environment, Estuaries 158-179
7. Smith, D.;1984 The hydrologie and geomorphology of tidal basins, The closure of tidal bassins 85-110
8. Amos, D.L. & Mosher, D.C.;1985 Erosion and deposition of fine grained sediments from the Bay of Fundy, Sedimentology 32 : 815-832
9. Schoemaker, H.J.;1979 Dynamica van morfologische processen, college diktaat f31 TU Delft
10. Kajihara, M.;1971 Settling velocity and porosity of large suspended particle, Journal of Oceanographical Society of Japan 27 : 158-162
11. Gibbs, R.J.;1985 Estuarine flocs: their size, settling velocity and density, Journal of Geophysical Research 90 : 3249-3251
12. Kawana, K. & Tanimoto, T.;1979 Suspended particle near the bottom in Osaka Bay, Journal of the Oceanographical Society of Japan 35 : 75-81
13. Puls, W. & Kuehl, H.;1986 Field measurements of the settling velocities of estuarine flocs, Proceedings of the 3rd International Symposium on River Sedimentation, Jackson, Mississippi, USA
14. Schubel, J.R. & Kana, T.W.;1972 Agglomeration of fine-grained suspended sediment in the Northern Chesapeake Bay, Powder Technology 6 : 9-16
15. Tackx, M. et al;1986 Consumptie door zoöplankton in de Oosterschelde, BALANS-rapport
16. Stortelder, P.;1985 De koolstofbalans in de Oosterschelde, BALANS-rapport
17. Smayda, T.J.;1969 Some measurements of the sinking rates of fecal pellets, Limnol. Oceanogr. 74 : 621-625
18. Burt, T.N.; -- Field settling velocities of estuary muds, Hydraulics Research Limitid, Wallingford

19. Owen, M.W.;1971 The effect of turbulence on the settling velocities of silt flocs, Proceedings 14th Congress International Association Hydraulic Research, Paris, Paper D4, 27-32
20. Krone, R.V.;1962 Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes, Hydraulic Engineering and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley 110 p
21. Leussen van, W.;1981 Onderzoek naar transportmechanismen van slib in zout/zoet omstandigheden nota nr. 2, WL Delft
22. Leussen van, W. & Hayes, F. & Elgershuizen, J.;1984 Oriënterende meting valsnelheden in Oosterschelde, M896 WL Delft
23. Kranenburg, C.;1985 Dichtheidsstromen, collegediktaat b81 TU Delft
24. Booy, R.;1986 Turbulentie in de waterloopkunde, collegediktaat b82 TU Delft
25. Steyaert, F. & Maldegem van, D.;1987 Poster 'Research of mud transport Westerschelde, DGW Middelburg
26. Klepper, O. & Scholten, H.;1987 A model of carbon flows in relation to macrobenthic food supply in the Oosterschelde estuary, I. model description, RWS DGW Middelburg, DIHO Yerseke
27. Ten Brinke, W.;1987 Slibtransporten in de Oosterschelde, Balans 1987-29, GWA0 87.528, RWS DGW Middelburg, DIHO Yerseke
28. Bigelow et al;1977 Protecting an estuary from floods. A policy analysis of the Oosterschelde. Vol 3 ,Assesment of long-run ecological balances. Rand(R-2121/3)Neth. ,Santa Monica pp 201-215
29. Uiterwijk-Winkel APB(1975) Microbiologische aspecten en het sedimentatiegedrag van rivierslib. RWS, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt ZW, notanr. 44.006.01
30. De Loof, D.,1980 Kaartering van de bodemsamenstelling van het westelijk gedeelte van de Westerschelde, Methode en resultaten, RWS, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Distrikt kust en zee, notanr. WWKZ 80.V009
31. West, R., Knight, W. & Shiono;1986 Turbulence measurements in Great Ouse estuary, Journal of Hydraulic Engineering vol. 112 no.3 pp.167-181
32. Kohsiek, L. et al,1987 De Oosterschelde naar een nieuw onderwaterlandschap, RWS DGW natanr DGW.AO.87.029 , Geomor 87.02

BIJLAGEN

Meetdagen in de dood-springtijcyclus te
Vlissingen[Getijtafels voor Nederland,1987]

870311	HW	11.54	1.33 m.	+NAP
	LW	18.03	1.35 m.	-NAP
870312	HW	12.43	1.67 m.	+NAP
	LW	18.55	1.57 m.	-NAP
870317	LW	9.38	2.25 m.	-NAP
	HW	15.25	2.45 m.	+NAP
870319	LW	10.49	2.20 m.	-NAP
	HW	16.33	2.38 m.	+NAP



BETREFT : Meetplan Balanstransport-meting dd. 870312
AAN : Bemanning ms Argus, ms Delta, dhr. Overmars,
dhr. Schreurs, dhr. Verlinde.
VAN : P.W. Boere DGW Middelburg

PLANNING BALANSTRANSPORT-METING

Inleiding

Op donderdag 870312 zal een 13-uursmeting plaatsvinden. De meting zal bestaan uit 2 puntmetingen (ms Delta; ms Argus) in de Westerschelde ter hoogte van Breskens. De twee meetpunten cq. meetschepen zullen circa 1000 m. van elkaar verwijderd liggen in de hoofdstroomrichting.

Op de beide punten zal de concentratie-, stroomsnelheid- en stroomrichtingvertikaal (minstens op 1 lokatie) gemeten worden. Tevens zal op de lokatie van de ms Argus turbulentie metingen verricht worden door dhr. Overmars mbv een Vektor Akwa en zal op de lokatie van de ms Delta de valsnelheid van zwevende stof bepaald worden mbv de vernieuwde Allersma tube.

Meetlokaties en -tijden

De meetlokaties liggen enigszins ten noordoosten van Breskens. Hieronder volgen de coördinaten:

ms Argus . X = 31000 Y = 382250

ms Delta X = 30000 Y = 382250

De meting zal starten om 09.00 uur en lopen tot 22.00 uur. De voorspelde waterstanden met bijbehorende tijden tijdens de meting volgen hieronder.

<u>tijd</u>	<u>waterstand</u>
09.00	
12.43	+1.67 m NAP
18.55	-1.57 m NAP
22.00	

Meetplan ms Delta

De ms Delta zal continue concentratie- en stroomsnelheidsvertikalen moeten bepalen. Daarnaast zal de valsnelheid bepaald moeten worden mbv de vernieuwde Allersma tube en zullen er watermonsters genomen worden. Hieronder volgt voor elk onderdeel een uitgebreidere beschrijving.

* Vertikaalmeting

Elke 20 minuten zal een vertikaal doorgemeten worden, wat neerkomt op 40 vertikalen voor de totale meting. De starttijd voor een vertikaalmeting zal op UU.00; UU.20 en op UU.40 uur vallen. Er zal gemeten worden vanaf het oppervlak naar de bodem (~ 20 m. onder oppervlak). De vertikaal zal op 5 punten bemeten worden op de volgende diepten.

- opp. -3 m.
- 40% diepte
- 60% diepte
- 70% diepte
- bodem +3 m.

Op elk punt zullen de volgende parameters automatisch geregistreerd worden.

- watertemperatuur
- saliniteit
- dichtheid
- stroomsnelheid
- troebelheid (2 maal)
- diepte meetset
- totale diepte
- tijd
- x,y coördinaten

Wat betreft de troebelheid dient opgemerkt te worden dat deze tot 10000 monitek eenheden bepaald moet kunnen worden. De variabelen dienen voor de verschillende schepen en meetdagen bij voorkeur op dezelfde manier gerangschikt te worden.

* Monstername

Eenmaal per uur, op het hele uur, dient er gelijktijdig met de vertikaalmeting op 5 diepten een éénlitermonster genomen te worden voor zwevende stof bepaling in het lab. Dit komt neer op 65 monsters voor de totale meting. De codering van de 65 monsters is van 2DZ1-2DZ65 volgens onderstaand schema.

	codering				diepte
tijd	09.00	10.00	11.00	12.00	
	2DZ1	2DZ6	2DZ11	2DZ16 etc	opp -3 m.
	2DZ2	2DZ7	2DZ12	2DZ17	40% diepte
	2DZ3	2DZ8	2DZ13	2DZ18	60% diepte
	2DZ4	2DZ9	2DZ14	2DZ19	70% diepte
	2DZ5	2DZ10	2DZ15	2DZ20	bodem +3 m.

* Valsnelheidsbepaling

Mbv de vernieuwde Allersmatube zal op de gebruikelijke manier de valsnelheid bepaald worden. De monsters dienen op ~60% diepte genomen te worden. Dit dient 13 maal gedaan te worden en wel op de het hele uur. De coderingscode is 2SV1-2SV104 waarbij per valsnelheidsbepaling 8 monsters worden gebruikt en in de tijd opgenummerd wordt zoals gebruikelijk was bij valsnelheidsbepalingen. In het lab zal hiervan het precieze volume en zwevend stof gehalte bepaald worden.

Meetplan ms Argus

De ms Argus zal eveneens continue concentratie- en stroomvertikalen meten en monsters aftappen. Tevens zullen op de ms Argus turbulentiemetingen verricht worden. In verband met de turbulentiemetingen dient de ms Argus zo min mogelijk te verplaatsen en dus op twee ankers te liggen. Hieronder volgt een uitgebreidere beschrijving.

* Vertikaalmeting

De vertikaalmetingen met automatische registratie zal op eenzelfde wijze plaatsvinden als op de ms Delta. De enige wijziging is dat naast stroomsnelheid ook de stroomrichting gemeten dient te worden. Ook nu moet de troebelheid tot 10000 monitek eenheden gemeten kunnen worden.

* Monstername

De monstername geschied overeenkomstig als op de ms Delta evenals de codering met de restrictie dat 2DZ1-2DZ65 vervangen wordt door 2AZ1-2AZ65.

* Turbulentiemetingen

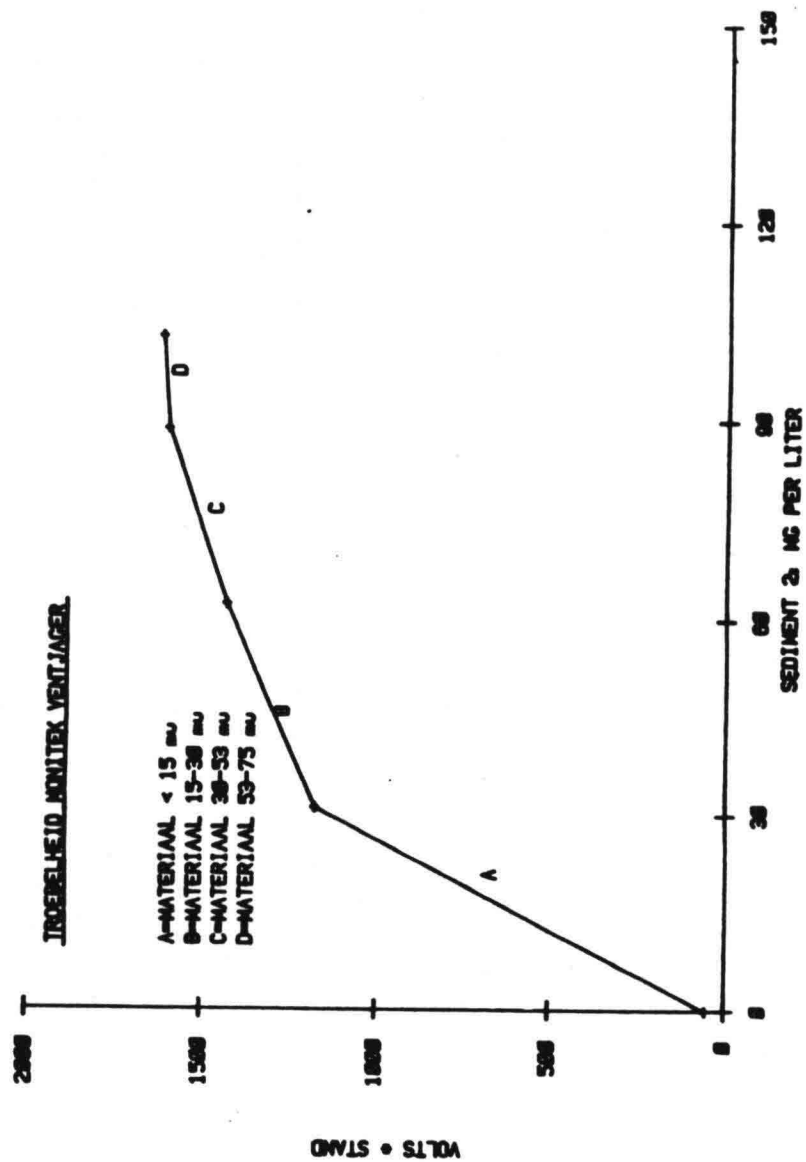
De turbulentiemetingen zullen uitgevoerd worden door de dhr. Overmars(Dir. N-Holland). De Vektor Akwa, welke gemonteerd is op een meetframe, zal door de vertikaal bewogen worden en zal op de in 'meetplan ms Delta' genoemde 5 punten turbulentie meten.

Op elk punt zal gedurende 10 minuten de snelheid, meetfrequentie 10 HZ, bepaald worden. Per uur zal ongeveer een vertikaal doorgemeten worden. Dit komt neer op totaal 13 vertikalen.

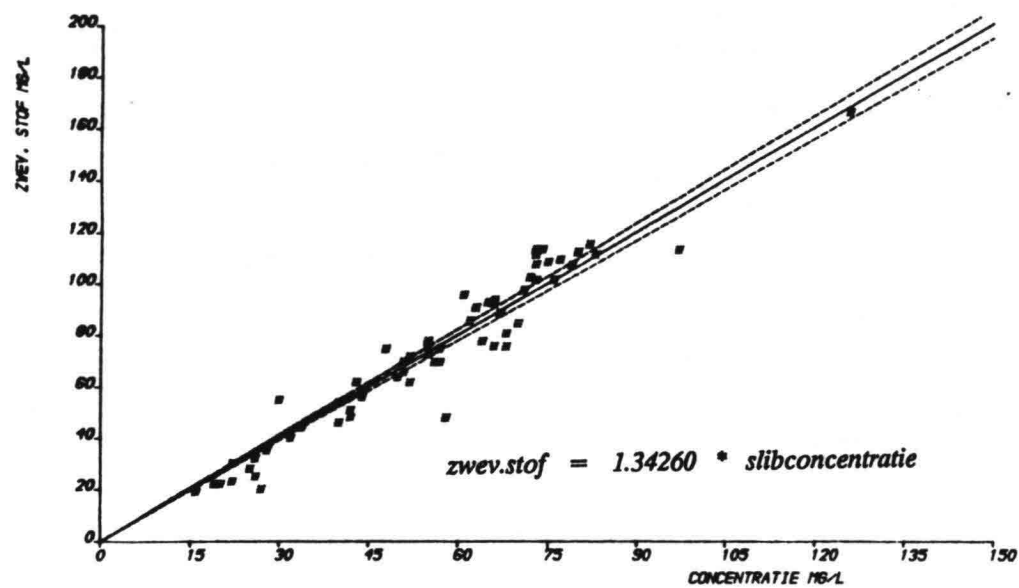
Troebelheidsverloop monster na
toevoeging van achtereenvolgens

30 mg/l A
30 mg/l B
30 mg/l C
10 mg/l D

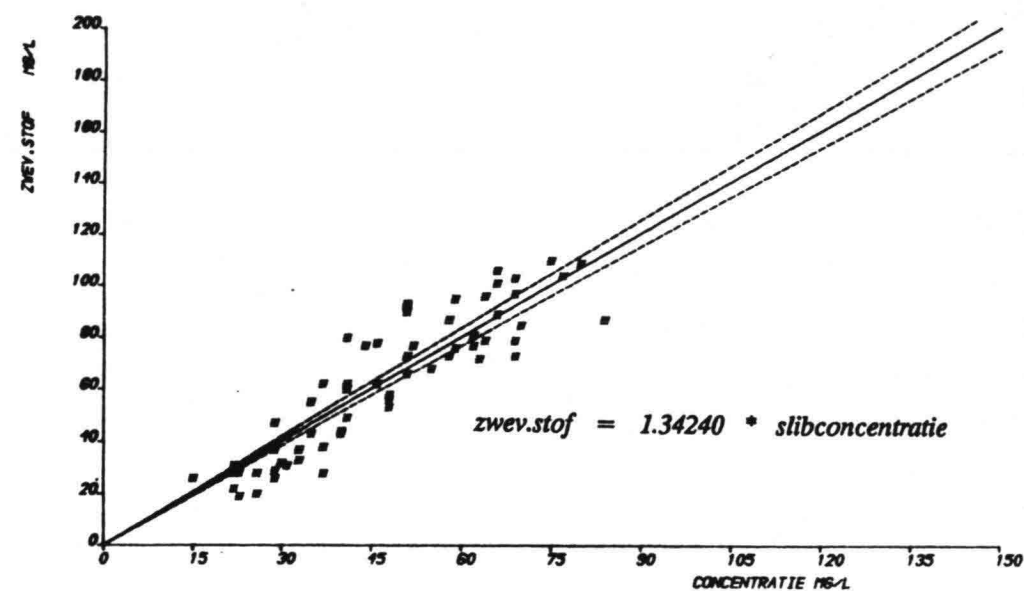
[Notitie DDMI 85.129]



meting 870312 2½ dag na doodtij

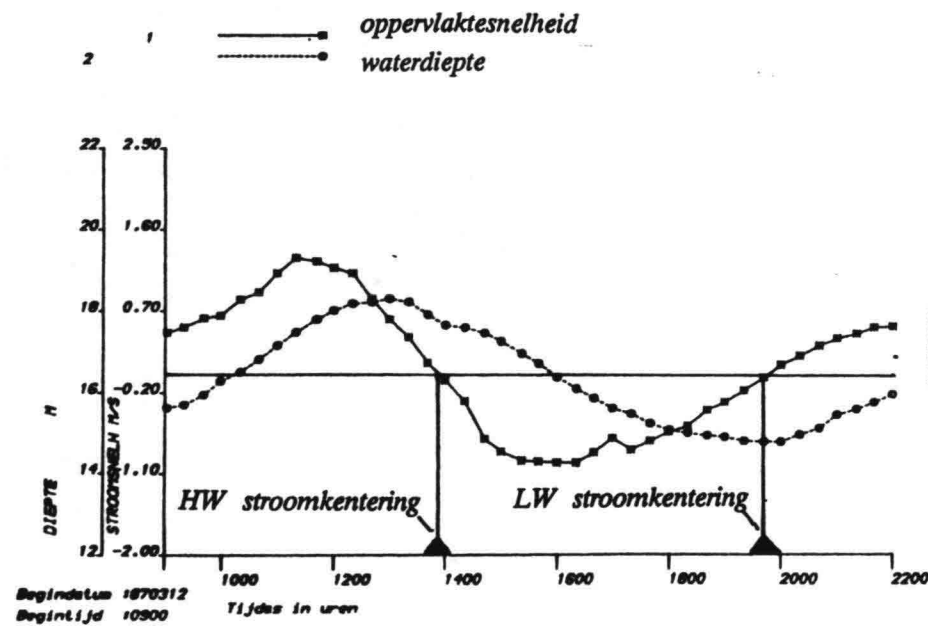


meetlokatie Delta(zie fig.)

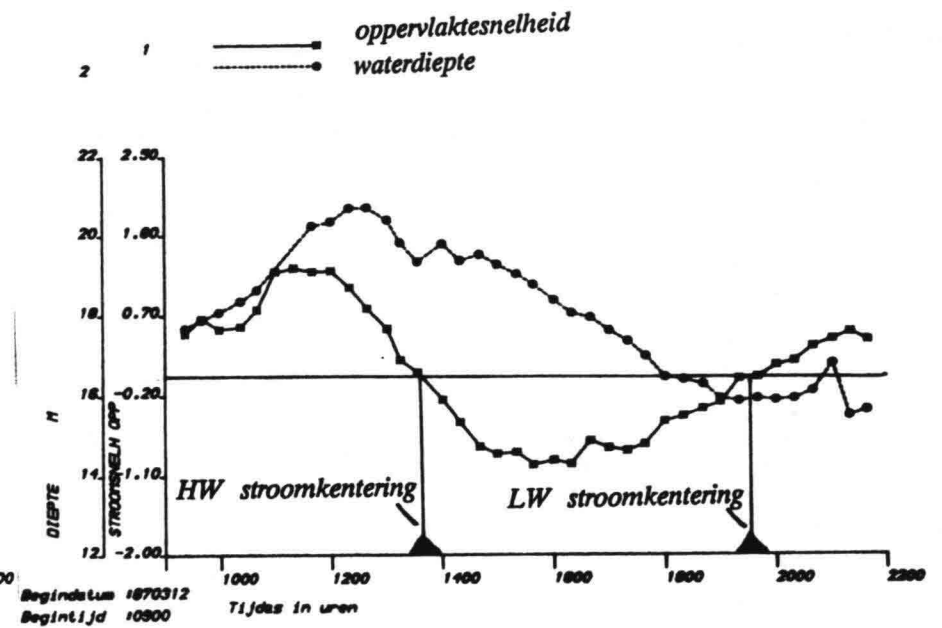


meetlokatie Argus

meting 870312 2½ dag na doodtij



Delta



Argus

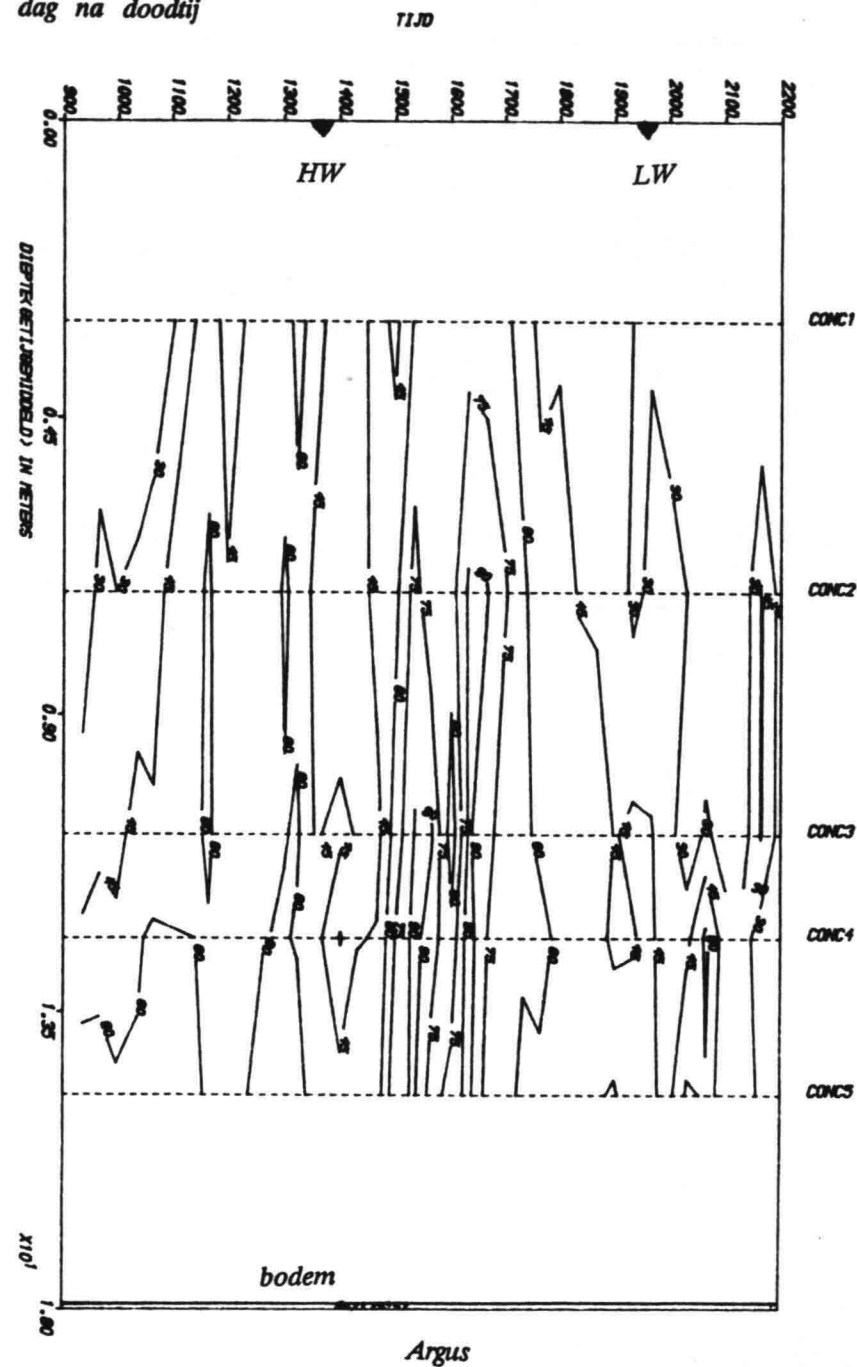
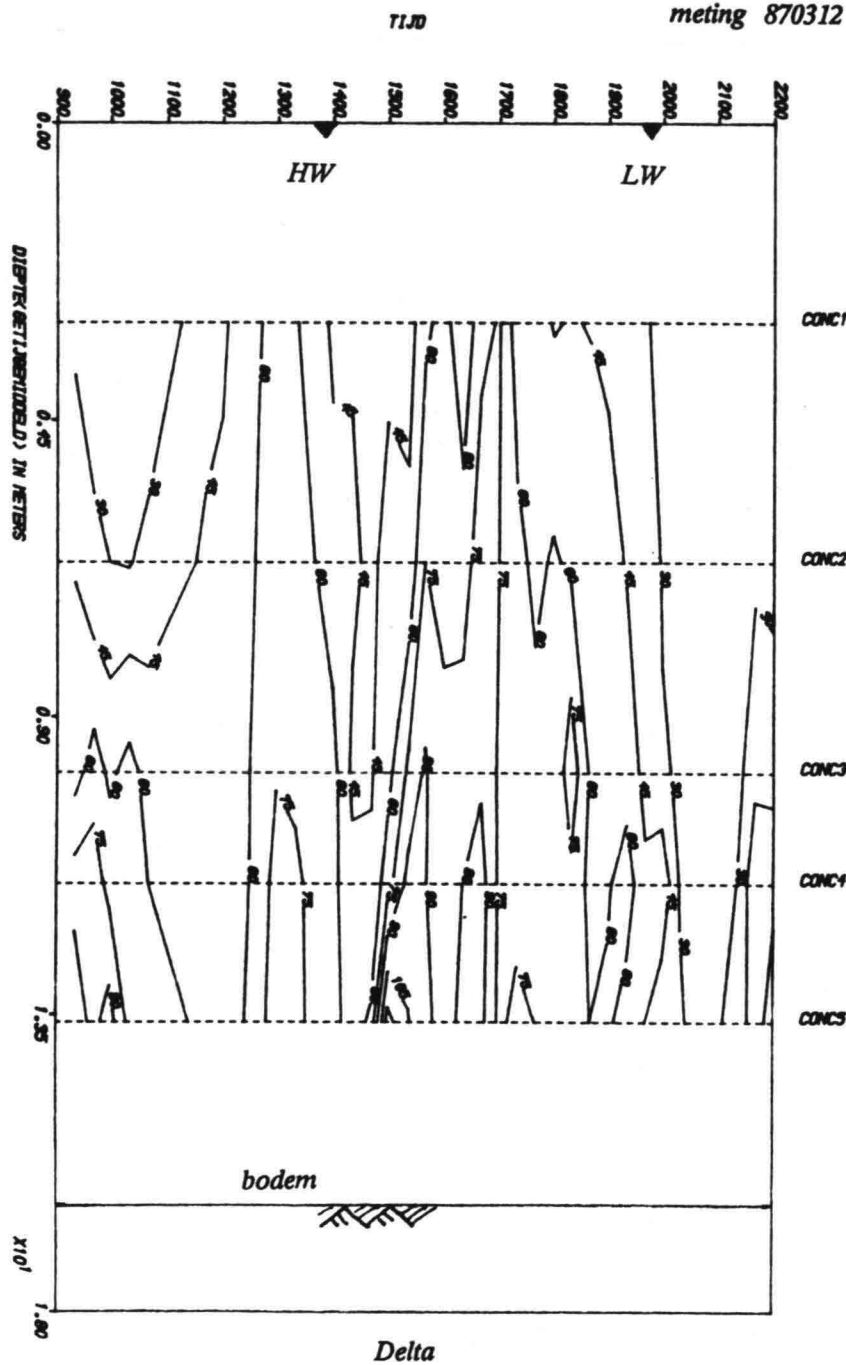
+ is stroming het estuarium in

concentratieisoplethen
uitgaande van getij-
gemiddelden meetdiep-
ten (stippellijnen)

slibconcentratie
in mg/l

in stappen van
15 mg/l met een
minimum van 30 mg/l

▼ s stroomkentering

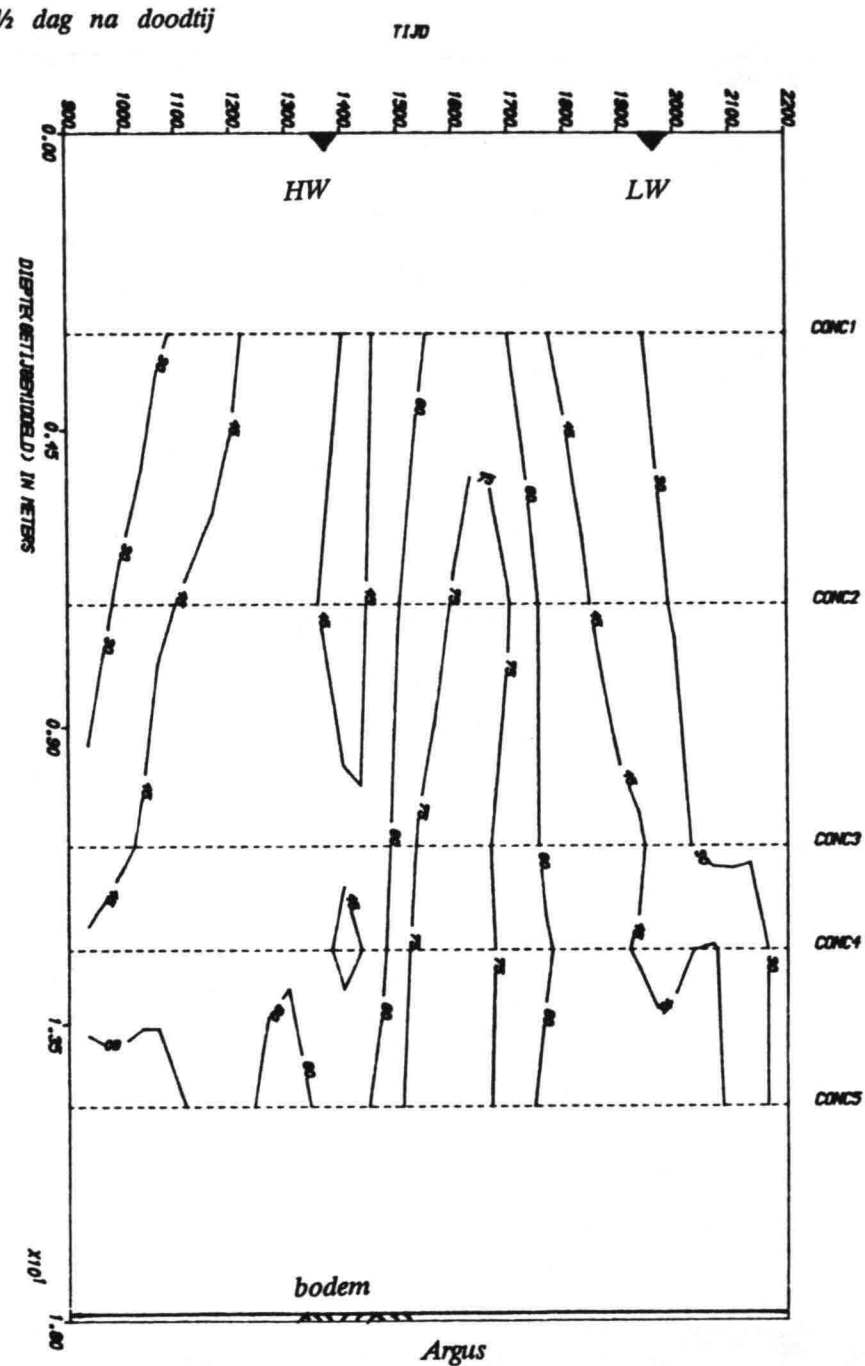
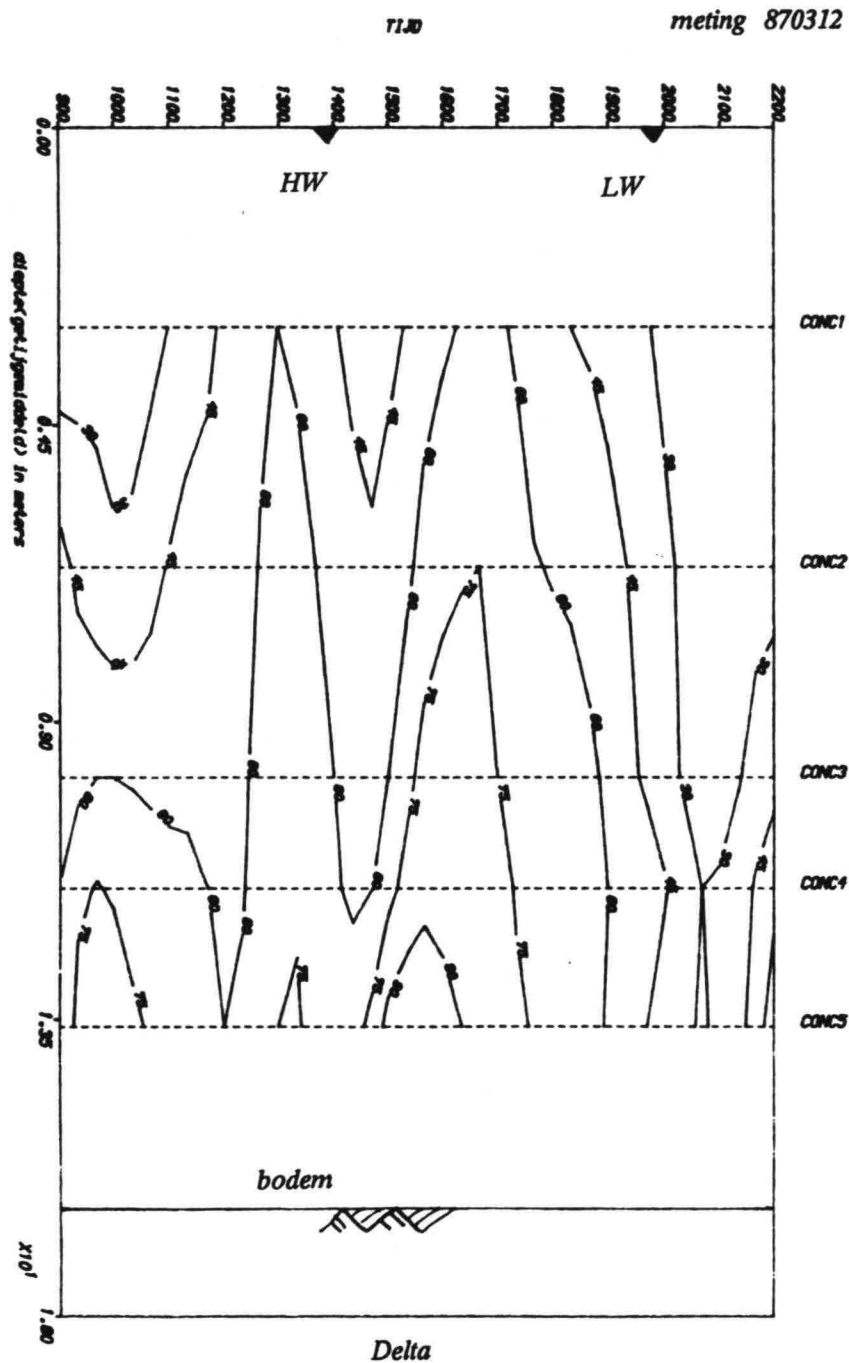


concentratieisoplethen
nadat twee maal het
lopend uurgemiddelde
is bepaald uit de con-
centraties in de voor-
gaande bijlage.

slibconcentratie
in mg/l

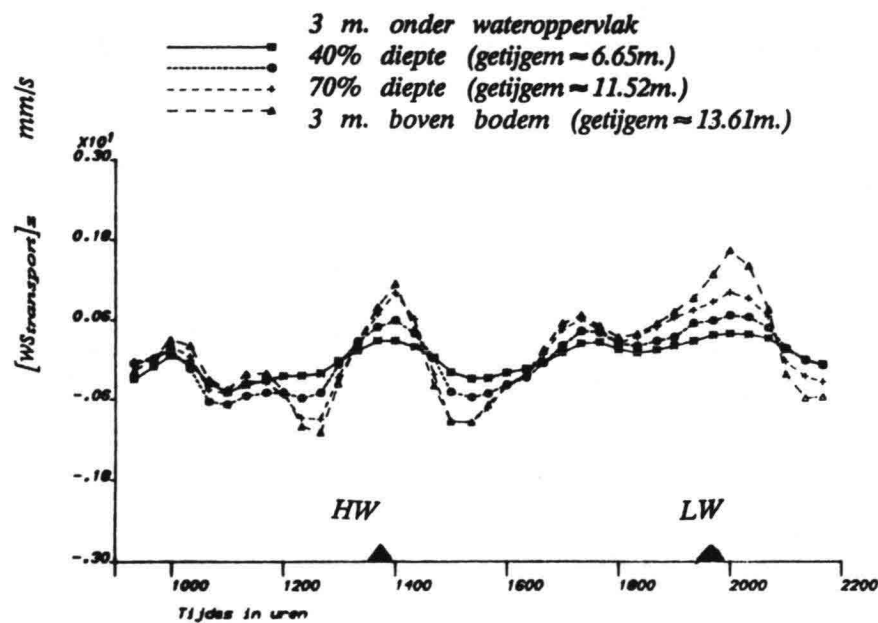
in stappen van
15 mg/l met een
minimum van 30 mg/l

▼ α stroomkentering

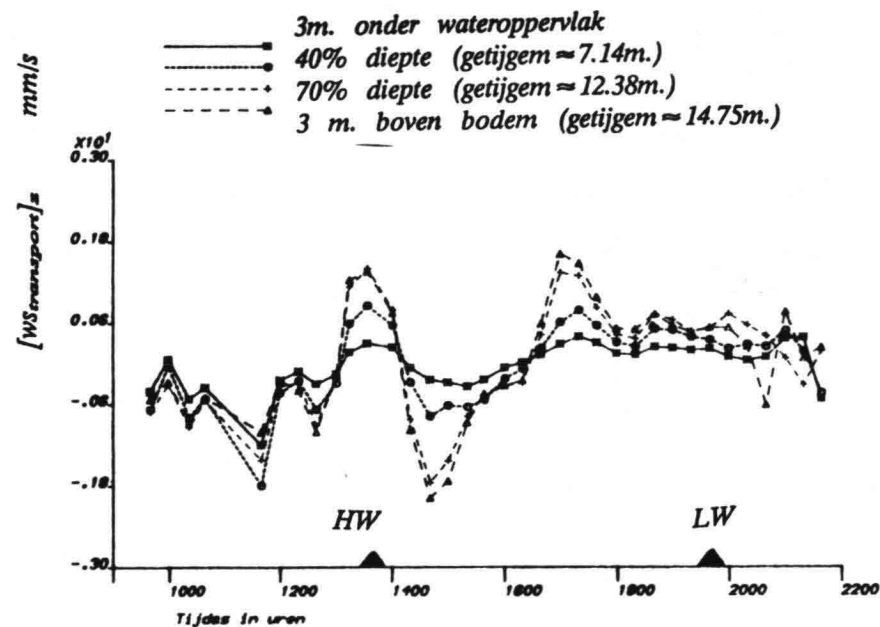


▲ = stroomkentering

meting 870312 2½ dag na doortij



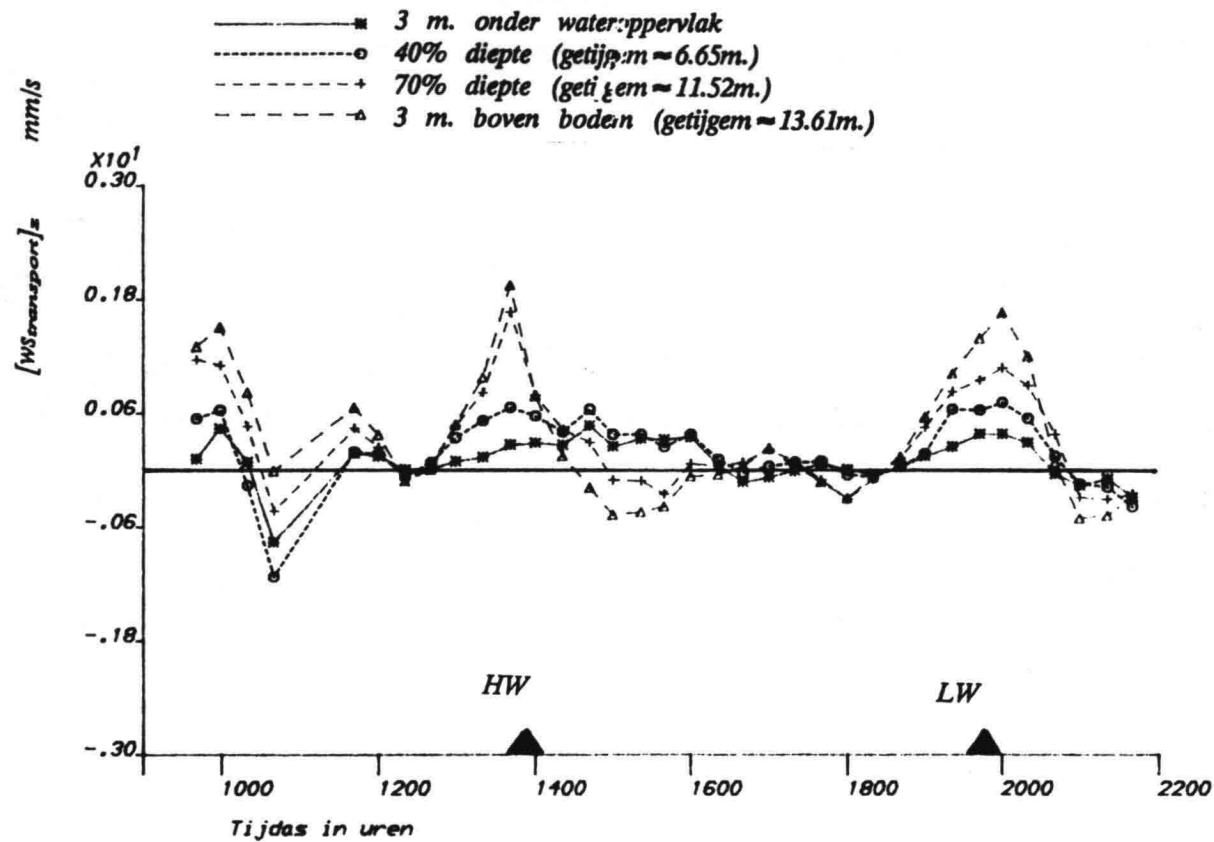
Delta



Argus

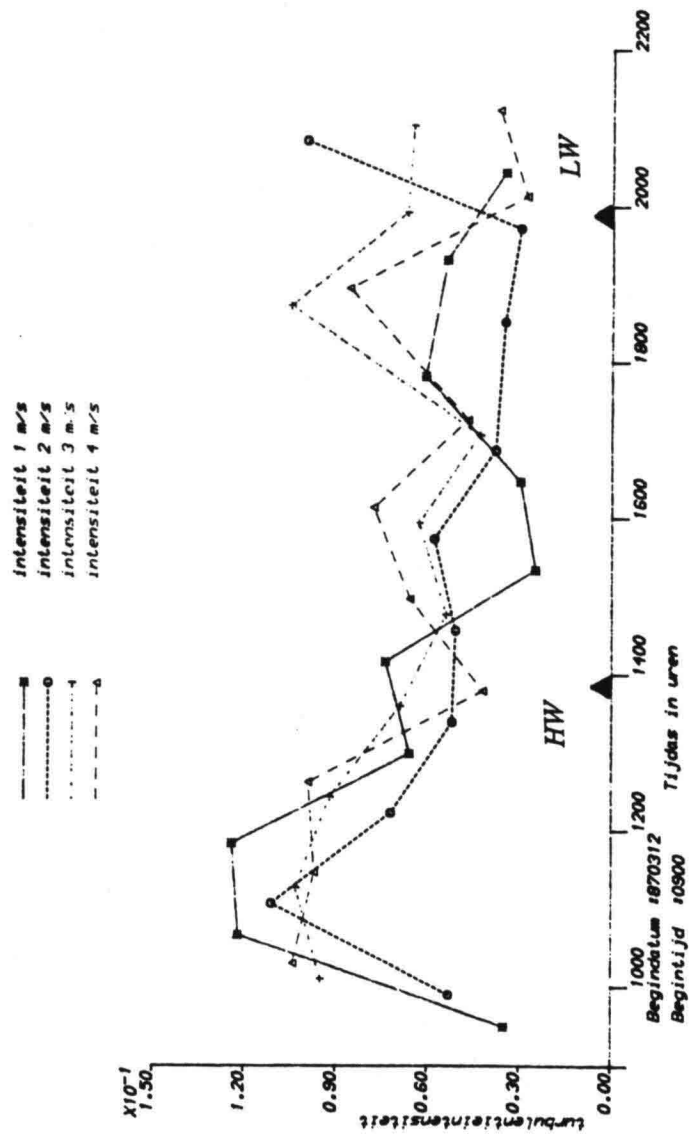
$$[WS_{transport}]_z = -1/[c]_z \cdot \sum_z^h \frac{\partial c}{\partial t} dz$$

meting 870312 2½ dag na doottij



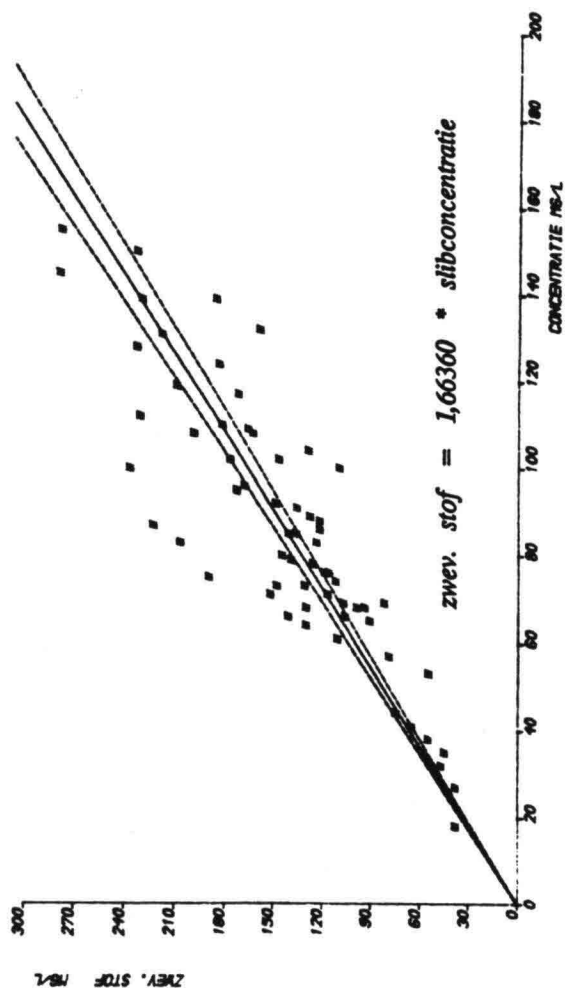
▲ = stroomkentering

$$[WS_{transport}]_z = -1/[c]_z * \sum_z^h \delta c / \delta t \, dz - 1/[c]_z * \sum_z^h u * \delta c / \delta x \, dz$$

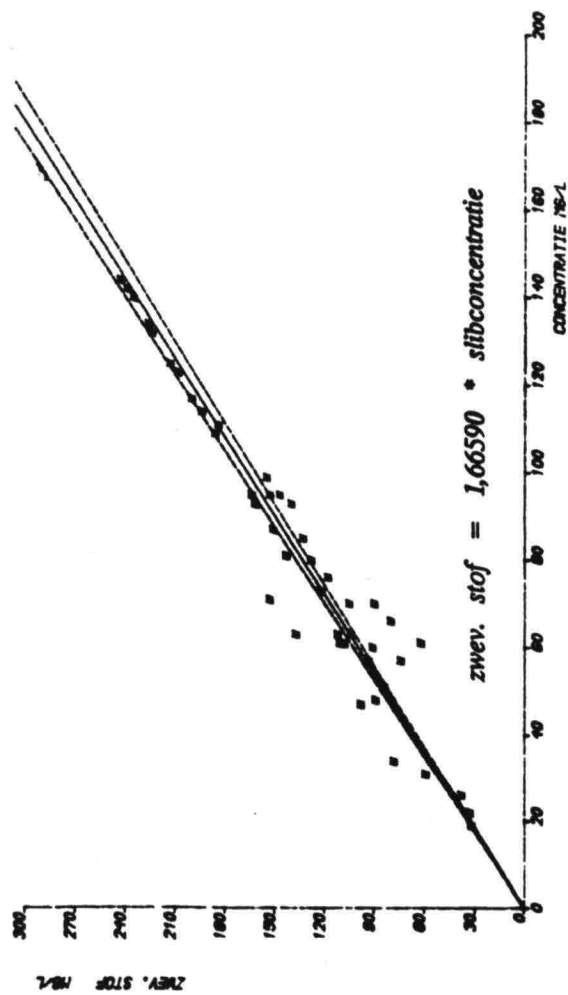


▲ = stroomkentering

meting 870319 2 dagen na springtij

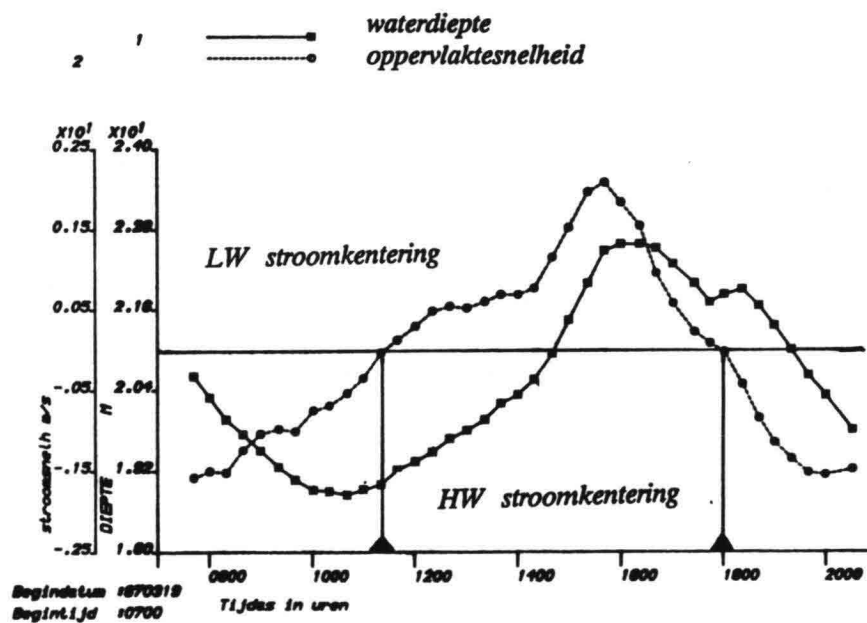


meetlokatie Delta

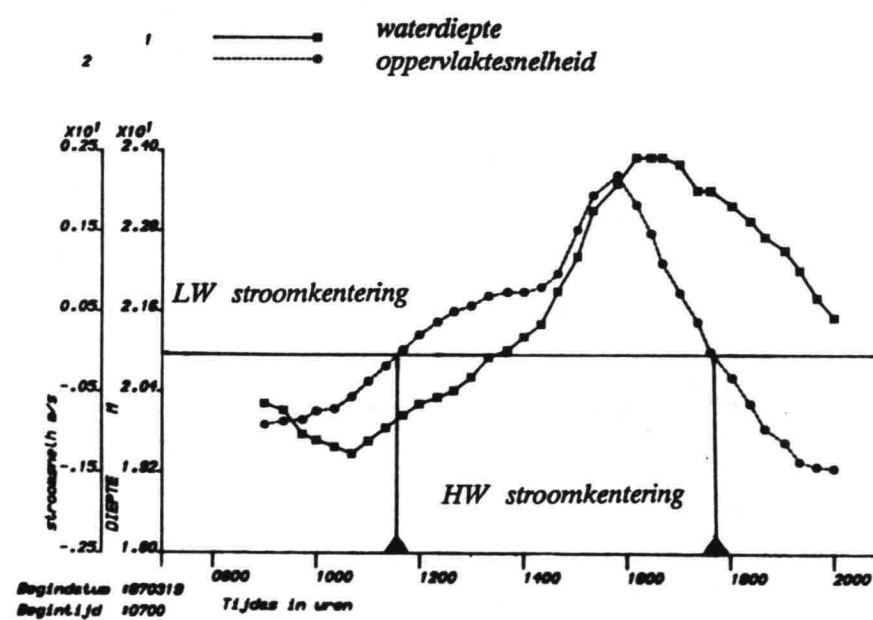


meetlokatie Argus

meting 870319 2 dagen na springtij



Delta



Argus

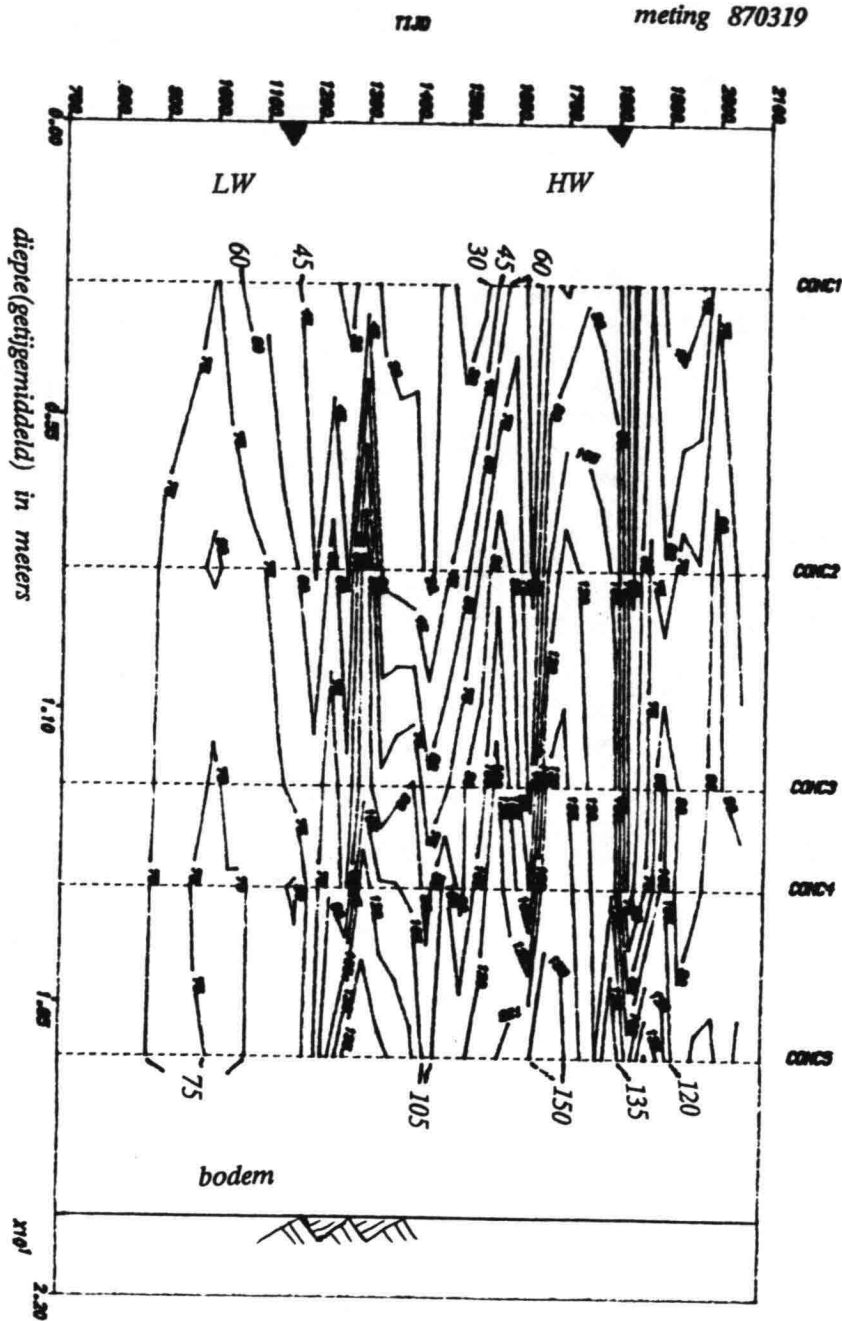
+ is stroming het estuarium in

concentratieisoplethen
uitgaande van getij-
gemiddelde meetdiep-
ten (stippellijnen)

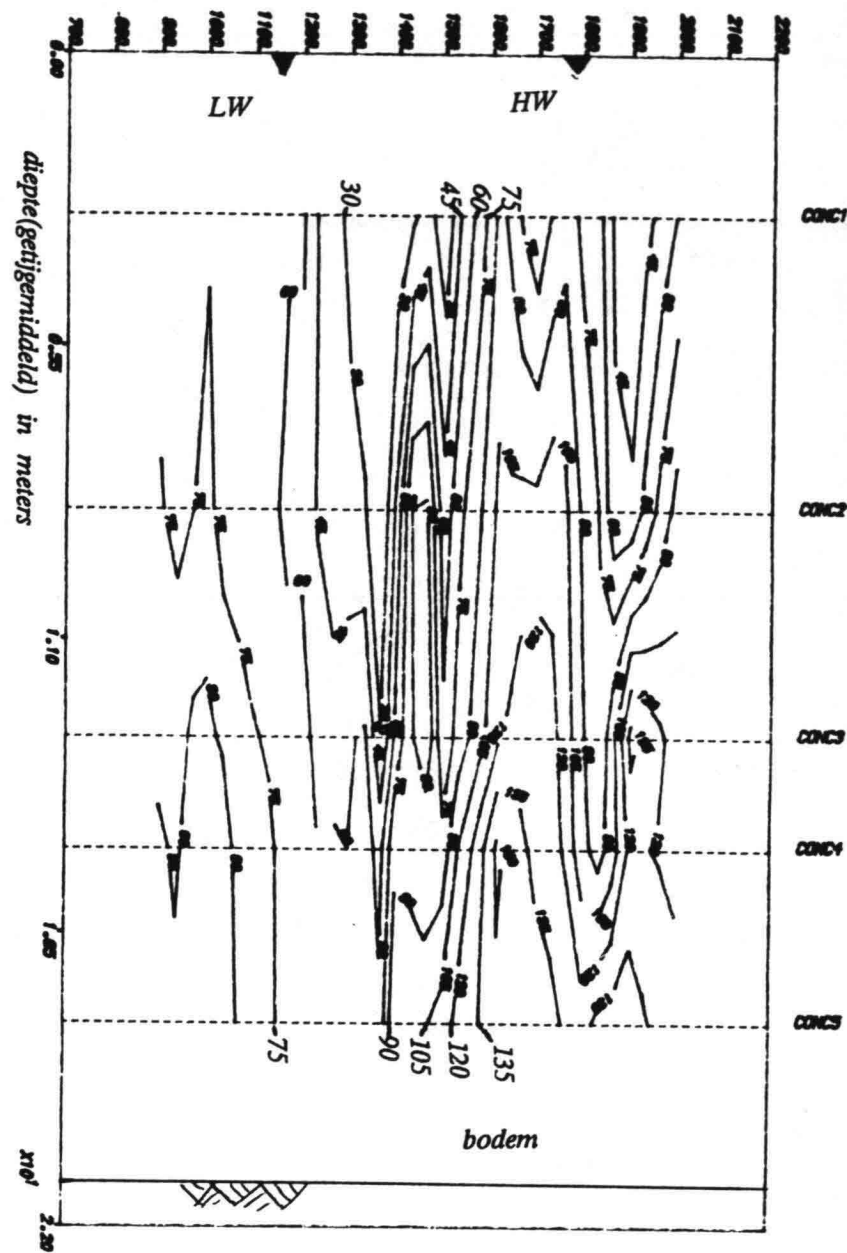
slibconcentratie
in mg/l

in stappen van
15 mg/l met een
minimum van 30 mg/l

▼ = stroomkentering



Delta



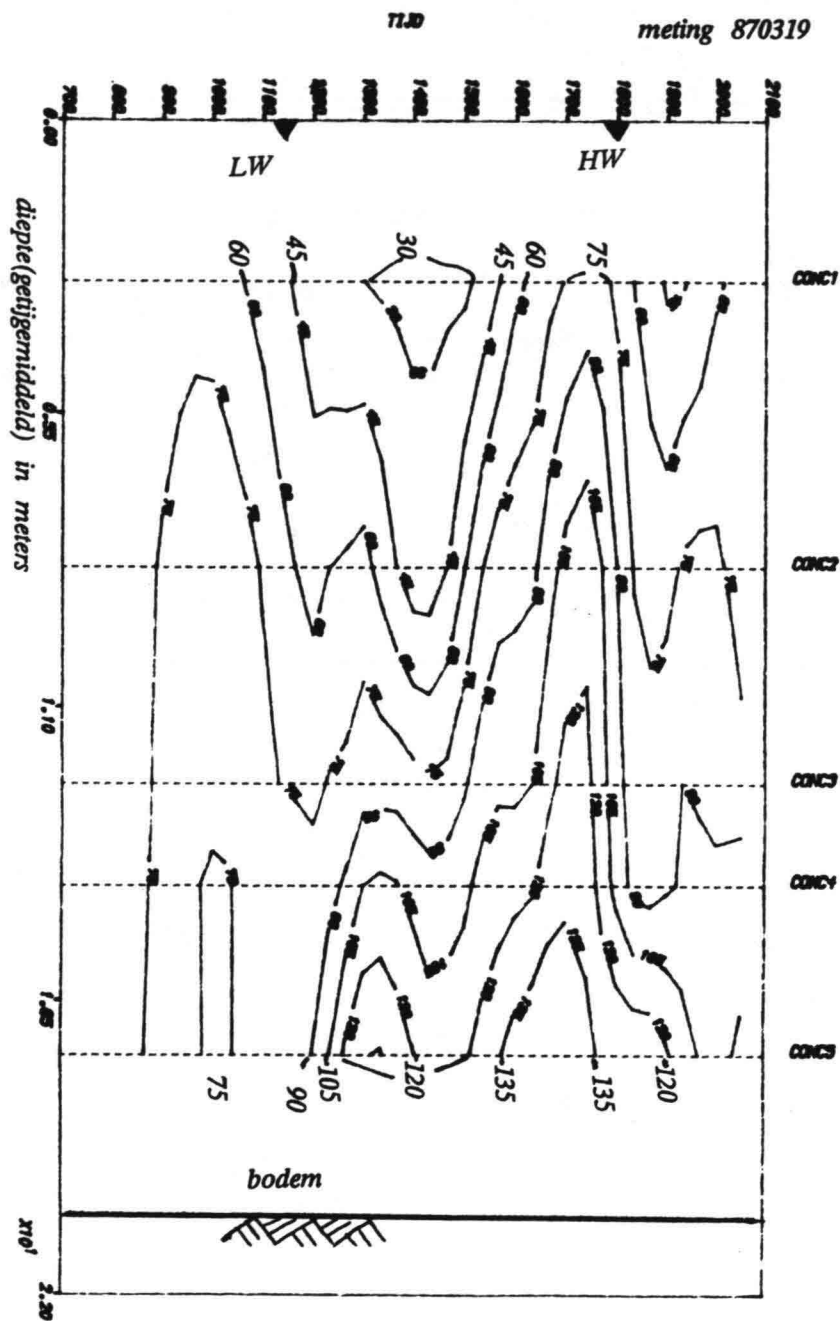
Argus

concentratieisoplethen
nadat twee maal het
lopenduurgemiddelde
is bepaald uit de con-
centraties in de voor-
gaande bijlage

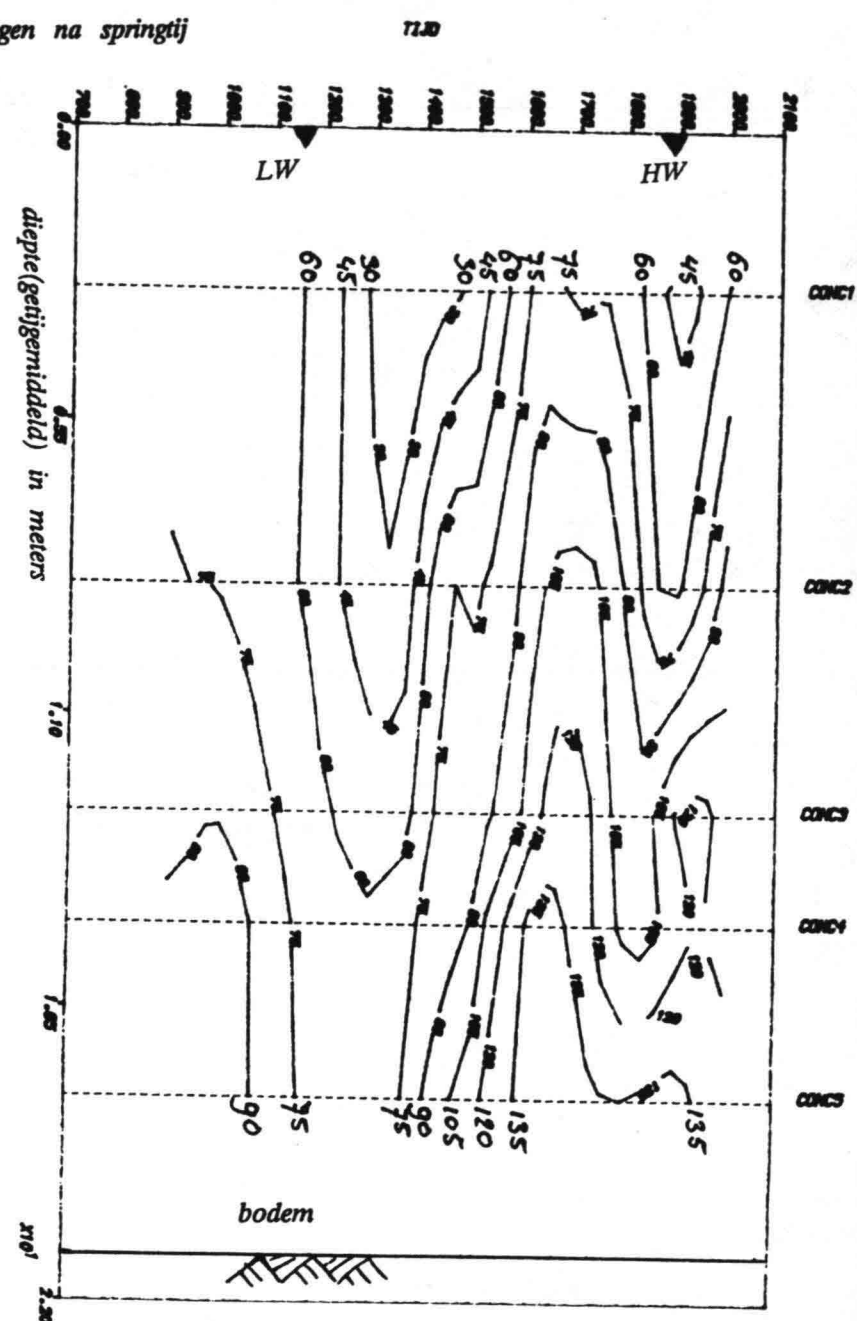
slibconcentratie
in mg/l

in stappen van
15 mg/l met een
minimum van 30 mg/l

▼ = stroomkentering

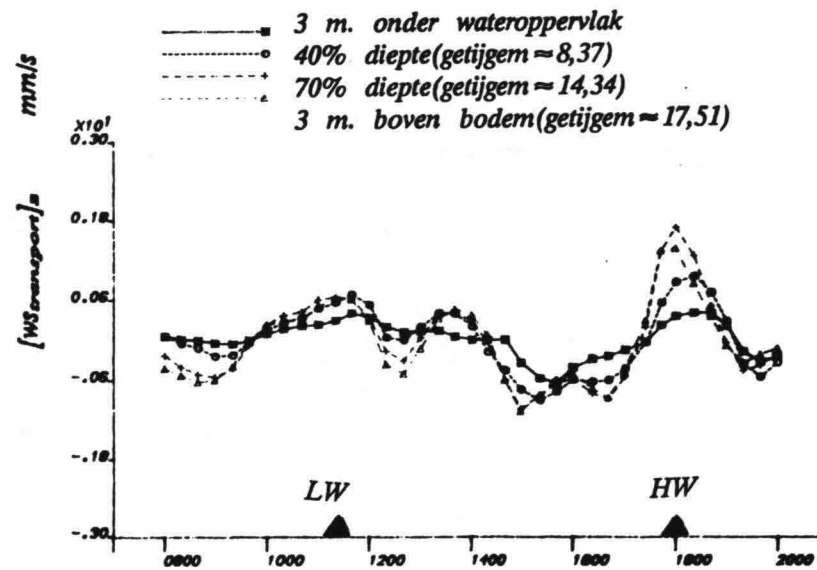


Delta



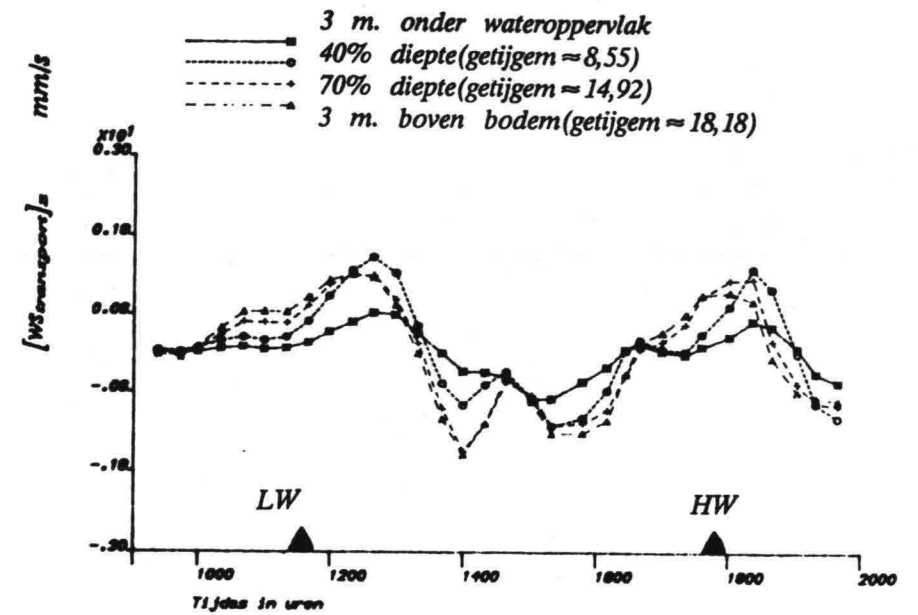
Argus

meting 870319 2 dagen na springtij



Delta

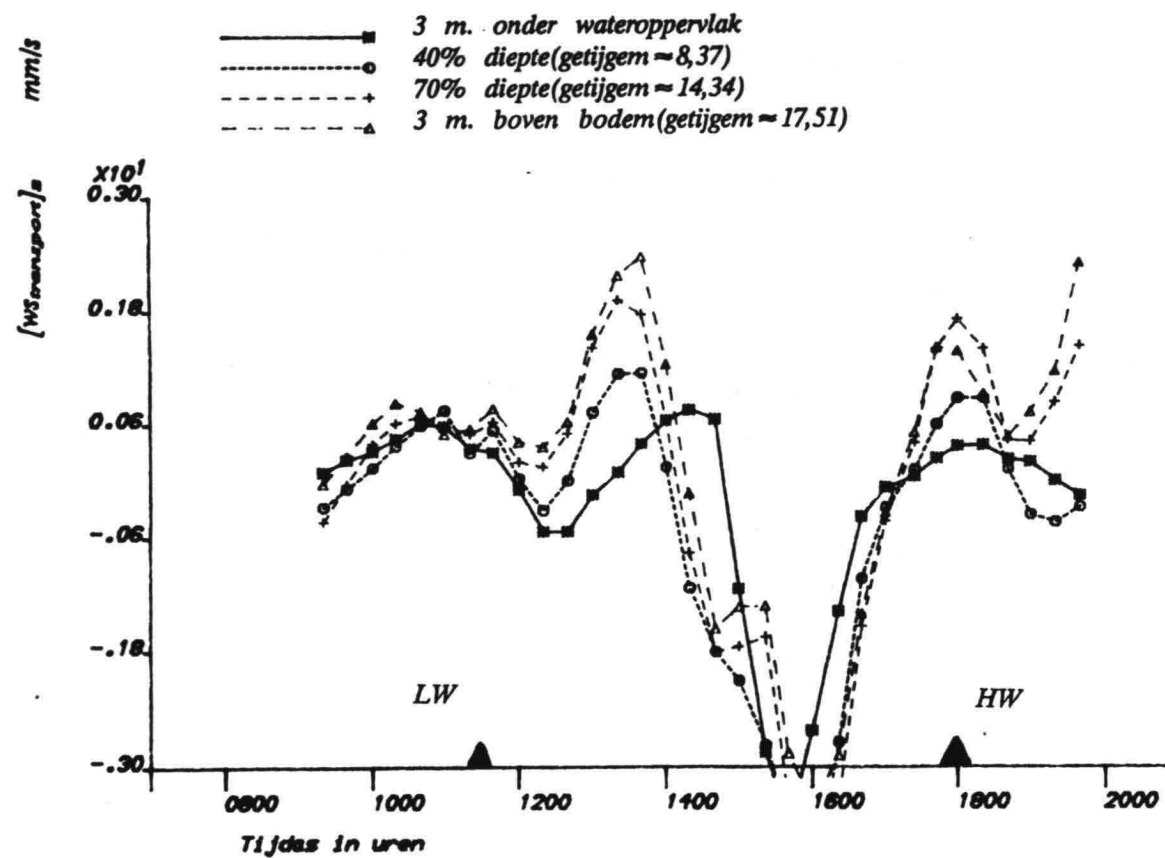
▲ = stroomkentering



Argus

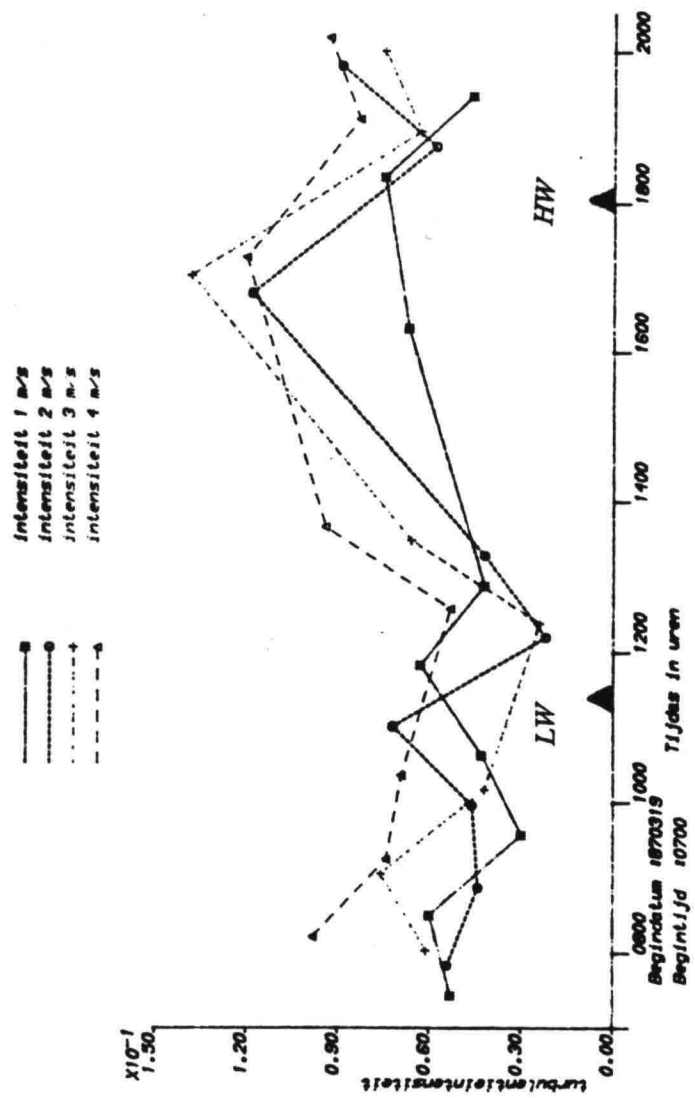
$$[WS_{transport}]_z = -1/[c]_z * \sum_z^h \partial c / \partial t dz$$

meting 870319 2 dagen na springtij



▲ = stroomkentering

$$[WS_{transport}]_z = -1/[c]_z \cdot \sum_z^h \frac{\partial c}{\partial t} dz - 1/[c]_z \cdot \sum_z^h u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} dz$$



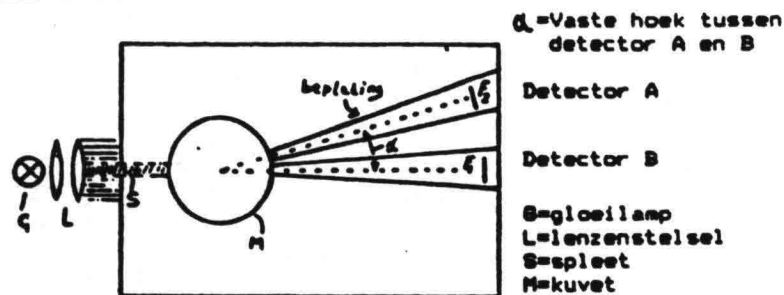
▲ = stroomkentering

troebelheidsmeter Monitek 160/131

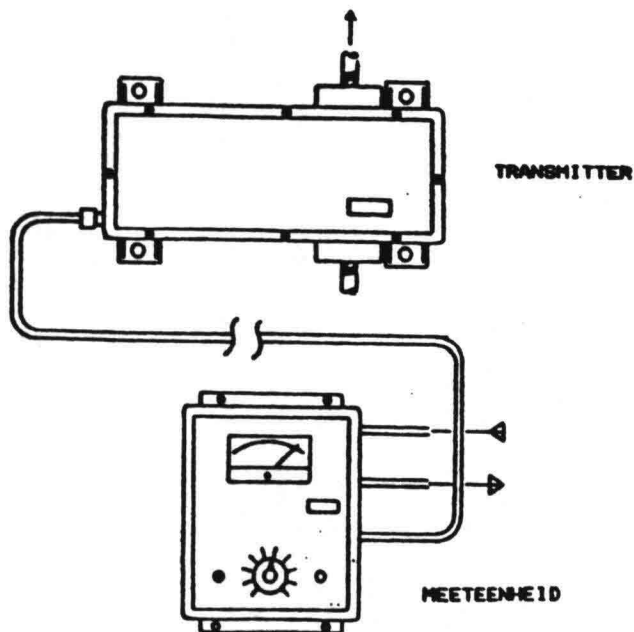
1.1 Monitek 160/131

Principe: Het licht wordt via een diafragma op het meetcuve met monster gericht. De deeltjes in de vloeistof veroorzaken strooiing. Het voorwaartse gestrooide licht wordt onder een kleine hoek ($<5^\circ$) opgevangen door een detector (A). Tegelijkertijd wordt het directe (= onverstrooide) licht opgevangen op een tweede detector (B). De verhouding tussen het signaal van detector (A) en (B) wordt weergegeven op een display in J.T.U. eenheden.

Optisch diagram:



MODEL 160/131 TURBIDIMETER



SPECIFICATIONS

160 TRANSMITTER

Materials of Construction:	Aluminum Bore & housing, Bore "H" rings, Pyrex glass, Brass fittings. (316 SS optional).
Light Source:	GE #16312 Incandescent
Detectors:	Silicon
Pressure:	60 PSI maximum
Temperature Range:	0-70°C
Power:	Supplied by cable from converter
Mounting:	Wall
Height:	

131 CONVERTER

Range:	0-.5 to 0-500 JTU in ten ranges. (0-20 to 0-2000 in three ranges optional)
Precision:	$\pm 2\%$ full scale
Linearity:	$\pm 1\%$ full scale
Repeatability:	$\pm .04$
Readout:	4-1/2" meter display
Recorder Output:	0-10V DC standard (4-20 ma. or 20-100 ma. optional)
Power:	115 or 230V AC, 50-60 Hz, 30 watts.
Temperature Range:	0-70°C
Enclosure:	Bore &
Mounting:	Wall
Height:	
©Corning	

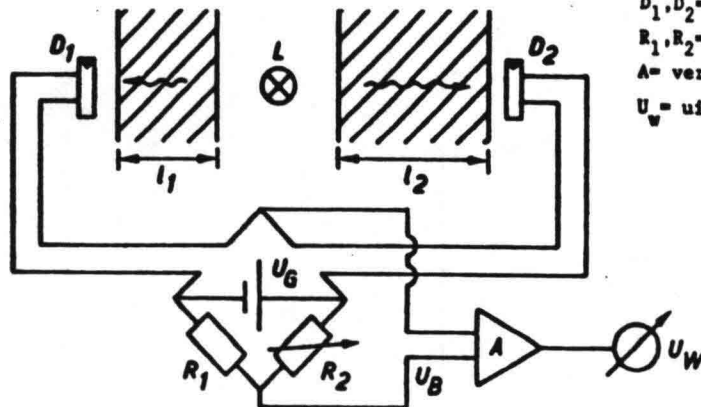
1.3 Partech 7000 RP troebelheidsmeter

Principe: De Partech troebelheidsmeter berust op het meten van lichtverswakking over twee lichtwegen van verschillende lengte. In de doppeleensor bevindt zich centraal een gloeilamp met aan weerszijden een lichtgevoelige weerstand. Deze weerstanden zijn opgenomen in een brug van Wheatstone waarvan de uitgangsspanning versterkt wordt om een draaispoelmeter te sturen. De wijzeruitslag U is in benadering een lineaire functie van de deeltjesconcentratie C .

$$U_w = k \cdot c$$

waarin k afhangt van de deeltjeseigenschappen, elektronische versterking, brugvoedingsspanning en werking van de lichtgevoelige weerstanden.

Optisch diagram:



L = Lamp

L_1 = afstand lens-venster (12.7 mm)

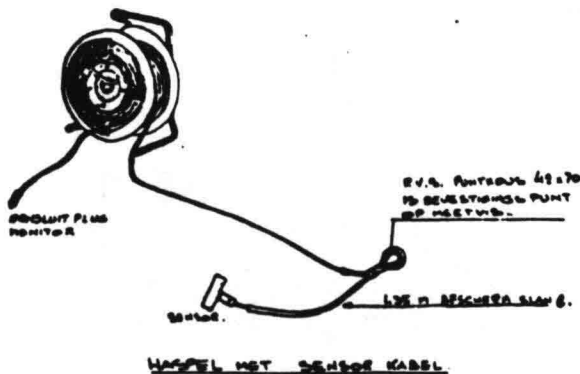
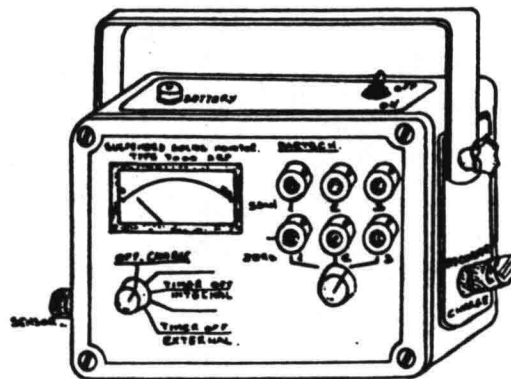
L_2 = afstand lens-venster (6.4 mm)

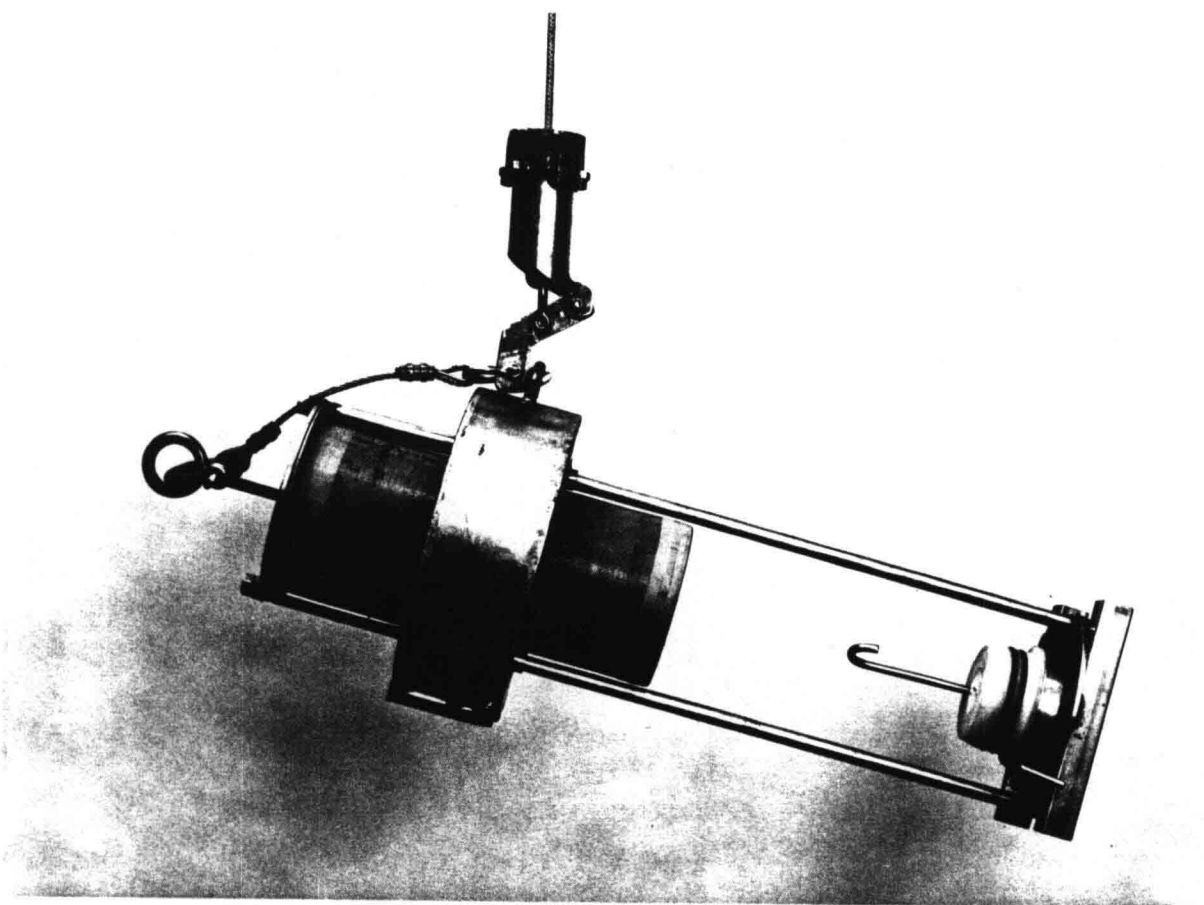
D_1, D_2 = detector

R_1, R_2 = weerstand

A = versterker

U_w = uitgangsspanning

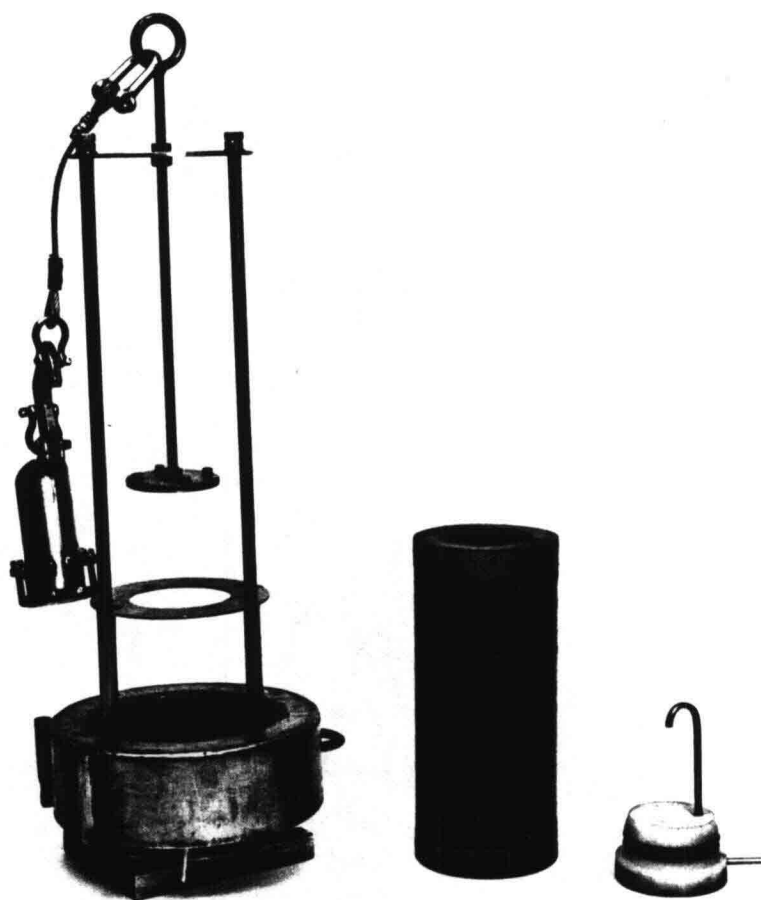


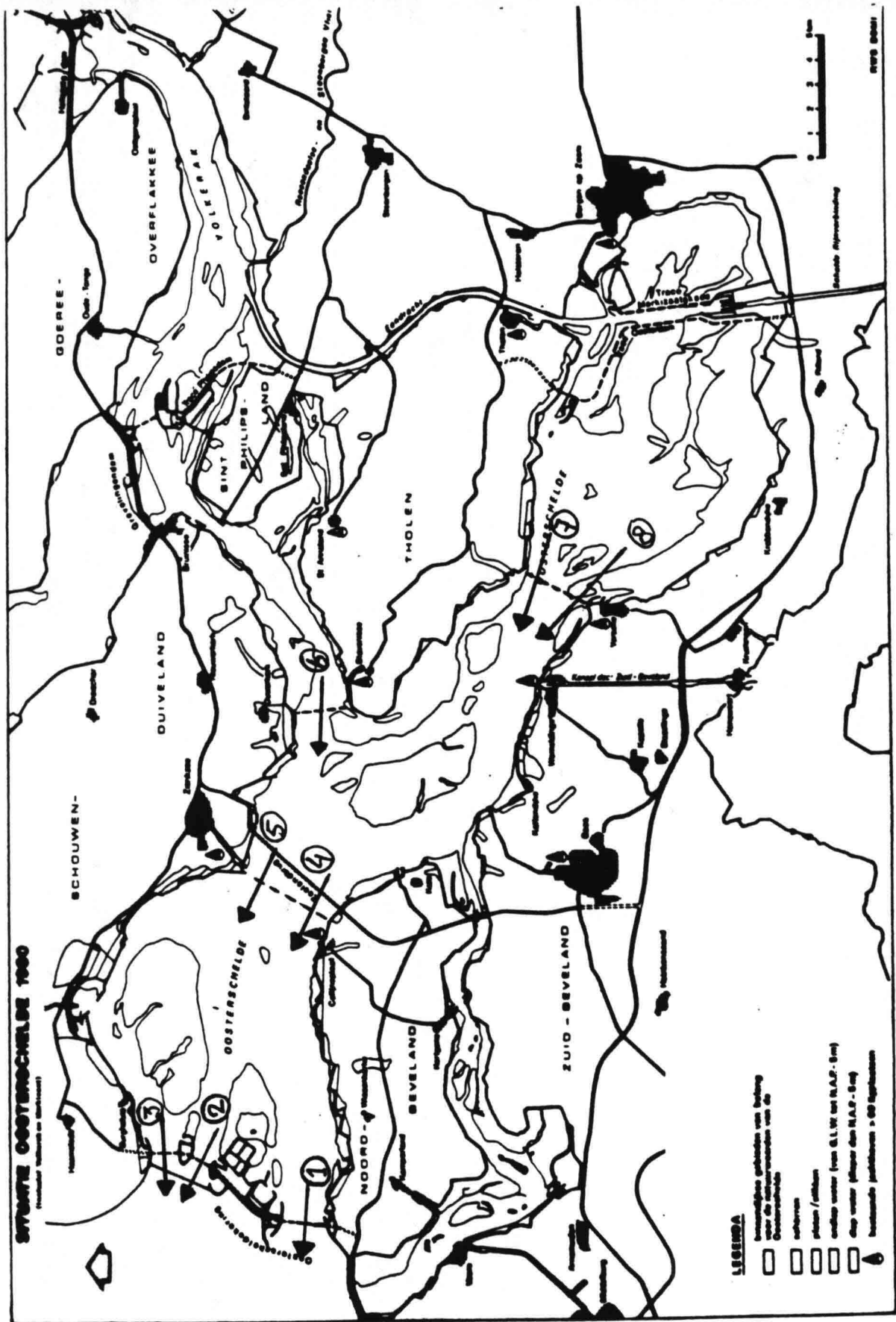


foto's: Harry v. Reeken

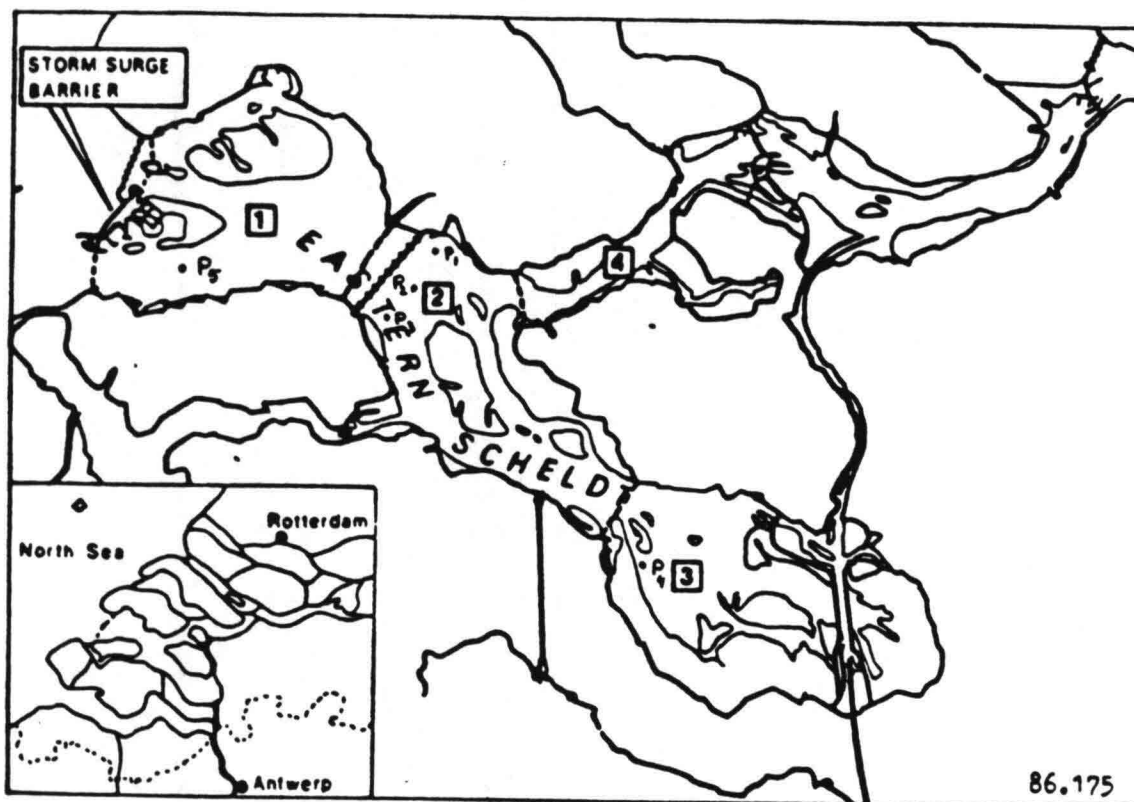
Het gebruikte valbuis/monstername apparaat voor monstername in de horizontale stand en na monstername in de vertikale stand. De valbuis is demontabel zodat het bezinkproces in de valbuis niet afgewacht behoeft te worden alvorens een nieuw monster genomen kan worden.







vakindeling met geulen (zie ook bijlage 24)



Vakindeling van de Oosterschelde in het door Klepper ontwikkelde computermodel van het ecosysteem. Deze vakindeling wordt ook gebruikt door Tenbrinke.

Er is gekozen voor een onderscheid van de kleibevattende lagen in vier klassen, te weten:

1. kleilig zand (0-8 % < 16 mu)
2. zavel (8-25 % < 16 mu)
3. zandige klei (25-35 % < 16 mu)
4. klei (35-55 % < 16 mu)

van:	naar:	1960-1965 min max	1965-1970 min max	1970-1975 min max	1975-1980 min max
Monding	Noordzee	18.9 47.8	32.6 64.8	6.1 37.9	6.2 42.3
Middengeb.	Monding	21.4 45.9	25.0 45.4	-6.7 13.2	1.5 29.1
Keet.Mast.	Middengeb	11.4 20.1	12.0 17.3	1.6 17.6	-1.7 15.2
Middengeb.	Kom	1.7 3.0	1.4 2.6	1.4 2.6	1.5 2.8
Keet-Mast.	Kram.Volk	2.0 4.3	2.0 4.1	3.3 9.8	3.2 9.5

Transport-fluxen (in 10^4 ton per jaar) uitgaande van de ondergrenzen van de klassen met de kleipercentages en een bulk-density voor de klasse klei van 700 kg/m^3 .

van:	naar:	1960-1965 min max	1965-1970 min max	1970-1975 min max	1975-1980 min max
Monding	Noordzee	39.7 76.9	59.3 99.6	22.6 61.0	23.0 67.8
Middengeb.	Monding	40.0 72.1	47.4 73.5	3.3 26.9	14.6 49.2
Keet.Mast.	Middengeb	22.0 33.7	23.7 29.5	11.0 30.6	5.4 26.0
Middengeb.	Kom	1.7 3.0	1.4 2.6	1.4 2.6	1.5 2.8
Keet-Mast.	Kram.Volk	2.0 4.3	2.0 4.1	3.3 9.8	3.2 9.5

Transport-fluxen (in 10^4 ton per jaar) uitgaande van de middens van de klassen met de kleipercentages en een bulk-density voor de klasse klei van 850 kg/m^3 .

van:	naar:	1960-1965 min max	1965-1970 min max	1970-1975 min max	1975-1980 min max
Monding	Noordzee	64.6 111.6	91.2 140.8	42.0 88.1	43.0 97.8
Middengeb.	Monding	62.4 103.3	74.6 107.3	15.4 43.6	30.6 73.3
Keet.Mast.	Middengeb	35.0 50.2	38.0 44.5	22.5 46.5	14.0 39.0
Middengeb.	Kom	1.7 3.0	1.4 2.6	1.4 2.6	1.5 2.8
Keet-Mast.	Kram.Volk	2.0 4.3	2.0 4.1	3.3 9.8	3.2 9.5

Transport-fluxen (in 10^4 ton per jaar) uitgaande van de bovengrenzen van de klassen met de kleipercentages en een bulk-density voor de klasse klei van 1000 kg/m^3 .

geul nummer	slibtransport door geul[ton/jaar]					
	transportvalsnelheid[mm/s]					
	voor sluiting			na sluiting		
	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0
1	-213537	-355220	-446485	-38728	-54422	-57281
2	-112233	-194178	-253715	-138707	-219679	-256786
3	-59029	-100933	-130045	-80113	-133021	-164939
4	-131803	-227198	-295207	-220325	-367950	-465250
5	-198774	-311134	-371603	-378910	-538819	-610619
6	-45495	-78048	-102172	-	121183	-
7	-73389	-127715	-167004	416822	603173	684046
8	188714 (133645)	207352 (134493)	186384 (107594)	791505 (306797)	841066 (282016)	808940 (477484)

veel significanten cijfers suggereren
grote nauwkeurigheid

De geulnummers zoals
vermeld in bijlage 21
De pijlen geven de
richting aan van het
negatieve slibtrans-
port.

Negatieve waarden betekenen zeewaarts slibtransport[ton/jaar]

Properties of suspended aggregates (from Krone, 1978)

Sediment Sample	Order of Aggregation	Density [kg/m ³]	Shear Strength [Pa]
Wilmington District	0	1250	2.1
	1	1132	0.94
	2	1093	0.26
	3	1074	0.12
Brunswick Harbor	0	1164	3.4
	1	1090	0.41
	2	1067	0.12
	3	1056	0.062
Gulfport Channel	0	1205	4.6
	1	1106	0.69
	2	1078	0.47
	3	1065	0.18
San Francisco Bay	0	1269	2.2
	1	1179	0.39
	2	1137	0.14
	3	1113	0.14
	4	1098	0.082
	5	1087	0.036
	6	1079	0.020
White River (in salt water)	0	1212	4.9
	1	1109	0.68
	2	1079	0.47
	3	1065	0.19

Density in sea water $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$

$$\tau r = C \tau_{\max}$$

$\tau_{\max}$ is de vloksterkte

τ is de schuifspanning in het water

r is de straal van de vlok

Bij monsternamen zal een vlok bijna momentaan in een situatie komen waarin de schuifspanningen veel groter zijn. De relatie van Krone geeft dan te grote vlokken als resultaat. Bij deze berekening is er echter ook van uitgegaan dat de turbulente grenslaag volledig ontwikkeld is terwijl dit pas het geval is na een afstand van $40-50r$ terwijl de valbuislengte slechts $7r$ bedraagt. Hierdoor ontstaat er een volume (20 %) kleiner dan het totale valbuisvolume met een grotere schuifspanningen en een volume (~80%) waarin de schuifspanningen heersen als in de ongestoorde situatie. Dit betekent dat de grote vlokken bij de valbuisas niet afgebroken zouden worden. Er zijn dus vlokken aanwezig die volgens de berekening met de relatie van Krone niet meer zouden bestaan. Alhoewel onbekend is in hoeverre de beide afwijkingen elkaar opheffen wordt hier verder gerekend met Krone. Reden hiertoe is de aanwezigheid van meerdere turbulentieopwekkende factoren zodat een in de gehele buis aanwezig turbulentieveld wordt verondersteld.

Aanname is een maximale vloggrootte van $\sim 2500\mu\text{m}$ wat ongeveer overeenkomt met een maximale valsnelheid van 10 mm/s . De sterkte van deze vlokken bedraagt $\sim 0,1\text{ Pa}$ (order of aggregation 3 zie tabel op volgende pagina). De toename in τ is een faktor 26. Aanname is dat de sterkte van de grootste vlokken na de afbraak ongeveer $0,2\text{ Pa}$ bedraagt (zie tabel, order of aggregation 2). De afname in de maximale vloggrootte is dan een faktor 13 zodat de maximale vloggrootte $\sim 200\mu\text{m}$ bedraagt. Dit komt zeer goed overeen met de aannamen in fig.13 en de resultaten uit de valbuisproeven. De afname in de transportvalsnelheid bedroeg hierdoor een faktor 3-4.

Indien er nu uitgegaan wordt, zoals hiervoor reeds vermeldt, van de situatie dat op $\sim 20\%$ van de vlokken (volume) bijna momentaan zeer grote schuifspanningen aangrijpen zodat deze vlokken totaal afgebroken zullen worden terwijl de andere 80 % intact blijft dan betekent dit een reductie van de transportvalsnelheid met 20%. Een relatie die afgeleidt kan worden voor ronde vlokken die waarop deze schuifspanningen aangrijpen is

$$\tau_{\max} = C r \delta \tau / \delta r$$

De schuifspanningsgradient neemt met een faktor $160/0,02 = 8000$ toe in het gebied waar de turbulente grenslaag ontwikkelt is. Hier zullen dus bijna geen vlokken meer aanwezig zijn.

Resumerend kan gezegd worden dat beide berekeningen in een vlokafbraak resulteren met een transportvalsnelheidsafname met een faktor 3-4 bij de methode van Krone en een faktor 1,2 bij de methode van de schuifspanningsgradienten.

Een theoretische beschouwing over de vlokafbraak welke op kan treden bij monstername met het valbuis/monsternameapparaat

Tijdens de monstername valt het valbuis/monsternameapparaat over een afstand van ~ 1 meter. Het apparaat bestaat voornamelijk uit staal met een dichtheid van 7800 kg/m^3 en deels uit een valbuis van licht materiaal ($\sim 1000 \text{ kg/m}^3$). De geschatte dichtheid van het geheel is ongeveer 5000 kg/m^3 . Indien geen rekening wordt gehouden met de wrijving betekent dit een versnelling van $(5000-1000) \cdot 9,8/5000 = 7,8 \text{ m/s}^2$. Dit betekent dat de snelheid van de valbuis aan het einde van de valweg wanneer het monster genomen wordt gelijk zou zijn aan:

$$s = 0,5at^2 \quad t = 2s/a = 2/7,8 = 0,26 \text{ sec.}$$

$$v = at = 7,8 \cdot 0,26 = 2,0 \text{ m/s}$$

Er is in deze berekening geen rekening gehouden met de wrijvingsweerstand zodat de eindsnelheid in praktijk lager zal liggen. Aangenomen wordt dat deze $1,5 \text{ m/s}$ bedraagt.

Bij de berekening van de schuifspanning in het water tijdens de monstername wordt aangenomen dat er een stationaire turbulente stroming heerst met een stroomsnelheid van $1,5 \text{ m/s}$ en er een volledig ontwikkelde grenslaag aanwezig is. De wandschuifspanning wordt dan

$$\tau_o = g(D/4)i \quad D = 0,1 \text{ m.}$$

$$i = h/\text{meter} = fu^2/2gD \quad u = 1,5 \text{ m/s}$$

f wordt bepaald met behulp van de k-waarde van glas. Deze bedraagt $3 \cdot 10^{-5}$

$$k = 3 \cdot 10^{-5} \quad z_o = 9,4 \cdot 10^{-7} \quad \delta = 1,1 \cdot 10^{-4} \quad C = 52,2$$

$$f = 8g/C^2 = 0,029$$

$$i = 3,2 \cdot 10^{-2}$$

$$\tau_{wand} = 8,0 \text{ N/m}^2$$

Bij een lineair schuifspanningsverloop betekent dit $\tau_{gem} \sim 5,3 \text{ N/m}^2$ over de valbuisdoorsnede en een $\delta\tau/\delta r$ van $160 \text{ N/m}^2\text{m}'$

In de waterkolom zelf heerst op halve diepte bij een stroomsnelheid van $0,3 \text{ m/s}$, de condities bij monstername van vlokken, een schuifspanning van

$$\tau \sim 0,5 \tau_{bodem} \quad \tau_{bodem} = u \cdot u \quad u \sim u/15$$

$$\tau_{bodem} = 0,4 \text{ N/m}^2 \quad \tau = 0,2 \text{ N/m}^2$$

Bij een waterdiepte van 20 m betekent dit een $\delta\tau/\delta z$ van $0,4/20 = 0,02 \text{ N/m}^2\text{m}'$

Krone leidde een relatie af voor de vloggrootte van ronde vlokken en de schuifspanning waarbij de vlok ronddraaide ten gevolge van de schuifspanningen. De relatie is als volgt

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE /data/transport/d870319/k19_00

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.8467	.0524	.0424	54.513	10.797
VARIANTIE	.0005	.0001	.0017		
INTENSITEIT	.02175	.01093	.04136		

COVARIANTIE X-Y	-.00012				
COVARIANTIE X-Z	-.00047				
COVARIANTIE Y-Z	.00022				
CORRELATIE X-Y	-.505				
CORRELATIE X-Z	-.520				
CORRELATIE Y-Z	.487				

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE /data/transport/d870319/k19_00

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.9740	.0700	.0348	48.663	12.192
VARIANTIE	.0006	.0005	.0020		
INTENSITEIT	.02407	.02163	.04489		

COVARIANTIE X-Y	-.00007				
COVARIANTIE X-Z	-.00037				
COVARIANTIE Y-Z	.00037				
CORRELATIE X-Y	-.132				
CORRELATIE X-Z	-.344				
CORRELATIE Y-Z	.385				

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE /data/transport/d870319/k19_00

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.7477	.1366	.0043	45.118	14.500
VARIANTIE	.0028	.0012	.0031		
INTENSITEIT	.05259	.03392	.05571		

COVARIANTIE X-Y	-.00027				
COVARIANTIE X-Z	-.00068				
COVARIANTIE Y-Z	.00038				
CORRELATIE X-Y	-.151				
CORRELATIE X-Z	-.233				
CORRELATIE Y-Z	.200				

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE /data/transport/d870319/k19_00

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.8615	.0680	.0256	57.289	4.7517
VARIANTIE	.0018	.0007	.0028		
INTENSITEIT	.04224	.02646	.05256		

COVARIANTIE X-Y	-.00060				
COVARIANTIE X-Z	-.00121				
COVARIANTIE Y-Z	.00054				
CORRELATIE X-Y	-.533				
CORRELATIE X-Z	-.546				
CORRELATIE Y-Z	.391				

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE /data/transport/d870319/k19_00

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.9812	.0458	.0218	58.896	8.1857
VARIANTIE	.0023	.0002	.0022		
INTENSITEIT	.04819	.01470	.04668		

COVARIANTIE X-Y	-.00029				
COVARIANTIE X-Z	-.00071				
COVARIANTIE Y-Z	.00038				
CORRELATIE X-Y	-.409				
CORRELATIE X-Z	-.315				
CORRELATIE Y-Z	.553				

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE k12_0011

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.8757	.0363	-.0316	344.15	4.7754
VARIANTIE	.0012	.0010	.0012		
INTENSITEIT	.03496	.03098	.03407		

COVARIANTIE X-Y	-.00018
COVARIANTIE X-Z	-.00020
COVARIANTIE Y-Z	.00010
CORRELATIE X-Y	-.168
CORRELATIE X-Z	-.165
CORRELATIE Y-Z	.097

=====

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE k12_0012

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.9478	.0367	-.0262	345.96	7.5020
VARIANTIE	.0026	.0005	.0034		
INTENSITEIT	.05060	.02179	.05809		

COVARIANTIE X-Y	-.00029
COVARIANTIE X-Z	-.00056
COVARIANTIE Y-Z	.00017
CORRELATIE X-Y	-.262
CORRELATIE X-Z	-.192
CORRELATIE Y-Z	.138

=====

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE k12_0013

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	1.1382	.0217	-.0460	345.33	10.132
VARIANTIE	.0028	.0008	.0011		
INTENSITEIT	.05274	.02796	.03299		

COVARIANTIE X-Y	.00017
COVARIANTIE X-Z	-.00035
COVARIANTIE Y-Z	.00014
CORRELATIE X-Y	.115
CORRELATIE X-Z	-.201
CORRELATIE Y-Z	.153

=====

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE k12_0014

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	1.0433	.0253	-.0355	339.68	11.447
VARIANTIE	.0090	.0012	.0017		
INTENSITEIT	.09461	.03530	.04117		

COVARIANTIE X-Y	-.00014
COVARIANTIE X-Z	-.00115
COVARIANTIE Y-Z	.00021
CORRELATIE X-Y	-.041
CORRELATIE X-Z	-.294
CORRELATIE Y-Z	.142

=====

DE GEGEVENS ZIJN AFGELEID UIT REEKSEN IN FILE k12_0015

	X	Y	Z		
GEMIDDELD	.9556	.0129	-.0383	334.53	13.132
VARIANTIE	.0107	.0018	.0029		
INTENSITEIT	.10351	.04242	.05346		

COVARIANTIE X-Y	-.00050
COVARIANTIE X-Z	-.00181
COVARIANTIE Y-Z	.00022
CORRELATIE X-Y	-.115
CORRELATIE X-Z	-.327
CORRELATIE Y-Z	.099

=====

