



zw
 niet besch.

Aan
 zie verzendlijst

Van
 H.P.J. Mulder

Doorkiesnummer
 050-5331346

Datum
 november 1995

Bijlage(n)

Nummer
 RIKZ/OS-95.615x

Project
 Dynastar

Onderwerp
 Analyse 13-uurs-verticaalmetingen in de Westerschelde t.b.v. slib-transportmodellering.

Inhoud

Overzicht tabellen, figuren en bijlagen	2
1. Inleiding	3
2. Meetgegevens	4
2.1 Databestand	4
2.2 Gegevens	4
2.3 Meetmethode	5
3. Analysemethode	6
3.1 Algemeen	6
3.2 Sedimentatie en valsnelheid	7
3.3 Erosie	8
3.4 Dispersief transport	9
3.5 Bodemschuifspanning	11
4. Resultaten en discussie	12
4.1 Karakterisering concentratieprofiel	12
4.2 Valsnelheid	12
4.3 Erosiesnelheid	13
4.4 Dispersief transport	13
4.5 Bodemschuifspanning	16
5. Conclusies	17
Literatuur	18

Vestiging Haren
 Postbus 207, 9750 AE Haren
 Bezoekadres Kerklaan 30

Telefoon (050) 533 13 31
 Telefax (050) 534 07 72



Overzicht tabellen, figuren en bijlagen

Tabellen

1. Herstelde fouten in bestand NAUWESB.
2. Indeling in deelgebieden.
3. Karakteristieke concentratieprofiel.
4. Valsnelheid volgens formule Krone en evenwichtsprofiel.
5. Erosie-constante volgens formule Partheniades.
6. Verhouding tussen bodemschuifspanning volgens snelheid bij de bodem en die volgens diepte-gemiddelde snelheid.
7. Samenvatting analyse-resultaten.

Figuren

1. Overzicht locaties en deelgebieden met 13-uurs-metingen in de Westerschelde.
2. Karakteristieke concentratieprofiel.
3. Valsnelheid volgens formule Krone en evenwichtsprofiel.
4. Erosie-constante volgens formule Partheniades.
5. Verhouding tussen bodemschuifspanning volgens snelheid bij de bodem en die volgens diepte-gemiddelde snelheid.

Bijlagen

1. Overzicht 13-uurs-metingen bestand NAUWESB.
2. Voorbeeld uit databestand NAUWESB.
3. Extrapolatie van in de verticaal gemeten stroomsnelheid en sedimentconcentratie naar bodem en oppervlak.



1. Inleiding

In 1988-1989 zijn in het kader van slibtransportmodellering voor de Westerschelde op basis van veldmetingen schattingen gemaakt van enkele modelparameters. Hiervoor stond een groot aantal 13-uurs-verticaalmetingen ter beschikking. Bij zo'n meting worden gedurende ca. 13 uur (getijperiode) regelmatig verticale profielen gemeten in de waterkolom. Deze metingen zijn geanalyseerd, uitgaande van de in het model gebruikte formulerings voor erosie, sedimentatie en transport.

Met name over de valsnelheid van het slib bestonden verschillende inzichten. Deze zou ongeveer twee orden van grootte kunnen variëren, van ca. 0,05 tot 5 mm/s, zie Boere (1987) en o.a. Van Leussen (1988, chapter 5). De variatie in waarden werd o.a. toegeschreven aan de meetmethode.

Ook aan de erosiesnelheid van slib is aandacht besteed. Hierover was geen enkele informatie beschikbaar.

Daarnaast is aandacht besteed aan de karakteristieken van het verticale concentratie-profiel en het dispersief transport. Ook is onderzocht in hoeverre de schuifspanning bij de bodem op basis van de diepte-gemiddelde snelheid afwijkt van die op basis van de snelheid dicht bij de bodem.

Aan de rapportage van de resultaten van de analyse werd in 1988 weinig aandacht besteed. Het 2D-horizontale model was gebaseerd op de programma-pakketten WAQUA en DELWAQ. De modelresultaten zijn gepubliceerd door Mulder en Udink (1991). Nu er vanuit o.a. de w.g. slibonderzoek belangstelling getoond is, is alsnog een verslag gemaakt.



2. Meetgegevens

2.1 Databestand

Er is gebruik gemaakt van het bestand NAUWESB, dat voortkwam uit het gelijknamige project dat het WL uitvoerde voor de voormalige Adviesdienst Vlissingen van Rijkswaterstaat (Waterloopkundig Laboratorium, 1985). Dit project richtte zich op de nauwkeurigheid van zandtransportmetingen. Het bestand bevat echter ook de meegemeten slibgehaltenes. Onder slib wordt hier de sedimentfractie $< 50 \mu\text{m}$ verstaan.

Helaas zijn het bestand en afgeleide files onvindbaar geworden na een reorganisatie in 1989. Geput is uit de beschikbare printuitvoer en aantekeningen.

2.2 Gegevens

Het bestand bevat 172 13-uurs-metingen in de periode 1970-1981. De metingen zijn onder verschillende getij- en meteo-condities uitgevoerd. Bijlage 1 bevat een overzicht van de locaties (o.a. in Amersfoortse coördinaten) en de datum. Gemiddeld zijn er ca. 11 verticale profielen per 13 uur gemeten, waarbij de 13 uur niet altijd is volgemaakt. Het tijdsinterval tussen de profielen varieerde van ca. 0,5 tot 1,5 uur, mede afhankelijk van storingen. Elke verticaal is in het bestand aangeduid met een recordnummer. In totaal bevat het bestand 1891 verticaal-metingen waarbij op meerdere niveaus in de waterkolom de hoogte boven de bodem, de stroomsnelheid en -richting, het zandgehalte en het slibgehalte zijn gemeten. Het aantal niveaus in de waterkolom was, voorzover achterhaald kon worden, maximaal 6. Per verticaal is ook de waterdiepte gemeten. Bijlage 2 geeft een voorbeeld uit het bestand.

In het bestand zijn tijdens dit onderzoek fouten gevonden en hersteld. Volledigheidshalve zijn ze vermeld in tabel 1.

Fig. 1 geeft de positie aan van de meetlocaties. Bij de analyse zijn de meetlocaties geografisch gegroepeerd tot 10 deelgebieden. In tabel 2 is aangegeven welke metingen tot welk deelgebied behoren. Hierbij zijn 6 van de 172 metingen buiten beschouwing gebleven: M1-M3 in het Middeldiep en M16, M19 en M23 in het Oostgat (in totaal 57 verticalen), omdat deze locaties buiten de modelgrenzen vielen. Ook is onderscheid gemaakt tussen een oostelijk en westelijk deel van de Westerschelde. Er is geen onderscheid gemaakt tussen vloed- en eb-geulen.



2.3 Meetmethode

De metingen zijn uitgevoerd met meetschepen van de voormalige Adviesdienst Vlissingen. Het doormeten van één verticaal duurde ca. 5 tot 20 minuten, van beneden naar boven werkend. Het laagste meetniveau was ca. 0,50 m boven de bodem. Het hoogste meetniveau was ca. 0,50 m onder het wateroppervlak. De concentratiemetingen zijn verricht met de Vlissingse fles, met een bal-afsluiting of onder een hoek geplaatst. De stroomsnelheden zijn gemeten met een Ott-molen op een ELMAR-frame.



3. Analysemethode

3.1 Algemeen

Bij de analyse wordt een aantal aannamen gedaan. Een deel van de aannamen sluit aan bij de wijze van modellering. Een ander deel is, bij gebrek aan gegevens, niet gecontroleerd op geldigheid. De aannamen zijn echter nodig om de modelparameters te kwantificeren.

Het slibtransportmodel is gebaseerd op een diepte-gemiddelde benadering. De massa-balans is uitgedrukt in de advectie-diffusie vergelijking met een erosie- en sedimentatieterm. In deze bron/put-termen is de bodemschuifspanning een essentiële parameter. De bodemschuifspanning τ_b is conform een logaritmische benadering van het snelheidsprofiel berekend met:

$$\tau_b = \rho_w g \frac{\bar{v}^2}{C^2} \quad (3.1)$$

waarin ρ_w de massa-dichtheid van het water is (1000 kg/m^3), g de versnelling van de zwaartekracht, $\bar{v}$ de diepte-gemiddelde stroomsnelheid en C de Chézy-coëfficiënt voor de ruwheid. De Chézy-coëfficiënt is gegeven door:

$$C = 181 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right) \quad (3.2)$$

waarin h de waterdiepte is en k_s is de equivalente ruwheid van Nikuradse.

De keuze van een waarde voor k_s is niet eenvoudig. Het WAQUA-model gebruikt een Manning-ruwheid van $n = 0,02 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, wat bij $h = 10 \text{ m}$ overeenkomt met $C = 73 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$ en $k_s = 0,01 \text{ m}$ en bij $h = 5$ met $C = 65$ en $k_s = 0,014$. Bakker (1985) presenteert echter waarden voor C tussen 30 en $70 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$. Bij de analyse hier is gekozen voor $k_s = 0,05 \text{ m}$. Bij $h = 10$ komt dit overeen met $C = 61$ en bij $h = 5$ met $C = 55$, hetgeen het midden houdt tussen die volgens WAQUA en Bakker.

De diepte-gemiddelde stroomsnelheid en concentratie zijn berekend uit integratie van het snelheidsprofiel. Daarvoor zijn de snelheid en concentratie geëxtrapoleerd naar de bodem en naar het wateroppervlak. De gevolgde methode is weergegeven in bijlage 3. Hierdoor zijn extra punten toegevoegd aan elke verticaal. Door lineaire interpolatie zijn de profielen in een voldoende groot aantal equidistante puntwaarden omgezet en vervolgens geïntegreerd. Het diepte-gemiddelde transport is berekend door combinatie van de equidistante snelheids- en concentratiewaarden. Door deze methode zijn ook de verhoudingen bepaald tussen de concentraties aan de bodem en het oppervlak enerzijds en de diepte-gemiddelde concentratie anderzijds.



3.2 Sedimentatie en valsnelheid

Er zijn twee methoden gevolgd. De eerste gaat uit van de formule van Krone en de tweede van een evenwichtsprofiel voor de concentratie.

3.2.1 Methode met Krone-formule

De formule voor sedimentatie, S , volgens Krone is:

$$S = w_s \bar{c} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \quad , \quad \text{met } S = 0 \text{ indien } \tau_b > \tau_{cd} \quad (3.3)$$

waarin $\bar{c}$ de diepte-gemiddelde concentratie is, w_s de valsnelheid en τ_{cd} de kritieke schuifspanning voor sedimentatie c.q. depositie. Bij de berekening van de valsnelheid uit de meetgegevens zijn de volgende aannamen gedaan:

- horizontale gradiënten zijn verwaarloosbaar
- berekening alleen indien $\tau_b < \tau_{cd}$
- erosie en sedimentatie treden niet gelijktijdig op
- de valsnelheid is constant over de verticaal

Uit de aannamen volgt:

$$w_s = - \frac{1}{P \bar{c}} \frac{d(\bar{c}h)}{dt} \quad \text{met } P = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \quad (3.4)$$

waarin P de kans aangeeft dat een vlok of deeltje zal sedimenteren en op de bodem blijven. Bij de analyse is uitgegaan van $\tau_{cd} = 0,4$ Pa, hetgeen bij een gemiddelde C -waarde overeenkomt met een kritieke snelheid $\bar{v}_{cd} = 0,38$ m/s. Ter vergelijking: de bodemschuifspanning bij een maximale stroomsnelheid van ca. 1 m/s is ca. 2,7 Pa. De waarde voor τ_{cd} is mede zo hoog gekozen om voldoende gegevens voor analyse te hebben.

Bij de berekening zijn de volgende discretisaties gebruikt voor de concentratie, de afgeleide van de massa naar de tijd en de bodemschuifspanning:

$$\bar{c} = \frac{1}{2}(\bar{c}_i + \bar{c}_{i-1}) \quad (3.5)$$

$$\left[\frac{d(\bar{c}h)}{dt} \right] = \frac{\bar{c}_i h_i - \bar{c}_{i-1} h_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (3.6)$$

$$\tau_b = \frac{1}{2}(\tau_{b,i} + \tau_{b,i-1}) \quad (3.7)$$

waarin i en $i-1$ twee tijdstippen markeren. $\tau_{b,i}$ wordt berekend met verg. 3.1.



3.2.2 Methode met evenwichtsprofiel

Onder evenwichtscondities (uniforme, stationaire omstandigheden) en uitgaande van een over de verticaal constante valsnelheid en turbulente-diffusie-coëfficiënt, wordt het concentratieprofiel beschreven door:

$$c(z) = c(0)e^{-\frac{w_s z}{\bar{\epsilon}}} \quad (3.8)$$

waarin $\bar{\epsilon}$ de turbulente-diffusie-coëfficiënt is en z de verticale as, positief omhoog vanaf de bodem. Met verg. 3.8 kan de valsnelheid afgeleid worden volgens:

$$w_s = \frac{\bar{\epsilon}}{h} \frac{c(0) - c(h)}{\bar{c}} \quad (3.9)$$

Uitgaande van een parabolisch snelheidsprofiel kan de turbulente-diffusie-coëfficiënt uitgedrukt worden als:

$$\bar{\epsilon} \approx \frac{h}{15} \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}} \quad (3.10)$$

3.3 Erosie

De gebruikte formule voor de erosie, E , is die volgens Partheniades:

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad , \quad \text{met } E = 0 \text{ indien } \tau_b < \tau_{ce} \quad (3.11)$$

waarin M een constante is en τ_{ce} de kritieke schuifspanning voor erosie. Bij de berekening van de coëfficiënt M uit de meetgegevens zijn de volgende aannamen gedaan:

- horizontale gradiënten zijn verwaarloosbaar
- berekening alleen indien $\tau_b > \tau_{ce}$
- erosie en sedimentatie treden niet gelijktijdig op
- beschikbaarheid van slib is geen beperking

Hieruit volgt:

$$M = \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)^{-1} \frac{d(\bar{c}h)}{dt} \quad (3.12)$$

Bij de analyse is uitgegaan van $\tau_{ce} = 0,5$ Pa, hetgeen bij een gemiddelde C -waarde overeenkomt met een kritieke snelheid $\bar{v}_{ce} = 0,43$ m/s. Negatieve waarden van M zijn buiten beschouwing gelaten. De discretisatie is volgens verg. 3.6 en 3.7.



3.4 Dispersief transport

3.4.1 Inleiding

In het transportmodel zijn de verticale variaties in het transport gemiddeld over de diepte en vormen een zgn. resttransport t.o.v. het transport op basis van dieptegemiddelde waarden. Dit transport wordt, gezien zijn karakter, ook wel dispersief transport genoemd en meestal uitgedrukt als functie van dieptegemiddelde grootheden i.c.m. met zgn. dispersie-coëfficiënt.

Bij modellering roept dit twee vragen op:

- 1) hoe groot is dit dispersief transport t.o.v. de andere termen
- 2) hoe groot is de dispersie-coëfficiënt?

3.4.2 Grootte van het dispersief transport

Het diepte-gemiddelde transport op één punt in het horizontale vlak en op één tijdstip is:

$$T = \frac{1}{h} \int_{z=0}^{z=h} v(z)c(z)dz = \overline{vc} \quad (3.13)$$

Vatten we de profielen op als een gemiddelde plus afwijking, volgens:

$$v(z) = \bar{v} + v' \quad , \quad c(z) = \bar{c} + c' \quad (3.14)$$

waarin v' en c' de afwijkingen voorstellen, dan volgt uit verg. 3.13:

$$\overline{vc} = \bar{v}\bar{c} + \overline{v'c'} \quad (3.15)$$

De eerste term in het rechterlid wordt het advectief, de tweede het rest- of dispersief transport genoemd. De verhouding tussen de transporttermen kan uit de meetgegevens berekend worden.

3.4.3 Dispersie-coëfficiënt

Meestal wordt in een model de gradiënt-type benadering gekozen voor het resttransport (zoals ook bij moleculaire en turbulente diffusie):

$$\overline{v'c'} = -D \frac{d\bar{c}}{ds} \quad (3.16)$$

waarin D de dispersiecoëfficiënt is en s de horizontale as (in de richting van $\bar{v}$). Hierdoor is, bij gegeven D , het transport alleen afhankelijk van dieptegemiddelde grootheden. Om D uit metingen te berekenen moet de horizontale concentratiegradiënt bekend zijn. In het volgende



hoofdstuk zullen hiervoor schattingen gehanteerd worden.

N.B. De grootte van de dispersiecoëfficiënt in een model is niet alleen afhankelijk van de fysische achtergrond, maar ook van numerieke eisen. Voor het toegepaste Westerschelde-model zou volgens numerieke eisen moeten gelden: $100 \leq D \leq 600 \text{ m}^2/\text{s}$. Hieraan wordt verder geen aandacht besteed.



3.5 Bodemschuifspanning

Bij de diepte-gemiddelde modellering is de invloed van de inhomogene stroming t.g.v. de saliniteitsgradiënt verwaarloosd. De zouttong in de brak-water-zone impliceert dat onder in de waterkolom de vloodsnelheden hoger zijn dan de ebsnelheden. Dientengevolge zal ook de bodemschuifspanning tijdens vloed hoger zijn dan tijdens eb. I.c.m. met een hogere concentratie nabij de bodem resulteert dit in een rivierwaarts resulterend transport zolang het rivierdebiet gering is t.o.v. het getijdebiet. De Westerschelde kan als een goed gemengd deel van het estuarium beschouwd worden. Ter plaatse van de Nederlands-Belgische grens is de mengparameter $M = Q_r T / TV$ kleiner dan 0,023 (rivierdebiet $Q_r = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, getijperiode $T = 45000 \text{ s}$ en getijvolume $TV = 200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), terwijl een waarde $< 0,1$ een indicatie is voor goed gemengd. Evenzo is het dimensioneloze estuariumgetal $E = F^2/M$ groter dan 0,5 ($F \approx 0,1$ is Froude-getal gebaseerd op maximale vloodsnelheid), terwijl $> 0,15$ à $0,2$ goed gemengd betekent.

De presentatie van de meetgegevens van M160-163 door Swart (1983) laat echter een gering, maar duidelijk verschil zien tussen de snelheidsverticalen bij vloed en eb. Dit verschil is onderzocht d.m.v. de bodemschuifspanning gebaseerd op een logaritmisch profiel onder het laagste meetpunt:

$$\tau_b(v_b) = \rho_w \left(\frac{\kappa v_b}{\ln(z_b/z_0)} \right)^2 \quad (3.17)$$

waarin v_b de gemeten snelheid is nabij de bodem, z_b de hoogte waarop v_b gemeten is, κ de Von Karman constante en z_0 de hoogte waarop de snelheid nul is. Bij de berekening van de bodemschuifspanning $\tau_b(v_b)$ is uitgegaan van $\kappa = 0,4$ en $z_0 = k_s/33$. Vervolgens is de verhouding berekend met de bodemschuifspanning volgens verg. 3.1. Deze verhouding is gelijk aan:

$$\frac{\tau_b(v_b)}{\tau_b(\bar{v})} = \left(\frac{v_b \ln(0.368h/z_0)}{\bar{v} \ln(z_b/z_0)} \right)^2 \quad (3.18)$$

Als restrictie is gehanteerd dat $z_b/h < 0,05$. Er is onderscheid gemaakt tussen de vloed- en de eb-snelheden door per deelgebied een stroomrichtingssector aan te geven voor vloed en eb. De vloedrichting is tussen 35° en 250° t.o.v. het Noorden (kloksgewijs) voor alle deelgebieden, m.u.v. de gebieden 'ossen' en 'wieling' (beide: 35° en 170°).



4. Resultaten en discussie

4.1 Karakterisering concentratieprofiel

Van elk profiel is de verhouding bepaald van de concentratie aan de bodem, $c(0)$, en de diepte-gemiddelde concentratie, alsook de verhouding van de concentratie aan het oppervlak, $c(h)$, en de diepte-gemiddelde concentratie. In tabel 3 en fig. 2 is het resultaat weergegeven.

De standaardafwijkingen (s.d.) zijn relatief groot, tot meer dan 100%. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de naijling tijdens de erosie-sedimentatie-cyclus. Gemiddeld over alle verticalen en het gehele gebied is de concentratie bij de bodem ca. 1,9 maal zo hoog als de diepte-gemiddelde concentratie, en de concentratie aan het oppervlak ca. 0,65 maal zo laag als de diepte-gemiddelde concentratie.

Opvallend is de versteiling van het profiel ten oosten van Terneuzen, m.n. nabij de bodem. Dit kan een indicatie zijn van een lagere valsnelheid of een grotere verticale menging. De grotere verticale menging ligt niet voor de hand gezien de toename van de saliniteitsgradiënt in oostelijke richting. Een lagere valsnelheid zou gezien de horizontale sortering van marien slib van west naar oost een mogelijke verklaring zijn.

4.2 Valsnelheid

In tabel 4 en fig. 3 is de valsnelheid weergegeven volgens de methode met de Krone-formule. De waarde varieert sterk, getuige ook de relatief grote standaardafwijkingen. Een grillig concentratie-verloop in de tijd door lokale effecten (o.a. turbulentie, golven, 3D-stroming) kan hier de oorzaak van zijn, alsmede effecten van de springtij-doodtij-cyclus. Gezien de gedane aannamen (zie par. 3.2) is het resultaat slechts een grove indicatie. De gemiddeld waarde van de valsnelheid is ca. 5 mm/s. Dat bevestigt de resultaten van Boere (1987) van 1 tot 4 mm/s ter hoogte van Breskens. Ook duidt dit op grote slibvlokken. Meer recente metingen van Van Leussen (1994) in de Eems-Dollard met een video-camera geven aan dat macro-vlokken een belangrijke rol spelen in de depositie. Er is een gering, maar niet overtuigend verschil tussen het oostelijke en westelijke deel, gemiddeld respectievelijk 4,7 en 5,7 mm/s.

In tabel 4 en fig. 3 is de valsnelheid weergegeven volgens de methode van het evenwichtsprofiel. Ook hierbij is de standaardafwijking relatief groot. De gemiddelde waarde is 1,5 mm/s. Dat deze lager is dan die volgens de Krone-formule zou verklaard kunnen worden uit het feit dat hierbij ook de verticalen bij hoge stroomsnelheden meetellen. Dit zou echter door onderzoek aangetoond moeten worden. De lagere waarden ten oosten van Terneuzen stemmen overeen met de bevindingen t.a.v. de versteiling van het concentratie-profiel in par. 4.1. Dit is echter logisch omdat deze methode gebruik maakt van de verhouding $c(0)/\bar{c}$ en



$c(h)/\bar{c}$.

4.3 Erosiesnelheid

In tabel 5 en fig. 4 is de erosieconstante M weergegeven. De gemiddelde waarde is ca. $2 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s. De standaardafwijking is meestal echter veel groter, hetgeen duidt op een zeer scheve verdeling c.q. vele pieken. Dit kan echter grotendeels het gevolg zijn van de variatie binnen een getijperiode. Er is een duidelijk verschil tussen het oostelijk en westelijk deel van de Westerschelde. De gemiddelde waarde van M ten oosten van Terneuzen is ca. $0,6 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s en in het westelijk deel is M ca. $9 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s. Deze waarden verschillen een factor 14.

Recent hebben Portela en Neves (1994) met een 2Dh-model en Cancino en Neves (1994) met een 3D-model slibtransporten in de Westerschelde berekend. Portela en Neves kregen betere resultaten als zij de erosieconstante M in het oostelijk deel de waarde $0,12 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s en in het westelijk deel de waarde $0,3 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s gaven, een verschil van een factor 2.5. Zij gebruikten verder dezelfde modelparameters als Mulder en Udink (1991), zie ook tabel 7. Cancino en Neves gebruikten $M = 0,5 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s en kregen betere resultaten door lokaal M aan te passen tot $0,05 \cdot 10^{-4}$ kg/m²/s, nl. in het overgangsgebied tussen oost en west (ongeveer de gebieden 'zgoost' t/m 'ossenis'). Beide modelresultaten ondersteunen de lokale verschillen tussen de erosieconstante.

De oorzaak van het ruimtelijke verschil in de erosieconstante is niet duidelijk. Mogelijk spelen de herkomst van het slib en de bodemsamenstelling een rol of de diepte-gemiddelde benadering of de verwaarlozing van bepaalde processen (b.v. golven).

4.4 Dispersief transport

De verhouding tussen het advectief respectievelijk het dispersief transport en het totaal transport volgens verg. 3.15 wordt uitgedrukt in de factoren F_A en F_D :

$$F_A = \frac{\bar{v} \bar{c}}{\bar{v} \bar{c}} \quad , \quad F_D = \frac{\overline{v'c'}}{\bar{v} \bar{c}} = 1 - F_A \quad (4.1)$$

De resultaten hier zijn gebaseerd op een steekproef ($n = 22$) uit de nog beschikbare computerprint. Hieruit volgde $F_A = 1,041$ met een s.d. van 0,050. Met uitzondering van één waarde, nl. 1,30, lagen alle waarden tussen 1 en 1,09. Hieruit volgt $F_D = -0,041$ ofwel het dispersief transport is slechts -4% van het totaal transport. Gezien de standaardafwijking kan gesteld worden dat het dispersief transport gemiddeld varieert tussen 0 en -10% van het totale transport.



Ook theoretisch zijn deze transporttermen te bepalen indien verticaalvormen worden aangenomen voor de snelheid en de concentratie. Hieronder volgt een eenvoudige benadering. Aangenomen wordt een parabolisch snelheidsprofiel volgens:

$$v(z) = \bar{v} (1+A) \left(\frac{z}{h} \right)^A \quad (4.2)$$

waarin A de macht is van de snelheidsparabool, en een lineair concentratieprofiel volgens:

$$\begin{aligned} c(z) &= c(0) + 2(\bar{c} - c(0)) \frac{z}{h} \\ &= \bar{c} \left(B + 2(1-B) \frac{z}{h} \right) \quad \text{met} \quad B = \frac{c(0)}{\bar{c}} \quad (B \leq 2) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Integratie van het transport over de diepte m.b.v. verg. 4.2 en 4.3 resulteert in:

$$\overline{vc} = \bar{v} \bar{c} \left(B + \frac{2(1-B)(1+A)}{2+A} \right) \quad (4.4)$$

Hieruit kan F_A berekend worden. De waarde van A varieert in de praktijk tussen 0,15 en 0,25. De gemiddelde waarden voor $c(0)/\bar{c}$ en $c(h)/\bar{c}$ in par. 4.1 suggereren een waarde van B tussen 1,35 en 1,9. Hieruit volgt dat F_A varieert tussen 1,025 en 1,11. Het dispersief transport varieert dan tussen -2,5 en -11% van het totale transport. Dit resultaat bevestigt de analyse van de metingen. Kennelijk zijn de aannames voor de profielvormen ook redelijk.

De dispersiecoëfficiënt kan m.b.v. verg. 3.16 en 4.1 geschreven worden als:

$$D = \frac{\left(1 - \frac{1}{F_A} \right) \bar{v}}{\frac{1}{\bar{c}} \frac{d\bar{c}}{ds}} \quad (4.5)$$

Uit metingen van oppervlakte-concentraties komt een jaargemiddelde gradiënt naar voren variërend van $0,2 \cdot 10^{-6}$ tot $4 \cdot 10^{-6}$ kg/m⁴ en een jaargemiddelde concentratie van 0,03 tot 0,06 kg/m³ (Van Maldegem, 1987). Met een getijgemiddelde snelheid van 0,65 m/s en $F_A = 1,04$ als realistische geachte waarden, volgt hieruit: $D = 190$ à 7500 m²/s. Dit resultaat is echter discutabel want de gradiënt van het gemiddelde zou wel eens anders kunnen zijn dan de gemiddelde gradiënt.

Een alternatieve benadering zou de volgende kunnen zijn. Aangenomen wordt dat de maatgevende concentratiegradiënt bepaald wordt door het verschil tussen de maximale concentratie gedurende een getijperiode (ongeveer optredend ten tijde van max. stroom) en de minimale concen-



tratie (bij kentering). Deze concentraties komen gelijktijdig voor op een onderlinge afstand van ongeveer een kwart van getijgolf lengte. Voor de berekening van D worden dan de volgende getijgemiddelde parameters gevonden:

$$\frac{d\bar{c}}{ds} = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{\frac{1}{4}L} \quad (4.6)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{2}(c_{\max} + c_{\min}) \quad (4.7)$$

waarin $c_{\max}$ de maximale concentratie is, $c_{\min}$ de minimale concentratie en L de getijgolf lengte. Neem nu voor de stroomsnelheid een sinusvormig verloop in de tijd aan volgens:

$$\bar{v}(t) = \hat{v} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (4.8)$$

waarin $\hat{v}$ de snelheidsamplitude is en T de getijperiode. Uit verg. 4.8 volgt getijgemiddelde snelheid:

$$\bar{v} = \frac{2}{\pi} \hat{v} \quad (4.9)$$

Uit verg. 4.5 volgt met verg. 4.6, 4.7 en 4.9 de getijgemiddelde dispersie-coëfficiënt:

$$D = \left(1 - \frac{1}{F_A}\right) \frac{1}{4} L \frac{\hat{v}}{\pi} \frac{(c_{\max} + c_{\min})}{(c_{\max} - c_{\min})} \quad (4.10)$$

Voor de Westerschelde geldt ongeveer $\hat{v} = 1$ m/s, $c_{\max} = 120$ mg/l, $c_{\min} = 20$ mg/l en $F_A = 1,04$. De voortplantingsnelheid van de getijgolf tussen Vlissingen en Bath is ca. 50 km / 1,5 uur c.q. 9,25 m/s. Hieruit volgt bij $T = 45000$ s dat $L \approx 400$ km. Uit verg. 4.10 volgt dan een waarde voor D van ca. 1700 m²/s. De concentratiegradiënt hierbij bedraagt $1 \cdot 10^{-6}$ kg/m⁴, i.e. 1 mg/l per km.

Door Swart (1983) is op basis van de metingen M160-M163 een poging gedaan dispersie-coëfficiënten af te leiden. Dat leidde tot negatieve waarden van D, zodat vergelijking niet zinnig is.

De hierboven gehanteerde methoden om de diffusie-coëfficiënt te bepalen zijn erg grof en leiden tot hoge waarden in vergelijking met die voor het zouttransport. Bovendien gelden in de richting dwars op de hoofdstroom weer andere (lagere) snelheden en concentratiegradiënten. In het model is op grond van de numerieke eisen en gevoeligheidsberekeningen een dispersie-coëfficiënt gebruikt van 200 m²/s voor beide horizontale richtingen.



4.5 Bodemschuifspanning

In tabel 6 en fig. 5 is de berekende bodemschuifspanningsverhouding gegeven volgens verg. 3.18. De opvallend hoge s.d. bij vloed in het gebied 'hansweert' wordt veroorzaakt door één meetlocatie, nl. M48. Dit is ook het geval bij eb in het gebied 'everter' (M40). Op deze locaties leidt de gebiedsbenadering tot fouten. Zowel voor vloed als eb is de gemiddelde verhouding kleiner dan 1, hetgeen betekent dat ofwel het verticale snelheidsprofiel systematisch afwijkt van het theoretische logaritmische profiel ofwel k_s verkeerd gekozen is. Een hogere k_s c.q. z_0 geeft een hogere verhouding.

De gemiddelde waarden suggereren een hogere bodemschuifspanning bij vloed dan bij eb en een sterker effect in het oostelijke t.o.v. het westelijk deel. Dit zou echter ook het gevolg kunnen zijn van een grotere ruwheid bij eb dan bij vloed (zie Bakker, 1985). Alleen in het gebied 'bath' zou het effect significant kunnen zijn. Dit zou pleiten voor een 3D-modellering van het meest oostelijke deel.



5. Conclusies

Door analyse van gemeten verticale profielen van slibgehalte en stroomsnelheid in de Westerschelde is een indruk verkregen van de grootte van slibtransportparameters met het oog op een diepte-gemiddeld wiskundig model.

Door de gevolgde methode zijn vele metingen over één kam geschoren, zodat de resultaten een globaal karakter hebben. Effecten van de fase in de springtij-doodtij-cyclus, wind, golven, baggeren en storten, meetmethode en -onnauwkeurigheden zijn niet bestudeerd.

Een samenvatting van de gemiddelde waarden van de geanalyseerde parameters is gegeven in tabel 7. Daarin zijn ook de gebruikte modelparameter-waarden opgenomen. Door de iets andere keuze van de kritieke bodemschuifspanningen voor sedimentatie en erosie wijken deze waarden af van de 'meetwaarden'. Bovendien zijn met het model gevoelheden onderzocht teneinde tot een definitieve keuze van de parameter-waarden te komen.

Er lijkt een duidelijk verschil te zijn tussen de oostelijke en westelijke Westerschelde qua eigenschappen van het slib. Dit hangt mogelijk samen met de verhouding van fluviatiel en marien slib, de lokale hydrodynamica met invloed op b.v. de flocculatie als ook de invloed van de saliniteitsgradiënten (horizontaal, verticaal). Dit zou verder onderzocht moeten worden en misschien kunnen leiden tot een betere modellering.

Van de metingen die geanalyseerd zijn is nog slechts computer-printuitvoer ter beschikking. Als deze informatie behouden moet worden en verder geanalyseerd en gepresenteerd moet worden is het noodzakelijk de gegevens in de computer in te voeren. Dit hoeft echter geen tijdrovende zaak te zijn m.b.v. moderne scan-technieken. M.n. verder onderzoek naar de variatie van parameters binnen een getijperiode kan meer inzicht verschaffen.

N.B. Gelijktijdig met het definitief maken van dit document is door RIKZ/Middelburg (Van Maldegem) gezorgd voor het opnieuw invoeren van de gegevens in een bestand.



Literatuur

- Bakker, W.T. (1985). Slibproblemen in en om de Westerschelde. Kust en Zee, nr. 1, pp 24-39.
- Boere, P.W. (1987). Valsnelheids- en vertikaal slibtransportmetingen in de Westerscheldemond en berekening van de horizontale slibtransporten in de Oosterschelde. Project Balans nota 1987-30, GWA0.87.113, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Middelburg, DIHO, Yerseke.
- Cancino, L. and R. Neves (1994). 3D-numerical modelling of cohesive suspended sediment in the Western Scheldt estuary. Netherlands Journal of Aquatic Ecology, Vol. 28(3-4), pp. 337-345
- Mulder, H.P.J. and C. Udink (1991). Modelling of Cohesive Sediment Transport. A case study: The Western Scheldt Estuary. In: B.L. Edge (ed.), Proc. of 22nd Coastal Engin. Conf., 1990, Delft, The Netherlands, Vol. 3, pp 3012-3023.
- Portela, L.I. and R. Neves (1994). Numerical modelling of suspended sediment transport in tidal estuaries: a comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (Belgium-The Netherlands). Netherlands Journal of Aquatic Ecology, Vol. 28(3-4), pp. 329-335
- Swart, J.P. (1983). Slibtransportberekening in een dwarsraai in de Westerschelde. Nota WWKZ-83.V007, Rijkswaterstaat, Vlissingen.
- Van Leussen, W. (1988). Aggregation of Particles, Settling Velocity of Mud Flocs. A Review. In: Dronkers and Van Leussen (eds.), Physical Processes in Estuaries, Springer Verlag, Berlin, 1988, pp 347-403.
- Van Leussen, W. (1994). Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. Proefschrift Universiteit Utrecht, February 1994.
- Van Maldegem, D.C. (1987). 1e Benadering slibbalans Westerschelde. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Nota GWA0-87.101
- Waterloopkundig Laboratorium (1985). Zandtransportmodel Westerschelde. Stochastisch onderzoek zandtransportformule. Rapport S582 (L.C. van Rijn et al).

Tabel 1. Herstelde fouten in bestand NAUWESB.

Code Meting	Record nr.	Foute waarde	Gewijzigd in
M84	796	z(5): 124.00	12.40
	801	z(1-6): 0.51, 0.02, 0.08, 0.01, 6.02, 3.50	0.50, 1.00, 2.00, 8.00, 16.00, 23.50
M3	23	v(6): 45.00	0.45
	18	z(1): 5.00	0.50
M167	1858	v(): 43.00	0.43
M44	411	z(1): 5.00	0.50
M111	1116	z(1): 5.00	0.50
M115	1172	z(1): 5.00	0.50
	1175	z(1): 5.00	
	1177	z(1): 5.00	
M145	1562	z(1): 5.00	0.50
M146	1574	z(1): 5.00	0.50
M151	1660	z(1): -0.50	0.50
M67	637	h: 8.00 (bij z(6)=8.50)	9.00
M54	523	h: 5.00 (< hoogste z)	6.00
M130	1325	format fout bij (h=) 10.9	2 spaties verwijderd

$z(i)$ = i-de hoogte boven de bodem;
 $v(i)$ = i-de snelheid boven de bodem;
 h = waterdiepte;

Tabel 2. Indeling in deelgebieden.

Gebied	Metingen (code)	Aantal	Geografische namen
bath	M49, M150-M172	24	Vaarwater boven Bath
zimmerm	M50-M63	14	Zimmermangeul
zgoost	M82-M86, M92, M101-M104	10	Zuidergat (oost)
zgatsvw	M64-M73 / M105-M124	30	Schaar van Waarde / Zuidergat (west)
hansweert	M48, M74-M81, M87-M91, M93-M100, M125-M149	47	Hansweert
ossen	M47	1	Gat van Ossenisse
everter	M36, M37, M39-M46	10	Everingen-Terneuzen
honte	M29, M30 / M28, M35 / M34, M38	6	Honte (west) / Honte (oost) / Honte-Everingen
vlibres	M15, M17, M18, M20-M22 / M24-M27 / M31-M33	13	Sardijngeul / Wielingen (oost) / Spijke-Hoofdplaat
wieling	M4-M14	11	Wielingen (west)
oostelijk deel	bath, zimmerm, zgoost, zgatsvw, hansweert, osse-nis	126	
westelijk deel	everter, honte, vlibres, wieling	40	
rest	M1-M3 / M16, M19 en M23	6	Middeldiep / Oostgat
Totaal	M1-M172	172	

Tabel 3. Karakteristieke concentratieprofiel.

Gebied	Aantal profielen	$c(0)/\bar{c}$		$c(h)/\bar{c}$	
		gem.	s.d.	gem.	s.d.
bath	245	1.62	1.08	0.60	0.25
zimmern	163	1.20	0.56	0.92	0.37
zgoost	117	1.28	0.37	0.78	0.18
zgatsvw	328	1.47	0.77	0.70	0.24
hansweert	596	1.55	0.92	0.66	0.26
ossen	18	1.30	0.80	0.74	0.22
everter	87	4.11	5.99	0.46	0.32
honte	47	3.98	4.09	0.41	0.31
vlibres	109	2.14	2.18	0.63	0.25
wieling	124	4.03	3.94	0.41	0.25
Som deel-gebieden	1834	1.88	2.19	0.66	0.29
oostelijk deel	1467	1.48	0.86	0.70	0.28
westelijk deel	367	3.48	4.23	0.49	0.29
Totaal	1891	1.88	2.16	0.65	0.29

Tabel 4. Valsnelheid volgens formule Krone en evenwichtsprofiel.

Gebied	Valsnelheid [mm/s]					
	evenwichtsprofiel			Krone		
	aantal	gem.	s.d.	aantal	gem.	s.d.
bath	245	2.59	3.80	17	4.44	4.64
zimmerm	163	0.73	2.23	1	0.02	-
zgoost	117	1.28	1.09	2	7.23	2.24
zgatsvw	328	1.66	2.00	30	3.78	6.29
hansweert	596	2.04	2.42	43	4.93	12.81
ossenris	18	1.03	1.47	2	17.29	9.41
everter	87	5.82	9.36	14	6.04	6.15
honte	47	8.78	12.69	1	3.50	-
vlisbres	109	3.34	4.69	7	2.77	1.72
wieling	124	5.99	8.46	22	6.48	11.92
Som deel- gebieden	1834	2.57	4.72	139	5.04	9.50
oostelijk deel	1467	1.83	2.58	95	4.74	9.71
westelijk deel	367	5.52	8.62	44	5.68	9.10
Totaal	1891	1)	1)	1)	5.14	9.50

¹⁾ de juistheid van het beschikbare getal was onduidelijk

Tabel 5. Erosie-constante volgens formule Partheniades.

Gebied	Erosie-constante [10^{-4} kg/m ² /s]		
	aantal	gem.	s.d.
bath	73	1.48	3.32
zimmerm	79	0.06	0.09
zgoost	56	0.51	1.63
zgatsvw	128	0.80	1.76
hansweert	229	0.43	1.10
ossen	10	1.99	4.57
everter	26	10.77	23.89
honte	12	31.06	76.81
vlibres	46	1.02	2.40
wieling	22	9.53	27.04
Som deel- gebieden	681	1.87	12.8
oostelijk deel	575	0.63	1.82
westelijk deel	106	8.58	31.4
Totaal	703	1.84	12.6

Tabel 6. Verhouding tussen bodemschuifspanning volgens snelheid bij de bodem en die volgens diepte-gemiddelde snelheid.

Gebied	Verhouding $\tau_b(v_b)/\tau_b(\bar{v})$					
	vloed			eb		
	aantal	gem.	s.d.	aantal	gem.	s.d.
bath	113	1.03	0.92	132	0.52	0.28
zimmerm	139	0.50	0.26	24	0.56	0.25
zgoost	54	0.95	0.53	63	0.80	0.64
zgatsvw	189	0.87	0.74	139	0.86	0.41
hansweert	299	1.01	2.49	297	0.73	0.39
ossen	8	0.55	0.46	10	0.86	0.78
everter	41	1.01	0.55	46	1.23	3.31
honte	47	0.88	0.59	0	-	-
vlisbres	62	0.82	0.48	47	0.71	0.34
wieling	58	0.62	0.41	66	0.55	0.34
Som deel- gebieden	1010	0.87	1.46	824	0.73	0.88
oostelijk deel	802	0.88	1.62	665	0.72	0.43
westelijk deel	208	0.82	0.52	159	0.79	1.81

Tabel 7. Samenvatting analyse-resultaten.

Parameter	Eenheid	Westelijk en oostelijk deel			Model
		west	oost	oost+west	
$c(0)/\bar{c}$	-	3.48	1.48	1.88	2 ³⁾
$c(h)/\bar{c}$	-	0.49	0.70	0.66	
w_s -Krone ¹⁾	mm/s	5.68	4.74	5.04	
w_s -evenwichtsprofiel	mm/s	5.52	1.83	2.57	0.5/7 ⁴⁾
M-Partheniades ²⁾	10 ⁻⁴ kg/m ² /s	8.58	0.63	1.87	
$F_D = \overline{v'c'}/\overline{vc}$	-			-0.05	
D	m ² /s			150	200

1) $\tau_{cd} = 0.4$

2) $\tau_{ce} = 0.5$

3) $\tau_{cd} = 0.2$

4) $\tau_{ce} = 0.4$; M afhankelijk van correctie voor slibgehalte in de bodem

$$n_x = \sqrt{\frac{\tau}{\rho \omega}} = \underline{\underline{0.7}}$$

figuur 1.

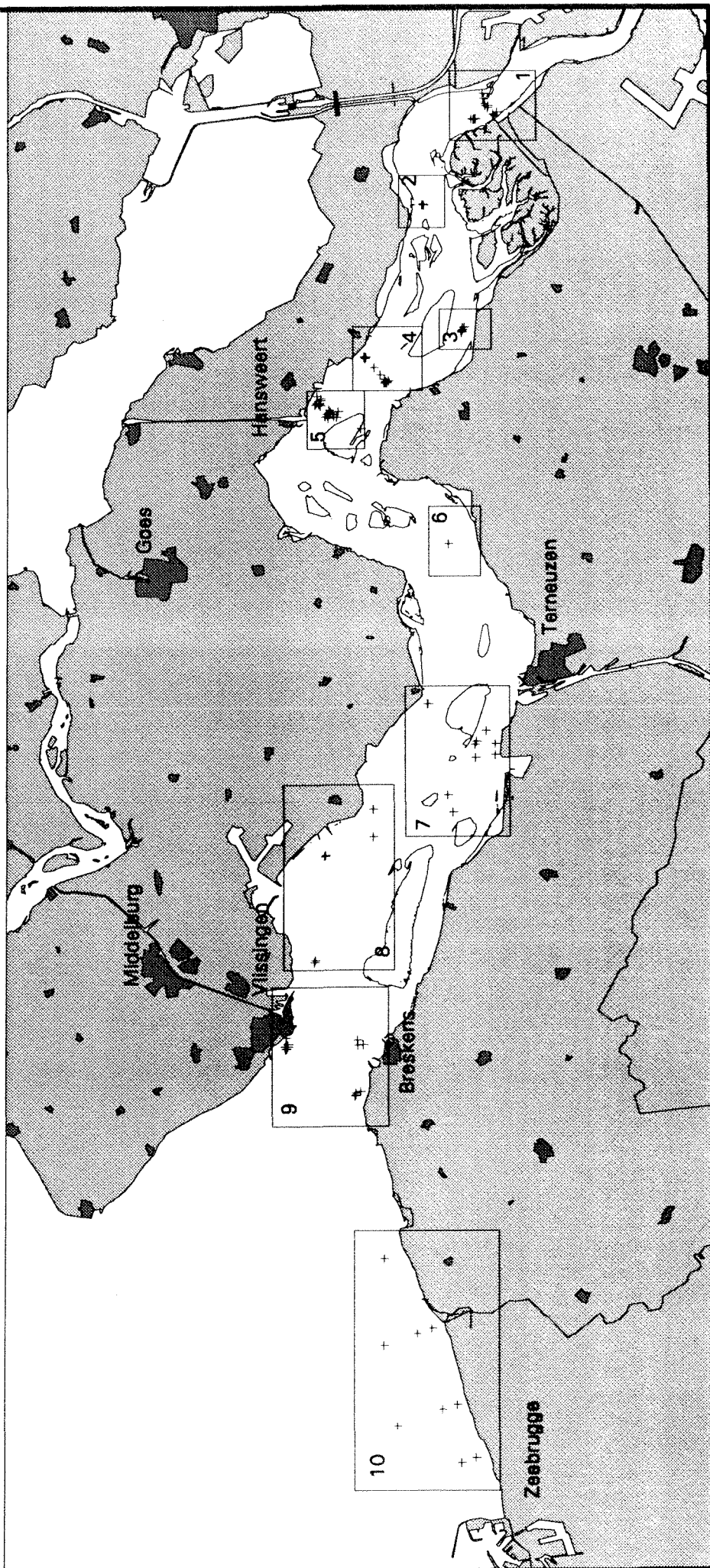
Overzicht locaties en deelgebieden met 13-uurs-
metingen in de Westerschelde, volgens
bestand NAUWESB (1970-1981)

Codenamen van de deelgebieden:

1. Bath
2. Zimmerm
3. Zgoost
4. Zgatsvw
5. Hansweert
6. Ossenis
7. Everter
8. Honte
9. Vlisbres
10. Wieling

+ Meetlocatie

~ N.A.P.



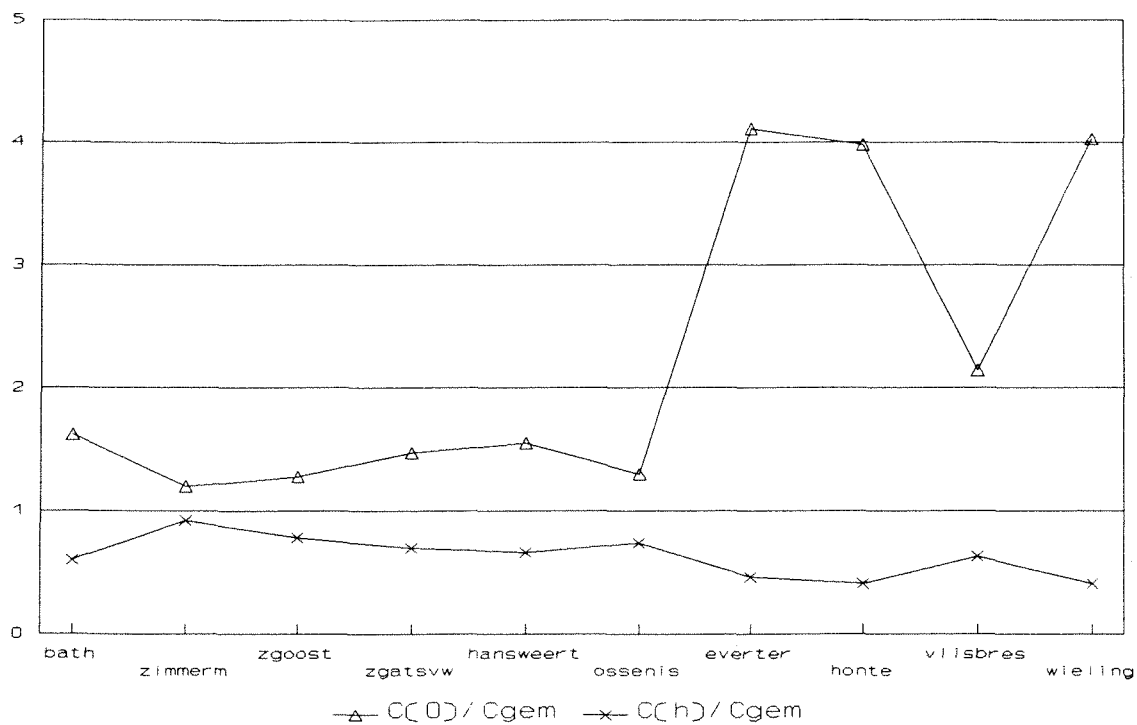


Fig. 2 Karakteristieken concentratieprofiel.

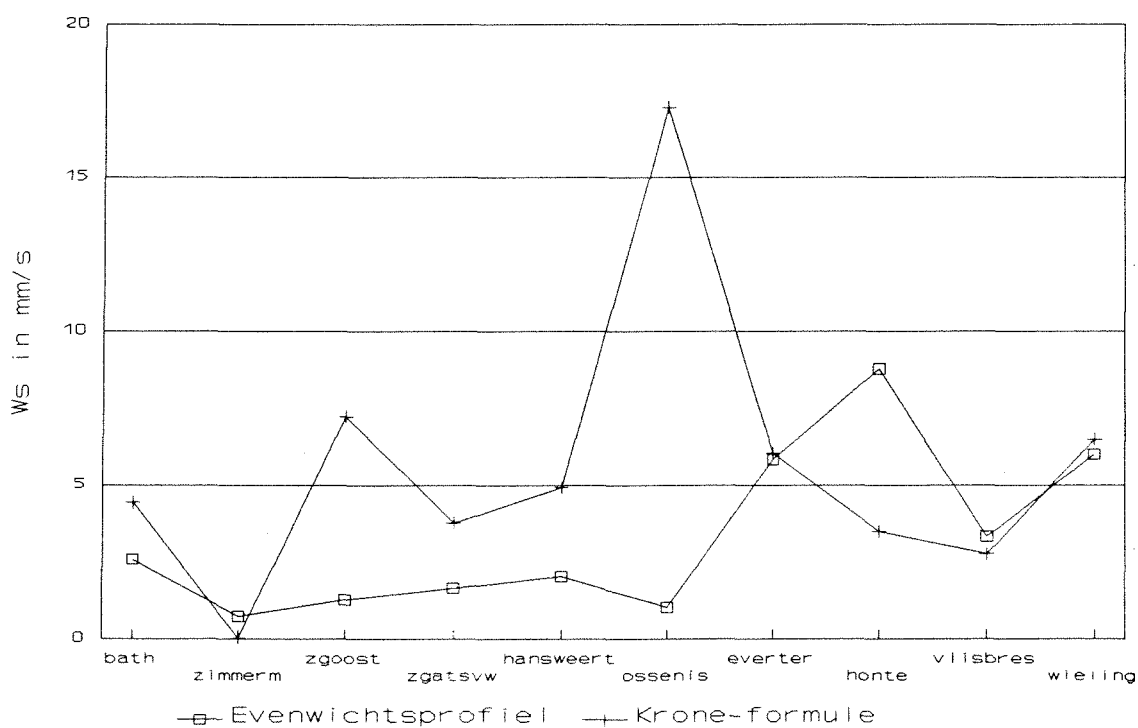


Fig. 3 Valsnelheid volgens formule Krone en evenwichtsprofiel.

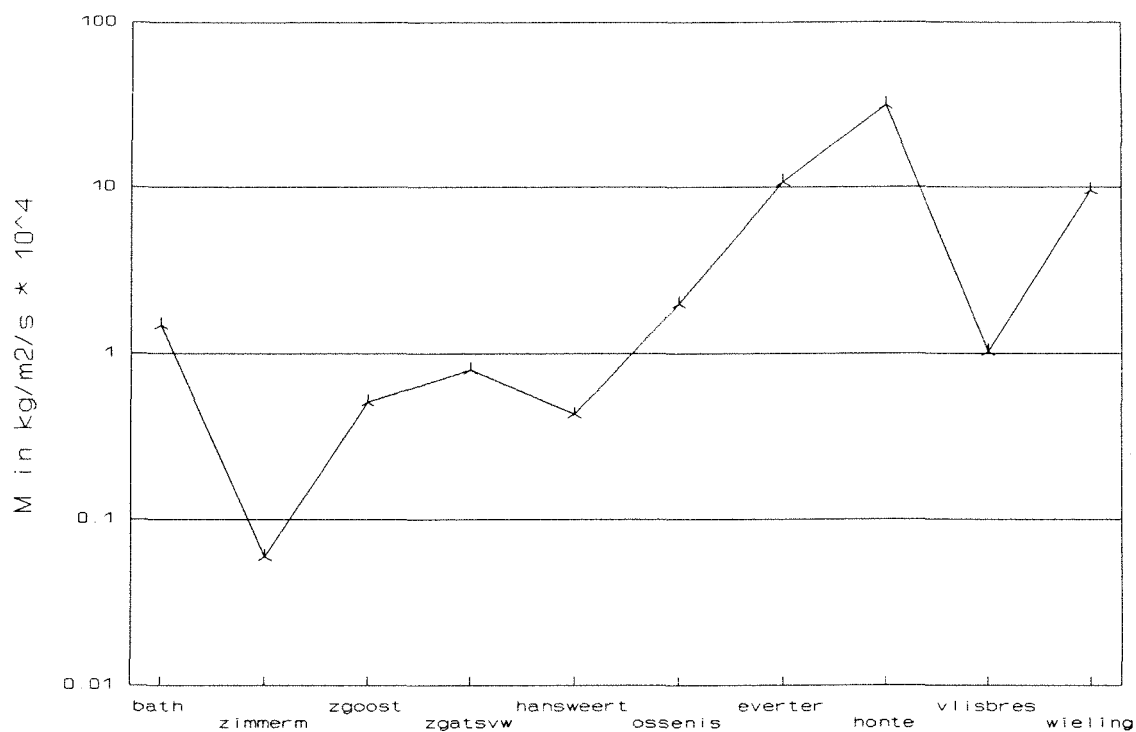


Fig. 4 Erosie-constante volgens formule Partheniades (logarithmische schaal).

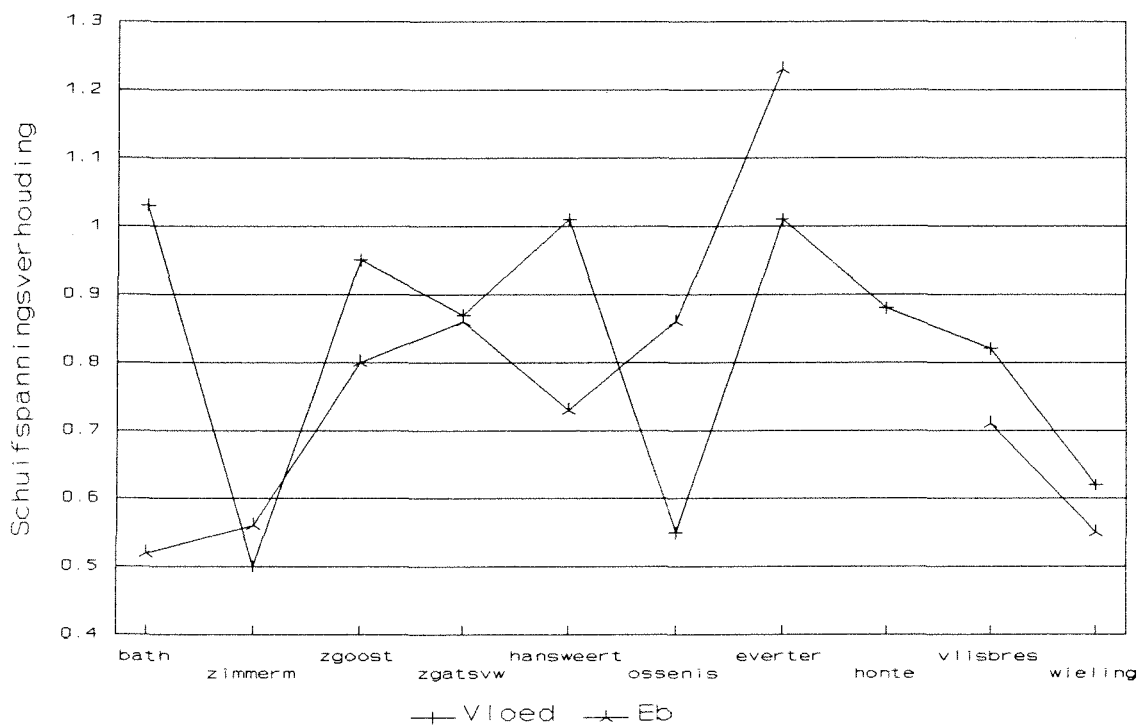


Fig. 5 Verhouding tussen bodemschuifspanning volgens snelheid bij de bodem en die volgens diepte-gemiddelde snelheid ($\tau_b(v_b)/\tau_b(\bar{v})$).

Bijlage 1.

Overzicht 13-uurs-metingen bestand NAUWESB

X en Y in Amersfoortse coördinaten [m], beide zonder min-teken weergegeven.
Omrekening naar RDV-coördinaten (Parijse coördinaten) middels: $X_{RDV} = X_{AMERSFOORT} + 155000$ en $Y_{RDV} = Y_{AMERSFOORT} + 463000$.

1) M42: gecorrigeerde waarde; oorspronkelijke waarde: 102690.

nr.	datum	plaats	X	Y
M1	14-01-1971	Middeldiep	142400	54580
M2	23-04-1971	Middeldiep	142400	54580
M3	24-09-1971	Middeldiep	142558	54432
M4	10-07-1979	Wielingen	137520	82505
M5	10-07-1979	Wielingen	141235	84120
M6	10-07-1979	Wielingen	140980	84840
M7	10-07-1979	Wielingen	140980	84840
M8	10-07-1979	Wielingen	141835	82475
M9	10-07-1979	Wielingen	144760	86095
M10	10-07-1979	Wielingen	144760	86095
M11	10-07-1979	Wielingen	145020	85375
M12	10-07-1979	Wielingen	145825	83150
M13	10-07-1979	Wielingen	147410	87000
M14	10-07-1979	Wielingen	147665	86290
M15	14-12-1970	Sardijngeul	127000	77766
M16	15-12-1970	Oostgat	136670	66195
M17	12-01-1971	Sardijngeul	126992	77624
M18	14-05-1971	Sardijngeul	126888	77754
M19	22-09-1971	Oostgat	136643	66306
M20	03-08-1973	Sardijngeul	126565	77675
M21	16-08-1973	Sardijngeul	127091	77700
M22	30-10-1973	Sardijngeul	127119	77658
M23	24-09-1976	Oostgat	136628	66280
M24	30-11-1970	Wielingen	129460	81055
M25	30-11-1971	Wielingen	129305	81122
M26	17-11-1972	Wielingen	129242	81358
M27	28-02-1973	Wielingen	129395	81113
M28	15-04-1975	Honte	117556	79556
M29	15-04-1975	Honte	122709	79095
M30	27-05-1975	Honte	122819	79055
M31	30-10-1973	Spijkerplaat	126932	81210
M32	14-05-1976	Schaar van de Spijke	126690	81185
M33	03-08-1973	Hoofdplaat	126908	81485
M34	15-04-1975	Honte	116594	81954
M35	27-05-1975	Honte	117521	79608
M36	08-05-1970	Everingen	109997	84721
M37	13-05-1970	Everingen	110000	84688
M38	15-04-1975	Everingen	115230	81955
M39	10-04-1970	Pas van Terneuzen	111349	87590
M40	10-02-1976	Pas van Terneuzen	112540	88065
M41	10-02-1976	Pas van Terneuzen	115385	85935
M42	12-02-1976	Pas van Terneuzen	112690 ¹⁾	87070
M43	12-02-1976	Pas van Terneuzen	111990	88070
M44	13-05-1976	Pas van Terneuzen	114540	85680
M45	10-09-1980	Pas van Terneuzen	112027	87032
M46	10-09-1980	Pas van Terneuzen	111886	87116
M47	17-03-1976	Gat van Ossensisse	102080	85740
M48	28-07-1976	Ossensisse	96381	81411
M49	12-11-1971	Vaarwater boven Bath	81098	87080
M50	05-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M51	08-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M52	11-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M53	11-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M54	12-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M55	12-08-1975	Zimmermangeul	85297	84508
M56	18-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M57	18-08-1975	Zimmermangeul	85339	84569
M58	19-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M59	19-08-1975	Zimmermangeul	85330	84521
M60	20-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470

M61	20-08-1975	Zimmermangeul	85330	84523
M62	26-08-1975	Zimmermangeul	85320	84470
M63	26-08-1975	Zimmermangeul	85335	84548
M64	01-11-1978	Schaar van Waarde	92851	81646
M65	28-02-1979	Schaar van Waarde	92836	81602
M66	28-02-1979	Schaar van Waarde	92836	81602
M67	29-03-1979	Schaar van Waarde	92838	81662
M68	30-03-1979	Schaar van Waarde	92857	81565
M69	13-06-1979	Zuidergat	92813	81597
M70	12-07-1979	Schaar van Waarde	92828	81607
M71	09-10-1979	Schaar van Waarde	92828	81607
M72	09-10-1979	Schaar van Waarde	92828	81607
M73	22-11-1979	Zuidergat	92828	81607
M74	09-06-1970	Zuidergat	95655	79800
M75	10-06-1970	Zuidergat	95095	79320
M76	19-06-1970	Zuidergat	95655	79695
M77	03-07-1970	Zuidergat	95228	79390
M78	18-08-1970	Zuidergat	95180	79108
M79	18-08-1970	Zuidergat	95792	80076
M80	20-08-1970	Zuidergat	95165	79314
M81	20-08-1970	Zuidergat	95780	80055
M82	12-11-1971	Zuidergat	91494	86486
M83	20-01-1972	Zuidergat	91505	86453
M84	30-03-1972	Zuidergat	91601	86440
M85	29-06-1972	Zuidergat	91642	86437
M86	25-10-1972	Zuidergat	91380	86485
M87	21-03-1973	Zuidergat	95820	80200
M88	21-03-1973	Zuidergat	95450	79820
M89	18-07-1973	Zuidergat	95450	79820
M90	18-07-1973	Zuidergat	95450	79820
M91	18-07-1973	Zuidergat	95820	80200
M92	23-07-1974	Zuidergat	91362	86581
M93	26-09-1973	Zuidergat	95820	80200
M94	26-09-1973	Zuidergat	95450	79820
M95	26-09-1973	Zuidergat	95450	79820
M96	28-11-1973	Zuidergat	95622	79830
M97	28-11-1973	Zuidergat	95096	79197
M98	11-12-1973	Zuidergat	95450	79820
M99	11-12-1973	Zuidergat	95820	80200
M100	06-08-1974	Zuidergat	95780	79640
M101	31-10-1974	Zuidergat	91550	86411
M102	15-11-1974	Zuidergat	91550	86411
M103	27-03-1975	Zuidergat	91590	86415
M104	11-07-1975	Zuidergat	91590	86415
M105	23-09-1975	Schaar van Waarde	93360	82055
M106	23-09-1975	Zuidergat	94057	82656
M107	23-09-1975	Zuidergat	93720	82377
M108	08-03-1978	Zuidergat	94110	82707
M109	08-03-1978	Zuidergat	92845	81635
M110	26-05-1978	Zuidergat	94082	82722
M111	26-05-1978	Zuidergat	92914	81616
M112	22-06-1978	Zuidergat	94123	82571
M113	22-06-1978	Zuidergat	92854	81565
M114	18-08-1978	Zuidergat	94061	82673
M115	18-08-1978	Zuidergat	92856	81593
M116	01-11-1978	Zuidergat	93942	82626
M117	28-02-1979	Zuidergat	94077	82619
M118	28-02-1979	Zuidergat	94077	82619
M119	29-03-1979	Zuidergat	94092	82652
M120	30-03-1979	Zuidergat	94037	82630
M121	13-06-1979	Zuidergat	94088	82611
M122	12-07-1979	Zuidergat	94010	82809
M123	09-10-1979	Zuidergat	94010	82809
M124	22-11-1979	Zuidergat	94010	82809
M125	24-10-1980	Zuidergat	95550	79900
M126	31-03-1981	Zuidergat	95820	80200
M127	31-03-1981	Zuidergat	95820	80200
M128	31-03-1981	Zuidergat	95670	80020
M129	31-03-1981	Zuidergat	95670	80020
M130	02-04-1981	Zuidergat	95670	80020
M131	02-04-1981	Zuidergat	95820	80200
M132	08-04-1981	Zuidergat	95450	79820
M133	08-04-1981	Zuidergat	94890	79410
M134	15-04-1981	Zuidergat	95450	79820

M135	15-04-1981	Zuidergat	95450	79820
M136	15-04-1981	Zuidergat	94980	79410
M137	22-04-1981	Zuidergat	95670	80020
M138	22-04-1981	Zuidergat	95860	79785
M139	22-04-1981	Zuidergat	95510	80295
M140	15-05-1981	Zuidergat	95670	80020
M141	15-05-1981	Zuidergat	95670	80020
M142	15-05-1981	Zuidergat	95670	80020
M143	15-05-1981	Zuidergat	95860	79785
M144	15-05-1981	Zuidergat	95510	80295
M145	19-05-1981	Zuidergat	95820	80200
M146	19-05-1981	Zuidergat	95820	80200
M147	20-05-1981	Zuidergat	95450	79820
M148	21-05-1981	Zuidergat	94770	79225
M149	26-05-1981	Zuidergat	94980	79410
M150	12-11-1971	Vaarwater boven Bath	81098	87080
M151	20-01-1972	Vaarwater boven Bath	81115	87100
M152	30-03-1972	Vaarwater boven Bath	81065	87110
M153	29-06-1972	Vaarwater boven Bath	81081	87125
M154	25-10-1972	Vaarwater boven Bath	81075	87180
M155	23-07-1974	Vaarwater boven Bath	81048	87200
M156	31-10-1974	Vaarwater boven Bath	81080	87120
M157	15-11-1974	Vaarwater boven Bath	81080	87120
M158	11-07-1975	Vaarwater boven Bath	81080	86970
M159	11-07-1975	Vaarwater boven Bath	81080	86970
M160	04-09-1975	Vaarwater boven Bath	80831	88061
M161	04-09-1975	Vaarwater boven Bath	80516	87792
M162	04-09-1975	Vaarwater boven Bath	80428	87682
M163	04-09-1975	Vaarwater boven Bath	80036	87550
M164	05-09-1975	Vaarwater boven Bath	80927	88144
M165	05-09-1975	Vaarwater boven Bath	80838	88068
M166	05-09-1975	Vaarwater boven Bath	80317	87622
M167	05-09-1975	Vaarwater boven Bath	79819	87526
M168	03-11-1976	Vaarwater boven Bath	80436	87825
M169	04-11-1976	Vaarwater boven Bath	80740	88250
M170	04-11-1976	Vaarwater boven Bath	80740	88250
M171	15-11-1976	Vaarwater boven Bath	80862	88075
M172	15-11-1976	Vaarwater boven Bath	80436	87825

1: #: M160#
 2: #*COPY#
 3: M160
 4: AANTAL MEETPUNTEN IN DE VERTIKAAL : 6
 5: DATUM : 04-09-1975
 6: PLAATS : VAARWATER BOVEN BATH
 7: RAAI : 1
 8: MEETPUNT : 3
 9: CODENUMMER : 01.05.M75
 10: X-COORDINAAT : 80831.000
 11: Y-COORDINAAT : 88061.000
 12: GEUL : 15
 13: HOEK NORMAAL MEETRAAI (GRADEN) : 320.00
 14: MEETMETHODE : FLES MET BAL BAL
 15: RECORDNUMMER : 1752
 16: BEGINTIJD : 6 UUR 0 MIN
 17: EINDTIJD : 6 UUR 22 MIN
 18: WATERDIEPTE (M) : 19.60
 19: HOOGTE BOVEN BED (M) :
 20: .50 1.00 2.00 6.60 13.10 19.10
 21: STROOMSNELHEID (M/S) :
 22: .21 .28 .35 .58 .48 .75
 23: STROOMRICHTING (GRADEN) :
 24: 317.00 317.00 317.00 317.00 317.00 317.00
 25: SLIBCONCENTRATIE (PPM) :
 26: 70.00 81.00 69.00 26.00 23.00 9.00
 27: ZANDCONCENTRATIE (PPM) :
 28: 15.00 9.00 10.00 6.00 3.00 2.00
 29: RECORDNUMMER : 1753
 30: BEGINTIJD : 7 UUR 5 MIN
 31: EINDTIJD : 7 UUR 25 MIN
 32: WATERDIEPTE (M) : 17.50
 33: HOOGTE BOVEN BED (M) :
 34: .50 1.00 2.00 6.20 12.40 17.00
 35: STROOMSNELHEID (M/S) :
 36: .26 .28 .32 .55 .69 .71
 37: STROOMRICHTING (GRADEN) :
 38: 315.00 315.00 315.00 315.00 315.00 315.00
 39: SLIBCONCENTRATIE (PPM) :
 40: 20.00 24.00 24.00 26.00 34.00 16.00
 41: ZANDCONCENTRATIE (PPM) :
 42: 7.00 6.00 3.00 4.00 6.00 4.00
 43: RECORDNUMMER : 1754
 44: BEGINTIJD : 7 UUR 30 MIN
 45: EINDTIJD : 7 UUR 50 MIN
 46: WATERDIEPTE (M) : 17.50
 47: HOOGTE BOVEN BED (M) :
 48: 0.50 1.00 2.00 6.00 11.70 17.00
 49: STROOMSNELHEID (M/S) :
 50: .25 .27 .33 .58 .80 .78
 51: STROOMRICHTING (GRADEN) :
 52: 315.00 315.00 315.00 315.00 315.00 315.00
 53: SLIBCONCENTRATIE (PPM) :
 54: 31.00 28.00 25.00 30.00 38.00 40.00
 55: ZANDCONCENTRATIE (PPM) :
 56: 7.00 7.00 5.00 5.00 7.00 2.00
 57: RECORDNUMMER : 1755
 58: BEGINTIJD : 8 UUR 15 MIN
 59: EINDTIJD : 8 UUR 30 MIN
 60: WATERDIEPTE (M) : 17.80
 61: HOOGTE BOVEN BED (M) :
 62: .50 1.00 2.00 6.00 11.70 17.30

Bijlage 3

Extrapolatie van in de verticaal gemeten stroomsnelheid en sedimentconcentratie naar bodem en oppervlak

De gemeten en door extrapolatie toegevoegde punten zijn genummerd van 1 tot n, beginnend bij de bodem. Verder is v de grootte van de snelheid, ϕ de richting, c de concentratie en z de verticale as, positief omhoog t.o.v. de bodem.

Extrapolatie stroomsnelheid naar het oppervlak

Er wordt in dit geval één punt aan de meting toegevoegd. Aan het oppervlak, op hoogte z_n (= waterdiepte), geldt:

$$v_n(z_n) = v_{n-1}(z_{n-1}) \quad , \quad \phi_n(z_n) = \phi_{n-1}(z_{n-1})$$

waarin z_{n-1} het hoogste meetniveau aangeeft.

Extrapolatie stroomsnelheid naar de bodem

Er worden in dit geval twee punten toegevoegd. Bij de bodem, $z_1 = 0$, geldt:

$$v_1(z_1) = 0 \quad , \quad \phi_1(z_1) = \phi_3(z_3)$$

waarin z_3 het laagste meetniveau aangeeft.

Tussen de bodem en het laagste meetniveau wordt halverwege een extra waarde gecreëerd op z_2 : $z_2 = \frac{1}{2}z_3$. Het toevoegen van dit extra punt is bedoeld om de snelheidsgradiënt bij de bodem beter weer te geven. Omdat bij de bodem de snelheidsgradiënt doorgaans maximaal is en ook het sedimenttransport maximaal kan zijn, kan een verfijning een realistischer profiel opleveren.

De interpolatie tussen bodem en oppervlak zou op basis van een logaritmisch of een parabolisch verloop kunnen gebeuren. Van Rijn stelt voor in zijn "Data Base - Sand concentration profiles for current and waves" (M 1695-04-1 / H 186-04-1, Delft Hydraulics Laboratory, January 1986) een parabool met macht 0.25 te gebruiken tussen het onderste meetpunt en de bodem. Het nadeel hiervan is dat geen rekening gehouden wordt met negatieve gradiënten boven het onderste meetpunt, die in een getijde-stroming m.n. rond kentering voor kunnen komen. Een logaritmisch of parabolisch verloop door het punt op de bodem, z_1 en de twee onderste gemeten punten, z_3 en z_4 , leidt evenmin tot realistische resultaten (de functies blijken zich hiervoor niet te lenen en kunnen tot extreem hoge snelheden bij de bodem leiden). Daarom wordt hier een andere methode voorgesteld, waarbij rekening gehouden wordt met het snelheidsverloop tussen de onderste twee gemeten punten, v_3 en v_4 . Hierbij wordt uitgegaan van een lineair verloop i.c.m. een parabolische vergelijking volgens:

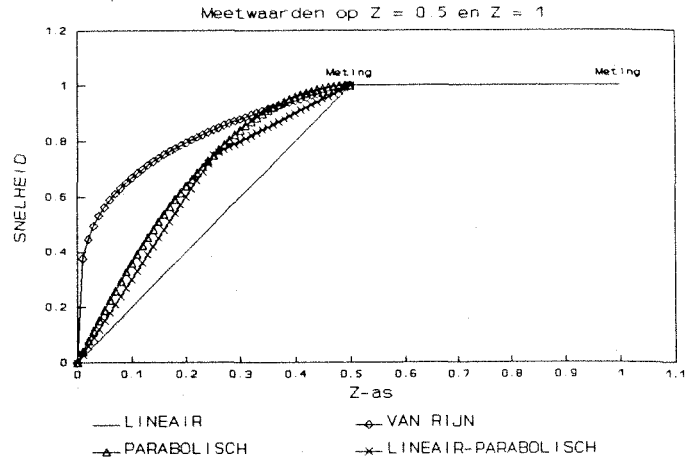
$$v(z) = \frac{z}{z_3} v_3 + a \left(1 - \frac{z}{z_3}\right) \frac{z}{z_3} \quad \text{met} \quad a = v_3 - \left(\frac{v_4 - v_3}{z_4 - z_3}\right) z_3 \quad (0 < z < z_3)$$

waarbij a volgt uit de aanname dat de snelheidsgradiënt op $z = z_3$, gelijk is aan die tussen z_3 en z_4 . Uit dit verband volgt:

$$v(z_2) = \frac{3}{4} v_3 - \frac{1}{4} z_3 \left(\frac{v_4 - v_3}{z_4 - z_3}\right)$$

Deze lineair-parabolische methode komt, gezien de eigenschappen van de functie, er op neer dat de snelheid halverwege de bodem en het onderste meetpunt gelijk is aan de gemiddelde waarde van a) de waarde die ligt op een rechte lijn door v_1 en v_3 en b) de waarde die ligt op een rechte lijn door v_3 en v_4 . In nevenstaande figuur zijn 4 verschillende benaderingen weergegeven ter illustratie van de verschillen (de parabool is gebaseerd op dezelfde gradiënt bij het onderste meetpunt als tussen de 2 meetpunten).

Extrapolatie van snelheid naar de bodem



Voor de snelheidsrichting wordt aangenomen dat:

$$\phi_1(z_1) = \phi_2(z_2) = \phi_3(z_3)$$

Extrapolatie van de concentratie naar het oppervlak

Er wordt een negatieve e-macht aangenomen door de concentratie van de bovenste twee gemeten punten op respectievelijk z_{n-1} en z_{n-2} :

$$c_{n-1} = c_{n-2} e^{-a(z_{n-1} - z_{n-2})}$$

waaruit volgt voor de coëfficiënt a :

$$a = \frac{\ln\left(\frac{c_{n-1}}{c_{n-2}}\right)}{z_{n-1} - z_{n-2}}$$

M.b.v. coëfficiënt a wordt deze e-macht gebruikt om de concentratie aan het oppervlak, z_n , te berekenen:

$$c_n = c_{n-1} e^{-a(z_n - z_{n-1})} = c_{n-1} \left(\frac{c_{n-1}}{c_{n-2}} \right)^{\frac{z_n - z_{n-1}}{z_{n-1} - z_{n-2}}}$$

Als restrictie geldt: $0 \leq c_n \leq c_{n-1}$.

Extrapolatie van de concentratie naar de bodem

Naar de bodem toe worden twee punten toegevoegd: op de bodem zelf, $z_1 = 0$, en op de hoogte $z_2 = k_s$, waarbij k_s de equivalente ruwheidshoogte volgens Nikuradse is. De waarde van k_s komt ongeveer overeen met de halve ribbelhoogte. Voor de extrapolatie naar z_2 wordt dezelfde methode gebruikt als voor extrapolatie naar het oppervlak, met gebruikmaking van de onderste twee meetpunten (z_3, z_4):

$$c_2 = c_3 \left(\frac{c_3}{c_4} \right)^{\frac{z_2 - z_3}{z_3 - z_4}}$$

Als restrictie geldt: $c_2 \geq 0$. Bij de bodem geldt: $c_1 = c_2$.