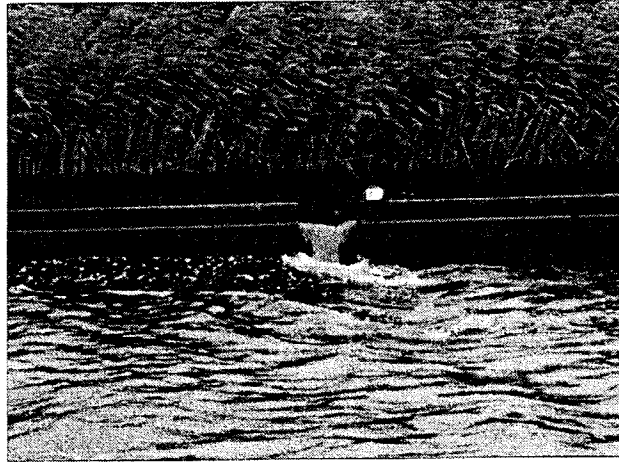


Aanslibbing Natte Strook

Augustus 1998

J.F de Vries



Eindrapport

Voorwoord

Voor U ligt het eindrapport van mijn afstudeerwerk, getiteld “Aanslibbing Natte Strook”. Met dit rapport beëindig ik mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Het afstudeerproject is tot stand gekomen door een samenwerking tussen WL | Delft hydraulics, Rijkswaterstaat (Dienst Weg- en Waterbouwkunde). De opdrachtgever van het project is Rijkswaterstaat, en de experimenten zijn uitgevoerd bij WL | Delft hydraulics. In mei 1997 jl. is een aanvang gemaakt met het project.

Aan de zijde van WL | Delft hydraulics is het project begeleid door ir. H.J. Verheij en drs. M.B. de Vries. Aan de zijde van de opdrachtgever hebben ir. R. Boeters en ir. P. Klok voor de begeleiding gezorgd. Namens de Technische Universiteit Delft waren ir. G.J. Schiereck, ir. J.C. Winterwerp en Prof. ir. K. d'Angremond de begeleiders. De afstudeer commissie bestaat uit Prof. ir. K. d'Angremond, ir. G.J. Schiereck, ir. H.J. Verheij en ir. P. Klok.

Bij deze wil ik een ieder bedanken die mij geholpen hebben bij de tot stand koming van dit rapport. In het bijzonder mijn begeleiders, met name Pieter Klok voor zijn tijd en zijn motiverende gesprekken, de mede afstudeerders op de Waterbouw kamer en mijn ouders voor hun hulp en steun.

Delft, augustus 1998

Jules de Vries.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Probleem beschrijving	3
2.1 Probleemanalyse	3
2.2 Probleemstelling	3
2.3 Doelstellingen	4
2.4 Probleemaanpak	4
2.5 Afbakening	4
3. Proces analyse	5
3.1 Inleiding	5
3.2 Waterbeweging	5
3.2.1 Scheepvaart	5
3.2.2 Waterbeweging in de opening	7
3.2.3 Waterbeweging in de natte strook	10
3.3 Vegetatie invloeden	11
3.4 Samenvattend	12
3.5 Slibtransport en aanslibbing	13
3.5.1 Slib vanuit het kanaal	13
3.5.2 Slib door de opening	14
3.5.3 Aanslibbing in de natte strook	15
3.5.4 Vegetatie invloeden	20
3.5.5 Samenvattend	13
4. Voorbereidingsexperimenten	21
4.1 Algemeen	21
4.2 Proefopzet	21
4.3 Randvoorwaarden en uitgangspunten	22
4.4 Experiment beschrijving	22
4.5 Te gebruiken faciliteiten	23
4.5.1 Instrumentatie	23
4.5.2 Slibkarakteristieken	24
4.5.3 Vegetatie	25
4.6 Gelijkvormigheid	26
4.7 Uit te voeren experimenten	27
5. Resultaten	29
5.1 Inleiding	29
5.2 Waterbeweging	29
5.2.1 Algemeen	29
5.2.2 Stroomsnelheden	30
5.2.3 Waterstanden	31
5.2.4 Volume uitwisseling	32
5.2.4.1 Schijf methode	32
5.2.4.2 Debiet methode	33
5.2.4.3 Conclusie	37
5.3 Aanslibbings experimenten	37
5.3.1 Algemeen	37
5.3.2 Slib concentratie metingen	38
6. Evaluatie resultaten	43
6.1 Inleiding	43

6.2 Waterbeweging	43
6.2.1 Effecten openingsgrootte op volumeuitwisseling	44
6.2.2 Effecten kanaalspiegeldaling op volumeuitwisseling	45
6.2.3 Effecten openingsgrootte op langsstroming	45
6.2.4 Effecten kanaalspiegeldaling op langsstroming	46
6.2.5 Effecten vegetatie op volumeuitwisseling	47
6.2.6 Effecten vegetatie op langsstroming	47
6.3 Aanslibbings experimenten	48
6.3.1 Effecten vegetatie en periode stilwater op slib toestroom	48
6.3.2 Effecten volumeuitwisseling	49
6.4 Vergelijking met wiskundige modellering natte strook concentratie	50
7. Conclusies en aanbevelingen	53
7.1 Conclusies	53
7.2 Aanbevelingen	55

Literatuurlijst

Bijlagen

- H3 Dimensie analyse
- H4 PLONS simulaties
- H5.1 Middeling meet resultaten
- H5.2 Snelheids metingen
- H5.3 Waterstands metingen
- H5.4 Bepaling valsnelheid
- H6 Concentratieverloop volgens analytisch model.

Samenvatting

In scheepvaartkanalen worden er steeds meer natuurvriendelijke oevers aangelegd. Dit zijn oevers die bestaan uit een vooroever en een daarachter gelegen natte strook of plasberm. In de vooroever zitten openingen die dienen om vers water vanuit het kanaal naar de natte strook te laten stromen om ongewenste effecten van stilstaand water te voorkomen.

Tengevolge van scheepvaart ontstaat er een wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook. Schepen wervelen ook slib op, waardoor er slibrijk water de natte strook instroomt. In de praktijk is gebleken dat de natte stroken aanslibben.

Het doel van dit project was om de fysische verschijnselen te identificeren die bij de aanslibbing een rol spelen. Verder moest worden bekeken welke parameters deze verschijnselen sturen. Het project dient verder ook als pilot studie voor het modelleren van natuurvriendelijke oevers. Er is een procesanalyse gedaan naar de waterbeweging en de aanslibbings processen. Uit de procesanalyse volgen hypothesen, die vervolgens met behulp van experimenten (simulaties van de processen in een model natte strook) worden getoetst.

Zo blijkt uit de proces analyse de volumeuitwisseling, uitgedrukt in het volumeuitwisselings percentage p) afhankelijk te zijn van de grootte van de opening (a), het verval over de opening (Δh) welke veroorzaakt wordt door een spiegeldaling rond varende schepen, en de duur van de spiegeldaling (T_{sd}). Vegetatie verhoogt de hydraulische weerstand en zal de langsstroming in de natte strook vertragen.

De netto concentratie toestroom is het verschil tussen de in- en uitgestroomde slibconcentratie door de opening van de vooroever naar de natte strook. De valsnelheid (w) in combinatie met de periode stilwater (T , periode tussen scheepspassages) bepalen hoeveel slib er bij een bepaalde diepte van de natte strook (h_{ns}) kan bezinken. Samen leveren deze parameters de dimensieloze parameter $T \cdot w/h$ op. De netto slib concentratie toestroom is dus afhankelijk van p en $T \cdot w/h$. Door de vertragende werking van vegetatie op de langstroming zal de aanslibbing worden versneld.

De experimenten zijn uitgevoerd in een model natte strook met een verticale vooroever, waarin een opening zat. Deze bevond zich bij het wateroppervlak (overlaat) of eronder (onder doorlaat). Scheepspassages zijn gesimuleerd door een verval over de opening te creëren. Er zijn eerst experimenten uitgevoerd om alleen de waterbeweging te simuleren en vervolgens de aanslibbing. Tevens is er een analytisch model afgeleid waarmee de gemiddelde natte strook concentratie bepaald kan worden.

Er kan geconcludeerd worden dat de belangrijkste parameters voor de aanslibbing zijn:

- volumeuitwisselings percentage p ; Deze parameter bepaald de hoeveelheid slib die de natte strook instroomt en de langsstroming.
- de parameter $T \cdot w/h$; Deze parameter bepaald hoeveel slib er kan bezinken.
- vegetatie geen invloed heeft op het volumeuitwisselings percentage. Het vertraagt wel de langsstroming en er blijkt een toename te zijn van de netto slibconcentratie toestroom naar de natte strook.

Voor toekomstige projecten wordt aanbevolen de huidige proefopstelling aan te passen en het analytisch model verder te ontwikkelen tot computer model.

Lijst van symbolen

a	=doorstroomoppervlak opening	$[m^2]$
a_n	=natte doorsnede opening	$[m^2]$
A_c	=oppervlakte kanaal doorsnede	$[m^2]$
A_s	=oppervlakte grootspant schip	$[m^2]$
b	=breedte waterspiegel	$[m]$
B	=breedte van de opening	$[m]$
c	=concentratie	$[gr/dm^3]$
C	=Chezy coëfficiënt	$[m^{1/2}/s]$
D_s	=diameter slibdeeltje	$[m]$
E	=energiehoogte boven drempel	$[m]$
Fr	=Froude getal	$[-]$
g	=gravitatie versnelling	$[m^2/s]$
h	=waterdiepte	$[m]$
i	=verhang in de natte strook	$[-]$
I	=verhang energielijn	$[-]$
L_{ns}	=lengte natte strook	$[m]$
L_s	=scheepslengte	$[m]$
m	=afvoercoëfficiënt	$[-]$
n	=vegetatie dichtheid	$[1/m^2]$
p	=volumeuitwisselings percentage	$[-]$
P	=uitwisselingsprisma	$[m^3.s]$
Q	=(uitwisselings)debiet	$[m^3/s]$
R	=hydraulische straal	$[m]$
S	=transport van slib	$[kg/s]$
t	=tijd	$[s]$
T	=periode tussen twee scheepspassages	$[s]$
T_{ns}	=periode natte strook golf	$[s]$
T_{sd}	=duur spiegel daling	$[s]$
u_b	=bodem snelheid natte strook	$[m/s]$
u_l	=langsstroming natte strook	$[m/s]$
v	=golfsnelheid	$[m/s]$
V_{ns}	=volume natte strook	$[m^3]$
V_s	=scheepssnelheid	$[m/s]$
V_{uitw}	=uitgewisseld volume	$[m^3]$
w	=valsnelheid	$[m/s]$
z	=dikte sliblaag	$[m]$
Δh	waterspiegeldaling	$[m]$
ΔF	kombergingsoppervlak	$[m^2]$
ϕ	erosie constante	$[kg/m^2.s]$
λ	inverse van de relaxatietijd	$[1/s]$
μ	contractie coëfficiënt	$[-]$
ρ_s	dichtheid slib	$[kg/m^3]$
ρ_w	dichtheid water	$[kg/m^3]$
τ_b	bodemschuifspanning	$[N/m^2]$
τ_{cr}	kritieke bodemschuifspanning	$[N/m^2]$

Hoofdstuk 1 Inleiding

De oever vormt de grens tussen land en water. Er is van nature een continue wisselwerking tussen land en water. Ook de mens heeft invloed op de oever. Door het toenemen van het motorvermogen en de scheepsafmetingen vindt een voortdurende afkalving plaats van de oevers van scheepvaartkanalen. Om dit te voorkomen worden oevers veelal beschermd met damwanden of stenen. Dit heeft wel tot gevolg dat de waarde van de ter plaatse aanwezige natuur en landschap daalt. Om deze waarden toch te kunnen behouden heeft men een speciale oever gecreëerd, waarbij er een ondiepe oeverstrook ontstaat achter een vooroever. De ondiepe oeverstrook wordt ook wel de natte strook genoemd of plasberm. De natte strook heeft als doel een toename van de flora en fauna in de oever te verkrijgen door middel van een geleidelijke overgang van land naar water.

De vooroever kan een damwand- of een stenendam-constructie zijn. Deze moet om ongewenste effecten van stilstaandwater zoals zuurstofloosheid en overmatige algengroei in de natte strook te voorkomen, een openverbinding hebben met de vaarweg. Zodoende kan er een wateruitwisseling plaats vinden tussen de natte strook en de vaarweg.

In scheepvaart kanalen wordt er slib van de kanaalbodem opgewerveld. Dit slib wordt door de wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook meegenomen. In de praktijk blijkt dat de natte strook na een bepaalde periode aanslibt. Er blijft dus kennelijk slib in de natte strook achter.

Vanuit de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat (RWS-DWW) is een studie gestart om de sedimentatie van slib in natte stroken te bepalen en daarmee tot een verbeterd ontwerp van natte stroken te komen.

Bij WL | Delft hydraulics zijn kleinschalige experimenten uitgevoerd in het kader van spuurwerk rond de interacties tussen bodem, water en biota. Naar aanleiding van de rapportage van dit onderzoek ("Wederzijdse beïnvloeding van erosie en sedimentatie van slib en benthische organismen", Z1004) is door WL | Delft hydraulics contact gelegd met RWS-DWW en is besloten om gezamenlijk een beperkt onderzoek (Pilot Study) naar de aanslibbing van natte stroken te starten. Voor de uitvoering is contact gezocht met een afstudeerder van de TU Delft. Deze heeft onder begeleiding van WL | Delft hydraulics de proeven uitgevoerd.

In dit rapport wordt achtereenvolgens het volgende behandeld:

In hoofdstuk 2 wordt het probleem beschreven en een doelstelling geformuleerd. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een probleemaanpak en afbakening.

In hoofdstuk 3 worden de waterbeweging en aanslibbings processen beschreven. Voor de afzonderlijke processen worden de belangrijkste parameters samengevat.

In hoofdstuk 4 volgt een beschrijving van de uit te voeren experimenten om de hypothesen volgend uit hoofdstuk 3 te toetsen..

In hoofdstuk 5 staan de resultaten van de experimenten.

In hoofdstuk 6 worden de resultaten uit hoofdstuk 5 geëvalueerd en getoetst aan de hypothesen volgend uit hoofdstuk 3.

In hoofdstuk 7 staan de conclusies en aanbevelingen.

2.3 Doelstellingen

De doelstellingen van dit project zijn:

- het identificeren van de fysische verschijnselen bij de aanslibbing van natte stroken.
- het bepalen van de parameters die de fysische verschijnselen sturen.
- pilot studie voor het modelleren van natuurvriendelijke oevers.

2.4 Probleemaanpak

Het project wordt onderverdeeld in drie fasen:

- Voorbereidingsfase; In de voorbereidingsfase wordt een literatuurstudie gedaan naar de processen die een rol spelen bij de wateruitwisseling en de aanslibbing.
- Experimentele fase; De processen zullen experimenteel worden gesimuleerd.
- Rapportage; Na analyse van de resultaten van het experimentele deel, zullen deze worden gerapporteerd.

2.5 Afbakening

Het betreft hier een natte strook met verticale vooroever waarin een rechthoekige opening zit en uitwisseling plaatsvindt door één opening (zie ook hoofdstuk 4.3).

Alleen de wateruitwisseling tengevolge van scheepspassages zullen worden meegenomen. De duur van de spiegeldaling wordt niet gevarieerd evenals de frequentie van de scheepvaart. Windgolven en translatiegolven door schutten worden buiten beschouwing gelaten.

Ook het concentratie verloop in het kanaal tengevolge van scheepvaart zal niet bestudeerd en gevarieerd worden. Voor dit project wordt er vanuit gegaan dat het concentratie verloop in het spoor van een schip homogeen is.

Hoofdstuk 3 Proces analyse

3.1 Inleiding

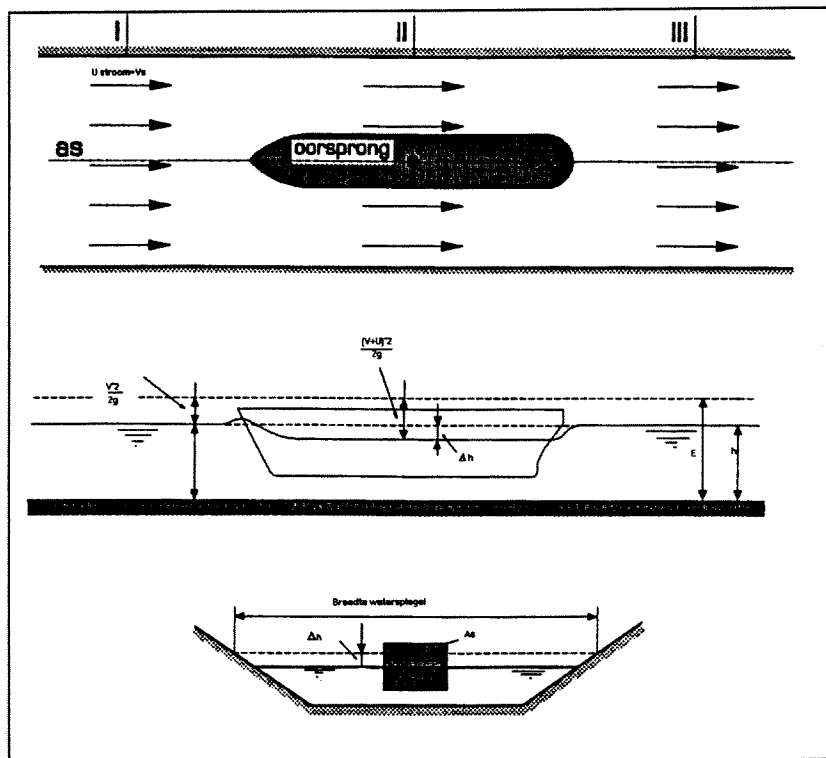
Het probleem van aanslibben van de natte strook is afhankelijk van de wateruitwisseling en daarmee gepaard gaande slibuitwisseling tussen kanaal en natte strook. In dit hoofdstuk zullen de processen worden beschreven die daarbij een rol spelen. Voor de duidelijkheid worden de waterbeweging en de aanslibbingsprocessen apart beschreven.

3.2 Waterbeweging

In deze paragraaf worden de processen beschreven die de wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook bepalen.

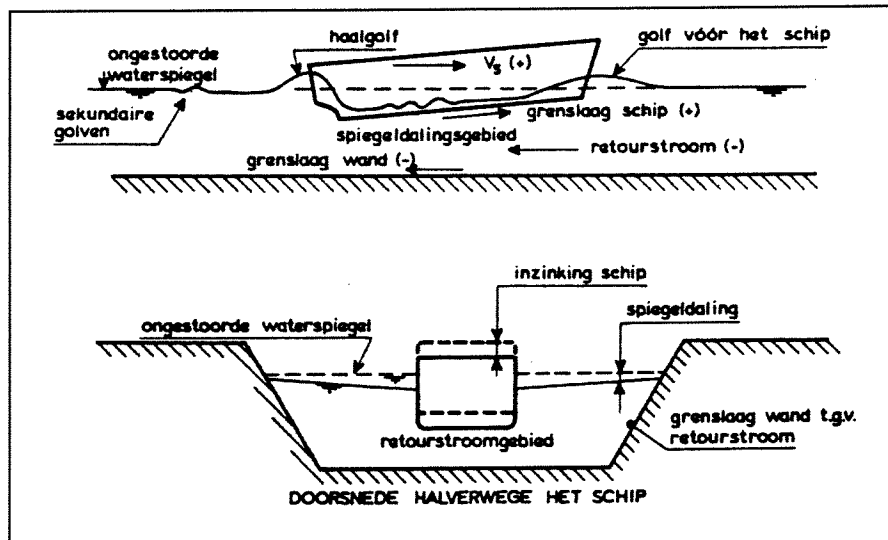
3.2.1 Scheepvaart

Tengevolge van interactie tussen schip en kanaal veroorzaakt een varend schip in een kanaal een waterstandsdaling (Δh) (zie ook collegedictaat F3, [lit.15]). Deze interacties zijn afhankelijk van de verhouding tussen het natte oppervlak van het schip en het dwarsprofiel van het kanaal (A_s/A_c) en de snelheid waarmee het schip vaart (V_s) (zie figuur 3.1, ontleend aan [lit.15]).



Figuur 3.1; Schematisatie varend schip in een kanaal met meegaand assenstelsel.

Naarmate de verhouding natte oppervlak van het schip en dwarsprofiel van het kanaal groter wordt, is het effect van een passerend schip op de waterstanden in het kanaal groter (zie figuur 3.1). Bij een varend schip stroomt het water dat voor de boeg wordt verdrongen naar het achterschip om daar de vrijkomende ruimte op te vullen. Deze z.g. retourstroom gaat gepaard met een daling van de waterspiegel naast het schip (door toename van snelheidshoogte en verlies aan drukhoogte, zie ook figuur 3.2).



Figuur 3.2; Schematisatie spiegeldaling.

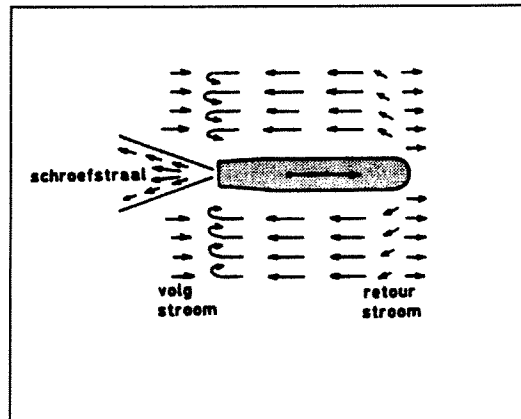
Na de spiegeldaling stijgt de waterstand weer. Deze stijging wordt de haalgolf genoemd. Verdere waterstandsveranderingen, veroorzaakt door een varend schip zijn secundaire golven.

Het spreekt voor zich dat naarmate het schip een grotere dwarsdoorsnede heeft of als het schip een grotere vaarsnelheid heeft dan ook de retourstroom groter zal zijn wat een toename van de spiegeldaling tot gevolg heeft. De grootte van de spiegeldaling kan berekend worden met de theorie van Schijf.

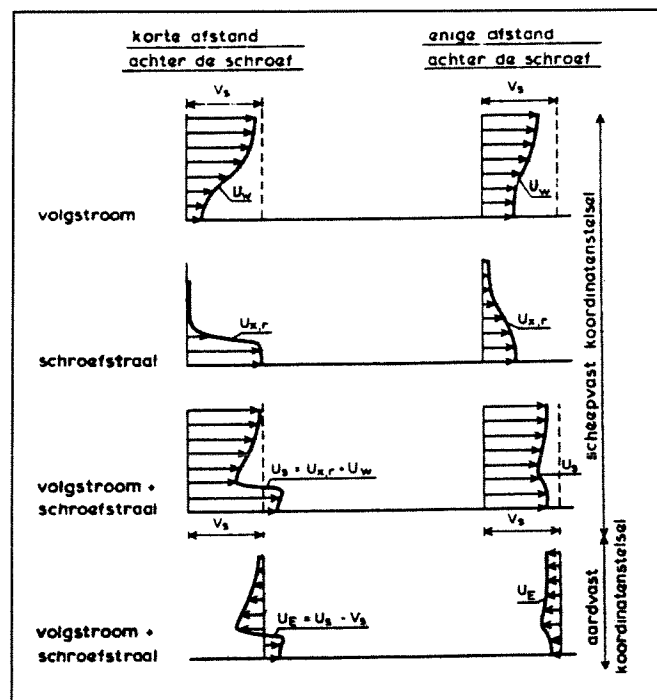
De duur van de spiegeldaling (T_{sd}) wordt bepaald door de vaarsnelheid (V_s) van het schip en de lengte van het schip (L_s): $T_{sd} = L_s / V_s$.

Naast een waterspiegeldaling, veroorzaakt de waterbeweging om een varend schip ook een (verhoogde) stroomsnelheid bij de bodem (u_b); deze wordt door de volgende componenten beheerst (zie ook figuur 3.3a en 3.3b, ontleend aan [lit.1]):

- retourstroom
- de volgstroom
- de schroefstraal



Figuur 3.3a; Stromings overzicht
(assenstelsel vast aan aarde).



Figuur 3.3b; Resulterende stroomsnelheid achter de schroef.

De grootte van de stroomsnelheid aan de bodem is sterk afhankelijk van de scheepsvorm, de schroefkarakteristieken en het ingestelde vermogen tijdens de vaart. De stroomsnelheden bij de bodem bepalen de mate van erosie en dus de mate van in suspensie brengen van bodemmateriaal (zie ook paragraaf 3.5.1).

3.2.2 Waterbeweging in de opening

Als gevolg van de kanaalspiegeldaling (zie vorige paragraaf) ontstaat er in scheepvaart kanalen van beperkte breedte een verval over de vooroever (tussen natte strook en kanaal). Bij een normale verhouding oppervlakte kanaaldoorsnede (A_c) en oppervlakte grootspant (A_s), orde 6 à 10, mag men ervan uitgaan dat de spiegeldaling rond het schip gelijk is aan de waterstands daling ter plaatse van de opening in de vooroever van de natte strook. In de openingen van de vooroever ontstaat er als

gevolg van het verval een waterbeweging. Een algemene uitdrukking voor het debiet door de opening luidt:

$$Q = \iint u_N(y, z, t) dy dz \quad 3.1$$

waarin:

u_N is de normaalsnelheid in de opening als functie van plaats en tijd [m/s]
 y is de breedte richting van de opening
 z is de hoogte richting van de opening
 t is de tijd [sec]

Gemiddeld over het oppervlak van de doorstroom opening kan 3.1 ook geschreven worden als:

$$Q(t) = \bar{u}(t) \cdot a_n \quad 3.2$$

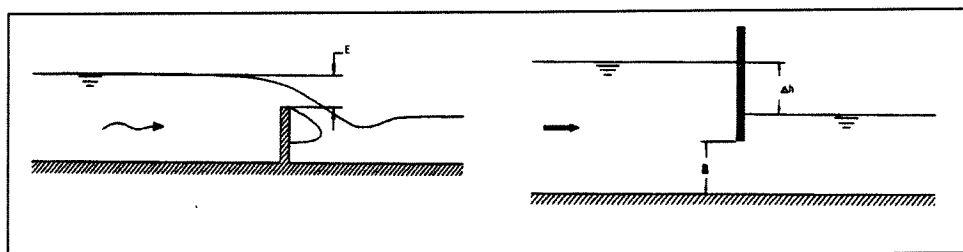
waarin :

$\bar{u}(t)$ de gemiddelde stroomsnelheid is in de tijd [m/s]
 a_n de natte doorsnede is van de opening [m²]

Achtereenvolgens worden hier de natte doorsnede, de snelheid en het uitwisselingsdebiet nader toegelicht.

Natte doorsnede

De natte doorsnede is dat deel van de opening waar een doorstroming plaats vindt, zie ook figuur 3.4 (ontleend aan het collegedictaat F3, [lit.15]).



Figuur 3.4; Volkomen overlaat en onder doorlaat.

Bij een overlaat is de opening ter plaatse van de waterspiegel. De opening is aan de onderzijde begrensd door een onderrand (de drempel) en aan de bovenzijde open. De natte doorsnede is hier gelijk aan de hoogte van de waterstand boven de drempel vermenigvuldigd met de breedte van de opening. Bij een volkomen overlaat is de waterstand boven de drempel gelijk aan $\frac{2}{3}$ van het energie niveau (E) boven de drempel (bovenstrooms van de opening is de snelheidshoogte relatief klein ten opzichte van de snelheidshoogte boven de drempel en valt bij de volkomen overlaat in figuur 3.4 de bovenstroomse waterstand samen met het bovenstroomse energieniveau). De natte doorsnede is dan het produkt van de breedte opening en $\frac{2}{3} \cdot E$.

Bij een onder doorlaat bevindt zich de opening geheel onder de waterspiegel. De natte doorsnede is hier constant en gelijk aan de grootte van de opening.

Snelheid

De snelheid in de opening is afhankelijk van de plaats van de opening (onder doorlaat of overlaat).

De snelheden zijn ook afhankelijk van de tijd. Dit omdat het verval over de opening in de tijd verandert. Deze wordt eerst groter (toename snelheid) omdat de kanaalspiegeldaling groter wordt. Vervolgens wordt het verval weer kleiner (afname snelheid) omdat de kanaalwaterstand zich herstelt. Dit betekent ook dat de richting van de snelheid verandert in de tijd.

Bij een volkomen overlaat is de snelheid gelijk aan:

$$u = \sqrt{2g \cdot \frac{1}{3} E} \quad 3.3$$

waarin:

u snelheid [m/s]
g gravitatieversnelling [m/s²]
E energieniveau boven de drempel bij stil water [m]

De snelheid is afhankelijk van het energieniveau boven de drempel en deze is afhankelijk van de bovenstroomse waterstand.

Bij een onder doorlaat is de snelheid:

$$u = \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad 3.4$$

waarin Δh het verval over de opening is.

Hier is de snelheid afhankelijk van het totale verval over de opening.

Uitwisselingsdebiet

Het uitwisselingsdebiet volgt uit de natte doorsnede en de snelheden. Voor de overlaat luidt de uitdrukking voor het uitwisselingsdebiet:

$$Q = m \cdot B \cdot \frac{2}{3} E \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{1}{3} E} \quad 3.5$$

waarin:

Q debiet [m³/s]
m afvoer coëfficiënt [-]
B breedte van de opening [m]

Uit de formule valt af te leiden dat het debiet recht evenredig is met het energie niveau boven de drempel tot de macht anderhalf: $Q \propto E^{3/2}$. Het debiet is onafhankelijk van de benedenstroomse waterstand als er een volkomen overlaat optreedt. Met andere woorden een toename van Δh (kanaalspiegeldaling tot onder de drempel) heeft geen toename van het debiet.

Voor de onder doorlaat luidt de formule:

$$Q = \mu \cdot a_n \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad 3.6$$

waarin:

μ de contractie coëfficiënt [-]
 Δh verval over de opening [m]

Uit de formule volgt dat het debiet recht evenredig is met de wortel uit het verval: $Q \propto (\Delta h)^{1/2}$. Hier is het debiet wel afhankelijk van de benedenstroomse waterstand en zal een toename van Δh ook een toename van het debiet als gevolg hebben.

Er kan geconcludeerd worden dat een varend schip met een grote waterspiegeldaling voor een groter uitwisselingsdebiet zorgt bij een onder doorlaat dan bij een overlaat. Bij een overlaat zal een spiegeldaling beneden de drempel geen invloed hebben op het uitwisselingsdebiet. Uiteraard zal bij zowel de overlaat als bij de onder doorlaat een toename van het uitwisselingsdebiet te verwachten zijn, als de openingsgrootte toeneemt.

Integreren van het debiet in de tijd levert het uitwisselingsvolume (V_{uitw}). Het uitwisselingspercentage p (maat voor de waterverversing) is de verhouding van het uitgewisseld volume en het totale volume van de natte strook:

$$p = \frac{V_{uitw}}{V_{ns}} \quad 3.7$$

Het maximale uitwisselings percentage p_{max} wordt bereikt als de waterspiegeldaling in de natte strook gelijk is aan die op het kanaal.

3.2.3 Waterbeweging in de natte strook

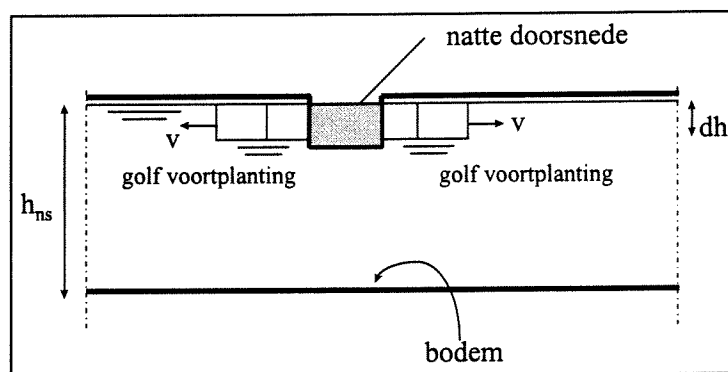
Tengevolge van het debiet door de opening in de vooroever (tijdens een scheepspassage) ontstaat er in de natte strook ook een waterbeweging (of golf, hierop wordt later terug gekomen). Het proces dat in de natte strook optreedt tijdens een scheepspassage langs een opening in de vooroever is als volgt:

- waterspiegeldaling op de vaarweg, tengevolge van een passerend schip;
- door het hierdoor ontstane verval over de constructie vindt uitstroming van natte strook naar vaarweg plaats via openingen in de constructie;
- tengevolge van die uitstroming ontstaat er ook in de natte strook een verhang, waardoor stroming in langsricting in de natte strook optreedt;
- de haalgolf van het schip beëindigt de spiegeldaling op de vaarweg; er is nu een negatief verval over de constructie waardoor het water via de openingen de natte strook instroomt.

In een verticale vooroever zijn er meerdere openingen op een bepaalde hart op hart afstand van elkaar. Als door een scheepspassage bij een opening de waterstand daalt, dan zal de waterstand bij de volgende opening nog niet zijn veranderd vanwege de tijd die het schip nodig heeft om de volgende opening te bereiken. Hierdoor ontstaat er tussen de twee openingen een verhang die een stroming veroorzaakt tussen deze openingen. Het proces is als volgt te beschrijven:

- het schip passeert opening 1, en als gevolg hiervan daalt de waterstand in het kanaal, gevolgd door een daling in de natte strook ter plaatse van de opening 1. Hierdoor ontstaat er een langsstroming (uit bovenstroomse- en benedenstroomse richting) in de natte strook naar opening 1.
- is het schip bij opening 2 aangekomen dan zal ook daar de waterstand in de natte strook dalen terwijl de waterstand bij opening 1 weer is "hersteld". Er ontstaat nu een langsstroming van opening 1 naar opening 2, totdat in opening 2 ook daar de waterstand weer hersteld is.

De waterbeweging in de natte strook is ook te omschrijven als een golfbeweging. De waterspiegeldaling tengevolge van de scheepspassage plant zich als golf via de opening in de vooroever voort in de natte strook, zie figuur 3.5.



Figuur 3.5; Schematisatie golf voortplanting natte strook.

De golf plant zich voort met een snelheid $v = \sqrt{g \cdot h_{gem}}$ (h_{gem} de gemiddelde diepte in de natte strook). Tijdens het voortplanten van de golf (water spiegeldaling) ontstaat er in langsrichting van de natte strook een verhang en stroomt er water de natte strook uit. Bij herstel van de waterspiegel op het kanaal stroomt een andere golf de natte strook binnen welke nu een instroming naar de natte strook veroorzaakt.

De hart op hart afstand tussen de openingen heeft invloed op het verhang in de natte strook. Als deze afstand groter wordt, zal bij een zelfde spiegeldaling en zelfde scheepslengte (bij lange schepen zou het water uit twee openingen tegelijk de natte strook uit kunnen stromen) het verhang ook afnemen. Op de invloed van meerdere openingen wordt verder niet ingegaan.

Hoe ver de spiegeldaling/stijging de natte strook indringt is afhankelijk van de snelheid waarmee deze golf zich voortplant in de natte strook en de duur van de spiegeldaling (T_{sd}). De afstand dat de golf binnen dringt $= T_{sd} \cdot v$.

In paragraaf 3.2.2 is de invloed beschreven van de openingsgrootte en het verval op het uitwisselingsdebiet. De verwachting is dat als het uitwisselingsdebiet toeneemt, ook de langsstroming zal toenemen.

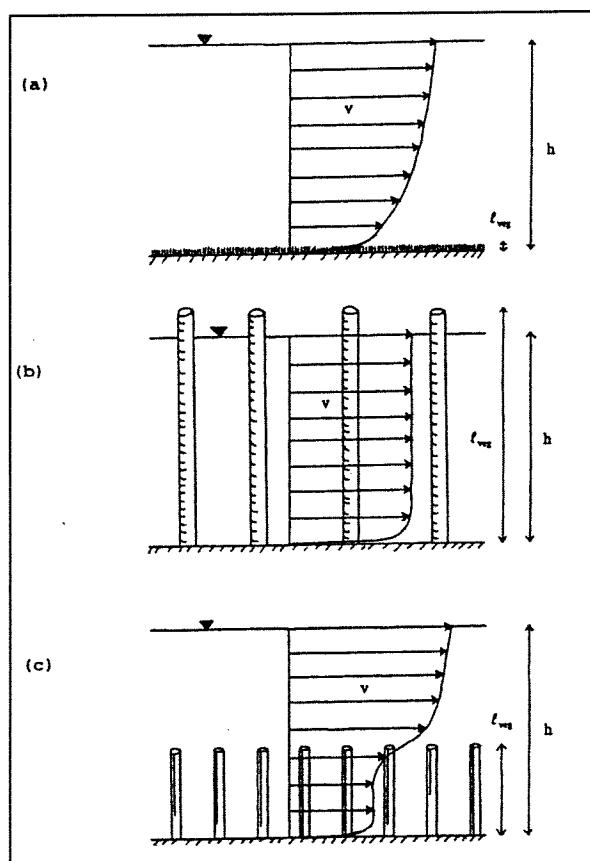
3.3 Vegetatie invloeden

De aanwezigheid van vegetatie in de natte strook heeft effect op de waterbeweging. Met name de dichtheid (aantal plantjes per eenheid van bodemoppervlak) en het type

vegetatie spelen daarbij een rol. Vegetatie biedt namelijk weerstand tegen de stroming, waardoor deze afneemt. Dus hoe meer vegetatie, hoe meer weerstand de stroming ondervindt en hoe meer de stroomsnelheid zal afnemen. Voor de bepaling van de kracht (de zogenaamde drag-kracht, bestaande uit een druk en een wrijvingscomponent) die het water ondervindt, bij stroming om stengels van vegetatie wordt verwezen naar de literatuur (de hydraulische ruwheid van doorstroomde vegetatie, [lit.14]).

Kijkend naar de plantjes afzonderlijk, neemt de snelheid rondom de stengels juist toe, welke voor een wervel staart zorgt achter de stengels in stroomafwaartse richting. Dit zou achter de stengels voor lokale ontgroningen kunnen zorgen.

De dichtheid van de vegetatie (n) in natte stroken wordt veelal uitgedrukt in het bedekkingspercentage. Dit is het percentage van de oever dat bedekt is met vegetatie: de totale doorsnede van de stengels gedeeld door het totale oppervlak van de oever. Wat betreft het type van de vegetatie zijn bijvoorbeeld de vorm (van de bladeren) maar ook de hoogte van invloed op de stroming. Zo zullen de snelheidsprofielen (voor de langsstroming) over de verticaal van de natte strook verschillen voor verschillende vegetatie hoogten. In figuur 3.6 zijn snelheidsprofielen weergegeven voor verschillende vegetatiehoogten. [L.A. Meursing, 1995, lit.14]



Figuur 3.6; Snelheids profielen verschillende vegetatie hoogte

3.4 Samenvattend

Bij de wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook spelen verschillende factoren een rol. Het uitwisselingspercentage p is afhankelijk van Δh , a , T_{sd} . Met behulp van

een dimensieanalyse (zie bijlage H3) kunnen dimensieloze parameters worden opgesteld. Hier volgen enkele relevante parameters:

- De scheepvaart veroorzaakt op het kanaal een spiegeldaling Δh . Deze spiegeldaling dringt als een golfbeweging de natte strook in (uitstroming), weliswaar met een andere amplitude dan die op het kanaal (zie volgend punt). Als de waterspiegel zich op het kanaal herstelt stroomt er weer een golf de natte strook in (instroming). De dimensieloze parameter $\Delta h/h_{ns}$ geeft de invloed van de kanaalspiegeldaling op de wateruitwisseling weer.
- De grootte van de opening in de vooroever bepaald de mate van doorlaten van de golf, dus de amplitude van de golf in de natte strook. Een opening bij de waterspiegel geeft bij een volumeuitwisseling een verandering van de natte doorsnede (vanwege de spiegeldaling boven de drempel). Een opening bij de bodem heeft een constante natte doorsnede (tenzij de waterspiegel in de natte strook tot de bodem daalt). De invloed van de openingsgrootte kan worden bepaald met de dimensieloze factor $a_n/a_{dsn,ns}$ (waarbij $a_{dsn,ns}$ het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de natte strook is.)
- Hoe ver een golf de natte strook binnendringt is afhankelijk van de duur van de spiegeldaling (T_{sd}). Als een golf zich in de natte strook voortplant met snelheid $v = \sqrt{g \cdot h_{gem}}$ en L_{ns} is de hart op hart afstand tussen de openingen in de vooroever, dan plant de golf zich van de ene naar de andere opening voort met: $T_{ns} = L_{ns}/v$. Het binnen dringen van een golf kan worden bepaald met de dimensieloze parameter T_{sd}/T_{ns} .
- Vegetatie dichtheid n heeft invloed op de langsstroming in de natte strook. Deze zal afnemen met toenemende n .
- Mate van volumeuitwisseling wordt weergegeven met het volumeuitwisselingspercentage $p = V_{uitw}/V_{ns}$.

Waterbeweging met computermodel

Met behulp van het computermodel PLONS (Positionering en Lengteverdeling van Openingen in een Natte Strookverdediging) kunnen de wateruitwisseling, de snelheden in de opening en de langsstroom snelheden in de natte strook berekent worden, zie bijlage H4.

3.5 Slibtransport en aanslibbing

Zoals blijkt uit de vorige paragrafen is er een wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook. Vanwege scheepvaart wordt door de ontstane stromingen in het kanaal bodemmateriaal geërodeerd, en in suspensie gebracht. Hierdoor stroomt er vanwege de wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook, slibrijk water de natte strook in.

3.5.1 Slib vanuit het kanaal

In paragraaf 3.2.1 kwam al naar voren dat schepen een bepaalde stroming om zich heen creëren. De verhoogde stroming bij de bodem kan ervoor zorgen dat bodemmateriaal wordt opgewerveld. Het type schip (vorm, afmetingen,

schroefkarakteristieken en dergelijke), de vaarsnelheid, de kritieke bodemschuifspanning (voor erosie) en de diepte van het kanaal bepalen of en hoeveel materiaal in suspensie komt. De frequentie van de scheepvaart bepaald hoe vaak water wordt uitgewisseld met de natte strook.

Een relatie voor de bij de bodem opgewekte schuifspanning is (Projectgroep Ketelmeer, 1989,[lit.1]):

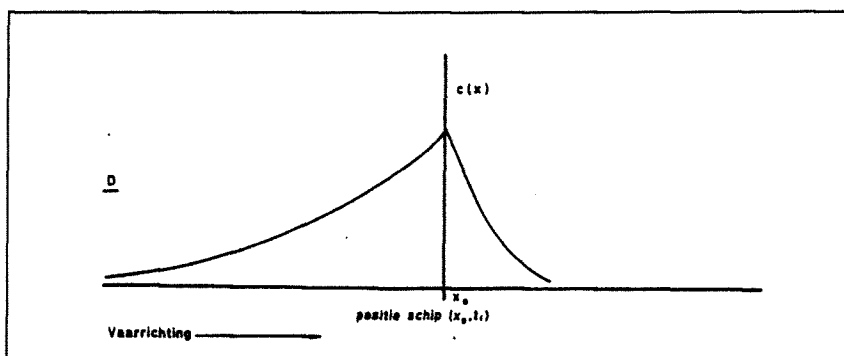
$$\tau_b = \rho_w \cdot \frac{g}{C^2} \cdot u \cdot |u| \quad 3.8$$

waarin

ρ_w	dichtheid van het water [kg/m ³]
g	gravitatie versnelling [m/s ²]
C	Chezy coëfficiënt [m ^{1/2} /s]
u	langsstroming in de natte strook [m/s]

Als de bodemschuifspanning een bepaalde kritieke bodemschuifspanning behorende bij het bodemmateriaal overschrijdt, wordt er sediment opgewerveld.

Met behulp van mathematische modellen (gebruik makend van de een-dimensionale advektie-diffusie vergelijking) heeft men inzicht proberen te krijgen in de erosie en sedimentatie tengevolge van scheepvaart. Hiervoor wordt verder verwezen naar de literatuur (Projectgroep Ketelmeer, 1989, [lit.1]). Wel wordt het concentratie verloop op een vast tijdstip als functie van x weergegeven in figuur 3.7 (vaarsnelheid van het schip is groter dan de stroomsnelheid van het water):



Figuur 3.7; Concentratieverloop als functie van x . (tot stand gekomen via mathematisch model voor de erosie en sedimentatie van slib tengevolge van scheepvaart) (zie [lit.1])

De concentratie van het zwevend sediment, gemeten in verschillende kanalen na een scheepspassage, ligt tussen de 10 en de 45 mg/dm³, (Hooimeijer, 1997 [lit. 11]). In het vervolg wordt ervan uitgegaan dat de concentratie op het kanaal homogeen is.

3.5.2 Slib door de opening

Het in suspensie brengen van bodemmateriaal in het kanaal en de wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook maken het mogelijk dat er slibrijk water de natte strook instroomt. De hoeveelheid ingestroomd sediment is o.a. afhankelijk van het concentratie verloop van gesuspendeerd materiaal achter een varende schip en het

debiet door de opening in de vooroever. Een uitdrukking voor het slib transport door de opening is:

$$S(t) = \iint c(y,z,t) \cdot u_N(y,z,t) \cdot dydz \quad 3.9$$

waarin:

S	slib transport [gr/s]
u_N	normaal snelheid [dm/s]
c	de concentratie [gr/dm ³]
y	breedte richting van de opening
z	hoogte richting van de opening

Bij een spiegeldaling op het kanaal stroomt er water met een bepaalde concentratie de natte strook uit. Geïntegreerd in de tijd, is het totale transport door de opening bij de uitstroming:

$$S_{tot,uit} = V_{uitw} \cdot \bar{c}_{uit} \quad 3.10$$

waarin $\bar{c}_{uit}$ de gemiddelde uitstroom concentratie is. Even later als de waterspiegel op het kanaal zich herstelt vindt er een waterinstroom plaats met een gemiddelde instroom concentratie:

$$S_{tot,in} = V_{uitw} \cdot \bar{c}_{in} \quad 3.11$$

Het verschil tussen het ingestroomde transport en het uitgestroomde transport is:

$$S_{tot,in} - S_{tot,uit} = V_{uitw} \cdot (\bar{c}_{in} - \bar{c}_{uit}) \quad 3.12$$

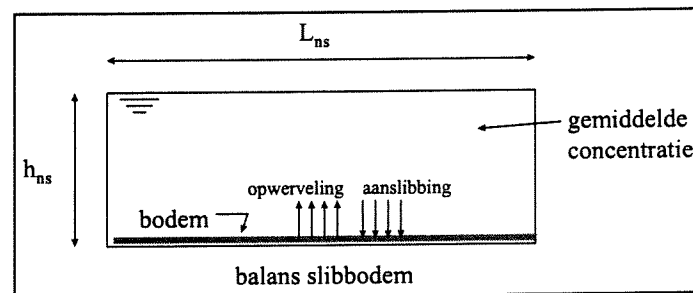
Is dit verschil positief, dan is er slib in de natte strook achter gebleven. Een deel van het slib zal dan nog in suspensie zijn in de natte strook en een ander deel zal zijn aangeslibt. Is daarentegen het verschil negatief, dan is er meer slib uitgestroomd. Dat wil zeggen dat in de natte strook erosie heeft plaats gevonden en het geresuspendeerde slib mee naar buiten gestroomd is.

3.5.3 Aanslibbing in de natte strook

Uit de voorgaande paragrafen kwam naar voren dat er slib in het kanaal wordt opgewerveld waardoor de concentratie in het kanaal achter een varend schip toeneemt. Bij de wateruitwisseling stroomt er zo slib rijk water de natte strook in. De langsstroming in de natte strook brengt dit slib verder de natte strook in (advektie). De concentratie zal vanwege advektie en diffusie niet hetzelfde zijn in lengterichting van de natte strook en over de diepte.

Lokaal kan de balans voor de slibbodem na een volumeuitwisseling als volgt worden beschreven (zie ook figuur 3.8):

verandering van de dikte van de slibbodem = aanslibbing - opwerveling



Figuur 3.8; Schematisatie balans.

In formule vorm is dat te schrijven als:

$$\rho_s \cdot \frac{dz}{dt} = w \cdot c - \phi \cdot \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad 3.13a$$

VOOR: $\tau_b > \tau_{cr}$.

waarin:

ρ_s	de volumieke dichtheid van het slib [kg/m ³]
z	de dikte van de sliblaag [m]
w	valsnelheid van het slib [m/s]
c	gemiddelde natte strook concentratie [kg/m ³]
ϕ	erosie constante [kg/m ² .s]
τ_b	bodemschuifspanning [N/m ²]
τ_{cr}	kritische bodemschuifspanning [N/m ²]

Indien geldt dat $\tau_b < \tau_{cr}$ is er geen opwerveling en geldt er:

$$\rho_s \cdot \frac{dz}{dt} = w \cdot c \quad 3.13b$$

Om vergelijking 3.13 op te lossen moeten eerst de parameters w , ϕ , τ_b , τ_{cr} , c bepaald worden:

• Valsnelheid w ; Deze wordt mede bepaald door de deeltjes grootte van het sediment en door het vlokformings proces. Het vlokformings proces houdt in dat deeltjes samen grotere “vlokken” vormen met een groter gewicht dan van de deeltjes afzonderlijk en dus een hogere valsnelheid. Maar de snelheid kan ook afnemen, als de concentratie toeneemt. Dit verschijnsel wordt hindered settling genoemd (de Wit, 1995 [lit.13]). Door de hoge concentratie (hoger dan 10 gr/dm³) worden de afstanden tussen de deeltjes kleiner, en wordt de vloeistof tussen de bezinkende deeltjes in opwaartse richting gestuwd. Dit heeft een remmende werking op de vallende deeltjes. Een algemene formule voor het bepalen van de valsnelheid (Stokes [lit.2]) wordt hier gegeven:

$$w = \frac{\Delta \cdot g \cdot D_s^2}{18\nu} \quad 3.14$$

waarin :

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad [-]$$

ρ_s	dichtheid van de deeltjes [kg/m ³]
ρ_w	dichtheid van water [kg/m ³]
g	gravitatie versnelling [m/s ²]
D_s	diameter van de deeltjes [m]
ν	kinematische viscositeit [m ² /s]

Met behulp van afzonderlijke sedimentatie proeven kan de valsnelheid worden bepaald (zie bijlage H5.4).

De valsnelheid bepaalt samen met de diepte van de natte strook de maximale bezinktijd (relaxatietijd): $T_{b,max} = h_{ns}/w$. In het vervolg zal met de bezinktijd (T_b) de maximale bezinktijd worden bedoeld. De inverse van de bezinktijd wordt gedefinieerd als $\lambda = w/h_{ns}$.

Erosie constante ϕ ; Deze dient met behulp van laboratorium proeven bepaald te worden. In de literatuur volgen waarden voor ϕ die variëren van 10^{-5} kg/m².s tot $2 \cdot 10^{-4}$ kg/m².s, één en ander sterk afhankelijk van de slibsoort. Hier wordt verder niet op ingegaan.

- Bodemschuifspanning τ_b ; De bodemschuifspanning kan uitgedrukt worden als:

$$\tau_b = \rho_w \cdot \frac{g}{C^2} \cdot u_l \cdot |u_l| \quad 3.15$$

waarin u_l de langstroming [m/s] in de natte strook is.

Bij overschrijding van de kritieke bodemschuifspanning τ_{cr} kan er in de natte strook erosie plaats vinden van sediment. In de literatuur zijn waarden gevonden voor τ_{cr} die liggen tussen de 0.05 N/m² en 1.2 N/m². De lage waarden worden meestal gevonden bij proeven met kaolinet (kunst klei), terwijl de hogere waarden voorkomen bij sterk geconsolideerd natuurlijk slib ([lit.1]).

- Concentratie c ; De concentratie in de natte strook is afhankelijk van de slib instroom, slib uitstroom, de aanslibbing en de opwerveling van slib. In paragraaf 3.5.1 is beschreven hoe scheepvaart de concentratie op het kanaal beïnvloed. Met de aanname dat de kanaalconcentratie in het spoor van het schip homogeen is, is de instroom concentratie gelijk aan de kanaal concentratie. Er stroomt dan een concentratie wolk de natte strook in waardoor gemiddeld de concentratie in de natte strook toeneemt.

Het ingestroomde slib kan bezinken (afhankelijk van de tijd tussen scheepspassages) en opwervelen (afhankelijk van de bodemschuifspanning tijdens stroming in de natte strook). Als lokaal met vergelijking 3.13 de verandering van de sliblaag berekend wordt, dient dan ook de concentratie op die locatie bekend te zijn, door bijvoorbeeld de concentratie te meten in de waterkolom boven de plaats waar men de verandering van de sliblaag wil weten. Als het verloop van de lokale concentratie bekend is kan nu met behulp van vergelijking 3.13 de verandering van de dikte van de sliblaag berekend worden.

In praktijk is men geïnteresseerd in de plek waar aanslibbing of opwerveling plaatsvindt. Het is van tevoren niet bekend waar de lokale meting plaats moet vinden. Dit zal met behulp van speciale video opnames bepaald moeten worden. Hier wordt verder niet op ingegaan. Wel kan de netto concentratie toestroom naar de natte strook bepaald worden, door de instroom en uitstroom concentratie te meten in de opening van de vooroever. Het verschil tussen die twee metingen geeft de totaal in de natte strook achtergebleven concentratie (aanslibbing) of de totaal uitgestroomde concentratie (erosie), zie vergelijking 3.12.

Concentratie bepaling met analytisch model:

Om toch een schematisatie van het verloop van de concentratie in de tijd weer te geven is een analytisch model ontwikkeld. Het verloop van de concentratie is als volgt. Als gedurende een kanaalspiegeldaling een uitstroom plaats vindt, stroomt slib dat in suspensie is (en nog getransporteerd kan worden naar de opening) de natte strook uit. Als gedurende de uitstroom ook nog de kritieke bodemschuifspanning wordt overschreden, wordt er bodemmateriaal opgewerveld, waardoor er slib in suspensie komt (en de natte strook uit kan stromen).

Bij herstel van de kanaalwaterstand stroomt er water met een verhoogde slib concentratie de natte strook in. Hierdoor neemt de concentratie in de natte strook toe. Tot een volgende wateruitwisseling krijgt het slib de tijd om te bezinken. Met behulp van een wiskundige benadering zal nu getracht worden het concentratie verloop te schematiseren. In het vervolg zullen de instroom en uitstroom van slib vervangen worden door een netto slibconcentratie toestroom naar de natte strook (verschil tussen in en uitstroom). Evenals voor de slibbodem wordt nu een balans opgesteld voor het water in de natte strook. Na een volumeuitwisseling luidt de balans voor het water in de natte strook:

verandering concentratie in de natte strook = opwerveling - aanslibbing

Na een volumeuitwisseling is er geen stroming in de natte strook en is de opwerveling gelijk aan nul. Opwerveling vindt alleen plaats tijdens de uitwisseling en de periode waarin dat plaatsvindt is relatief kort (30 seconden).

Voor de bepaling van de concentratie in de natte strook wordt er vanuit gegaan dat de concentratie toename tengevolge van opwerveling zo klein is vergeleken met de vanuit het kanaal ingestroomde concentratie, dat deze kan worden verwaarloosd. Als ook wordt uitgegaan van een constante valsnelheid, is de concentratie dan alleen afhankelijk van de neerwaartse slib flux:

$$V_{ns} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -w \cdot \bar{c} \cdot A_{ns} \quad 3.16$$

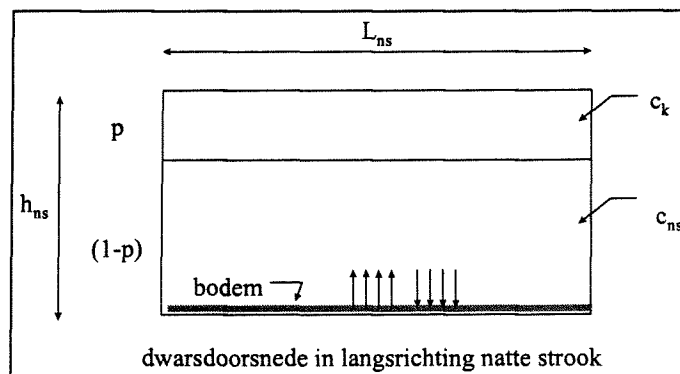
waarin:

V_{ns}	natte strook volume [m ³]
A_{ns}	oppervlak natte strook (boven aanzicht) [m ²]
$\bar{c}$	gemiddelde concentratie in de natte strook [gr/dm ³]

De homogene oplossing voor vergelijking 3.16 heeft de vorm: $c(t) = c_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T}$ met $1/\lambda$ de bezinktijd (relaxatie tijd) en $\lambda = w/h_{ns}$ en T is de tijd tussen twee volume-uitwisselingen. Verondersteld wordt dat de gemiddelde concentratie in de natte strook

(c_{ns}) dat na een scheepspassage aanwezig is, analoog aan de homogene oplossing ook exponentieel afneemt in de tijd (als gevolg van bezinken van slib). Bij een volgende scheepspassage stroomt dan een volume met een lagere concentratie de natte strook uit. Hoe groter de periode tussen scheepspassages, hoe lager de uitstroom concentratie.

De natte strook concentratie volgt verder uit de initiële natte strook concentratie en netto instroom concentratie (vanuit het kanaal). Bij een bepaald uitgewisseld volume $p \cdot V_{ns}$ met de kanaalconcentratie, is er dan $(1-p) \cdot V_{ns}$ met de initiële natte strook concentratie, zie figuur 3.9 (p is het uitwisselingspercentage, zie vergelijking 3.7)



Figuur 3.9; Schematisatie balansgebied.

Na een scheepspassage is de gemiddelde concentratie in de natte strook:

$$\bar{c}_{ns,i+\Delta t} = c_{ns,0} \cdot (1-p) + c_{k,0} \cdot p \quad 3.17$$

waarin:

$c_{ns,0}$ beginwaarde voor de natte strook concentratie.

$c_{k,0}$ beginwaarde voor de ingestroomde (kanaal) concentratie.

Vlak voor een volgende scheepspassage is deze concentratie afgenomen (door bezinken) tot:

$$\bar{c}_{ns,i+1} = (c_{ns,0} \cdot (1-p) + c_{k,0} \cdot p) \cdot e^{-\lambda T} = (\bar{c}_{ns,i+\Delta t}) \cdot e^{-\lambda T} \quad 3.18$$

waarin T de periode is tussen twee scheepspassages.

Na een volgende scheepspassage is de concentratie

$$\bar{c}_{ns,i+1+\Delta t} = \bar{c}_{ns,i+1} \cdot (1-p) + c_{k,i} \cdot p$$

en deze neemt tot vlak voor een volgend passerend schip af tot:

$$\bar{c}_{ns,i+2} = (\bar{c}_{ns,i+1+\Delta t}) \cdot e^{-\lambda T}$$

Uitgeschreven levert dit een convergente reeks op. Na n aantal scheepspassages is de gemiddelde concentratie in de natte strook gelijk aan:

$$\bar{c}_{ns,i=n} = (1-p)^n \cdot c_{ns,0} e^{-\lambda T_n} + \sum_{i=1}^n (1-p)^{n-k} \cdot p \cdot c_{k,i} e^{-\lambda T(n-i+1)} \quad 3.19$$

Als het aantal scheepspassages (volumeuitwisselingen) toeneemt ($n \rightarrow \infty$) dempt de invloed van de beginconcentratie uit en de concentratie in de natte strook gaat naar een evenwicht.

De gemiddelde natte strook concentratie is nu bekend als functie van de tijd. Uitgaande van deze concentratie kan de aanslibbing met vergelijking 3.13 bepaald worden voor een bepaald tijdstip. De opwerveling (die verwaarloosd was voor de concentratie bepaling) wordt voor de bepaling van de dikte van de sliblaag wel meegenomen. De invloed van vegetatie moet blijken uit de waarden voor τ_b .

3.5.4 Vegetatie invloeden

De invloed van vegetatie op de langsstroming kwam reeds naar voren in paragraaf 3.3. Vegetatie biedt weerstand tegen de langsstroming in de natte strook, waardoor deze afneemt. Specifiek voor een ingestroomd slibdeeltje betekent dit dat de horizontale snelheidscomponent van dat deeltje wordt vertraagd terwijl de verticale component (valsnelheid) constant blijft, flocculatie en hindered settlement buiten beschouwing gelaten. Het deeltje bezinkt dus eerder bij de aanwezigheid van vegetatie vergeleken met de situatie zonder vegetatie. Vegetatie vertraagt de stroming en versnelt de aanslibbing.

Vegetatie heeft ook invloed op het wel of niet opwervelen van slib in de natte strook. Lokaal vindt namelijk om de stengel van de plantjes juist een toename van de stroomsnelheid. Bij de bodem zou vanwege deze toename juist bodem materiaal geërodeerd kunnen worden. Als bij de instroom slib wordt opgewerveld wordt het verder de natte strook in meegevoerd. Opwerveling bij de uitstroming zou tot gevolg kunnen hebben dat slib de natte strook weer uit wordt gevoerd.

3.5.5 Samenvattend

De aanslibbing van de natte strook is afhankelijk van de volgende parameters: w , c , ϕ , τ , τ_{cr} . De parameter c is weer afhankelijk van p , λ , T , n . Met behulp van de dimensieanalyse (bijlage H3) kunnen relevante parameters dimensieloos worden gemaakt:

- De valsnelheid (w) is afhankelijk van het soort slib. Samen met de diepte van de natte strook (h_{ns}) kan de bezinktijd (relaxatietijd) worden bepaald: $T_b = h_{ns}/w$. De inverse van de bezinktijd is λ . Om de invloed van de periode stilwater (T) en het bezinken van slib op de aanslibbing te bepalen is de dimensieloze parameter $\lambda \cdot T$ bepaald.
- De verhouding van de bodemschuifspanning en de kritieke bodem schuifspanning (τ_b/τ_{cr}) geeft de invloed van de schuifspanning op de opwerveling van bodem materiaal in de natte strook.
- De invloed van vegetatie op de aanslibbing kan worden weergegeven met de vegetatiedichtheid n .

Hoofdstuk 4 Experimenten

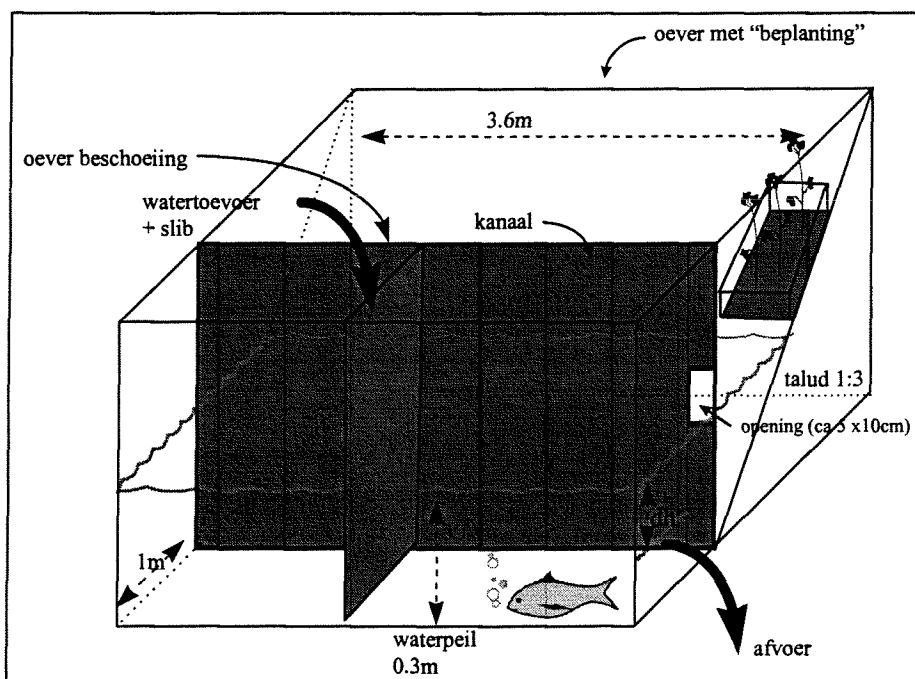
4.1 Algemeen

In hoofdstuk 2 kwam in de probleemaanpak naar voren dat het project onderverdeeld is in drie fasen. De eerste fase is afgerond in hoofdstuk 3, en daaruit volgen parameters die sturend zijn bij de volumeuitwisseling en het slibtransport tussen kanaal en natte strook. In de tweede fase zullen de processen worden gesimuleerd middels experimenten, waarbij ook parameters volgend uit de procesanalyse worden gevarieerd.

In dit hoofdstuk komen de proefopzet, randvoorwaarden en uitgangspunten, de te gebruiken faciliteiten en de uit te voeren experimenten aan de orde.

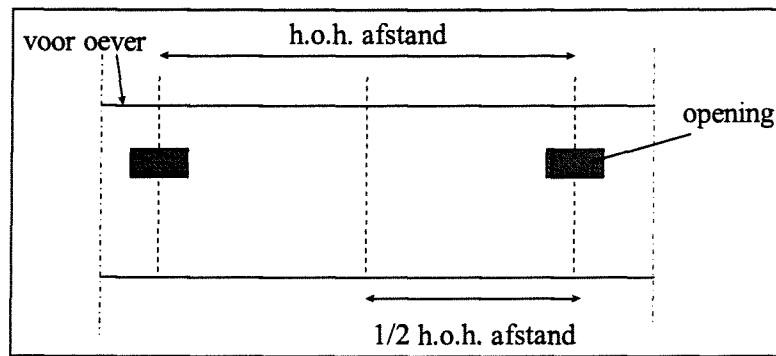
4.2 Proefopzet

In een bak in de Zout Zoethal van WL | Delft Hydraulics is een natuurvriendelijke oever met een stuk kanaal nagebouwd, zie figuur 4.1a.



Figuur 4.1a; Impressie van het model.

De natte strook heeft een verticale vooroever met een opening die het kanaal en de natte strook verbindt, en een talud van 1:3 aan de landzijde. Het betreft een natte strook met een lengte die de helft is van de hart op hart afstand tussen openingen. De opening in de vooroever van het model is in feite dus een halve opening, zie ook figuur 4.1b.



Figuur 4.1b; Afstand openingen.

De opening heeft een vaste breedte van 0.1m en de hoogte kan gevarieerd worden. De hoogte van de opening en het niveau van de opening ten opzichte van de bodem kan geregeld worden met behulp van uitneembare schotjes.

De lengte van de natte strook bedraagt 3.6m en het dwarsprofiel is driehoekig.

De opzet is om op het kanaal scheepspassages te simuleren en de processen die daar het gevolg van zijn te analyseren. Eerst zullen de hydraulische processen zoals beschreven in hoofdstuk 3.2 worden gesimuleerd. Bij deze experimenten is er nog geen vegetatie en slib, die komen bij de aanslibbings experimenten.

4.3 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Er gelden voor het experiment de volgende randvoorwaarden:

- In het model vormt een verticale vooroever (damwand constructie) de scheiding tussen kanaal en natte strook.
- In het model zit er maar een opening in de vooroever.
- De lengte van de natte strook is gelijk aan de halve hart op hart afstand tussen twee openingen.
- De oever heeft een talud helling 1:3.
- Scheepssnelheid en scheepslengte worden niet gevarieerd, dus periode spiegeldaling is constant.
- Hydraulische invloeden van andere openingen worden niet meegenomen.

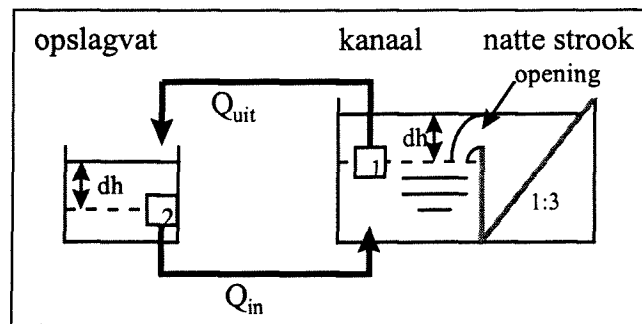
De uitgangspunten zijn:

- De concentratie in het spoor achter een varende schip is homogeen en zal niet gevarieerd worden.
- Bezonden slib komt niet meer in suspensie.

4.4 Experiment beschrijving

Een scheepspassage op het kanaal wordt gesimuleerd door een waterspiegeldaling op het kanaal te creëren. Met behulp van pomp 1 wordt water vanuit het kanaal gepompt naar een opslagvat totdat de gewenste waterstands daling op het kanaal bereikt is. Het water verblijft 10 seconden in het opslagvat waarna het door pomp 2 weer gepompt wordt naar het kanaal (zie figuur 4.2). Er vindt gedurende de verandering van de kanaalspiegel een volume-uitwisseling plaats tussen de bak (kanaal en natte strook) en

het opslagvat. De duur van de kanaalspiegel verandering en de frequentie van de scheepvaart wordt geregeld door twee tijdklokken die zijn aangesloten op de pompen 1 en 2. Een peilslagelektrode in het kanaal, die ook op de pompen is aangesloten kan de peilslag regelen. Als de waterstand een bepaalde daling heeft bereikt zorgt elektrode 1 ervoor dat pomp 1 afslaat. Tien seconden nadat pomp 1 is afgeslagen zet de tijdklok pomp 2 in werking, en als de waterspiegel op het kanaal hersteld is zet elektrode 2 pomp 2 uit. Een tijdklok zorgt er dan weer voor dat pomp 1 voor een volgende kanaalspiegeldaling aanslaat.



Figuur 4.2; Schematisatie model werking.

Bij de aanslibbings experimenten wordt slib toegevoegd aan het opslagvat. Dit slib komt dan bij het verpompen in de bak (kanaal en natte strook) terecht. Het water dat van de bak naar het opslagvat gepompt wordt, stort met veel geweld in het opslagvat zodat de het slib goed in suspensie komt voordat het naar de natte strook terug gepompt wordt.

Zoals in hoofdstuk 3.3 is beschreven is aanslibbing van slib het gevolg van een positief verschil in concentratie tussen de instroom en de uitstroom volumes naar en van de natte strook.

Met behulp van dit experiment zal dat getoetst worden door slibhuishouding voor de natte strook bij te houden. Ook zal door het aanbrengen van vegetatie in de oever worden bekeken wat de invloed hiervan is op de aanslibbing in de natte strook.

Het is niet mogelijk om in dit model de slibhuishouding heel nauwkeurig te kunnen bijhouden. Dit omdat slib altijd in hoeken, leidingen en naden zal blijven hangen. Bovendien zijn er voor een hogere nauwkeurigheid ook veel metingen nodig, die bij dit project niet uitgevoerd zullen worden. Op zich is dit niet zo een probleem, als de balans kwalitatief maar een goed beeld geeft van de sediment toename in de natte strook. Het gaat er verder ook meer om de fysische verschijnselen dan om de exacte hoeveelheid neergeslagen sediment in de natte strook.

4.5 Te gebruiken faciliteiten

4.5.1 Instrumentatie

Voor de waterspiegel verandering in het kanaal worden twee pompen gebruikt, waarvan een in het kanaal en een in het opslagvat. In het kanaal is een peilslagelectrode aangebracht, die de peilslag regelt. Voor het bepalen van de stroomsnelheden worden stroomsnelheidsmeters gebruikt die in twee haakse

richtingen (x- en y-richting) de stroomsnelheid kunnen meten. De waterstanden worden met golfhoogte meters bepaald. Voor de slibbalans zijn slibconcentratie meters nodig. Hier volgt een overzicht van de te gebruiken meetinstrumenten en hun positie in het model (zie ook figuur 4.3):

In de opening worden de volgende meetinstrumenten aangebracht:

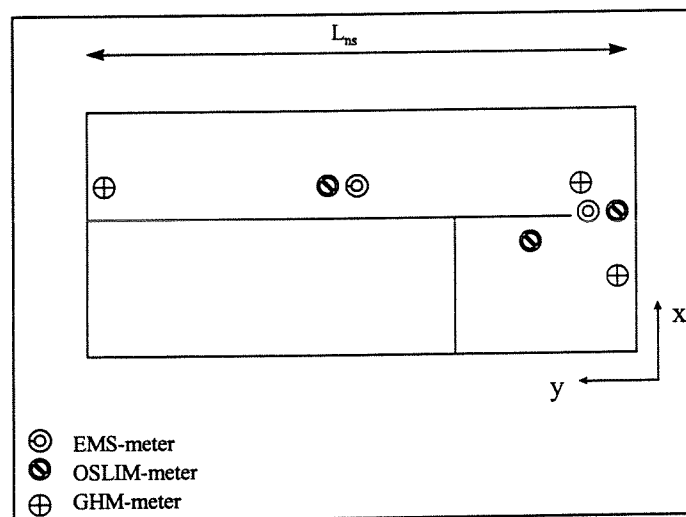
- Stroomsnelheidsmeter; Programmeerbare Electro-magnetische Snelheidsmeter (EMS).
- 2 Slibconcentratimeters ; Optische SLib Meters (OSLIM)

In de natte strook komen de volgende meetinstrumenten:

- 2 Golfhoogtemeters; GHM
- Stroomsnelheidsmeter ; EMS
- Slibconcentratimeter ; OSLIM

In het kanaal komen de volgende meetinstrumenten:

- Golfhoogtemeter; GHM
- Slibconcentratimeter; OSLIM
- Waterniveaivolger; WAVO (reserve meter)



Figuur 4.3; meetinstrumenten opstelling (bovenaanzicht).

4.5.2 Slibkarakteristieken

Voor de experimenten is kunstklei, de zogenaamde Westerwalden klei gebruikt (gemaakt van een grijsachtige poeder).

De verdeling van de deeltjes grootte is in figuur 4.4 weergegeven. Uit de verdeling kan geconcludeerd worden dat deze klei vrij uniform is en een grote fractie van deeltjes kleiner dan 1µm bezit.

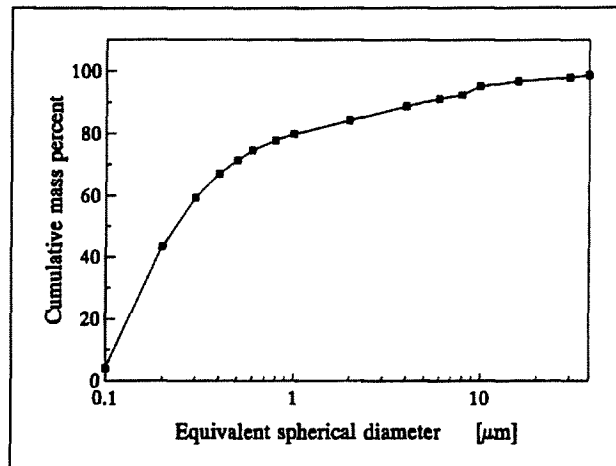


Fig.4.4; deeltjesverdeling westerwaldenklei (lit. liquefaction of cohesive sediments caused by waves) [lit.13]

De volumieke dichtheid van Westerwalden klei is 2640 kg/m^3 [lit.13].

De valsnelheid is bepaald met behulp van afzonderlijke sedimentatie proeven, zie bijlage H5.4: $w=0.1 \text{ mm/s}$.

Met vlokvorming zullen we bij dit experiment waarschijnlijk weinig te maken krijgen. Dit omdat het slib vanwege de relatief korte verblijftijden niet de kans zal krijgen om vlokken te vormen. Met hindered settlement zullen we ook niet te maken krijgen omdat de concentraties waarmee de experimenten uitgevoerd zullen worden onder de 10 gr/dm^3 liggen.

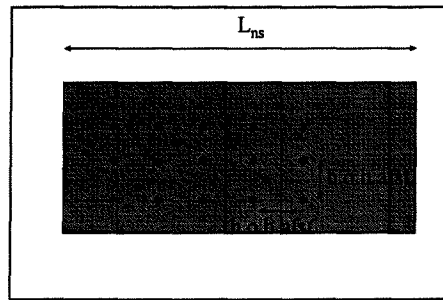
4.5.3 Vegetatie

In overleg met Rijkswaterstaat (DWW) is besloten een waterpest achtige vegetatie soort te gebruiken voor de experimenten. Waterpest komt namelijk veel voor in natuurvriendelijke oevers.

Er zal gebruikt worden gemaakt van kunstmatige vegetatie. Deze zijn van het merk Aquascapers en zijn afkomstig van het ABDLO te Wageningen. Ze zijn van het type Anacharis (Egeria densa) een op waterpest lijkende submerse waterplant. Het bestaat uit 9 stengels van variërende lengte, die boven het wateroppervlak uitsteken.

Voor de experimenten zal anders dan in hoofdstuk 3 beschreven een andere definitie voor de vegetatie dichtheid gebruikt worden. Er is gekozen voor een uniforme vegetatie patroon (zie figuur 4.5), wat wil zeggen dat de plantjes op een vaste afstand (hart op hart afstand) van elkaar liggen in zowel de breedte als de lengte richting in de natte strook. De vegetatie dichtheid n wordt gedefinieerd als het aantal plantjes per eenheid van oppervlak:

$$n = \frac{1}{(h.o.h)^2} \quad [1/\text{m}^2]$$



Figuur 4.5; Vegetatie patroon.

4.6 Gelijkvormigheid

Voor het model moet gelden dat het gelijkvormig (meetkundig en dynamisch) is met het prototype. Dat wil zeggen dat de relevante dimensieloze factoren (bepaald in hoofdstuk 3 en bijlage H3) dezelfde waarde moeten hebben voor zowel model als prototype.

Om de dimensieloze factoren te kwantificeren worden hier enkele waarden gegeven voor afmetingen zoals die in het prototype voorkomen. Ook voor de hydraulische parameters worden enkele waarden gegeven zoals die in werkelijkheid kunnen optreden. De breedte van een prototype natte strook ligt in het algemeen tussen de 1m en 10m, afhankelijk van de ruimte (in verband met de benodigde vaarstrook breedte voor de scheepvaart). In de vooroever bevinden zich op onderlinge afstand (h.o.h. afstand van 25m tot 75m) openingen voor de wateruitwisseling. Deze kunnen een breedte hebben die varieert tussen de 0.25m en 0.75m en de hoogte van de opening varieert tussen de 0.25m en 0.4m.

Afhankelijk van de scheepstypen kunnen de waterspiegeldalingen om varende schepen tussen de 0.1m en 0.3m liggen en een duur van de spiegeldalingen die ligt tussen de 10 seconden en 40 seconden. De scheepsfrequenties liggen tussen de 30 minuten en 3 uur.

De valsnelheid van slib ligt tussen de 10^{-4} m/s en 10^{-5} m/s.

In het model heeft de oever een talud helling van 1:3 en een maximale diepte van 0.3m. De dwarsdoorsnede van de natte strook is driehoekig waaruit volgt dat de maximale breedte van de waterspiegel 0.9m. is. De breedte van de opening is 0.1m en de hoogte bedraagt 0.5m en 0.1m.

De kanaalspiegeldaling bedraagt 30 seconden en de scheepsfrequentie bedragen 5 en 10 minuten.

Op grond van de eis dat de dimensieloze parameters voor zowel model als prototype dezelfde waarde moet hebben volgen hier waarden voor deze factoren zoals die in de werkelijkheid en in het model voorkomen, zie tabel 4.1.

Dimensieloze parameters	prototype	model
$\frac{\Delta h}{h_{ns}}$	0.15-0.7	0.25-0.5
$\frac{T_{sd}}{T_{ns}}$	0.3-5	10
$\frac{a_{nd}}{a_{dsn,ns}}$	0.08-0.9	0.09-0.2
$\frac{u_l}{\sqrt{g \cdot h_{ns}}}$	0.1-0.5	0.01-0.5
$T \cdot \frac{w}{h_{ns}}$	0.01-1	0.01-0.03

Tabel 4.1; Waarden van relevante dimensieloze factoren voor gelijkvormigheid.

De waarden komen redelijk overeen. Alleen de dimensieloze factor T_{sd}/T_{ns} is groter dan die in de werkelijkheid voorkomt. Dat wil zeggen dat de waterspiegeldaling (golf) in het model veel sneller gaat dan in werkelijkheid.

Om de langsstroming in het prototype te bepalen is gebruik gemaakt van het model PLONS. En Froude kentallen voor het model zijn ontleend aan hoofdstuk 6.

4.7 Uit te voeren experimenten

De parameters welke gevarieerd zullen worden zijn :

- a grootte van de opening
- Δh waterspiegeldaling kanaal
- T periode stilstaand water
- n vegetatie dichtheid

In de onderstaande tabellen staan de uit te voeren experimenten. In tabel 4.2 staan de hydraulische experimenten. Bij deze experimenten is er nog geen slib aanwezig.

Exp.	a [m ²]	Δh [m]	positie a	T [min]	n [1/m ²]
1	0.005	0.05	boven	1	0
2	0.01	0.05	boven	1	0
3	0.01	0.1	boven	1	0
4	0.005	0.05	onder	1	0
5	0.01	0.05	onder	1	0
6	0.01	0.1	onder	1	0
A	0.01	0.1	boven	1	25
B	0.01	0.1	onder	1	25

Tabel 4.2; Hydraulische experimenten.

In tabel 4.3 staan de aanslibbings experimenten. Bij deze experimenten is er slib aanwezig en is op experiment C en D na overal vegetatie aanwezig.

Exp.	a [m ²]	Δh [m]	positie a	T [min]	n [1/m ²]
7	0.005	0.05	boven	5	25
8	0.005	0.05	boven	10	25
9	0.005	0.05	boven	10	100
10	0.01	0.1	boven	5	25
11	0.01	0.1	boven	5	100
12	0.01	0.1	boven	10	100
13	0.01	0.1	boven	10	25
C	0.01	0.1	boven	5	-
D	0.01	0.1	boven	10	-

Tabel 4.3; Aanslibbings experimenten.

Hoofdstuk 5 Resultaten

5.1 Inleiding

Centraal bij dit project staan de experimenten, waarbij de aanslibbing van een natte strook wordt gesimuleerd. In hoofdstuk 3 zijn de processen beschreven alsmede de relevante parameters die een rol kunnen spelen bij het aanslibben van een natte strook. Er is een keuze gemaakt, welke parameters gevarieerd zullen worden bij de experimenten omdat het gezien de beschikbare tijd niet mogelijk is om ze allemaal te variëren. Ook legt het reeds gebouwde model enkele beperkingen op ten aanzien van de keuze van het variëren van parameters.

In dit hoofdstuk staan de resultaten van de uitgevoerde experimenten.

5.2 Waterbeweging

5.2.1 Algemeen

Om een indruk te krijgen van de volume-uitwisselingen tussen kanaal en natte strook en de snelheden in de natte strook zijn eerst experimenten uitgevoerd zonder slib. Er zijn twee experimenten met vegetatie ter vergelijking uitgevoerd.

Hier volgt een overzicht van de uitgevoerde hydraulische experimenten:

exp.	a [m ²]	Δh [m]	positie a	T [min]	n [1/m ²]
1	0.005	0.05	boven	1	0
2	0.01	0.05	boven	1	0
3	0.01	0.1	boven	1	0
4	0.005	0.05	onder	1	0
5	0.01	0.05	onder	1	0
6	0.01	0.1	onder	1	0
A	0.01	0.1	boven	1	25
B	0.01	0.1	onder	1	25

Tabel 5.1; Hydraulische experiment beschrijving.

NB Experiment B is niet goed uitgevoerd. Echter zijn wel de resultaten van de GHM-meters te gebruiken (om volumeuitwisselingen te bepalen). Verder is om de invloed van vegetatie op de volumeuitwisseling te toetsen, experiment 11 (zie aanslibbingsexperimenten tabel 4.3) ook meegenomen in de beschouwing (echter zijn er hier geen snelheidsmetingen verricht).

Omdat het er bij deze proeven alleen ging om de snelheden en uitwisselingen, konden de cycli (waterspiegeldaling gevolgd door periode stilwater) kort gehouden worden om zo in een dag twee experimenten te kunnen uitvoeren.

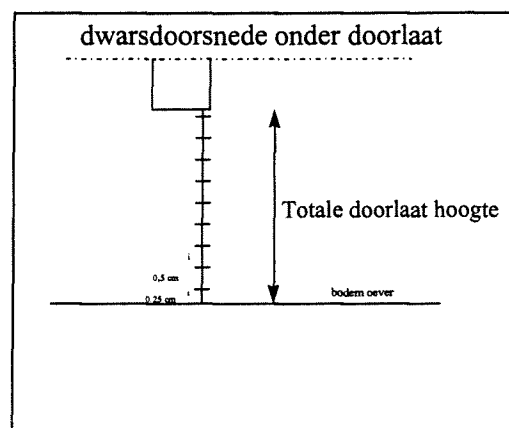
De meetresultaten van alleen de peilveranderingen zijn verder per experiment over 10 cycli gemiddeld (zie bijlage 5.1).

5.2.2 Stroomsnelheden

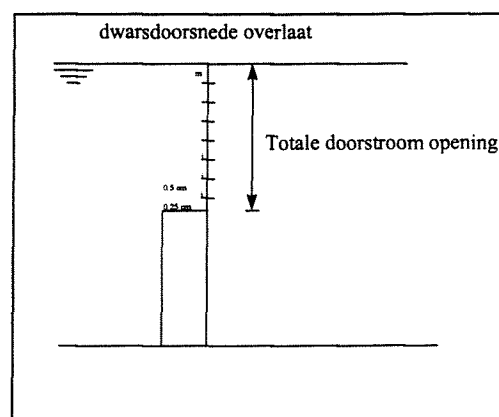
Op twee locaties in het model zijn stroomsnelheden gemeten en wel in de opening en in de natte strook (zie ook figuur 4.3). In de opening gaat het met name om de instroom en uitstroom snelheden (x-richting) en in de natte strook gaat het om de langsstroom snelheden (y-richting).

Voor de instroom en uitstroom snelheden in de opening zijn snelheidsprofielen bepaald. Dit is gedaan door eerst op verschillende hoogtes in de verticaal (zie figuur 5.1 en 5.2) de snelheid te meten. Vervolgens is uit het snelheidsverloop in de tijd de maximale snelheid voor de instroom en de uitstroom afgelezen en uitgezet tegen de meethoogte.

In figuur 5.1 en 5.2 zijn de meetpunten (posities van de EMS-meters) geschetst voor het bepalen van het verticale snelheidsprofiel.



Figuur 5.1; Onder doorlaat



Figuur 5.2; Overlaat

Het verloop van de snelheden in de tijd alsmede de verticale snelheidsprofielen staan in de bijlage 5.2.

In de tabel 5.2 staan de gemeten maxima voor de instroom en uitstroom snelheden in de opening en de maximale langs stroming.

Maximale stroom snelheid [m/s]				
Exp.	u _x opening		u _y oever	
	in	uit	in	uit
1	0.6	0.58	0.07	0.02
2	0.66	0.63	0.13	0.04
3	0.56	0.72	0.14	0.06
4	0.8	0.5	0.08	0.05
5	0.67	0.41	0.09	0.09
6	0.53	0.82	0.19	0.15
A	0.79	0.61	0.07	0.05

Tabel 5.2; Maximale stroomsnelheden.

5.2.3 Waterstanden

Bij de experimenten is geprobeerd waterstands dalingen ten gevolge van scheepvaart van 0.05m en 0.1m te creëren. Dit is te controleren met de waterstandsmeting in het kanaal. Met de waterstandsmetingen aan beide uiteinden van de natte strook (zie figuur 4.4) kan worden bepaald of er een verhang zich over de natte strook instelt bij een volume-uitwisseling. Ook kan met behulp van de waterstandsmeting in de natte strook het uitgewisselde volume bepaald worden.

De resultaten van de maximale waterstands veranderingen in het kanaal als ook van de twee meetlocaties in de natte strook zijn in tabel 5.3 weergegeven. Het verloop van de waterstand in de tijd is weergegeven in de figuurtjes in de bijlage 5.3.

Exp.	Maximale Δh [m]			Verhang [-]
	opening	oever	kanaal	
1	0.02	0.02	0.08	$4 \cdot 10^{-3}$
2	0.03	0.03	0.07	$4 \cdot 10^{-3}$
3	0.04	0.04	0.1	$8 \cdot 10^{-3}$
4	0.03	0.03	0.08	$4 \cdot 10^{-3}$
5	0.03	0.03	0.06	$5 \cdot 10^{-3}$
6	0.05	0.05	0.11	$9 \cdot 10^{-3}$
A	0.04	0.04	0.1	$2 \cdot 10^{-3}$
B	0.06	0.06	0.14	$3 \cdot 10^{-3}$
11	0.04	0.04	0.1	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabel 5.3; Maximale waterstands veranderingen en verhangen.

Uit de meetresultaten volgt dat de maximale spiegeldaling aan beide uiteinden van de natte strook gelijk zijn. Doordat de maxima niet op hetzelfde moment worden gehaald, is er een verhang in de natte strook. In de tabel zijn de maximale verhangen vermeld, welke grafisch zijn bepaald. Ook wordt de waterstands daling van het kanaal niet helemaal gevolgd in de natte strook.

5.2.4 Volume uitwisseling

De volume uitwisseling tussen kanaal en natte strook is nodig bij de slibhuishouding voor de natte strook (aanslibbings experimenten).

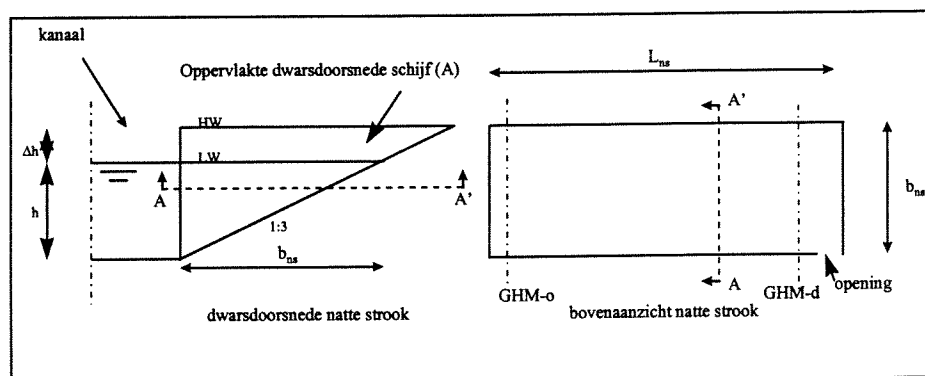
In hoofdstuk 3.2.2 is beschreven hoe het uitwisselingsdebiet bepaald kan worden uit de snelheden in de opening en het doorstroomoppervlak. In dit hoofdstuk wordt daarop aanvullend beschreven hoe uit de waterstandsmetingen in de natte strook het uitwisselingsvolume bepaald kan worden (een soort geïntegreerde kombergings benadering).

De methoden om de volume uitwisseling tussen kanaal en natte strook te bepalen zijn:

- schijfmethode; volume-uitwisseling volgt uit de waterstandsverandering in de natte strook;
- debietmethode; debieten volgen uit de snelheidsmetingen in de opening, of uit de waterstandsmeting bij de opening.

5.2.4.1 Schijfmethode

In de natte strook wordt bij de twee uiteinden de waterstand constant gemeten in de tijd. Met de bekende talud helling van de oever is met behulp van de waterstand, de breedte van de waterspiegel te bepalen. Bij de schijfmethode worden de breedte voor hoogwater en laagwater bepaald. Het uitgewisseld volume is gelijk aan de “waterschijf” die de natte strook uitstroomt en ook weer instroomt. (zie figuur 5.3)



Figuur 5.3; Dwarsdoorsnede model en bovenaanzicht.

Bij de schijfmethode wordt de maximale en de minimale waterstand uit het waterstandsverloop afgelezen. Het verschil tussen die waarden geeft de maximale waterstandsverandering. Het waterstandsverloop in de tijd wordt met deze methode dus niet meegenomen.

In paragraaf 5.2.3 kwam naar voren dat de waterstands veranderingen aan de uiteinden van de natte strook gelijk zijn. Het uitwisselingsvolume kan met de volgende formule berekend worden:

$$V_{uitw} = A \cdot L_{ns} \quad 5.1$$

waarin:

V_{uitw} het uitgewisselde volume.

- A oppervlak van het dwarsprofiel van de waterschijf tussen HW en LW bij het uiteinde van de oever.
 L_{ns} is de lengte van de natte strook.

A is als volgt te berekenen:

$$A = \frac{1}{2} \cdot (h_{HW} - h_{LW}) \cdot (b_{HW} + b_{LW}) \quad 5.2$$

waarin:

- h_{HW} waterstand bij hoog water
 h_{LW} waterstand bij laag water
 b_{HW} breedte van de waterspiegel behorende bij h_{HW}
 b_{LW} breedte van de waterspiegel behorende bij h_{LW}

Met het uitwisselingsvolume kan nu het uitwisselingspercentage $p (=V_{uitw}/V_{tot})$ een maat voor de waterverversing) bepaald worden.

Als de spiegeldaling lang genoeg aanhoudt of de opening groot genoeg is, zodat de spiegeldaling in de natte strook even groot zou kunnen worden als die op het kanaal, wordt het maximale uitwisselingspercentage p_{max} bereikt.

In de onderstaande tabel volgen volume-uitwisselingen berekent met de schijfmethode. In dezelfde tabel zijn ook het uitwisselingspercentage p en het maximale uitwisselingspercentage p_{max} erbij vermeld.

Experimen t	Volume-uitwisseling [dm ³]	p [%]	p_{max} [%]
1	38	20	70
2	54	30	60
3	70	35	80
4	53	25	70
5	61	30	50
6	99	50	80
A	73	35	80
B	121	60	94
11	72	35	80

Tabel 5.4; Volume uitwisselingen schijfmethode.

De hoge waarden voor p_{max} zijn mogelijk vanwege het driehoekig dwarsprofiel van de natte strook, en de relatief lage waterstanden.

5.2.4.2 Debiet methode

De debiet methode bepaalt debieten uit de snelheden in de opening, of uit de waterstandsveranderingen bij de opening.

Debieten uit snelheidsmetingen

De debiet methode gaat uit van de continue snelheidsmetingen in de opening:

- De EMS meter meet op een toenemende hoogte van ieder keer 0.5cm (zie figuur 5.1 en 5.2). Als wordt aangenomen dat de meting geldt voor een verticaal doorstroom interval van 0.5 cm (0.25cm boven en onder de probe) dan kan met de bekende breedte van de opening het debiet per tijdstap door dat kleine doorstroom interval worden bepaald.
- Vanwege het voorgaande uitgangspunt, resteert er dan onder de plek van de eerste meting (in de verticaal de onderste meting, op 0.5cm vanaf de overlaat of bodem) een doorstroom interval van 0.25cm dat buiten het interval valt waarvoor de meetwaarde van de EMS geldt. Er mag voor dit interval lineair worden geïnterpoleerd tussen de eerste EMS-meting en de onderrand waar geldt dat de snelheid nul is.
- Voor de stroomsnelheids metingen bij het wateroppervlak kon niet over de gehele openingshoogte gemeten kan worden, daar de EMS bij toenemende hoogte droog kwam te liggen bij een waterspiegel daling. Voor de hoogte waarvoor er geen EMS metingen verricht konden worden, wordt uitgegaan van de laatste EMS meting (laatste meting voor droogvallen). De ontbrekende snelheden tot het wateroppervlak kunnen bepaald worden door een lineaire extrapolatie. Tijdens de snelheidsmetingen zijn ook de waterstanden nabij de opening continu gemeten en is dus de resterende doorstroom hoogte bekend en is het debiet te berekenen.

Samenvatting debiet uit snelheidsmetingen:

Van de doorstroom opening is de breedte bekend, $b = 0.1\text{m}$. Verder is de snelheid in de tijd in de opening bekend (op hoogte i is snelheid $v_i(t)$ bekend) en daar waar niet gemeten kon worden wordt de snelheid geëxtrapoleerd. Met behulp van de GHM-meting nabij de opening is de waterstand boven de drempel bekend.

In hoofdstuk 3.2.2 staan de volgende uitdrukkingen voor het debiet door de opening:

$$Q = \iint u_N(y, z, t). dydz$$

Dit is ook te schrijven als

$$Q(t) = \overline{u_N}(t).a$$

Met behulp van de meetgegevens kan nu per doorstroom interval het debiet bepaald worden:

$$Q_{x,i}(t) = \overline{u_N}(t)_i . b . d_i \quad 5.3a$$

waarin:

- a openings grootte
- b breedte van de opening
- d hoogte van het doorstroom interval
- u_N normaal snelheid (in x-richting)
- i teller voor de doorstroom intervallen

Het debiet door de opening wordt:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n Q_{x,i} \quad 5.3b$$

Deze methode is bewerkelijk. Er moet eerst een goed snelheidsprofiel in de opening bepaald worden. Hiervoor zijn vele snelheidsmetingen in de opening nodig in zowel de hoogte als de breedte richting. Verder komt ook het probleem bij dat de EMS-meter droog valt, ieder keer als er een verval over de opening komt te staan. De nauwkeurigheid neemt af als snelheden geëxtrapoleerd moeten worden. Deze methode wordt verder ook niet meer uitgewerkt.

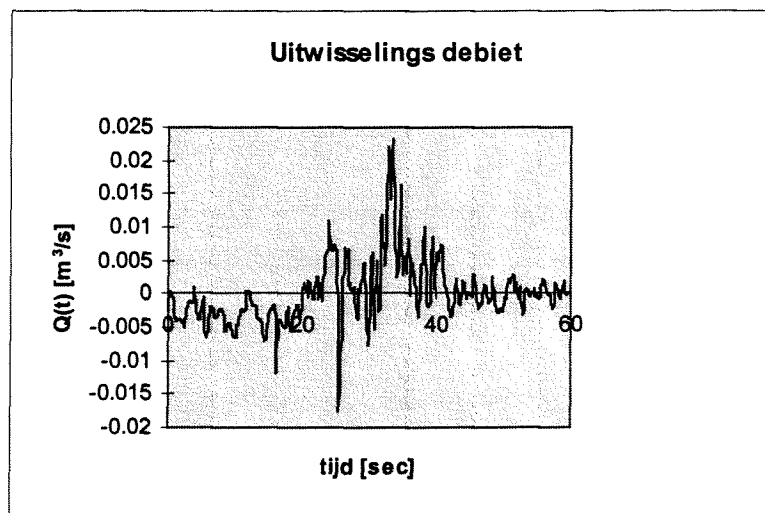
Debiet uit waterstanden bij de opening

De bepaling van de debieten uit de waterstanden bij de opening komt neer op een kombergings benadering. De natte strook is het bekken en die is aan het uiteinde begrensd, zodat daar de randvoorwaarde $Q=0$ geldt. De kombergings vergelijking luidt:

$$Q(0,t) = \Delta F_{\text{totaal}} \cdot \frac{dh(0,t)}{dt} = \Delta F_{\text{totaal}} \cdot \frac{dh_{ns}(t)}{dt} \quad 5.4$$

Met behulp van een numeriek schema kan het debiet als functie van de tijd bepaald worden.

Eenvoudiger kan het debiet bepaald worden uit dV/dt . Uit de metingen van $h(t)$ bij de opening kan het volume direct bepaald worden op ieder tijdstip. Het debiet is gelijk aan dV/dt , het verschil in volume tussen twee tijdstapjes, gedeeld door de tijdstap. Het verloop hiervan is weergegeven in figuur 5.4.



Figuur 5.4; Uitwisselings debiet.

Uit de figuur valt te zien dat het bepalen van $Q(t)$ uit de meetresultaten een grillig verloop geeft, vanwege de ruis in de meetdata.

Na middeling van de meetresultaten (met behulp van Fortran programma, zie bijlage 5.1) kon niet alle ruis eruit gehaald worden. Het gaat alleen om de ruis bij de waterstands daling (minima) omdat voor stilwater de ruis er grafisch uit gehaald is door een lijn te trekken door de gemiddelde hoogte van de waterspiegel (zo worden de

meetwaarden afgevlakt). Als het uitwisselingsprisma $P(t)$ beschouwd wordt (een maat voor het totale uitwisselingsdebiet) kan overgebleven ruis uitgemiddeld worden. $P(t)$ wordt als volgt gedefinieerd:

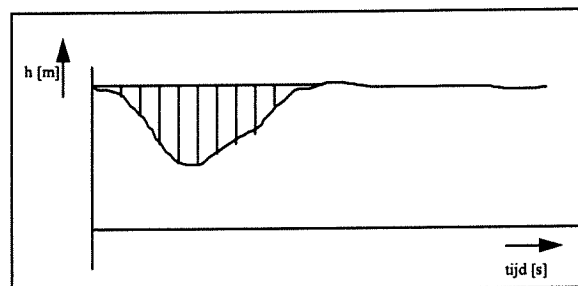
$$P(t) = \int_0^t L \cdot b(h) \cdot h(t) \cdot dt = \sum_0^i L \cdot \frac{b(i) \cdot h(i) + b(i+1) \cdot h(i+1)}{2} \cdot \Delta t \quad 5.5$$

Met $i = 0 \dots n$ tijdstapjes Δt

L lengte van de oever

h waterstand natte strook

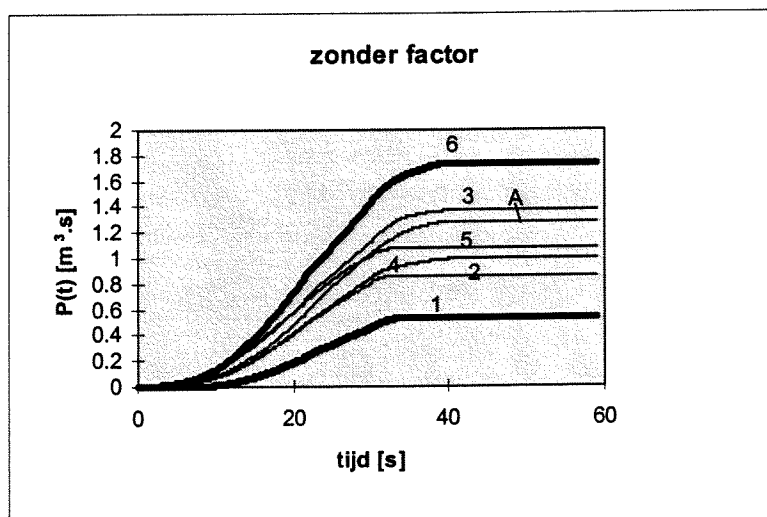
b breedte waterspiegel



Figuur 5.5; waterstands verandering natte strook in de tijd.

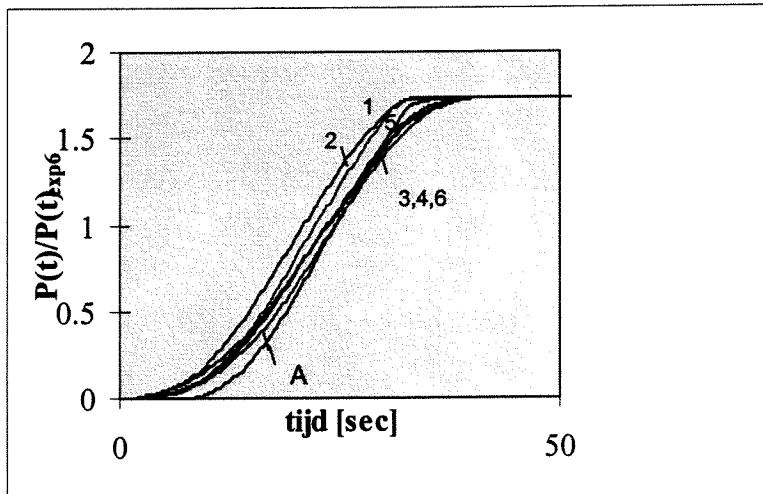
De helling van de curve (zie figuur 5.6b) is een maat voor de uitwisselingssnelheden, hoe groter de helling hoe groter de uitwisselingssnelheid.

Voor de natte strook betekent dit dat bij een constante tijd (30sec.) waarbij een peilvariatie op het kanaal optreedt er een groter volume wordt uitgewisseld bij een steilere helling.



Figuur 5.6a; $P(t)$ cumulatieve curven.

Om de $P(t)$ krommen met elkaar te vergelijken op steilheid dienen ze genormeerd te worden. De maximale volume-uitwisseling treedt op bij experiment 6. Uitgaande van de daarbij behorende maximale $P(t)$ waarde kan de normerings factor bepaald worden: $P(t)_{\max, \exp 6} / P(t)_{\max, \exp j}$ (j is een teller voor een experiment). De normerings factor vermenigvuldigd met $P_i(t)_{\exp j}$ geeft de $P(t)$ curve zoals afgebeeld in figuur 5.6b.



Figuur 5.6b; $P(t)$ cumulatieve curven (genormeerd).

Naar afnemende steilheid (helling grafisch bepaald) kunnen de experimenten als volgt gerangschikt worden:

1, 2, 5, 3 en 4 en 6, A.

Samenvatting debiet uit waterstanden bij de opening:

Uit de waterstandsmetingen bij de opening kan $Q(t)$ berekend worden. Om de ruis uit te middelen kunnen de $P(t)$ curven verder uitgewerkt worden.

Echter zullen bij de uitwerking van de aanslibbings experimenten deze debieten niet gebruikt worden (zie hoofdstuk 5.3.2). Verdere uitwerking hiervan wordt buiten beschouwing gelaten.

5.2.4.3 Conclusie

Vanwege de betrekkelijk eenvoudige manier waarmee de volumeuitwisselingen bepaald kunnen worden met de schijfmethode worden de resultaten van deze methode gebruikt voor de verdere uitwerking van dit project.

5.3 Aanslibbings experimenten

5.3.1 Algemeen

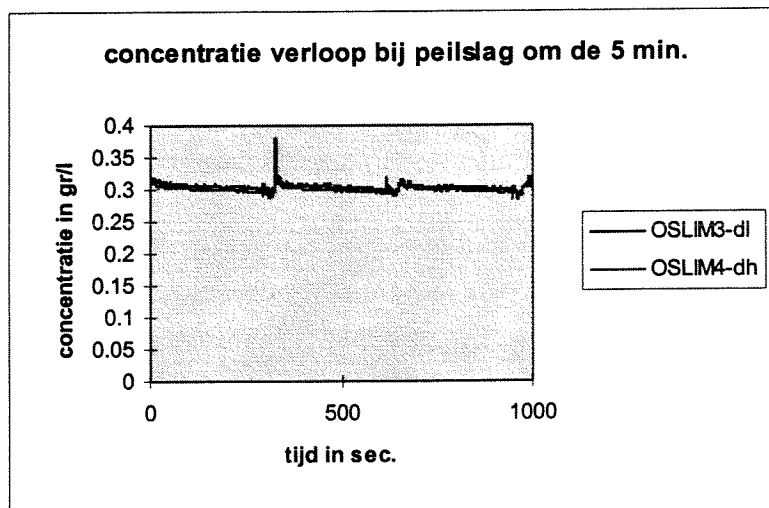
In vervolg op de hydraulische experimenten is een aanvang gemaakt met de aanslibbings experimenten. Bij deze experimenten zal de aanslibbing van de natte strook worden bepaald, en wordt bekeken wat de invloed van de vegetatie en frequentie van volume-uitwisseling op de slibbalans van de natte strook is. De parameters uit de hydraulische proeven worden nogmaals gevarieerd op de positie van de opening na. Deze blijft gedurende de slibexperimenten bij het wateroppervlak. In de onderstaande tabel volgt een beschrijving van de uitgevoerde experimenten met slib.

Exp.	a [m ²]	Δh [m]	positie a	T [min]	n [1/m ²]
7	0.005	0.05	boven	5	25
8	0.005	0.05	boven	10	25
9	0.005	0.05	boven	10	100
10	0.01	0.1	boven	5	25
11	0.01	0.1	boven	5	100
12	0.01	0.1	boven	10	100
13	0.01	0.1	boven	10	25
C	0.01	0.1	boven	5	-
D	0.01	0.1	boven	10	-

Tabel 5.5; Slib experimenten beschrijving.

5.3.2 Slib concentratie metingen

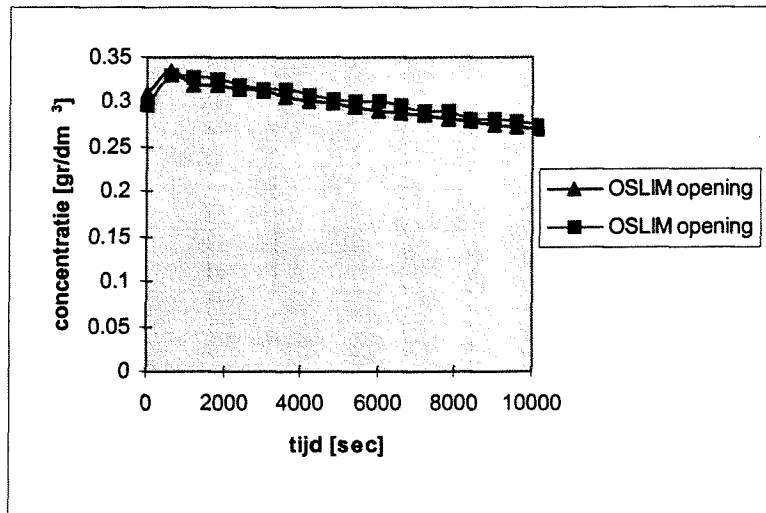
De slibconcentratie metingen zijn op drie locaties verricht, te weten halverwege de natte strook, in de opening en in het kanaal (zie figuur 4.3). In de onderstaande figuur zijn de meetresultaten in de opening gedurende 1000 seconden (ongeveer 15 minuten) weergegeven voor een willekeurig experiment.



Figuur 5.7 Concentratie meting in de opening (drie scheepspassages).

De concentratiemetingen zijn niet gemiddeld, net zoals dat gedaan is voor de hydraulische experimenten. Wel is er uit de meetreeks per experiment een gemiddelde concentratie voor de instroom en uitstroom bepaald, om deze te koppelen aan V_{uitw} (vergelijking 3.10). Het bepalen van deze concentratie is als volgt gedaan: Net als bij de hydraulische proeven is hier een vast referentie punt in de tijd, het tijdstip dat de eerste pomp aanslaat en er een spiegel daling op het kanaal plaatsvindt (zie ook bijlage H5.1). Op ieder tijdstip dat er een spiegel daling op het kanaal plaatsvindt is er in de meetreeks een signaal. Met behulp van een FORTRAN programma zijn de concentratie metingen uit de dataset gehaald, die simultaan met het pompsignaal gemeten worden. Gezien het minimale verschil in concentratie direct voor en na een peilslag is aangenomen dat deze aan elkaar gelijk zijn. Dat betekent dat de uitstroom concentratie van een cyclus (periode van een peilslag en periode stilwater) gelijk is aan de instroom concentratie voor een volgende cyclus (zie figuur 5.8). In deze figuur zijn de gemiddelde concentraties behorende bij een pompsignaal

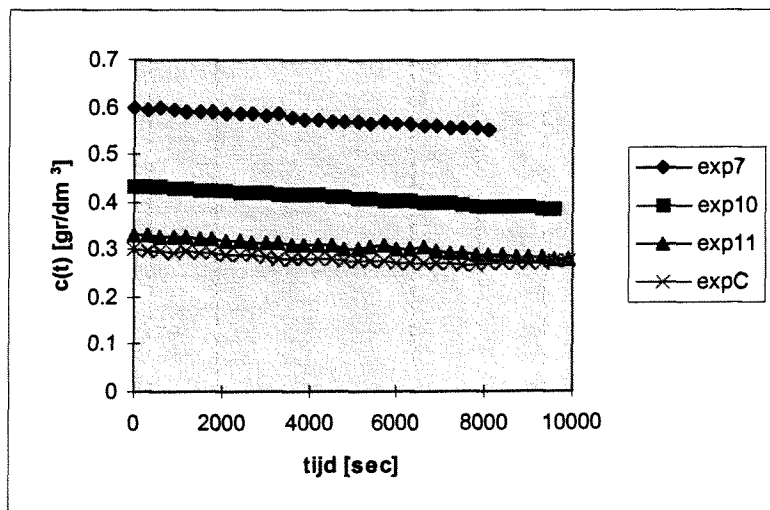
uitgezet in de tijd. Ieder concentratiepunt is de beginconcentratie voor een cyclus maar tevens eindconcentratie voor een vorige cyclus. De afname van de concentratie in de opening is dus het gelijk aan de toename van de concentratie in de natte strook. Afhankelijk van de scheepsfrequentie zijn er voor een meetdag op deze manier om de 5 of 10 minuten concentraties bekend over de meetdag. Nu kan het totale concentratieverloop over een meetdag weergegeven worden. In figuur 5.7 staan de maximaal met een spreadsheet weer te geven concentratiemetingen, terwijl in figuur 5.8 voor hetzelfde experiment de metingen voor een hele meetdag zijn weergegeven.



Figuur 5.8; Concentratie meting in de opening, nu over hele meetdag.

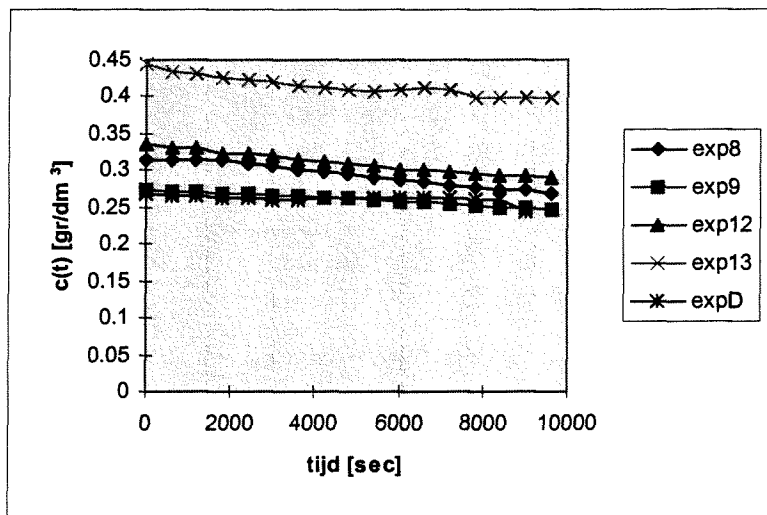
Concentratiemetingen in het kanaal

Er is alleen bij de aanvang van de aanslibbings experimenten slib aan het opslagvat toegevoegd. Hierdoor neemt gedurende de experimenten reeks de begin concentratie in het kanaal af. In figuur 5.9a staan de meetwaarden horende bij $T=5$ minuten en in figuur 5.9b voor $T=10$ minuten.



Figuur 5.9a Kanaal concentraties; $T=5$ min.

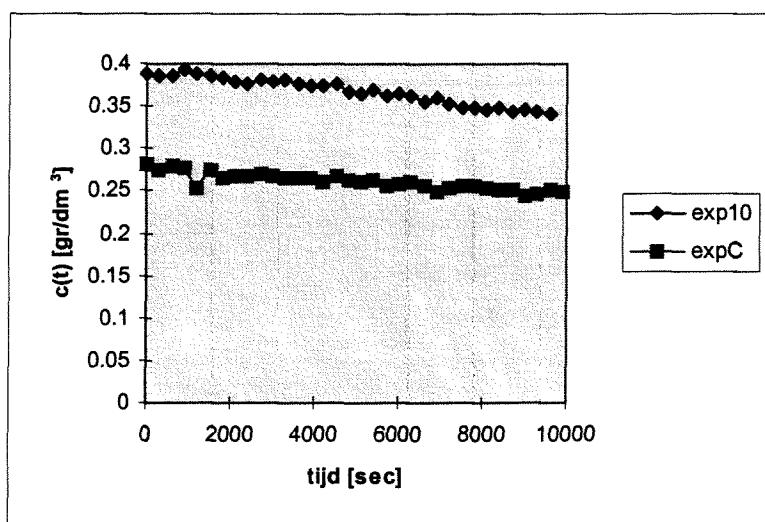
De meting van experiment 7 is korter uitgevoerd, vandaar dat de resultaten minder lang doorlopen dan bij de overige experimenten.



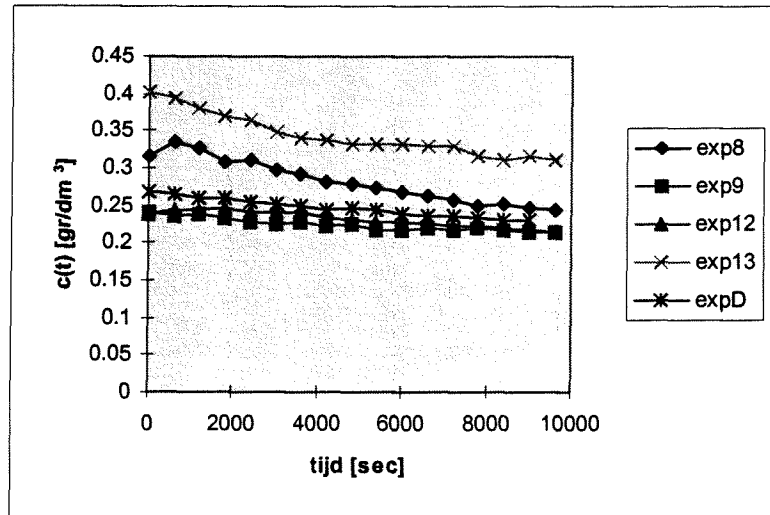
Figuur 5.9b; Kanaal concentraties; $T=10\text{min}$.

Concentratiemetingen in de natte strook

In de natte strook zijn ook de concentraties gemeten (zie ook figuur 4.3) en wel op 0.02m afstand vanaf de bodem. In figuur 5.10a staan concentratie waarden behorende bij $T=5$ minuten. Er zijn hier maar resultaten van twee metingen, omdat de oevermetingen van experiment 7 en 11 zijn mislukt. In figuur 5.10b staan de concentratie waarden behorende bij $T=10$ minuten.



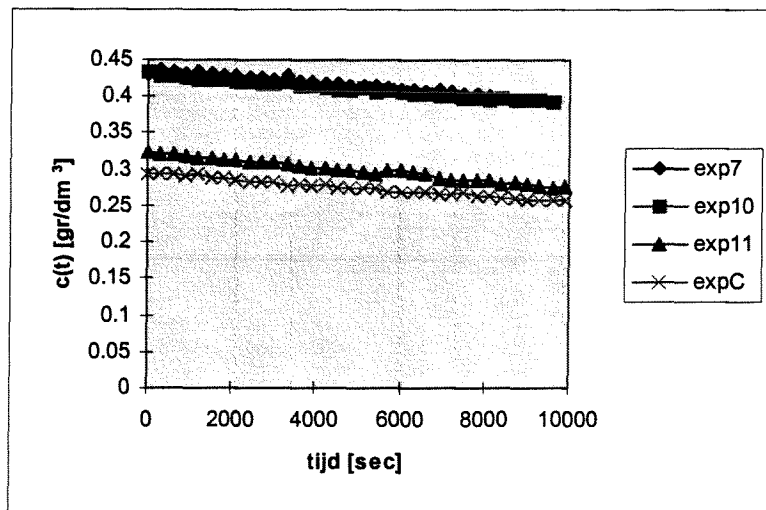
Figuur 5.10a; Natte strook concentraties; $T=5\text{ min}$.



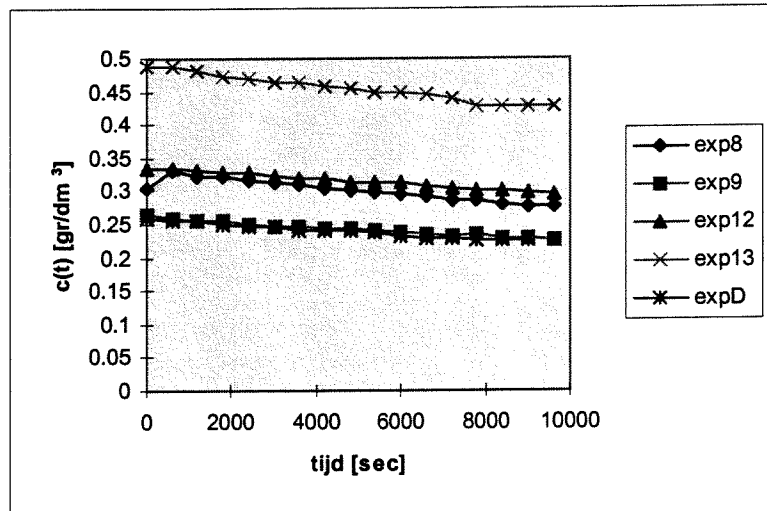
Figuur 5.10b; Natte strook concentraties; $T=10\text{min}$.

Concentratiemetingen in de opening

In de opening zijn constant in de tijd op twee verschillende hoogtes de concentraties gemeten. Het gemiddelde van die twee geeft de gemiddelde concentratie in de opening. De gemiddelde concentratiemetingen in de opening zijn weergegeven in figuur 5.11a en figuur 5.11b.

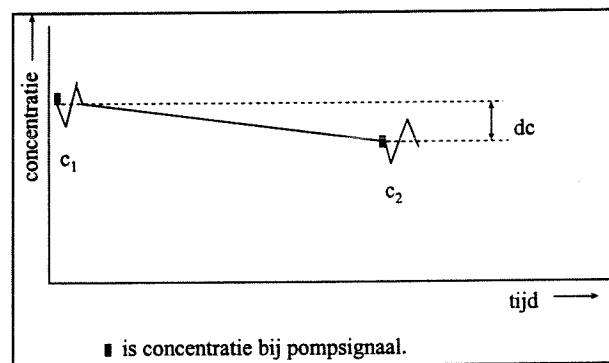


Figuur 5.11a; Openings concentraties; $T=5\text{min}$.



Figuur 5.11b; Openings concentraties; $T=10\text{min}$.

De concentratie op het tijdstip dat een cyclus begint (begin uitstroming) is de begin concentratie voor een cyclus en de concentratie op het tijdstip van de eerstvolgende uitstroming is de eindconcentratie van dezelfde cyclus en tevens de beginconcentratie van een volgende cyclus. Het verschil tussen de twee concentraties voor het begin en eind van een cyclus geeft de netto concentratie toestroom voor de natte strook gedurende die cyclus (zie ook figuur 5.12).



Figuur 5.12; schematisatie concentratieafname.

Over een meetdag met n cycli is $n \cdot \Delta c_i$ (met i een teller voor de cyclus) de natte strook ingestroomd (dc_{tot}). In tabel 5.6 volgen de totaal over een meetdag in de natte strook achtergebleven concentraties, waarbij $dc_{\text{tot}} = V_{\text{uitw}} \cdot n \cdot \Delta c_i$.

Experiment	$n \cdot \Delta c$ [gr/dm ³]	dc_{tot} [gr]
7	0.03	1.14
8	0.03	1.14
9	0.04	1.52
10	0.04	2.8
11	0.05	3.5
12	0.04	2.8
13	0.06	4.2
C	0.02	1.4
D	0.03	2.1

Tabel 5.6; netto concentratie toestroom.

Hoofdstuk 6 Evaluatie resultaten

6.1 Inleiding

In hoofdstuk 3 staat beschreven welke processen zich afspelen bij een passerend schip langs een opening van de natte strook. In hoofdstuk 4 is de proefopzet beschreven om die processen te simuleren. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de uitgevoerde experimenten (hoofdstuk 5) geëvalueerd en getoetst aan de verwachtingen die voortkomen uit hoofdstuk 3.

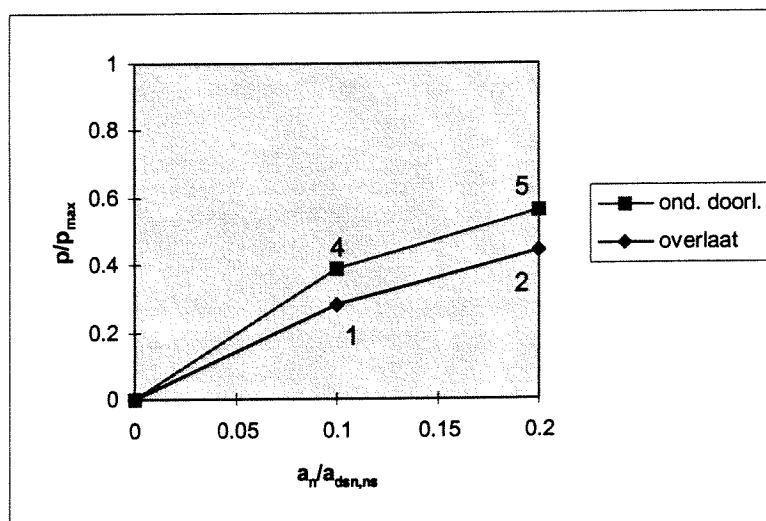
6.2 Waterbeweging

6.2.1 Effecten openingsgrootte op volumeuitwisseling

De openingsgrootte bepaalt het doorstroom oppervlak voor het uitwisselingsdebiet tussen kanaal en natte strook en dus de mate waarin een waterspiegeldaling (golf) vanuit het kanaal de natte strook kan binnendringen.

Bij een overlaat wordt de opening vergroot door de drempel (onderrand) van de opening te verlagen. Als de kanaalspiegeldaling lang genoeg duurt, en deze onder de drempel uitkomt, zakt de waterstand in de natte strook tot de drempel (beperkende werking drempel). Is daarentegen de opening bij de bodem dan is er geen drempel aanwezig, er is dan sprake van een onder doorlaat. De kanaalspiegel daling veroorzaakt dan een debiet welke door het hele doorstroomoppervlak van de opening kan stromen.

Experimenten 1, 2, 4 en 5 worden met elkaar vergeleken in figuur 6.1. Dit zijn experimenten waarbij voor hetzelfde verval over de opening de openingsgrootte en de positie van de opening ten opzichte van de bodem zijn gevarieerd. In de figuur is horizontaal de verhouding tussen maximale a_n (natte doorsnede bij stilwater) en $a_{dsn,ns}$ (oppervlak van de doorsnede van de natte strook bij stilwater) uitgezet. Verticaal staat de verhouding van het uitwisselingspercentage p en het maximale uitwisselingspercentage p_{max} .

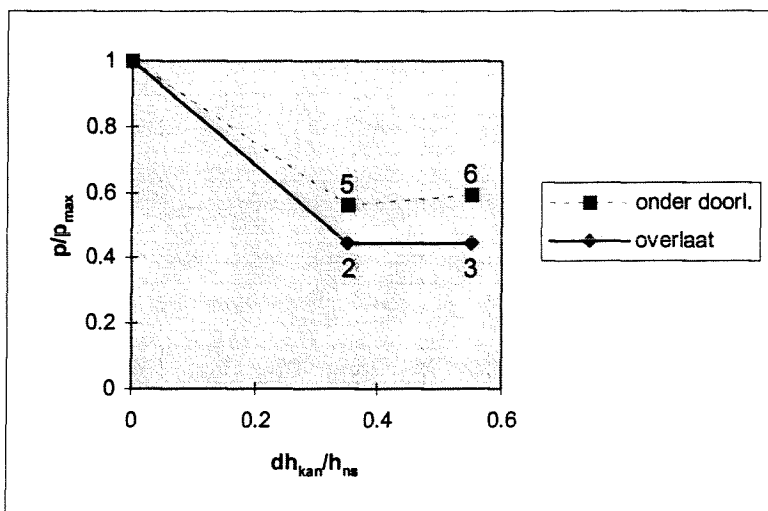


Figuur 6.1; Invloed openingsgrootte op volumeuitwisseling.

Uit de figuur valt af te leiden (hetzij triviaal) dat een toename van de natte doorsnede (openingsgrootte) een toename van het uitwisselingspercentage p geeft. Ook is te zien dat een verschil in overlaat en onder doorlaat ook een verschil in volumeuitwisselingen geeft. In hoofdstuk 3 kwam al naar voren dat bij een overlaat het debiet afhankelijk is van de bovenstroomse waterstand. Dit betekent dat de natte doorsnede evenredig is met de waterstand boven de drempel. Dit geeft vergeleken met een onder doorlaat waar de natte doorsnede constant is kleinere volumeuitwisselingen.

6.2.2 Effecten spiegeldaling kanaal op volumeuitwisseling

De spiegeldaling op het kanaal is de oorzaak dat er een volume met de natte strook wordt uitgewisseld. Om de effecten van een toenemende spiegeldaling op het kanaal te bepalen worden de experimenten 2,3,5 en 6 met elkaar vergeleken. Dit zijn experimenten waarbij voor dezelfde openingsgrootte het verval over de opening wordt gevarieerd. In de figuur is 6.2 is horizontaal de verhouding tussen de maximale kanaalspiegel daling en de natte strook waterstand uitgezet. Op de verticale as staat de verhouding van het uitwisselingspercentage p en het maximale uitwisselingspercentage $p_{\max}$.



Figuur 6.2; Invloed waterspiegel daling kanaal op volumeuitwisseling.

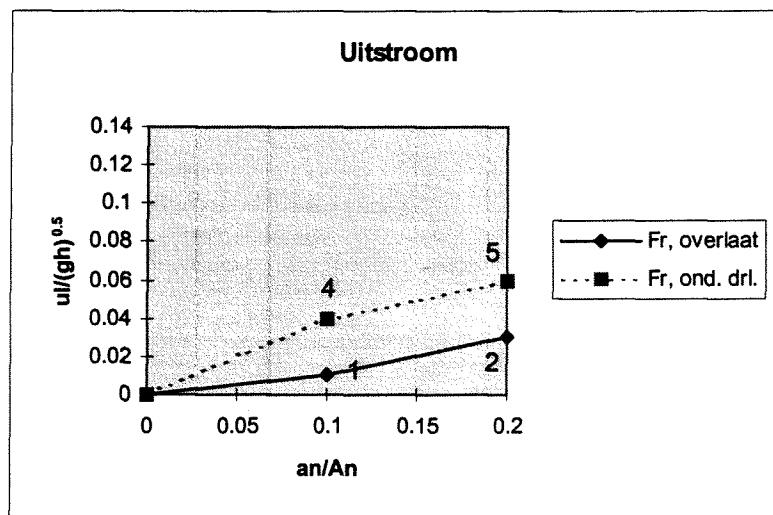
Bij kleine spiegeldalingen op het kanaal zal de waterstands daling in de natte strook die op het kanaal goed kunnen volgen. Bij een toenemende kanaalspiegeldaling zal dat minder goed kunnen, omdat de opening in de vooroever daarin een beperkende rol speelt. De verhouding tussen p en $p_{\max}$ neemt af tot een bepaalde waarde.

Een verdere toename van de kanaalspiegeldaling geeft nauwelijks een toename te zien van de $p/p_{\max}$ verhouding. Dat wil zeggen dat als de grootte van de spiegeldaling op het kanaal toeneemt, de spiegeldaling in de natte strook zodanig toeneemt, dat de verhouding min of meer constant blijft.

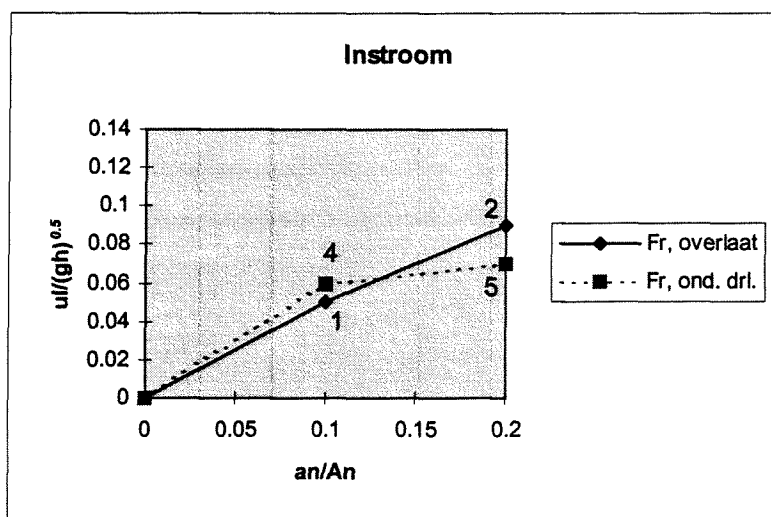
Naast de beperkende rol van de opening speelt ook de duur van de spiegeldaling (T_{sd}) een rol bij het kunnen volgen van de kanaalspiegel door de natte strook waterstand.

6.2.3 Effecten openingsgrootte op de langs stroming

Een vergroting van de opening geeft vanwege een vergroot doorstroom oppervlak een toename van de volume-uitwisseling. Hierdoor neemt ook de langssnelheid (y-richting) in de natte strook toe. Dit is te zien als bij toenemende openingsgrootte en bij hetzelfde verval over de opening, de langs snelheden in de natte strook met elkaar worden vergeleken. Experiment 1, 2, 4 en 5 worden met elkaar vergeleken. In figuur 6.3a en figuur 6.3b is horizontaal de verhouding van het maximale natte doorstroom oppervlak in de opening en de dwarsdoorsnede (in x-richting) van de natte strook uitgezet. Verticaal is het kental van Froude uitgezet. Hiervoor zijn de maximale langssnelheden uit tabel 5.2 gebruikt.



Figuur 6.3a; Invloed doorstroomoppervlak op langsstroming.



Figuur 6.3b; Invloed doorstroomoppervlak op langsstroming.

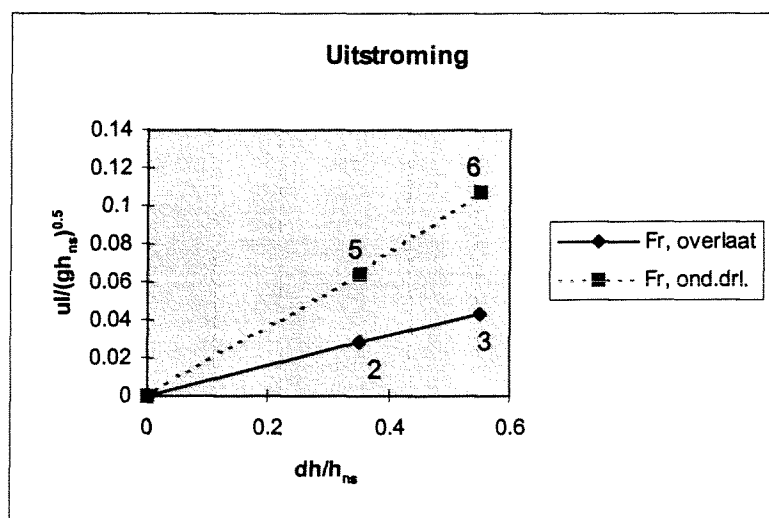
Uit beide figuren blijkt een toename van het Froude getal, omdat de langsstroming toeneemt als de openingsgrootte toeneemt. Dit was te verwachten omdat ook het uitwisselingsdebiet toenam bij een toename van het doorstroom oppervlak. $Fr < 1$, wat neerkomt op subkritische stroming ter plaatse van de meting, halverwege de natte strook.

De toename van het Froude getal bij de instroom voor de overlaat en onder doorlaat loopt niet meer gelijk op (figuur 6.3b), zoals dat wel het geval is voor de uitstroom (figuur 6.3a). Bij de uitstroom is de toename wel ongeveer gelijk en liggen de snelheden voor een onder doorlaat wel hoger dan voor een overlaat (omdat Q_{uitw} bij onder doorlaat groter is). Er kan geconcludeerd worden dat de invloeden van de instroming van de natte strook (door de sterk gekromde stroming in de opening vanwege de asymmetrische ligging, schiet het water naar binnen) nog merkbaar zijn ter plaatse van de meting.

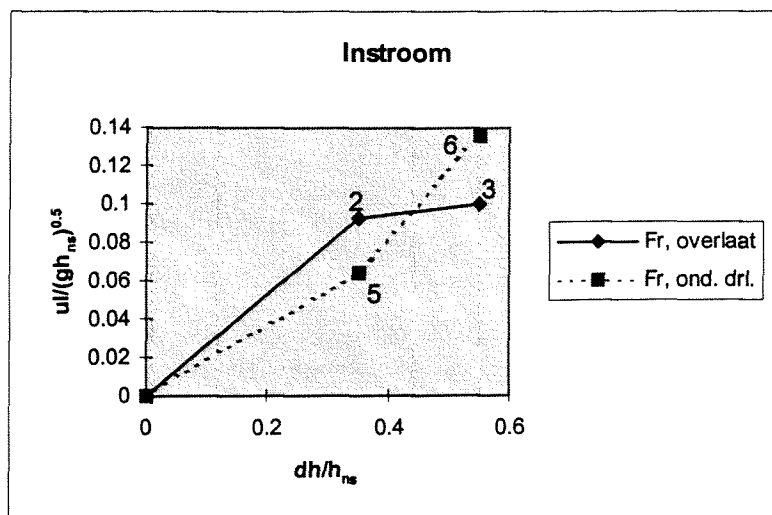
Bij de uitstroming is er ook een kromming van de stroomlijnen maar er is waargenomen dat de uitstroming rustiger verloopt dan de instroming.

6.2.4 Effect spiegeldaling kanaal op de langsstroming

Om de effecten van een toenemende kanaalspiegeldaling op de langsstroming in de natte strook vast te stellen, worden experimenten met een zelfde openingsgrootte vergeleken. Hiervoor zijn experimenten 2, 3, 5 en 6 met elkaar vergeleken. In figuur 6.4a en figuur 6.4b is horizontaal de verhouding van de kanaalspiegel daling en de natte strook waterstand uitgezet. Verticaal het kental van Froude.



Figuur 6.4a; Invloed kanaalspiegeldaling op langsstroming.



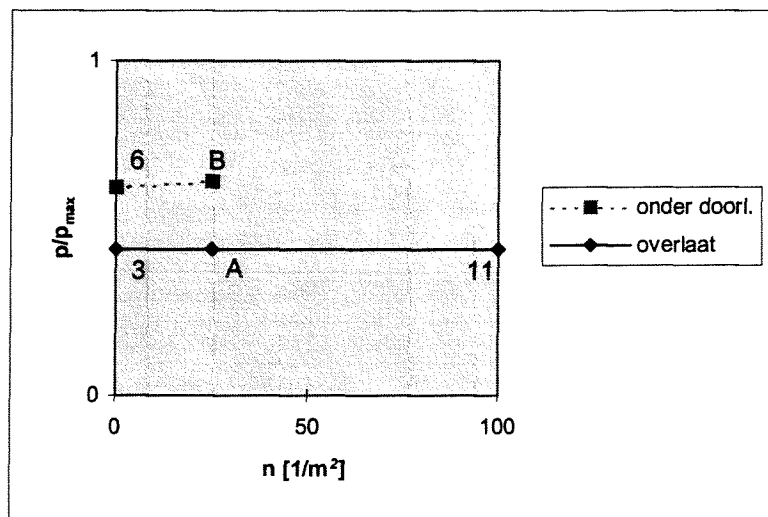
Figuur 6.4b; Invloed kanaalspiegeldaling op langsstroming.

Uit beide figuren blijkt een toename van het Froude getal als gevolg van een toename van de langssnelheid in de natte strook als de kanaalspiegeldaling toeneemt. Ook hier weer $Fr < 1$, subkritische stroming, daar waar de EMS meting plaats vond, halverwege de natte strook.

Ondanks dat er in paragraaf 6.2.2 is geconstateerd dat er geen toename is van het uitwisselingsvolume bij een overlaat bij toenemende kanaalspiegeldaling, geeft figuur 6.4 wel een toename van de langstroming in de natte strook te zien. Bij zowel de instroom als de uitstroom neemt de langssnelheid voor een onder doorlaat wel meer toe dan bij een overlaat. Bij de uitstroom zijn de langssnelheden voor een onder doorlaat consequent groter dan voor een overlaat.

6.2.5 Effecten vegetatie op volumeuitwisseling

Om de effecten van vegetatie op de volume-uitwisselingen waar te nemen worden experiment 3, 6, 11, A en B met elkaar vergeleken. Het betreft experimenten met dezelfde openingsgrootte en dezelfde kanaalspiegeldaling.

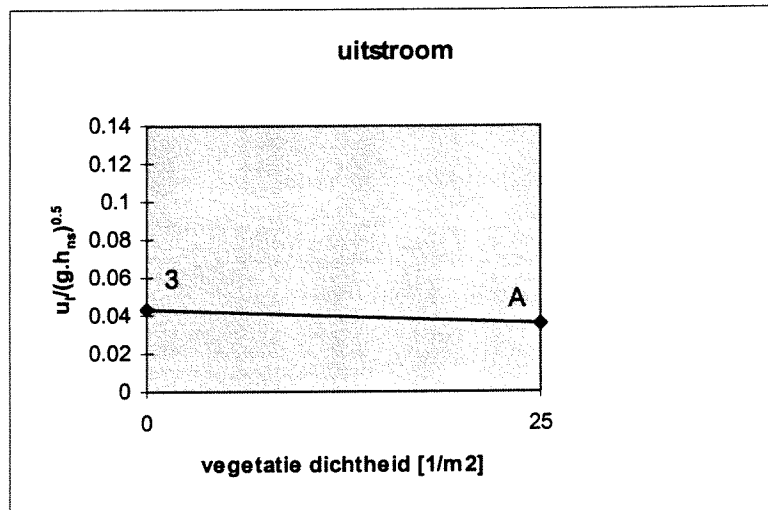


Figuur 6.5; Invloed vegetatie op volume uitwisseling.

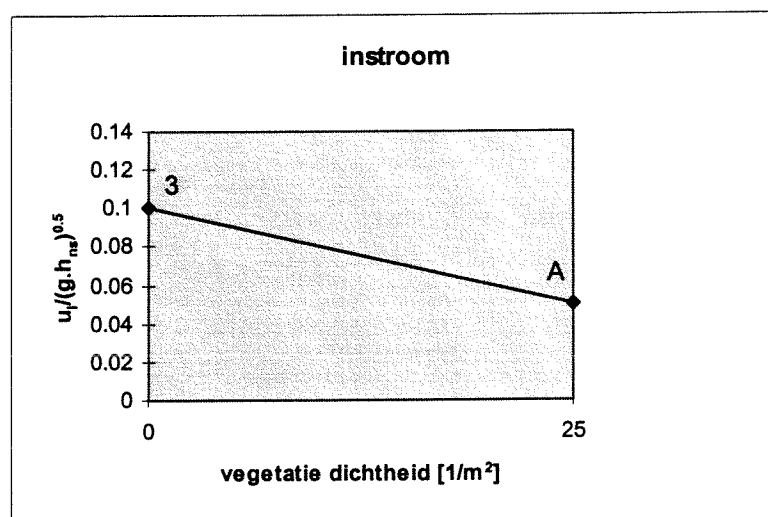
In figuur 6.5 is te zien dat vegetatie geen invloed heeft op de volumeuitwisselingen. Vegetatie kan wel de langsstroming beïnvloeden, zie volgende paragraaf.

6.2.6 Effecten vegetatie op de langsstroming

Om de effecten van vegetatie op de langsstroming in de natte strook waar te nemen, worden weer experiment 3 en A met elkaar vergeleken. In figuur 6.6a en figuur 6.6b is horizontaal de vegetatie dichtheid uitgezet en verticaal het kental van Froude, waarin de maximaal in de natte strook gemeten langssnelheid is gesubstitueerd.



Figuur 6.6a; Invloed vegetatie op langsstroming.



Figuur 6.6b; Invloed vegetatie op langsstroming.

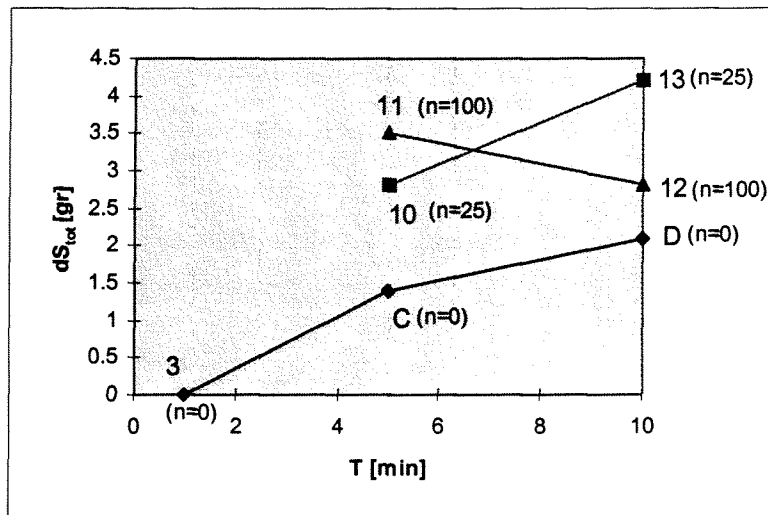
Uit de procesanalyse (hoofdstuk 3) volgt dat vegetatie een verhoogde hydraulische weerstand geeft, wat resulteert in een afname van de langssnelheid in de natte strook. Dit is in beide figuren te zien aan de afname van het Froude getal. Het betreft hier een snelheidsmeting op één hoogte waardoor niet kon worden aangetoond wat de invloed van vegetatie is op het snelheidsprofiel. Zoals in hoofdstuk 3.3 naar voren kwam zal het snelheidsprofiel indien er vegetatie aanwezig is, afwijken van het logaritmisch profiel en meer constant over de diepte verlopen. Dat is met een meting niet aan te tonen.

6.3 Aanslibbings experimenten

6.3.1 Effecten vegetatie en periode stilwater op de slib toestroom

Om de invloed van vegetatie waar te nemen worden experimenten 3, C, D en 10, 13 en 11, 12 met elkaar vergeleken. Dit zijn experimenten met dezelfde kanaalspiegel

daling en openingsgrootte. In figuur 6.7 staat horizontaal de periode stilwater afgebeeld en verticaal de netto slib toestroom naar de natte strook (dS_{tot}).



Figuur 6.7; Invloed vegetatie en periode stilwater.

Op experiment 12 na geeft een toename van de vegetatie dichtheid een toename van de netto slib toestroom naar de natte strook dS_{tot} . Toename van vegetatie in de natte strook verhoogt de hoeveelheid slib die in de natte strook achterblijft. Ondanks dat vegetatie ook voor opwerveling van slib kan zorgen kan geconcludeerd worden dat de concentratie opgewerveld slib niet tot uiting komt in een negatieve netto slibtoestroom naar de natte strook (dat de slib uitstroom de instroom overtreft).

Ook is waargenomen tijdens de uitvoering van de experimenten dat het slib op de planten achterblijft.

De verklaring dat bij experiment 12 het concentratie verschil niet toeneemt is waarschijnlijk te wijten aan een fout in de meting voor dat experiment. (de fout is waarschijnlijk dat een van de twee metingen in de opening een te lage waarde geeft, waardoor het gemiddelde van de twee ook lager uitkomt).

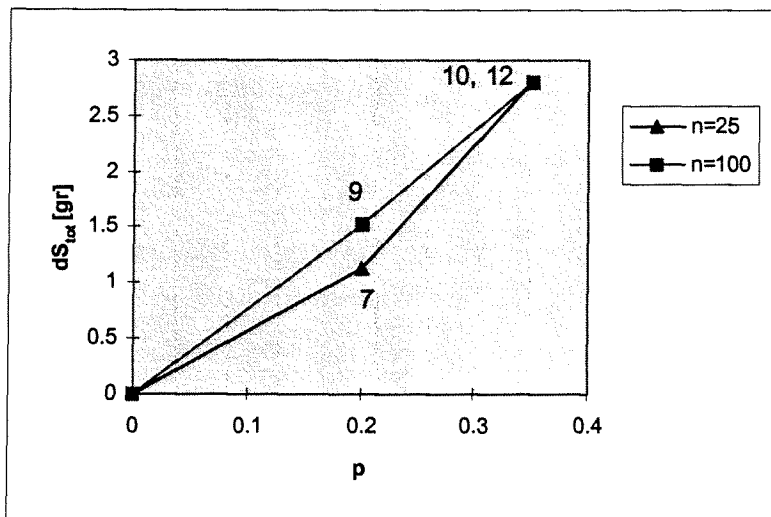
Wat betreft de invloed van de periode stilwater (periode tussen scheepspassages) kan het volgende geconcludeerd worden:

- Een toename van T geeft bij proeven zonder vegetatie, een toename van de netto slib toestroom naar de natte strook. Het slib heeft meer tijd om te bezinken.
- Een toename van T geeft bij $n=25$ eveneens een toename van de netto slib toestroom naar de natte strook. Er was al geconstateerd dat vegetatie de netto toestroom van slib naar de natte strook verhoogd (hogere dS_{tot} begin waarde vergeleken met $n=0$). Een toename van T laat de netto toestroom nog meer toenemen.
- Een toename van T voor $n=100$ laat een afname zien van de netto slib toestroom naar de natte strook. Hier wordt verder niet op ingegaan daar experiment 12 mislukt is.

6.3.2 Effecten volumeuitwisseling op concentratie toestroom

Om de invloed van volume uitwisseling aan te tonen worden bij gelijk blijvende vegetatiedichtheid en periode stilwater de volgende experimenten met elkaar

vergeleken: experimenten 7 en 10 en experimenten 9 en 12. Dit zijn proeven met een kanaalspiegeldaling van respectievelijk 0.05m en 0.1m. In figuur 6.8 is horizontaal het uitwisselingspercentage p uitgezet en verticaal de netto slib toestroom na een cyclus.



Figuur 6.8; Invloed volume uitwisseling.

Een toename van het volumeuitwisselings percentage p geeft een toename van het slibtransport door de opening. In figuur 6.8 is weer de invloed van vegetatie te zien, waar bij dezelfde volumeuitwisseling ($p=0.2$) de netto slibtoestroom naar de natte strook hoger is bij een hogere vegetatie dichtheid.

6.4 Vergelijking met wiskundige modellering natte strook concentratie

In hoofdstuk 3.5.3 is beschreven hoe de natte strook concentratie wiskundig gemodelleerd kan worden. Dit model zou als aanvulling op het PLONS model (computer model dat de waterbeweging in de natte strook simuleert en de sturende parameters berekent) kunnen worden gebruikt om het concentratie verloop in de natte strook te bepalen en daaruit weer de aanslibbing. Het model berekent direct na een volumeuitwisseling een gemiddelde natte strook concentratie uit een beginconcentratie van de natte strook en de netto ingestroomde concentratie vanuit het kanaal. (zie hoofdstuk 3.5.3).

Uitgangspunt van de gemiddelde concentratie is dat deze homogeen is in de natte strook (volledige menging). Dit zal in werkelijkheid niet het geval zijn daar de concentratie van de opening af zal afnemen.

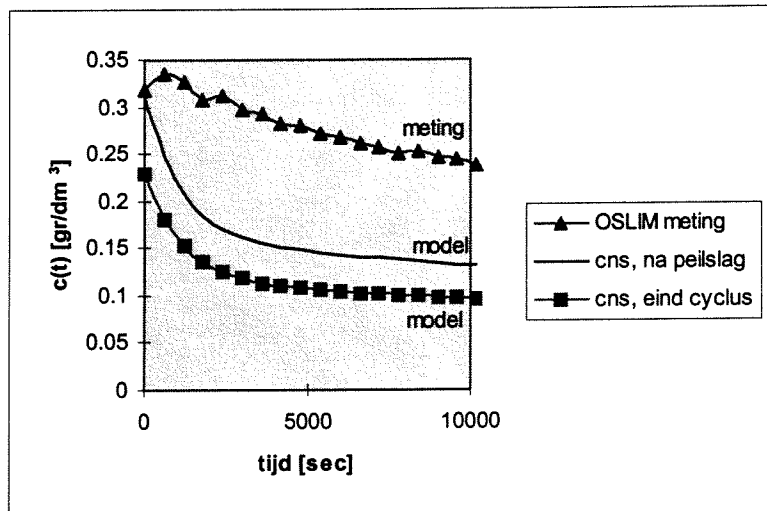
Na een volume uitwisseling is de concentratie in de natte strook gelijk aan:

$$\bar{c}_{ns,i+\Delta t} = c_{ns,0} \cdot (1 - p) + c_{k,0} \cdot p$$

Voor $c_{ns,0}$ wordt de beginconcentratie gesubstitueerd van de meting in de natte strook. Deze waarde geldt weliswaar lokaal, maar er is aangenomen dat de concentratie homogeen is. Voor $c_{k,0}$ wordt de beginconcentratie van de meting in de opening gesubstitueerd. Het uitwisselingspercentage p volgt uit de waterstands daling in de natte strook (schijfmethode). Afhankelijk van de periode tussen scheepspassages neemt de concentratie als gevolg van het aanslibben in de natte strook exponentieel af,

$$c_{ns,i+1} = (c_{ns,0} \cdot (1 - p) + c_{k,0} \cdot p) \cdot e^{-\lambda T} = (c_{ns,i+\Delta t}) \cdot e^{-\lambda T}$$

met $\lambda = w/h_{ns}$. De valsnelheid is bepaald middels afzonderlijke sedimentatie proeven (zie bijlage H5.4) waaruit volgt $w = 10^{-4}$ m/s en h_{ns} is de maximale diepte in de natte strook, $h_{ns} = 0.19$ m. In figuur 6.9 volgt voor een willekeurig experiment (experiment 8) het resultaat van de natte strook concentratie berekent met behulp van het model, en de gemeten natte strook en instroom concentraties.

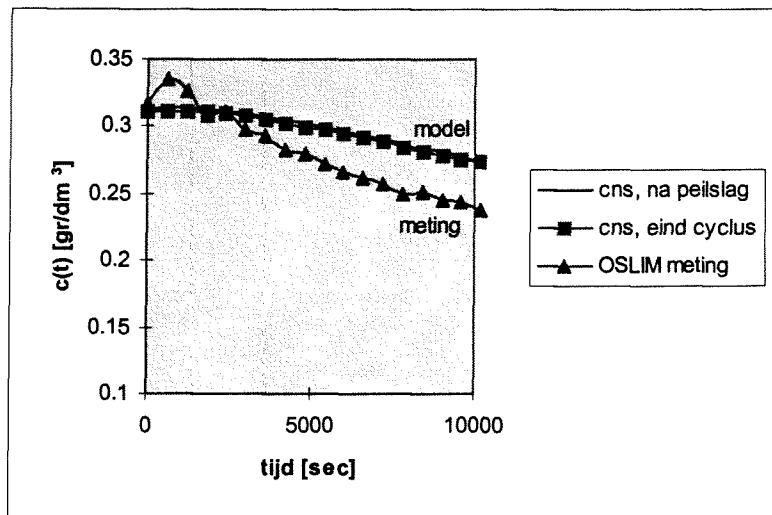


Figuur 6.9; Natte strook concentratie afname volgens analytisch model.

In figuur 6.9 zijn weergegeven:

- de concentratie meting halverwege de natte strook.
- concentratie verloop na een peilslag, over een meetdag (volgend uit het wiskundig model).
- concentratie verloop aan het eind van een cyclus over een meetdag (volgend uit het wiskundig model).

Opvallend is dat de uitkomsten van het model lager liggen dan die van de metingen. Dit kan komen omdat de opwerveling waarschijnlijk toch een rol speelt, en daardoor de gemiddelde natte strook concentratie uit het model hoger komt te liggen. Ook valt op dat de relaxatie tijd van het model korter is dan bij de metingen. Het kan dus zijn dat de valsnelheid van het slib toch lager is dan die volgt uit de afzonderlijke sedimentatie balans (bijlage H5.4). Uit de meetresultaten is toen een waarde voor λ bepaald uit de concentratie metingen. Met de aanname dat de concentraties exponentieel afnemen ($c_{\text{eind}} = c_{\text{begin}} \cdot e^{-\lambda T}$) kan λ worden bepaald met de bekende begin en eind concentraties. Wordt deze λ (factor 10 kleiner) gesubstitueerd in het model, dan krijg je het concentratie verloop zoals in figuur 6.10.



Figuur 6.10; Gemiddelde concentratie verloop natte strook volgens analytisch model.

Het concentratie verschil direct na een volumeuitwisseling en aan het eind van de cyclus is nu nauwelijks te zien (de lijnen $c_{ns,na}$ en $c_{ns,eind}$ vallen haast samen), omdat deze ligt in de orde van mg/dm^3 . Maar gesommeerd komen de waarden wel overeen met de netto toegestroomde concentratie, zoals die gemeten is in de opening.

De concentratie afname gaat nu meer geleidelijk, vanwege de grotere relaxatie tijd (orde 10 groter) en komt nu beter overeen met de metingen. De invloed van de beginconcentratie is na circa 4 uitwisselingen nog steeds merkbaar, en neemt daarna pas exponentieel af.

De waarden van het model liggen wel hoger dan die van de metingen.

Dit komt omdat in werkelijkheid de invloed van de kanaalconcentratie afneemt in langsrichting van de natte strook (van de opening af). Ter plaatse van de meting in de natte strook zal de invloed van de kanaalconcentratie ($c_{k,0}$) zijn afgenomen, waardoor daar de gemeten concentratie lager zal liggen. Voor het model zijn waarden voor $c_{k,0}$ ingevuld die zijn gemeten in de opening.

In bijlage H6 staan de figuurtjes van het concentratieverloop zoals berekend met het analytisch model.

De conclusies met betrekking tot dit wiskundig model zijn:

- Het model geeft voor de bepaalde w met de sedimentatie balans een kleinere relaxatie tijd dan is waargenomen bij de metingen. Er is dus wel een groot verschil tussen de concentratiemeting en die berekent met het model.
- Het model geeft met een waarde voor λ (die uit het concentratie verloop bepaald is, aannemende dat deze exponentieel afneemt) wel waarden voor de natte strook concentratie die dezelfde orde van grootte zijn als die van de metingen. Door de grotere relaxatie tijd neemt de concentratie minder snel af, en zijn de verschillen tussen de concentratie direct na een peilslag en aan het eind van een cyclus in de orde van mg/dm^3 . Dit is ook waargenomen bij de metingen.

Hoofdstuk 7 Conclusies en aanbevelingen

De algemene doelstelling van dit project was het identificeren van de fysische verschijnselen bij het aanslibben van natte stroken en het bepalen van de parameters die deze processen sturen. Het project dient tevens als pilot study voor het modelleren van natuurvriendelijke oevers.

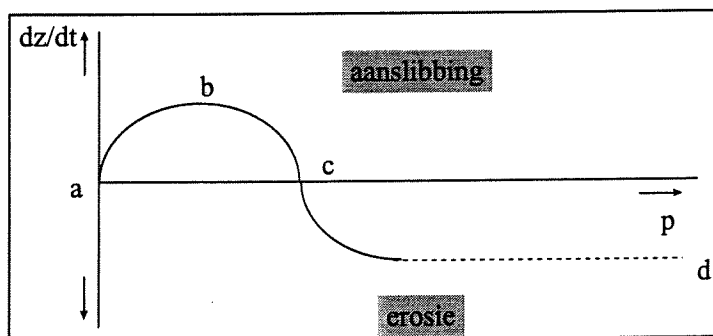
Er is een procesanalyse uitgevoerd, waaruit de belangrijkste parameters en hypothesen volgden. Met behulp van experimenten zijn de processen gemodelleerd en zijn de hypothesen getoetst.

7.1 Conclusies

Op basis van deze studie kan geconcludeerd worden dat de belangrijkste sturende parameters voor de aanslibbing zijn:

- Het uitwisselingspercentage $p = \frac{V_{uitw}}{V_{ns}}$; Deze bepaalt namelijk hoeveel slib er de natte strook instroomt en p bepaald de langsstroming in de natte strook. Het uitwisselings percentage wordt bepaald door:
 - ♦ $\frac{\Delta h}{h_{ns}}$; deze parameter veroorzaakt de volumeuitwisseling
 - ♦ $\frac{a_{nd}}{a_{dsn,ns}}$; deze parameter bepaalt de contractie van het uitwisselings debiet. Een toename van de openingsgrootte leidt tot een toename van het uitwisselingspercentage. Ook de positie van de opening is bepalend voor het uitwisselings debiet. Een onder doorlaat voor de uitgevoerde experimenten een groter uitwisselingsdebiet zien.
 - ♦ $\frac{T_{sd}}{T_{ns}}$; deze parameter bepaalt de duur en dus ook de grootte van het uitwisselingsdebiet.
- $T \cdot \frac{w}{h_{ns}}$; Deze parameter bepaalt hoeveel slib er gedurende stilwater kan bezinken.
- Vegetatiedichtheid n ; Uit de experimenten blijkt dat vegetatie geen invloed heeft op het uitwisselingspercentage. Wel heeft vegetatie invloed op de langssnelheden. Deze nemen af, waardoor de opwerveling afneemt. Uit de experimenten is gebleken dat vegetatie een toenemend effect heeft op de aanslibbing.

Het verband tussen p en dz/dt (waarbij z de verandering van de dikte van de slibbodem is) ziet er waarschijnlijk als volgt uit (zie figuur 7.1):



Figuur 7.1; Schematisatie relatie dz/dt en p .

In figuur 7.1 kunnen de volgende trajecten doorlopen worden:

Traject a-b; Toename volumeuitwisseling, maar net geen opwerveling (snelheden niet groot genoeg). Vanwege de verhoogde slibinstroom zal de aanslibbing dus toenemen.

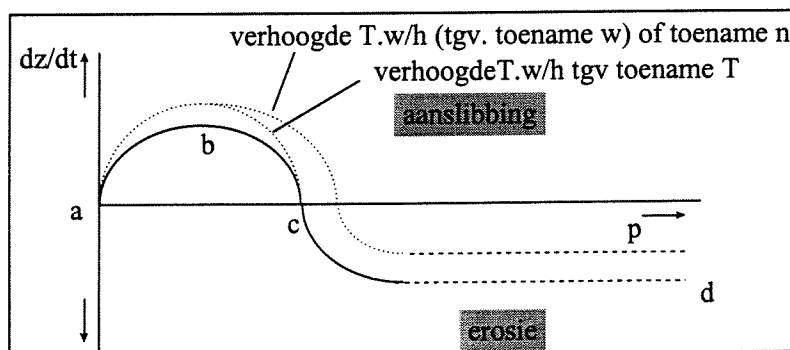
Traject b-c; De volumeuitwisseling zodanig neemt toe, dat de snelheden nu wel voor opwerveling zorgen (kritieke bodemschuifspanning wordt overschreden). Door opwerveling wordt de aanslibbing kleiner.

Punt c; Dit is een evenwichts punt waarbij de aanslibbing en opwerveling in evenwicht zijn.

Traject c-d; In dit traject is de volumeuitwisseling zodanig toegenomen dat de erosie overheerst.

Het verband tussen dz/dt en p kan als volgt worden beïnvloed:

- Door $T \cdot \frac{w}{h_{ns}}$; voor hogere waarden van deze parameter zal de curve waarschijnlijk verschuiven zoals afgebeeld in figuur 7.2.



Figuur 7.2; Schematisatie relatie dz/dt en p .

Vanwege de langere perioden met stilwater kan er meer slib bezinken. Ook een toename van de valsnelheid zou een verhoging van de aanslibbing tot gevolg kunnen hebben. Zwaardere slibdeeltjes zullen waarschijnlijk ook een hogere kritieke bodemschuifspanning hebben waardoor punt c naar rechts verschuift en de opwerveling minder is.

- Vegetatiedichtheid n ; Een toename van de vegetatie dichtheid zal waarschijnlijk het zelfde effect hebben als een toename van $T \cdot \frac{w}{h_{ns}}$ (als gevolg van een toename van w) in figuur 7.2.

De uitgevoerde experimenten hebben vermoedelijk in traject a-b plaats gevonden, daar (zie ook hoofdstuk 6.3.2) een toename van p ook een toename van de netto ingestroomde concentratie te zien gaf.

7.2 Aanbevelingen

Bij de experimenten is er maar een type vooroever bekeken. Verder zat er maar een opening in de vooroever waardoor invloeden van andere openingen, zoals een verhang tussen twee openingen welke de langssnelheid laat toenemen, niet werd meegenomen. Ook de duur van de spiegeldaling welke mede van invloed is op de grootte van het uitwisselingspercentage is niet gevarieerd. Hier volgen enkele aanbevelingen:

- Met betrekking tot de huidige experiment opstelling ; Deze voldoet niet helemaal en moet aangepast worden: een grotere kanaalkomberging, een andere locatie van de opening, liefst symmetrisch gelegen in langsrichting van de natte strook; mogelijkheden om de opening ook in de breedte te variëren, meerdere openingen in langsrichting (voor het verhang) en in hoogte richting.

Om in de opening toch in de tijd het debiet te koppelen aan de concentraties een debiet meter aanbrengen voor debietuitwisseling, en een zuigmond van de concentratie meters die in de verticaal mee beweegt met het wateroppervlak (zodat in een vast punt van het concentratieprofiel over de diepte wordt gemeten).

Bij dit project is voor de experimenten met slib alleen gekeken naar een overlaat. Bij vervolg experimenten moet gekeken worden of er bij een onder doorlaat en bij een combinatie wezenlijke verschillen optreden.

Kanaal concentratie moet over een meetdag constant worden gehouden.

De duur van de spiegeldaling moet ook worden gevarieerd.

De bodem van natuurlijk materiaal voorzien om de erosie van de bodem na te gaan.

- Met betrekking tot vervolg studies naar aanslibbing van natte stroken; De uitkomst van dit project geeft aan dat vegetatie de aanslibbing laat toenemen. Voor een vervolg studie moet het accent dan meer liggen op de details van processen. Er moet worden gekeken naar het opwervelings proces door stroming om vegetatie bij de bodem. Ook kan worden gekeken of wortels van vegetatie, of micro organismen het slib vast houden. Ook kan worden nagegaan of flocculatie en hindered settlement een rol spelen bij het aanslibben.
- Met betrekking tot het ontwerp van natte stroken; Het verdient aanbeveling om het wiskundig model verder uit te werken en er een computermodel van te maken dat als aanvulling kan dienen voor PLONS. Met het model moet dan de aanslibbing gemodelleerd kunnen worden.
- Met betrekking de constructieve aspecten; Het zal duidelijk zijn dat er een evenwicht gevonden moet worden tussen de slib instroom en slib uitstroom (punt c in figuur 7.1), waarbij het uiteindelijke doel van de natte strook (milieuvriendelijke

oeverbescherming) niet verloren gaat. Gedacht kan worden aan een kleppen systeem in de vooroever. In de verticale vooroever dienen de openingen voorzien te worden van kleppen. Voor openingen bij het wateroppervlak dienen deze kleppen (bevestigd aan een scharnier aan de bovenzijde van de klep) alleen een instroming naar de natte strook toe te laten (opening dient door de waterdruk open geduwd te worden).

Hierdoor komt er vers water de natte strook in, met een relatief lagere concentratie, omdat de concentratie bij de waterspiegel lager is (c neemt af bij toenemende afstand vanaf de bodem).

Bij de bodem moet er ook een opening zitten, en wel met een klep die alleen water uit de natte strook kan laten stromen. Een opening bij de bodem heeft een groter debiet en zo kan er meer slib de natte strook uitgevoerd worden.

Literatuur

- 1 **Kappe, B. & van Koningsbruggen, P. & Voogt, L.**; **Projectgroep Ketelmeer**, 1989. Integraal waterbeheer Ketelmeer. Erosie van slib tengevolge van scheepvaart. Rijkswaterstaat, directie Flevoland.
- 2 **Simons, D & Senturk, F.**, 1977. Sediment Transport Technology. Water Recources Publications.
- 3 **Cappendijk- de Bok, A.**, 1994. Validatie van PLONS. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde Delft.
- 4 **Cappendijk- de Bok, A.**, 1995. Hydraulische en morfologische monitoring van de natuurvriendelijke oever langs het Noordhollandsch Kanaal ter hoogte van het Alkmaardermeer. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde Delft.
- 5 **Rijksinstituut voor Natuurbeheer**, 1989. Onderzoek aan natte oeverstroken langs het Wilhelminakanaal. Rijkswaterstaat, directie Noord-Brabant.
- 6 **Ivens, E.**, 1996. Welke begroeiing is te verwachten bij natuurvriendelijke oeververdedigingen? Rapport W-DWW-96-080. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- 7 **Winterwerp, J.**, et al. Flow induced erosion of cohesive beds, a literature survey. Cohesive sediments rapport 25. Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics.
- 8 **Winterwerp, J.**, et al. Flocculation characteristics of natural muds, Sediments from Ketelmeer. Cohesive sediments rapport 31. Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics.
- 9 **Winterwerp, J.**, et al. Erosion and deposition characteristics of natural muds, Sediments of Ketelmeer. Cohesive sediments rapport 30. Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics.
- 10 **Vries, M., de**, 1977. Waterloopkundig onderzoek, college handleiding b80. Technische Universiteit Delft.
- 11 **Hooimeijer, R.**, 1997. Sedimentatie in natte stroken, afstudeerverslag. Technische Universiteit Delft.
- 12 **Leussen, W. van**, 1989. Estuarine macroflocs their role in fine-graded sediment transport, proefschrift. Universiteit Utrecht.
- 13 **Wit, P. de**, 1995. Liquefaction of Cohesive Sediments caused by waves, proefschrift. Technische Universiteit Delft.
- 14 **Meursing, L.**, 1995. De hydraulische ruwheid van doorstroomde vegetatie. Rijkswaterstaat, directie Oost-Nederland.
- 15 **d' Angremond, K.**, 1993. Waterbouwkunde, college dictaat F3. Technische Universiteit Delft.

Bijlagen

Bijlage H3 Dimensieanalyse

Gezien het grote aantal parameters die bij de hydraulische- en sedimentatieprocessen een rol spelen is het handig deze met behulp van de dimensieanalyse te ordenen. De dimensieanalyse is een ordening van kennis van fysische verschijnselen.

De fysische processen waterbeweging en aanslibbing natte strook zijn beschreven hoofdstuk 3.2 en hoofdstuk 3.5.

De positie van de opening in de vooroever wordt bij de dimensieanalyse ingevoerd middels de parameter H (hoogte van de opening ten opzichte van de bodem als lengte maat) en is de vegetatie dichtheid dimensieloos gehouden.

Met aanvulling van de gravitatie versnelling en de viscositeit is het sedimentatieproces nu afhankelijk van:

$$S = f(a, \Delta h, n, T, u_i, H, c, w, h, g, \eta).$$

Met de elementaire grootheden massa $[M]$, lengte $[L]$ en tijd $[T]$ is het mogelijk de parameters te verminderen met 11-3 dimensieloze produkten (kentallen) volgens het Π theorema. (deVries 1975, [lit.10]). Rangschikking van de parameters naar de volgende volgorde geeft:

groep 1; afhankelijke parameters : c

groep 2; parameters die in het experiment: $\Delta h, a, n, T, H$ gevarieerd kunnen worden.

groep 3; andere parameters : u_i, w, h, g, η

De parameters worden in de volgende dimensiematrix gerangschikt:

parameters	c	Δh	a	n	T	H	u_i	w	h	g	η
M	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
L	-3	1	2	0	0	1	1	1	1	1	-1
T	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0	-2	-1

Exponenten van de dimensies

De 11 dimensieloze produkten kunnen nu snel worden gekozen aan de hand van de matrix:

	c	Δh	a	n	T	H	u_i	w	h	g	η
$\Pi 1$	1	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0.5	-1
$\Pi 2$	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
$\Pi 3$	0	0	1	0	0	0	0	0	-2	0	0
$\Pi 4$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$\Pi 5$	0	0	0	0	1	0	0	0	-0.5	0.5	0
$\Pi 6$	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0
$\Pi 7$	0	0	0	0	0	0	1	0	-0.5	-0.5	0
$\Pi 8$	0	0	0	0	0	0	0	1	-0.5	-0.5	0

Dimensieloze produkten

De dimensieloze produkten worden:

$$\Pi 1 = \frac{c \cdot h^{1.5} \cdot g^{0.5}}{\eta}$$

$$\Pi 2 = \frac{\Delta h}{h} \quad (\text{meetkundige gelijkvormigheid})$$

$$\Pi 3 = \frac{a}{h^2} \quad (\text{meetkundige gelijkvormigheid})$$

$$\Pi 4 = n$$

$$\Pi 5 = \frac{T \cdot g^{0.5}}{h^{0.5}}$$

$$\Pi 6 = \frac{H}{h} \quad (\text{meetkundige gelijkvormigheid})$$

$$\Pi 7 = \frac{u_t}{h^{0.5} \cdot g^{0.5}} \quad (\text{Froude getal})$$

$$\Pi 8 = \frac{w}{h^{0.5} \cdot g^{0.5}}$$

Voor schaalbepaling kan er dus worden gesteld, dat de volgende kentallen het probleem beheersen en daarom gelijk moeten zijn in model en prototype:

$\Pi 2$ en $\Pi 3$ $\Pi 4$ en $\Pi 6$ voor meetkundige gelijkvormigheid.

(In principe heeft $\Pi 4 = n$ de dimensie L^2/L^2)

$\Pi 7$ voor kinematische gelijkvormigheid.

Door combinatie van de producten zijn ook nieuwe kentallen te vormen, bijvoorbeeld:

$$\Pi 5 \cdot \Pi 8 = \frac{T \cdot w}{h}$$

Bijlage H4 PLONS berekeningen

Er zijn wat berekeningen met PLONS uitgevoerd voor het model en daarbij zijn dezelfde parameters gevarieerd als bij de experimenten. Echter kan met PLONS de frequentie van de scheepvaart niet gevarieerd worden. Ook is er voor de bodemruwheids coëfficiënt aangenomen dat de bodem glad is. De vegetatie wordt zo dus ook niet meegenomen in PLONS. Een overzicht wordt hieronder weergegeven (zie voor de volledige PLONS beschrijving en resultaat uitdraai de bijlage):

NB. Om met PLONS het model te kunnen berekenen moest een schaaftactor worden toegepast. Hier werd voor de lengte schaal 4 aangehouden en volgt op grond van $n_{Fr}=1$ dat de snelheidsschaal 2 is.

run	a (m ²)	Δh (m)	H (m)	h (m)	wv (%)	u_l (m/s) *)	i (-) #
exp1	0.4*0.2	0.2	1.0	1.2	11.72	0.045	$2.1 \cdot 10^{-4}$
exp2	0.4*0.4	0.2	1.0	1.2	42.75	0.155	$2.5 \cdot 10^{-3}$
exp3	0.4*0.4	0.4	1.0	1.2	45.68	0.14	$8.3 \cdot 10^{-4}$
exp4	0.4*0.2	0.2	0	1.2	13.98	0.065	$8.3 \cdot 10^{-4}$
exp5	0.4*0.4	0.2	0	1.2	24.95	0.145	$1.7 \cdot 10^{-3}$
exp6	0.4*0.4	0.4	0	1.2	37.94	0.235	$2.5 \cdot 10^{-3}$

PLONS berekeningen

Verklaring van de afkortingen;

- a : doorstroom oppervlak opening (breedte*hoogte)
- Δh : waterspiegeldaling
- h : waterstand natte strook
- H : niveau van de opening ten opzichte van de bodem natte strook
- wv : waterverversing in %
- u_l : maximale langsstroming in de natte strook van het model
- i : langs verhang tussen opening 3 en 4 (zie bijlage)

Het verhang is met de hand berekend tussen opening 3 en 4 (h.o.h.afstand 12 m).

*) Het betreft hier de langssnelheden zoals die in de natte strook van het model zullen optreden. De snelheden in de kolom zijn dus $u_{l, \text{prot}}/n_{\text{snelh}}$.

Bijlage

Inleiding

Ten behoeve van het ontwerp van natuurvriendelijke oevers met plasberm en vooroever, waarbij er een optimale wateruitwisseling is tussen kanaal en plasberm is door DWW het pc-model PLONS ontwikkeld. PLONS staat voor Positionering en Lengteverdeling van de Openingen in een Natte Strook-verdediging. Met dit pc-model kan voor een gegeven vooroeververdediging en nattestrook, de wateruitwisseling berekend worden, die optreedt tussen kanaal en nattestrook, tengevolge van een spiegeldaling op het kanaal tijdens het passeren van een schip.

De waterbeweging in de nattestrook en de wateruitwisseling tussen natte strook en vaarweg wordt beschreven door de volgende eendimensionale partiële differentiaalvergelijkingen (deze vergelijkingen zijn afgeleid van de twee eendimensionale partiële differentiaalvergelijkingen die niet-stationaire stroming in een openwaterloop beschrijven):

cont.verg.:

$$B \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q'}{\partial x}$$

bew. verg.:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha Q v)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{g|Q|Q}{ARC^2} = 0$$

Het toepassingsgebied van PLONS

Het programma PLONS is toepasbaar voor een relatief smalle korte strook, d.w.z. een strook met een waterspiegelbreedte van maximaal 10 meter. Bovendien moet de afstand tussen de openingen tussen de 10 en 75 meter liggen. PLONS berekent de waterstanden in de natte strook, de snelheden in langsrichting, de snelheden waarmee de natte strook vol en leeg loopt en het volume water dat tussen natte strook en kanaal uitgewisseld wordt. Het percentage volume water wat uitgewisseld wordt, wordt bepaald door het in de natte strook stromende volume per tijdstap te sommeren en dit volume te delen door het volume water dat aanwezig is in de natte strook.

Schaalfactor

Vanwege de eis aan de minimale hart op hart afstand van 10 m. tussen de openingen, om een berekening met PLONS te kunnen maken, moet er voor het model (welke maar een h.o.h afstand van 6 m. heeft) een schaal factor worden toegepast. Alle afmetingen van het model zijn met deze schaal factor vermenigvuldigd.

Onder de schaal (of schaal factor) van een fysische grootheid wordt verstaan de waarde in het prototype gedeeld door de waarde in het model. Er geldt voor grootheid x dat de schaal is:

$$n_x = \frac{x_p}{x_m}$$

Voor meetkundige gelijkvormigheid tussen model en prototype moet het Froude getal bij stroming met een vrije waterspiegel ook gelijk zijn, dus

$$n_{Fr} = 1$$

De Froude voorwaarde geeft na uitwerking :

$$n_u = \sqrt{n_h}$$

De schaalfactor voor de snelheid (u) is de wortel uit die van diepte (h). De diepte schaal (lengte schaal, n_L) gedeeld door de snelheidsschaal geeft weer de tijdschaal zodat na uitwerken ook geldt:

$$n_t = \sqrt{n_h}$$

Als voor de lengte schaal bijvoorbeeld $n_L = 4$ wordt gekozen, dan volgt voor de snelheidsschaal en tijdschaal dat deze beide gelijk zijn aan 2.

De lengteafmetingen van het model moeten dus allemaal met een factor 4 worden vermenigvuldigd. De tijd- en snelheidsfactoren allemaal met 2.

PLONS runs

Vervolgens worden berekeningen met PLONS uitgevoerd aan de hand van de uit paragraaf 4.3.1 te variëren parameters. Echter kan met PLONS de frequentie van de scheepvaart niet gevarieerd worden. Ook is er voor de bodemruwheidscoëfficiënt aangenomen dat de bodem glad is. De vegetatie wordt zo dus ook niet meegenomen in PLONS. Hier volgen enkele uitvoer prints van PLONS:

ResPlons.W11

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening	:	0.20 [m]
breedte opening	:	0.40 [m]
hoogte onderkant opening	:	1.00 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte	:	0.00 [m]
taludhelling oever (1:m)	:	3.00 [-]
bodemligging	:	0.00 [m + NAP]
Manning coefficient	:	0.01 [s/m ^(1/3)]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook	:	60.00 [m]
hart op hart afstand openingen	:	12.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0	:	1.20 [m + NAP]
grootte spiegeldaling kanaal	:	0.20 [m]
duur van de spiegeldaling op kanaal	:	60.00 [s]
vaarsnelheid schip	:	1.33 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook	:	129.60 [m ³]
Procentuele volume vaarweg naar natte strook:	:	11.72 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u_{in}) Stroomsnelheid talud (u_{talud})

	[m/s]	[m/s]
1	0.69	0.42
2	0.69	0.42
3	0.69	0.42
4	0.69	0.42
5	0.69	0.42

Stroomsnelheden aan de bodem

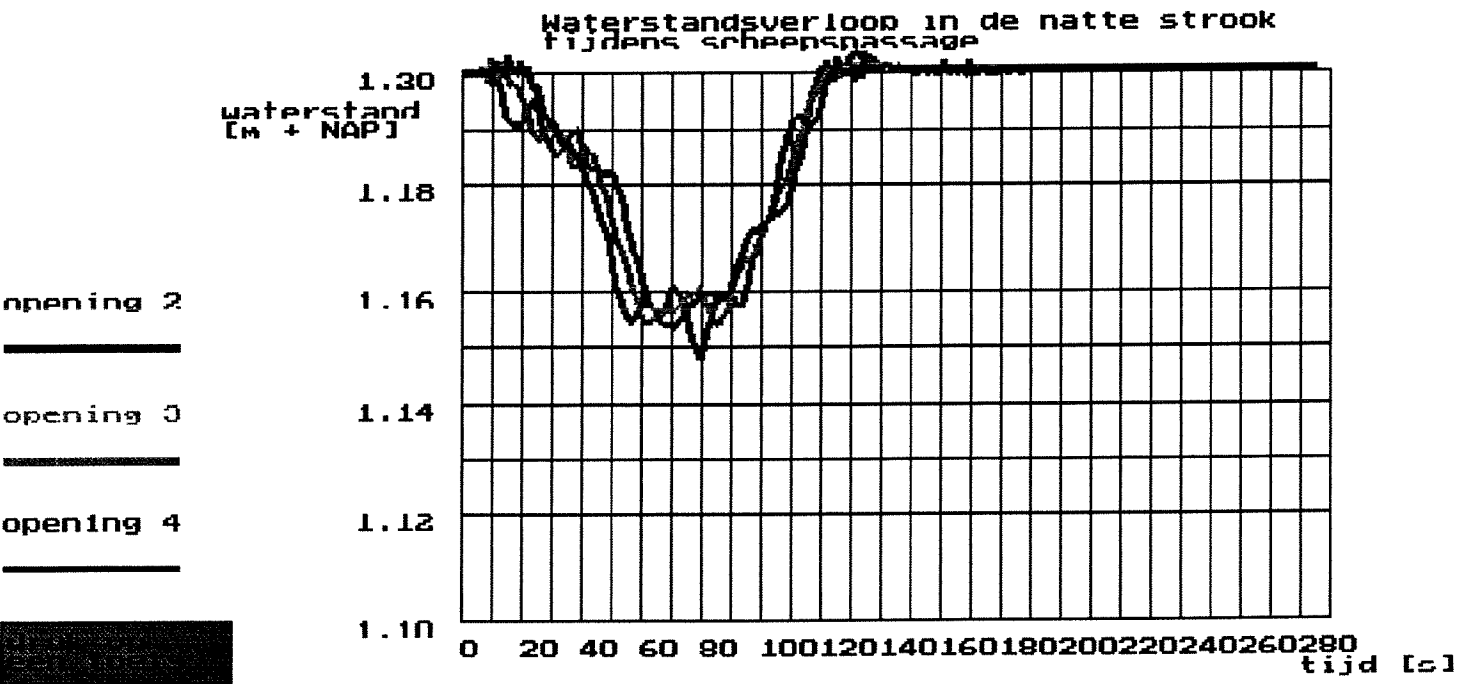
Openingnr u_{bo}[0.00] u_{bo}[0.00]

	[m/s]	[m/s]
1	0.17	0.17
2	0.17	0.17
3	0.17	0.17
4	0.17	0.17
5	0.17	0.17

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.09 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 285 [s]

FTIF:HPI DNS.W11
Vooreeuw: Damwand met openingen



ResPlons.W12

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening	:	0.40 [m]
breedte opening	:	0.40 [m]
hoogte onderkant opening	:	0.80 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte	:	0.00 [m]
taludhelling oever (1:m)	:	3.00 [-]
bodemligging	:	0.00 [m + NAP]
Manning coefficient	:	0.01 [s/m ^{1/3}]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook	:	60.00 [m]
hart op hart afstand openingen	:	12.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0	:	1.20 [m + NAP]
grootte spiegeldaling kanaal	:	0.20 [m]
duur van de spiegeldaling op kanaal	:	60.00 [s]
vaarsnelheid schip	:	1.33 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook	:	129.60 [m ³]
Procentuele volume vaarweg naar natte strook:		42.75 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u_in) Stroomsnelheid talud (u_talud)

	[m/s]	[m/s]
1	0.98	0.92
2	1.03	0.96
3	1.04	0.97
4	0.98	0.92
5	0.98	0.92

Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr u_bo[0.00] u_bo[0.00]

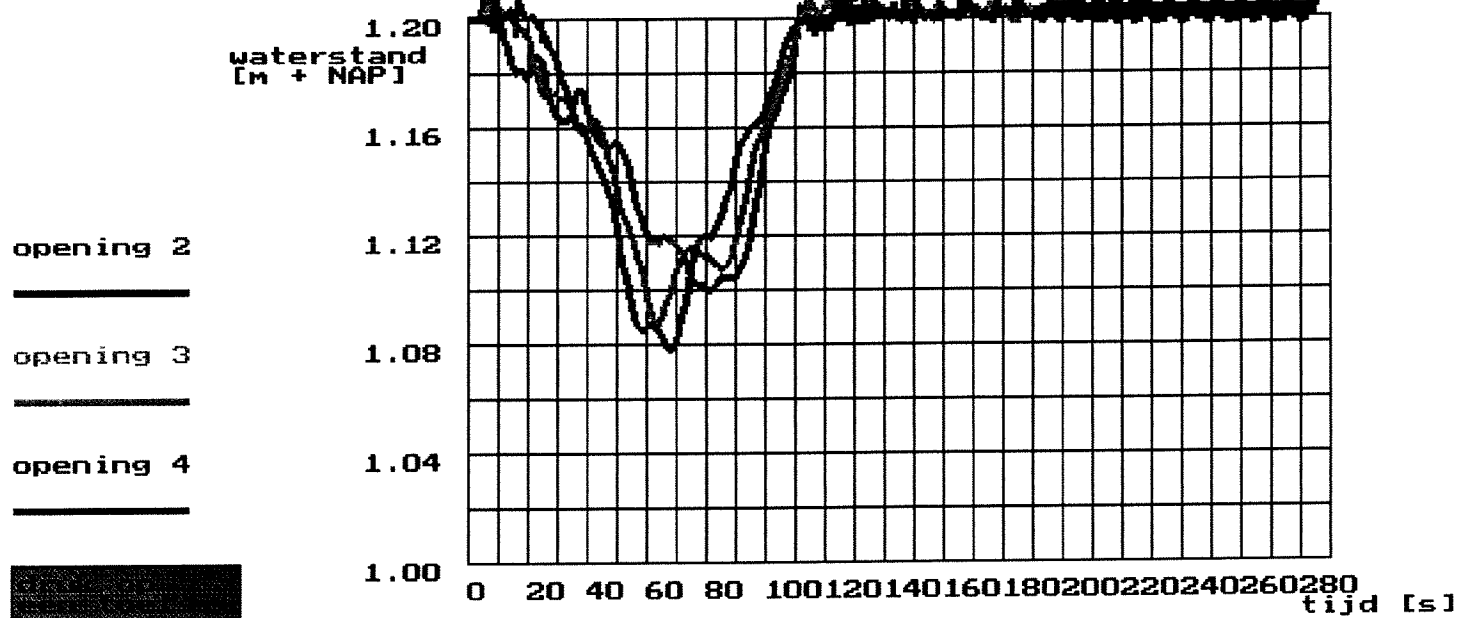
	[m/s]	[m/s]
1	0.25	0.25
2	0.26	0.26
3	0.26	0.26
4	0.25	0.25
5	0.25	0.25

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.31 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 285 [s]

FILE:HPLONS.W12
Vooreever: Damwand met openingen

Waterstandsverloop in de natte strook
tijdens scheepspassage



ResPlons.W13

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening	:	0.40 [m]
breedte opening	:	0.40 [m]
hoogte onderkant opening	:	0.80 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte	:	0.00 [m]
taludhelling oever (1:m)	:	3.00 [-]
bodemligging	:	0.00 [m + NAP]
Manning coefficient	:	0.01 [s/m ^(1/3)]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook	:	60.00 [m]
hart op hart afstand openingen	:	12.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0	:	1.20 [m + NAP]
grootte spiegeldaling kanaal	:	0.40 [m]
duur van de spiegeldaling op kanaal	:	60.00 [s]
vaarsnelheid schip	:	1.33 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook	:	129.60 [m ³]
Procentuele volume vaarweg naar natte strook:	:	45.68 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u_in) Stroomsnelheid talud (u_talud)

	[m/s]	[m/s]
1	0.98	0.92
2	1.04	0.97
3	1.04	0.97
4	1.01	0.95
5	0.98	0.92

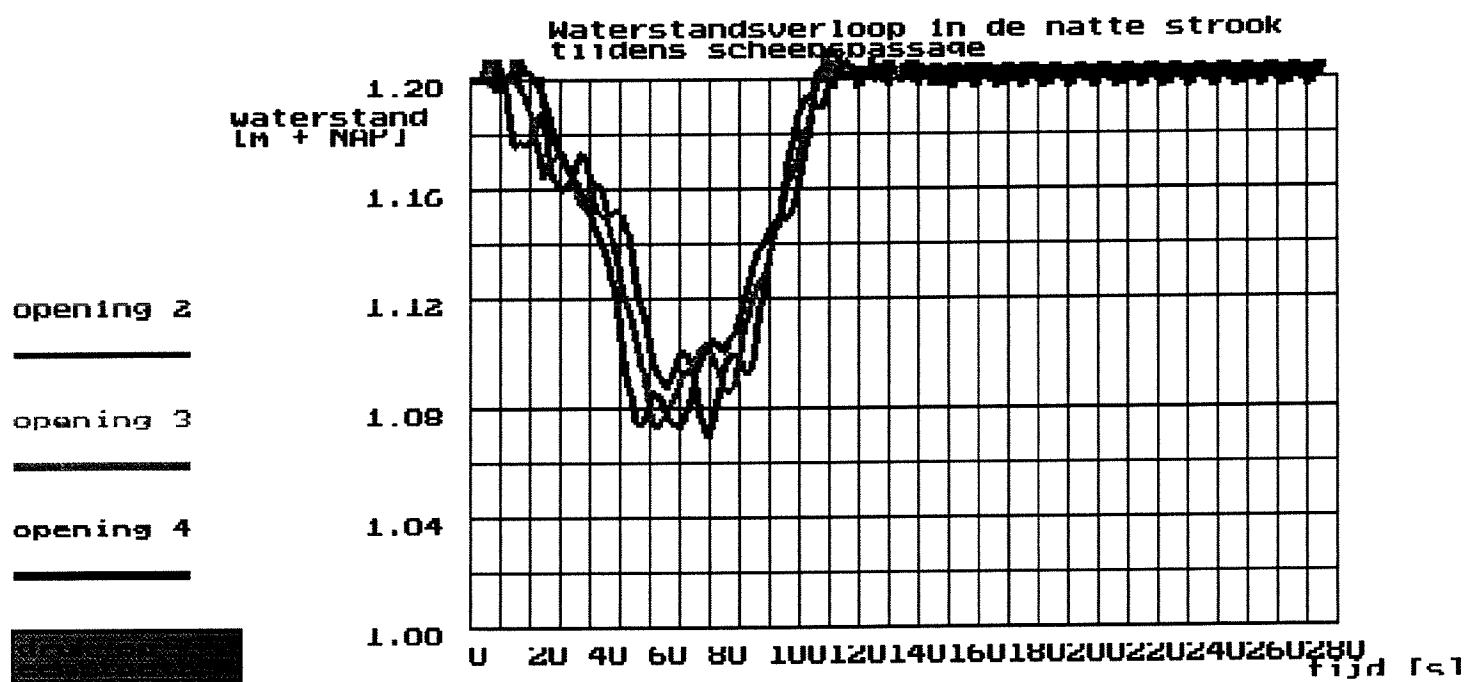
Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr u_bo[0.00] u_bo[0.00]

	[m/s]	[m/s]
1	0.25	0.25
2	0.26	0.26
3	0.26	0.26
4	0.25	0.25
5	0.25	0.25

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting:	0.28 [m/s]
De totale passagetijd (rekentijd)	: 285 [s]

FILE:HPLUNS.W13
Onderwerp: Damwand met openingen



ResPlons.W14

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening	:	0.20 [m]
breedte opening	:	0.40 [m]
hoogte onderkant opening	:	0.00 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte	:	0.00 [m]
taludhelling oever (1:m)	:	3.00 [-]
bodemligging	:	0.00 [m + NAP]
Manning coefficient	:	0.01 [s/m ^(1/3)]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook	:	60.00 [m]
hart op hart afstand openingen	:	12.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0	:	1.20 [m + NAP]
grootte spiegeldaling kanaal	:	0.20 [m]
duur van de spiegeldaling op kanaal	:	60.00 [s]
vaarsnelheid schip	:	1.33 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook	:	129.60 [m ³]
Procentuele volume vaarweg naar natte strook:	:	13.98 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u_{in}) Stroomsnelheid talud (u_{talud})

	[m/s]	[m/s]
1	0.74	0.74
2	0.73	0.73
3	0.70	0.70
4	0.63	0.63
5	0.57	0.57

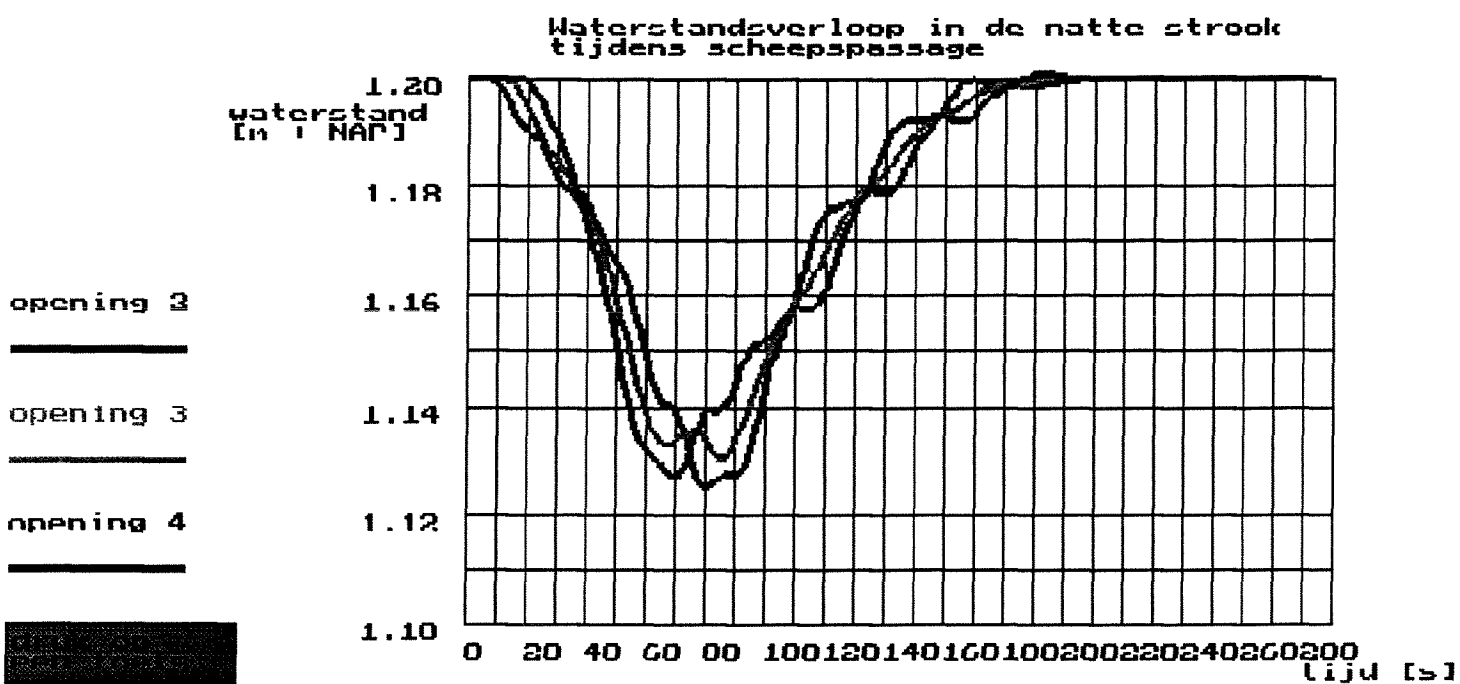
Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr u_{bo}[0.00] u_{bo}[0.00]

	[m/s]	[m/s]
1	0.74	0.74
2	0.73	0.73
3	0.70	0.70
4	0.63	0.63
5	0.57	0.57

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting:	0.13 [m/s]
De totale passagetijd (rekentijd)	: 285 [s]

FILE:HPLONS.W14
 Voorruever: Danward met openingen



ResPlons.W15

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening	:	0.40 [m]
breedte opening	:	0.40 [m]
hoogte onderkant opening	:	0.00 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte	:	0.00 [m]
taludhelling oever (1:m)	:	3.00 [-]
bodemligging	:	0.00 [m + NAP]
Manning coefficient	:	0.01 [s/m ^(1/3)]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook	:	60.00 [m]
hart op hart afstand openingen	:	12.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0	:	1.20 [m + NAP]
grootte spiegeldaling kanaal	:	0.20 [m]
duur van de spiegeldaling op kanaal	:	60.00 [s]
vaarsnelheid schip	:	1.33 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook	:	129.60 [m ³]
Procentuele volume vaarweg naar natte strook:	:	24.95 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u_{in}) Stroomsnelheid talud (u_{talud})

	[m/s]	[m/s]
1	0.91	0.91
2	0.89	0.89
3	0.85	0.85
4	0.67	0.67
5	0.56	0.56

Stroomsnelheden aan de bodem

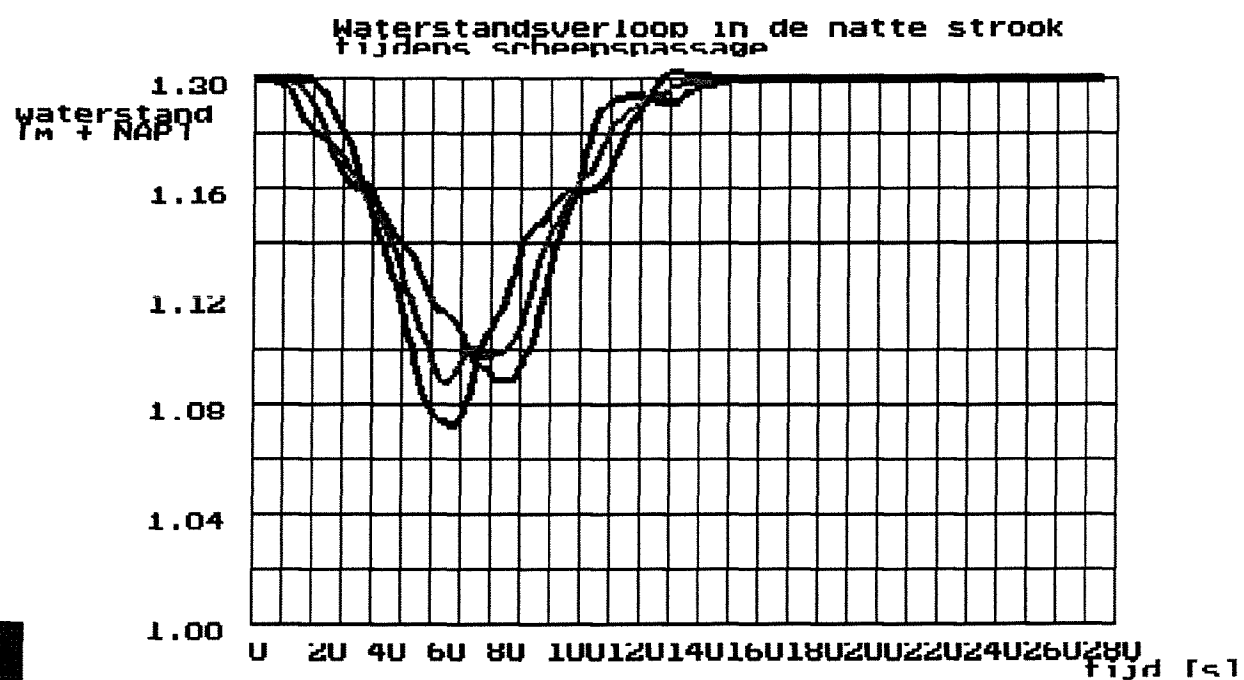
Openingnr u_{bo}[0.00] u_{bo}[0.00]

	[m/s]	[m/s]
1	0.91	0.91
2	0.89	0.89
3	0.85	0.85
4	0.67	0.67
5	0.56	0.56

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.29 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 285 [s]

FTI F:HPI DNS.W15
 Ooroever: Damwand met openingen



ResPlons.W16

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening	:	0.40 [m]
breedte opening	:	0.40 [m]
hoogte onderkant opening	:	0.00 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte	:	0.00 [m]
taludhelling oever (1:m)	:	3.00 [-]
bodemligging	:	0.00 [m + NAP]
Manning coefficient	:	0.01 [s/m ^{1/3}]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook	:	60.00 [m]
hart op hart afstand openingen	:	12.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0	:	1.20 [m + NAP]
grootte spiegeldaling kanaal	:	0.40 [m]
duur van de spiegeldaling op kanaal	:	60.00 [s]
vaarsnelheid schip	:	1.33 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook	:	129.60 [m ³]
Procentuele volume vaarweg naar natte strook:	:	37.94 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u_in) Stroomsnelheid talud (u_talud)

	[m/s]	[m/s]
1	1.18	1.18
2	1.16	1.16
3	1.12	1.12
4	0.93	0.93
5	0.80	0.80

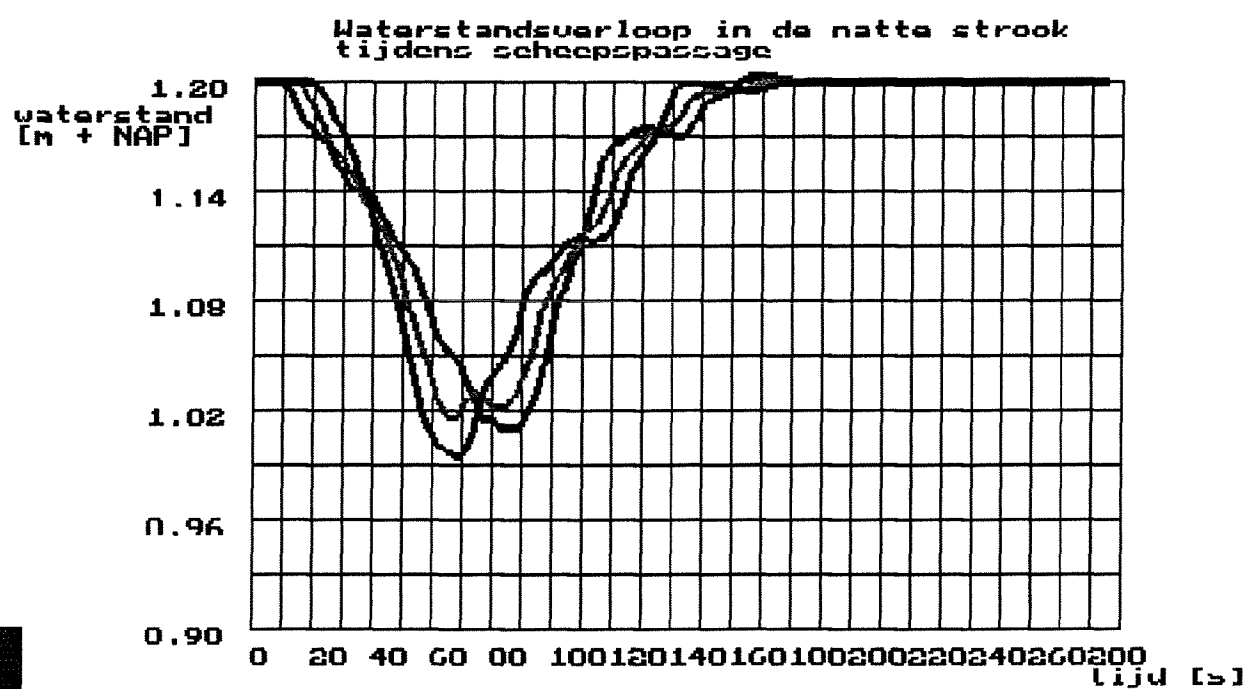
Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr u_bo[0.00] u_bo[0.00]

	[m/s]	[m/s]
1	1.18	1.18
2	1.16	1.16
3	1.12	1.12
4	0.93	0.93
5	0.80	0.80

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting:	0.47 [m/s]
De totale passagetijd (rekentijd)	: 285 [s]

FILE:HPLONS.W16
Voeroever: Danwand met openingen



Bijlage H5.1 Middeling meetresultaten

Het middelen had als doel ruis uit de meetgegevens uit te middelen. Er is gemeten met een meetfrequentie van 4Hz en gefilterd met 2Hz. Elk meetinstrument is gekoppeld aan een kanaal waar de meetgegevens binnen komen en als referentie punt in de tijd is daar een signaal aan toegevoegd. OP ieder tijdstip dat de eerste pomp aanslaat en er een volumeuitwisseling begint, is er een signaal.

De hydraulische experimenten zijn als volgt gemiddeld. Met behulp van een Fortran programma worden de meetdata files ingelezen. Het programma leest die waarden in vanaf het pompsignaal tot een zelf opgegeven tijdstip (eind van het interval). Er is opgegeven om 10 cycli in te lezen van 60 seconden (240 meetwaarden). Het programma middelt dan voor alle instrumenten de resultaten tijdens een volume uitwisseling over 10 cycli en schrijft het resultaat weg naar een nieuwe file.

Hier volgt het programma:

```
$debug
c12234*
      program cycmid1
c
c Dit programma berekend het gemiddelde profiel van een cyli
c voor alle meetkanalen
c uitgangspunt is het refentiesignaal.
c
c JohnCornelisse 10/11/97 tbv van Jules de Vries
c
c Verondersteld wordt dat de data begint met pomp uit en water in rust!!!

c declaraties
      real      d1(13),d2(500,13)
      integer   nblok,ndata
      integer   i,j,k,m
      character*80 naamin,naamuit
      character*1  dum

c invoer via scherm
      write(*,'(a)') ' Geef de naam van de invoerfile'
      read (*,'(a)') naamin
      write(*,'(a)') ' Geef de naam van de uitvoerfile'
      read (*,'(a)') naamuit
      write(*,'(a)') ' Geef het aantal blokken en punten per blok'
      read (*,*)   nblok, ndata

c invoer via file
c      lezen tekstblok in naamin
      open (1,file=naamin)
10  read (1,'(a1)') dum
      if (dum.ne.'*') goto 10
```

```
c      lezen data
      do 200 k=1,nblok,1
100    read (1,*) (d1(m),m=1,13,1)
      if (d1(12).gt.2.5) goto 100
      do 50 i=1,ndata,1
        read(1,*) (d1(m),m=1,13,1)
        do 20 j=1,13,1
          d2(i,j)=d2(i,j)+d1(j)/real(nblok)
20      continue
50      continue
200     continue

c uitvoer naar de file
      open (2,file=naamuit)
      do 1000 i=1,ndata
        write (2,'(13f10.3)') (d2(i,j),j=1,13,1)
1000    continue

c einde
      end
```

De slibexperimenten zijn niet gemiddeld. Wel is het bovenstaande programma herschreven om alleen waarden in te lezen. Zo wordt bij elk pomp signaal weer een tijdsinterval uit de meetdata file ingelezen en de grootte van het interval was zelf aan te geven. Er zijn intervallen van 2.5 seconden (10 meet punten) uit de dataset gehaald, bij ieder pompsignaal. In een spreadsheet worden deze 10 waarden per pompsignaal gemiddeld.

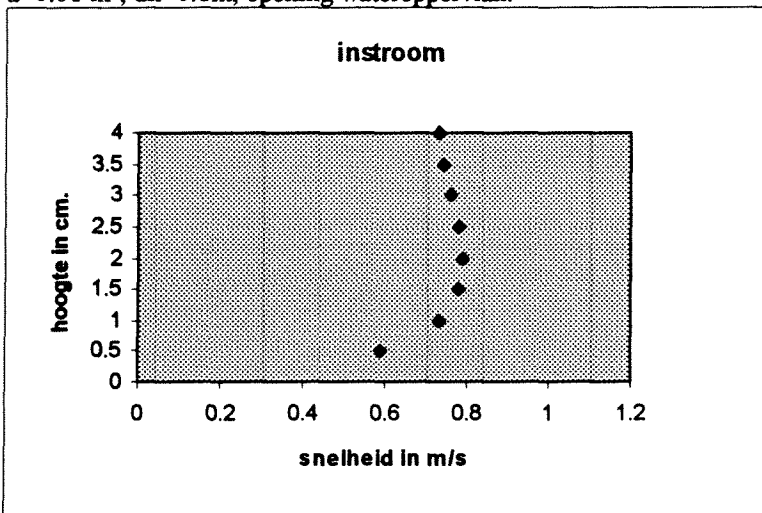
Het concentratie verloop is zo globaal over een meetdag bekend. Het verloop van de concentratie tijdens een cyclus wordt zo niet meegenomen. Er is aangenomen dat de concentraties direct voor en na een cyclus aan elkaar gelijk zijn en dat de netto toegestroomde hoeveelheid slib naar de natte strook gelijk is aan de afname van de concentratie (van de OSLIM's in de opening) tussen twee cycli.

Bijlage H5.2 Snelheids metingen

Snelheidsprofielen in de opening.

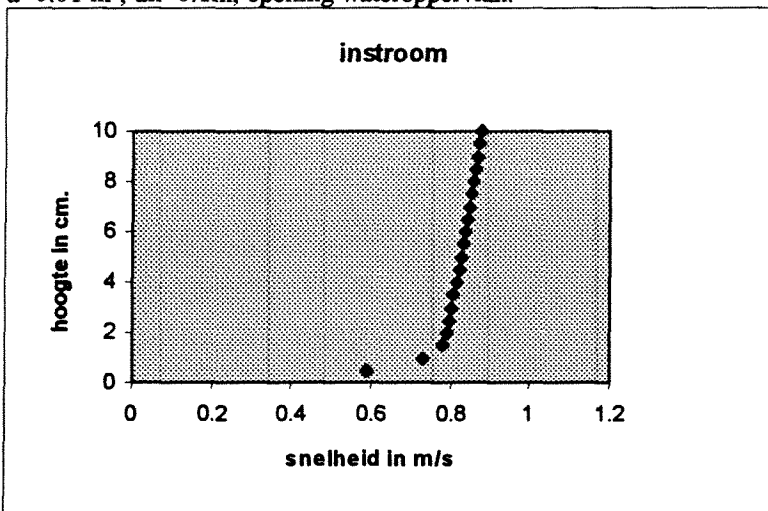
In hoofdstuk 5.2.2 staat beschreven hoe de snelheden in de opening gemeten zijn, om de snelheidsprofielen te bepalen. Uit de metingen zijn de maximale waarden afgelezen en die zijn uitgezet tegen de hoogte in een grafiek. Voor de hoogtes waar geen metingen konden worden verricht is lineair geëxtrapoleerd. Ook voor hoogtes die een afname van de snelheid laten zien (opening waterspiegel), is lineair geëxtrapoleerd vanaf de laatste snelheidstoename. Dit is gedaan omdat de snelheid bij een vrije waterspiegel niet kan afnemen in een richting naar de waterspiegel toe.

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1\text{m}$, opening wateroppervlak.



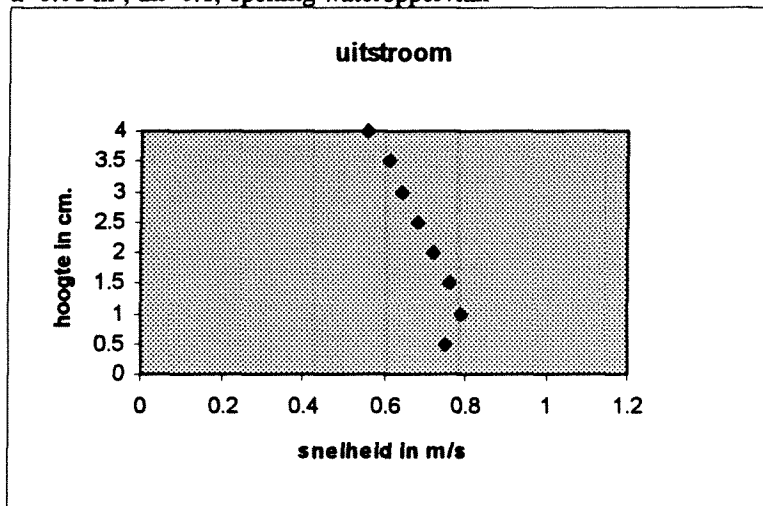
figuur 1a;meting

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1\text{m}$, opening wateroppervlak.



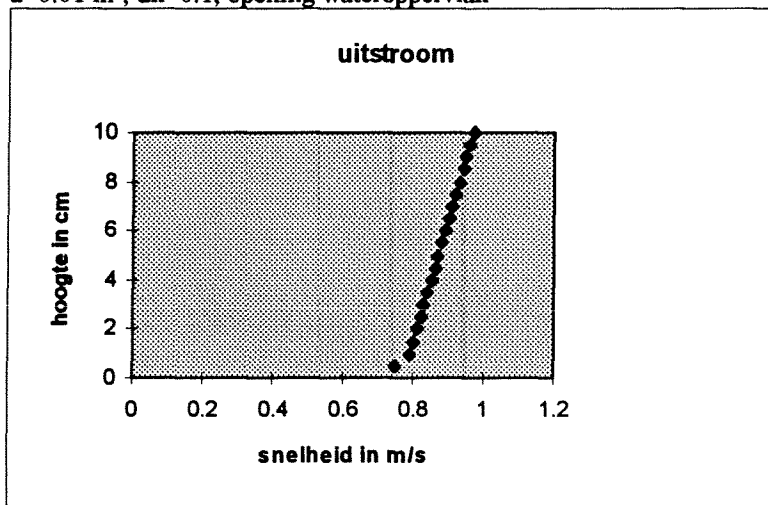
figuur 1b;extrapolatie

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1$, opening wateroppervlak



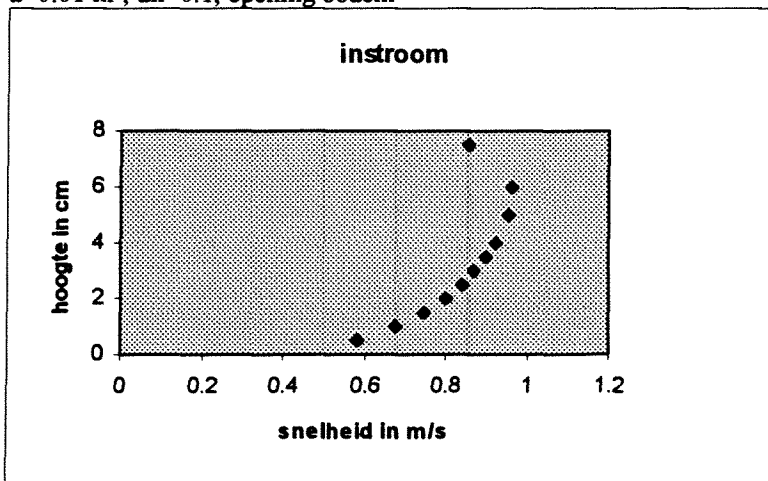
figuur 1c;meting

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1$, opening wateroppervlak



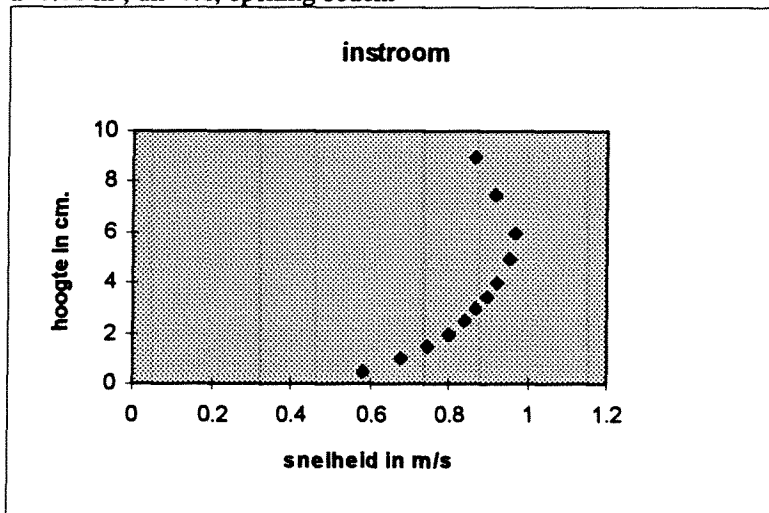
figuur 1d;extrapolatie

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1$, opening bodem



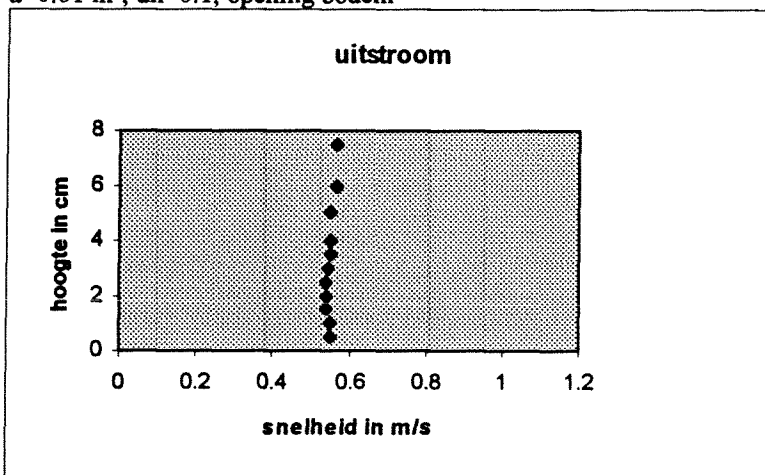
figuur 2a;meting

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1$, opening bodem



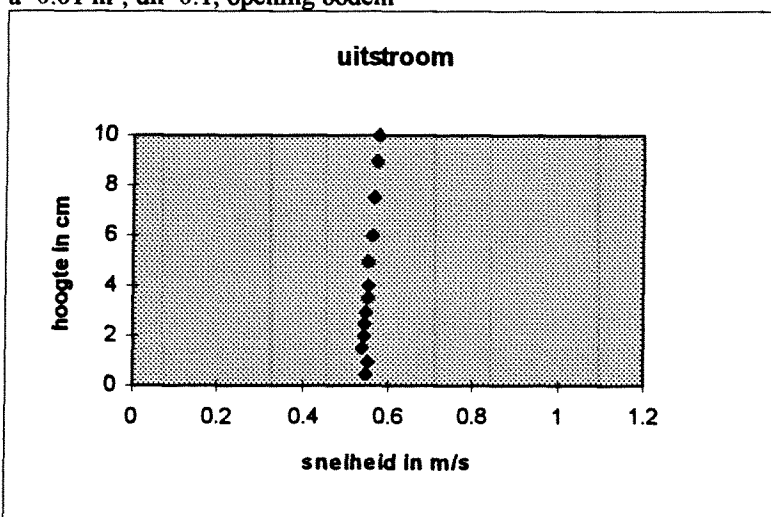
figuur 2b;extrapolatie

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1$, opening bodem



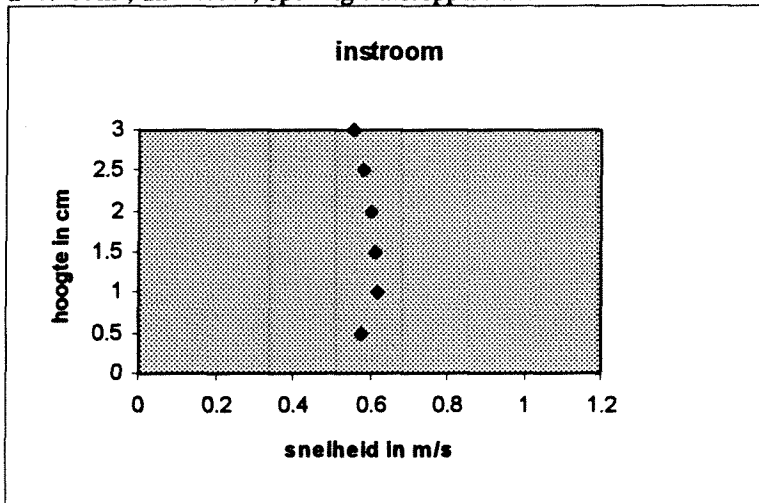
figuur 2c;meting

$a=0.01 \text{ m}^2$, $dh=0.1$, opening bodem



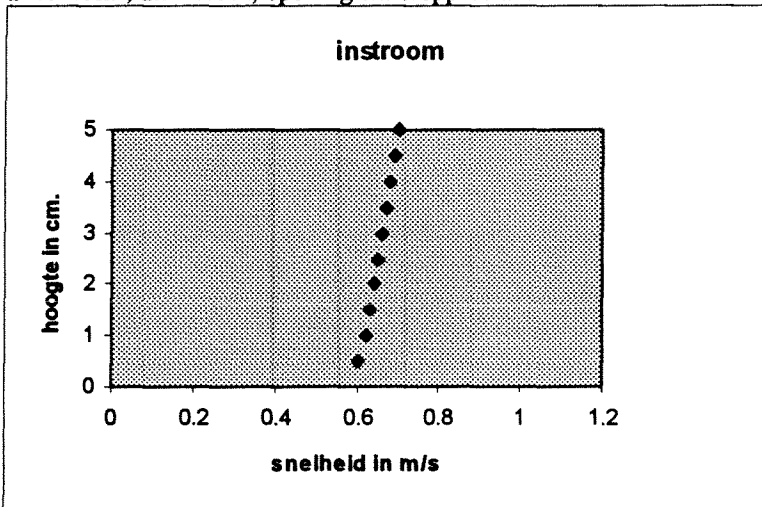
figuur 2d;extrapolatie

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05\text{m}$, opening wateroppervlak.



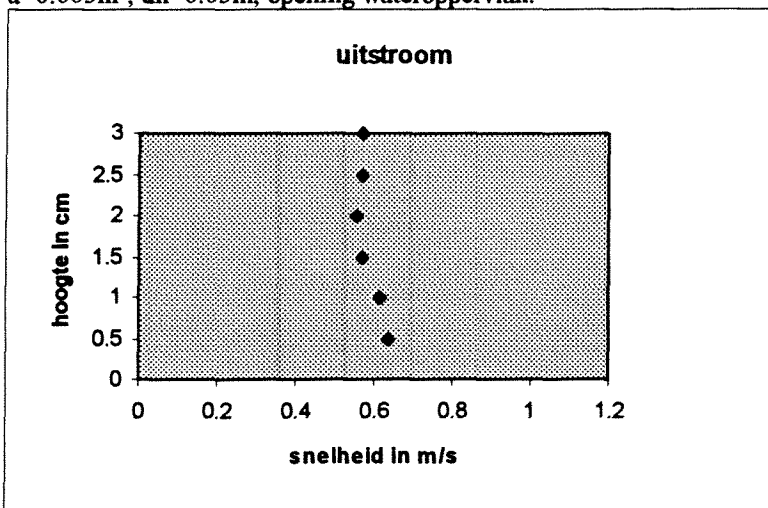
figuur 3a; meting

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05\text{m}$, opening wateroppervlak.



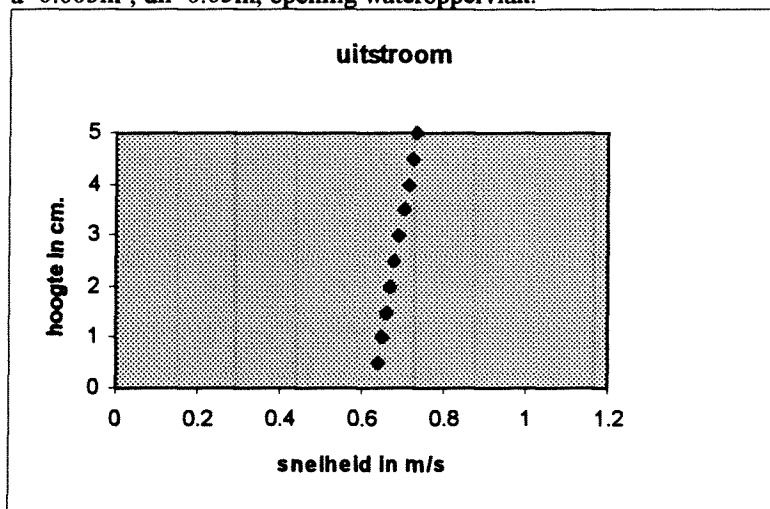
figuur 3b; extrapolatie

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05\text{m}$, opening wateroppervlak.



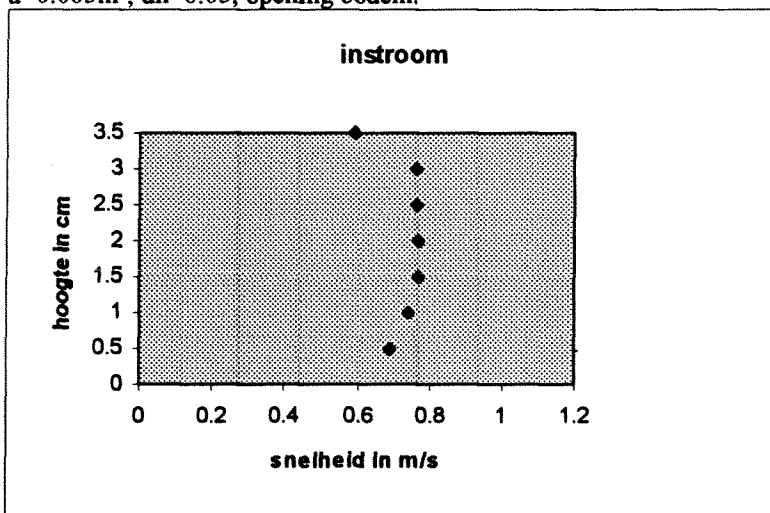
figuur 3c; meting

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05\text{m}$, opening wateroppervlak.



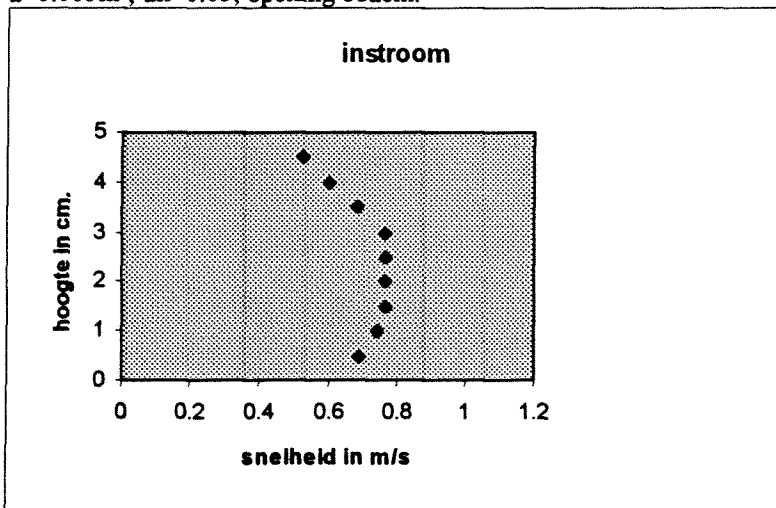
figuur 3d; extrapolatie

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05$, opening bodem.



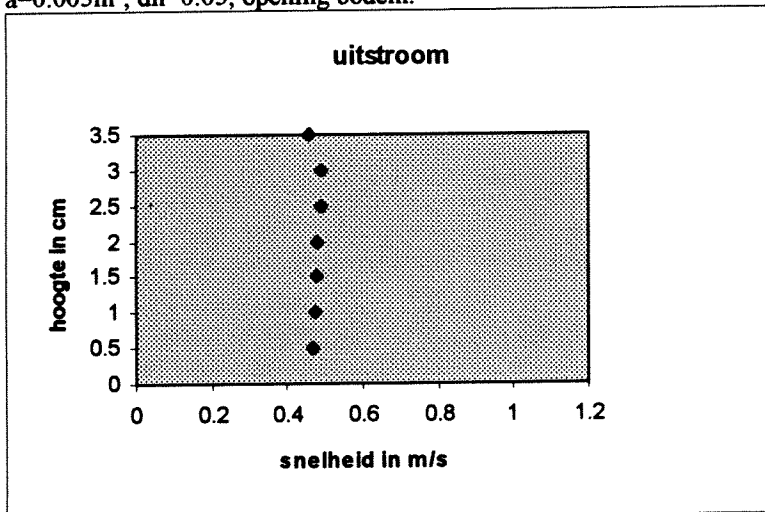
figuur 4a; meting

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05$, opening bodem.



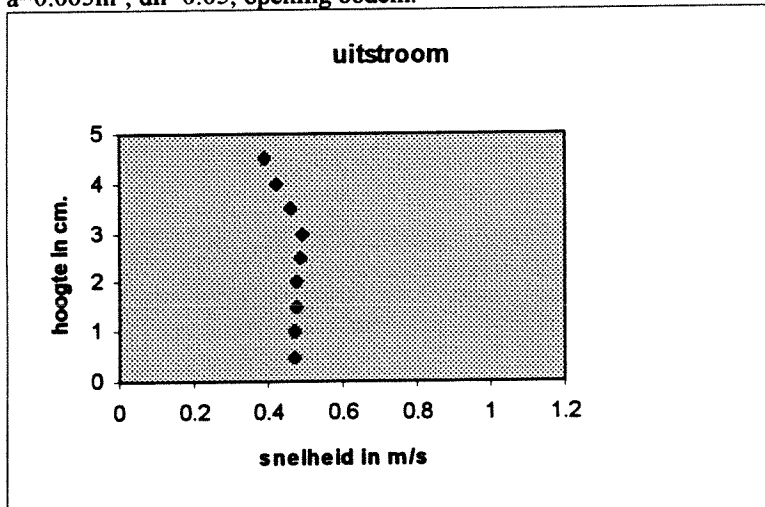
figuur 4b; extrapolatie

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05$, opening bodem.



figuur 4c; meting

$a=0.005\text{m}^2$, $dh=0.05$, opening bodem.

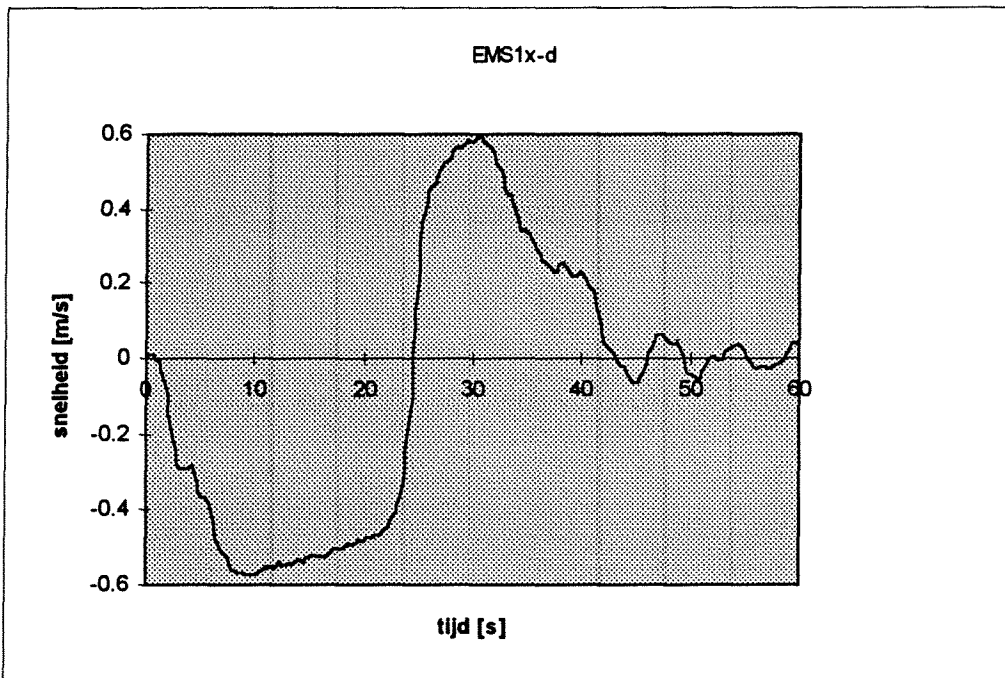


figuur 4d; extrapolatie

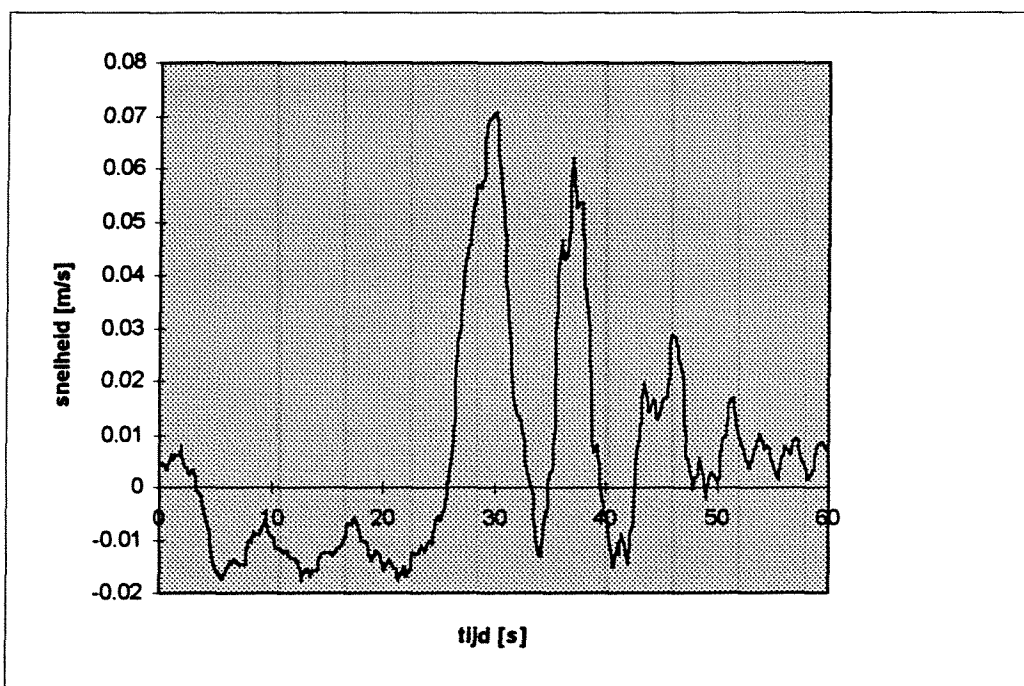
Snelheidsmetingen in de opening en in de natte strook.

In de onderstaande figuren staan de resultaten van de EMS meters in de opening (de normaal snelheid in de opening) en de langssnelheid in de natte strook.

Experiment 1;

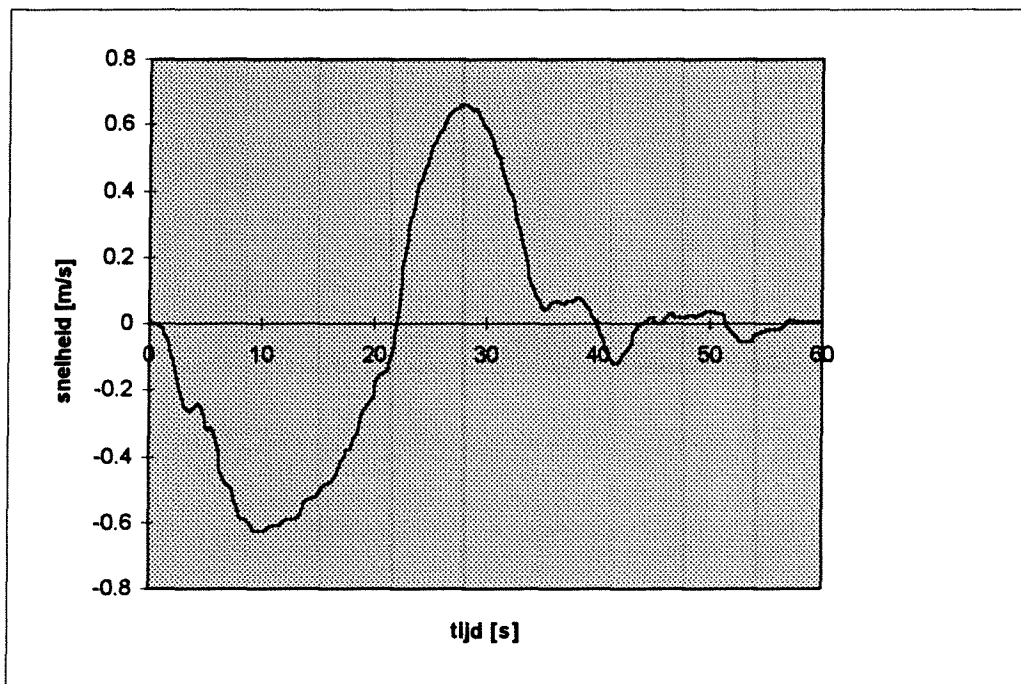


figuur; normaal snelheid in de opening

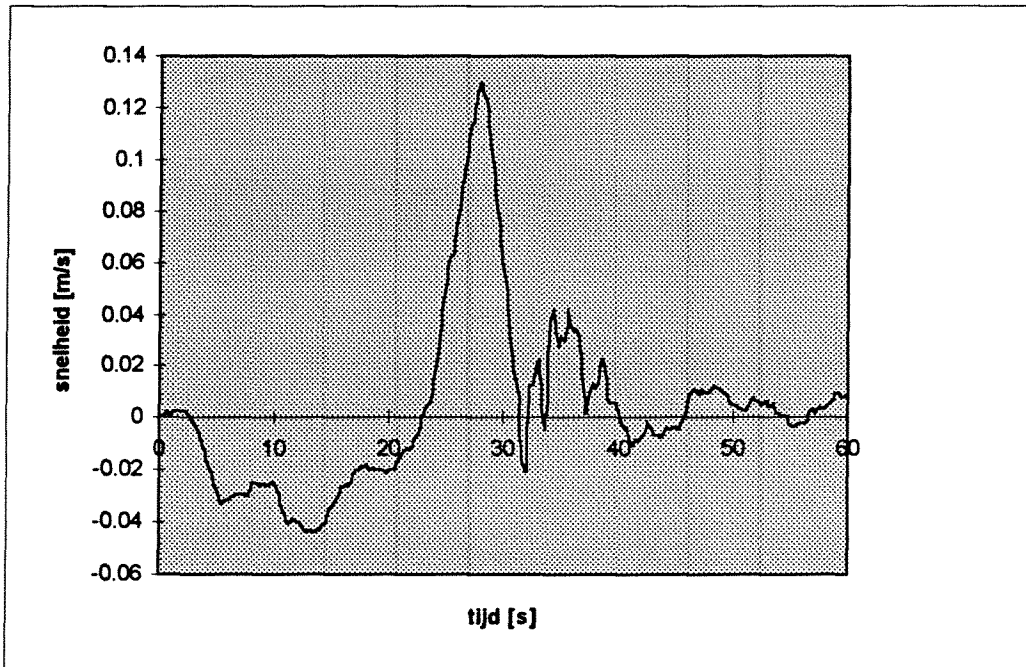


figuur; langssnelheid in de natte strook.

Experiment 2;

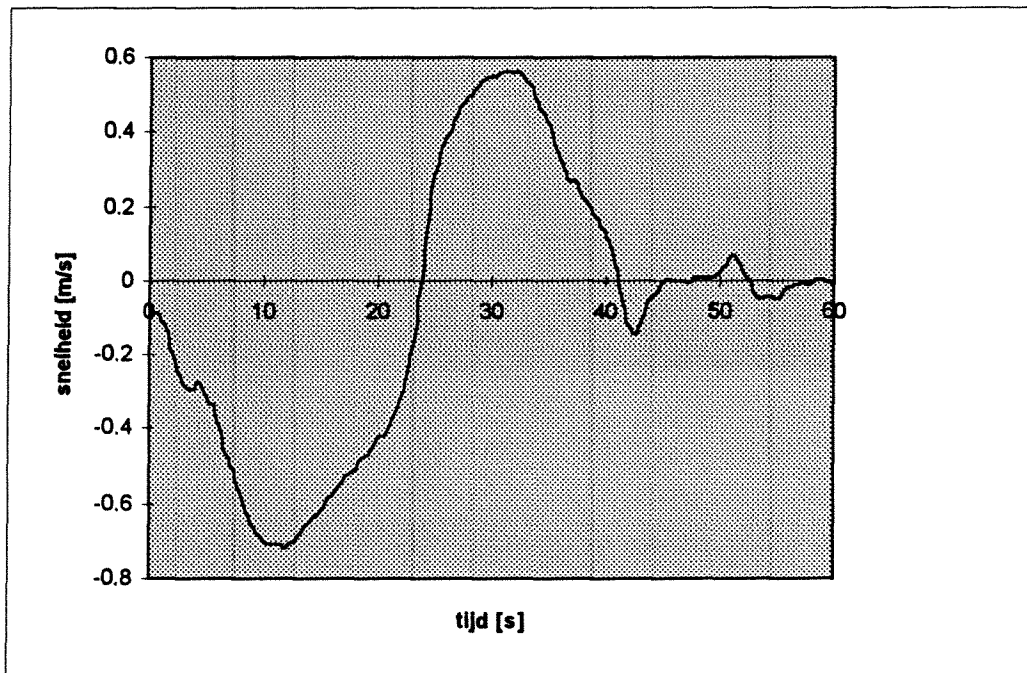


figuur; normaal snelheid in de opening

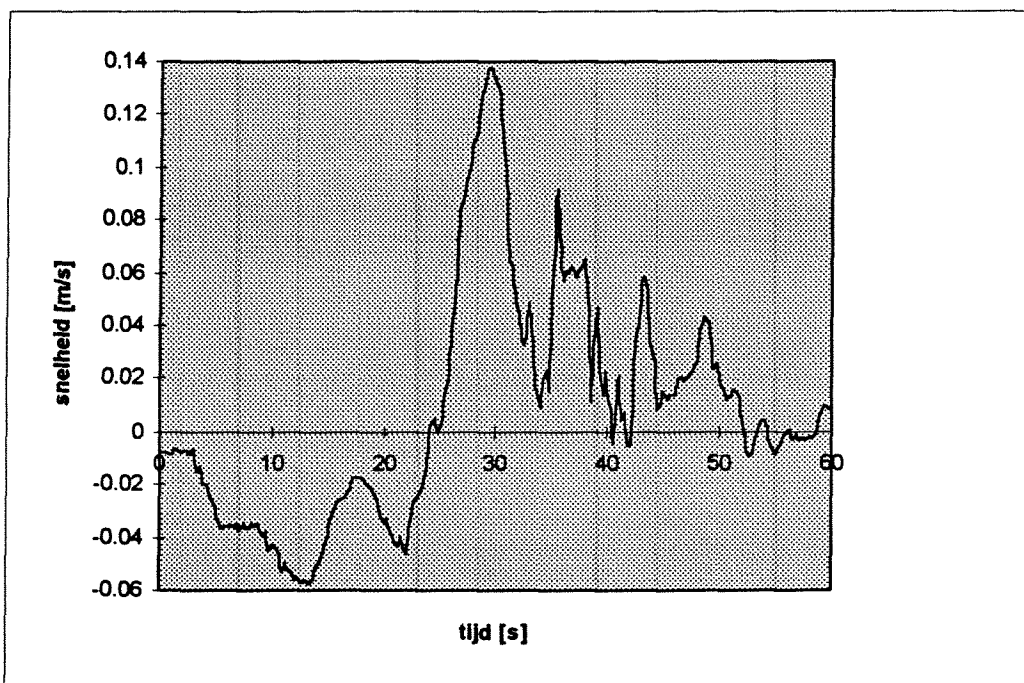


figuur; langssnelheid in de natte strook.

Experiment 3:

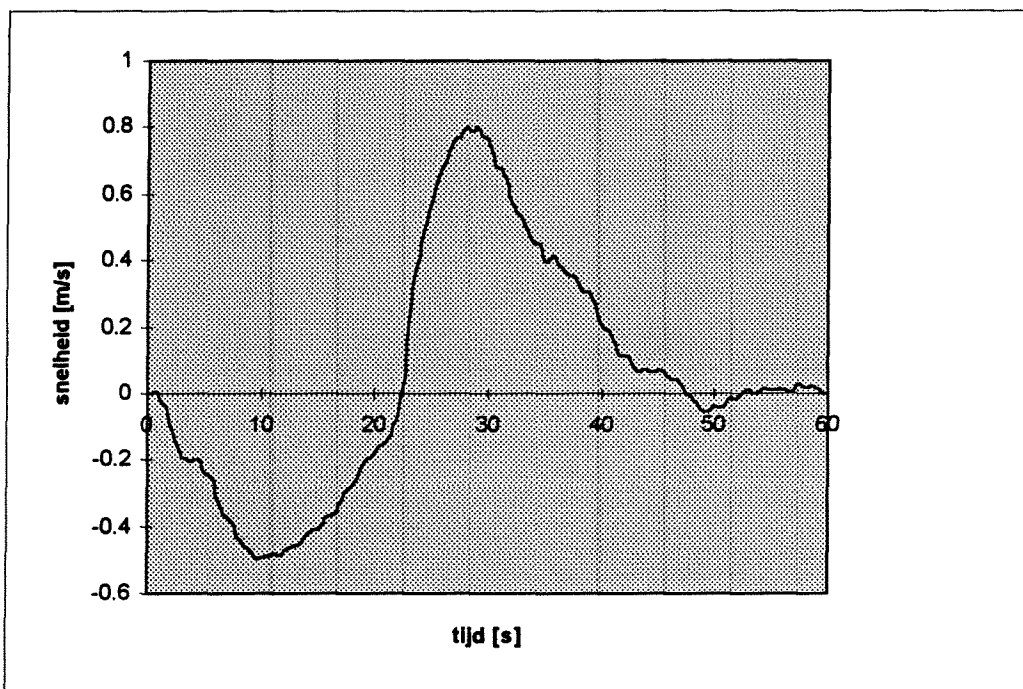


figuur; normaal snelheid in de opening

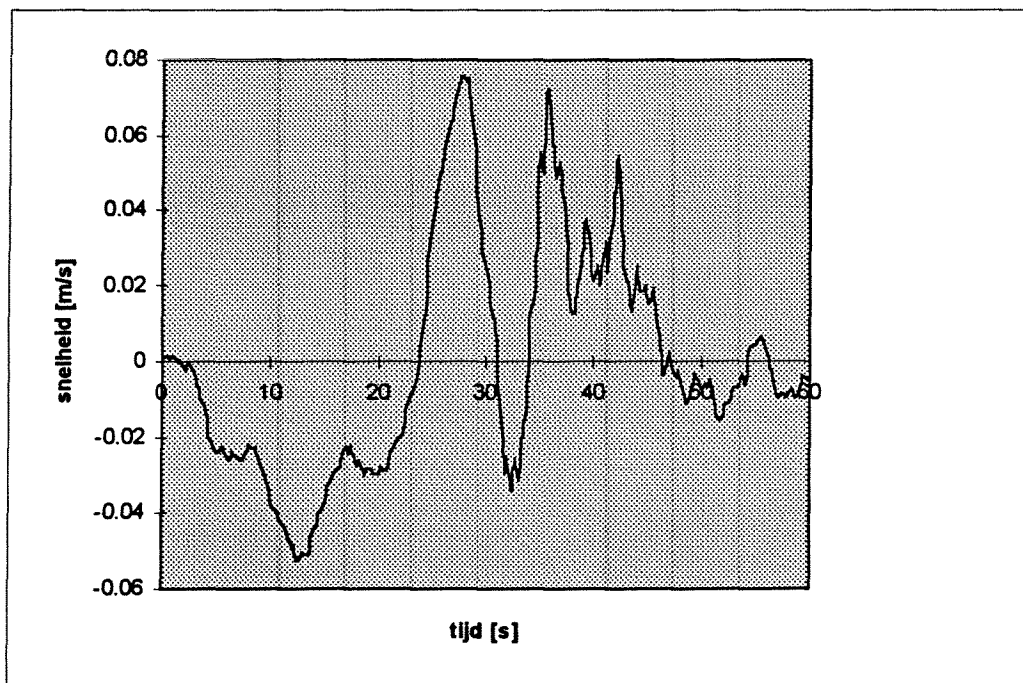


figuur; langssnelheid in de natte strook.

Experiment 4;

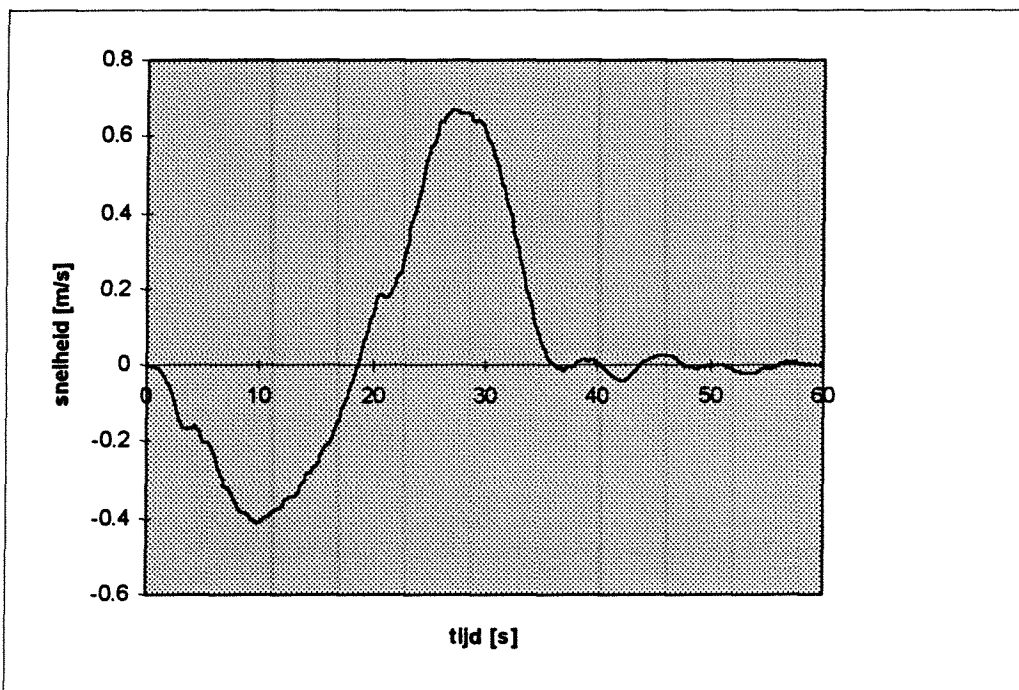


figuur; normaal snelheid in de opening

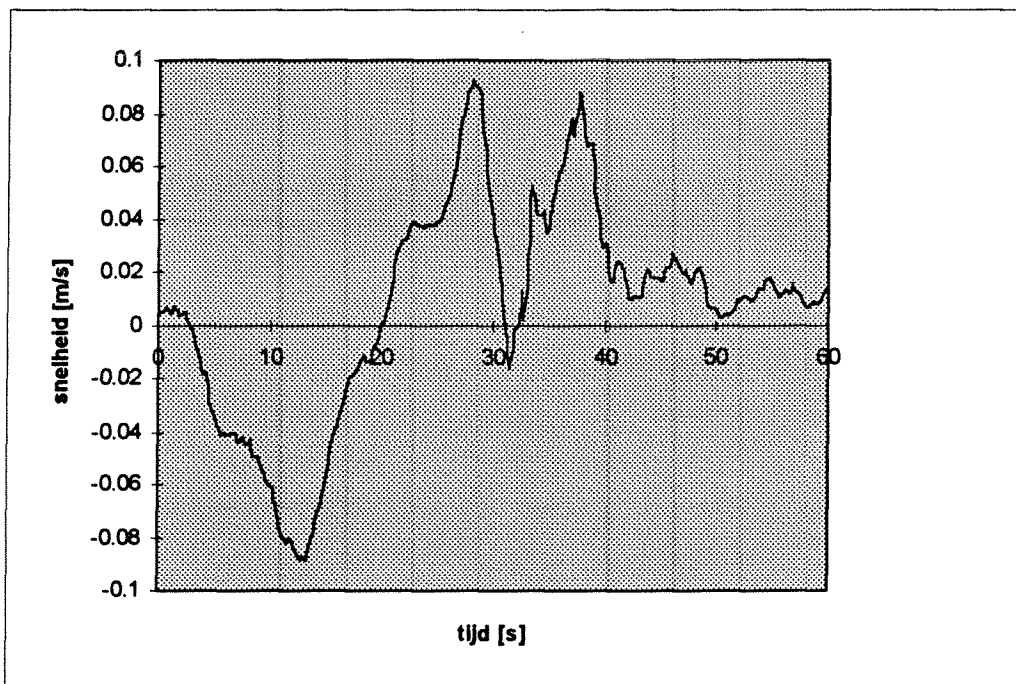


figuur; langssnelheid in de natte strook.

Experiment 5;

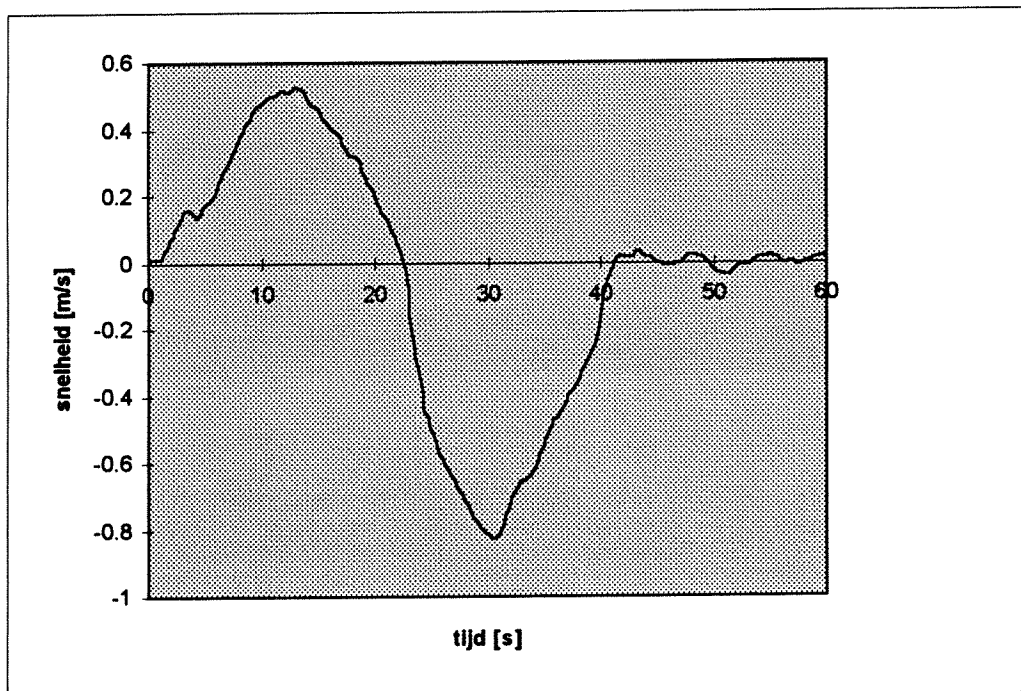


figuur; normaal snelheid in de opening

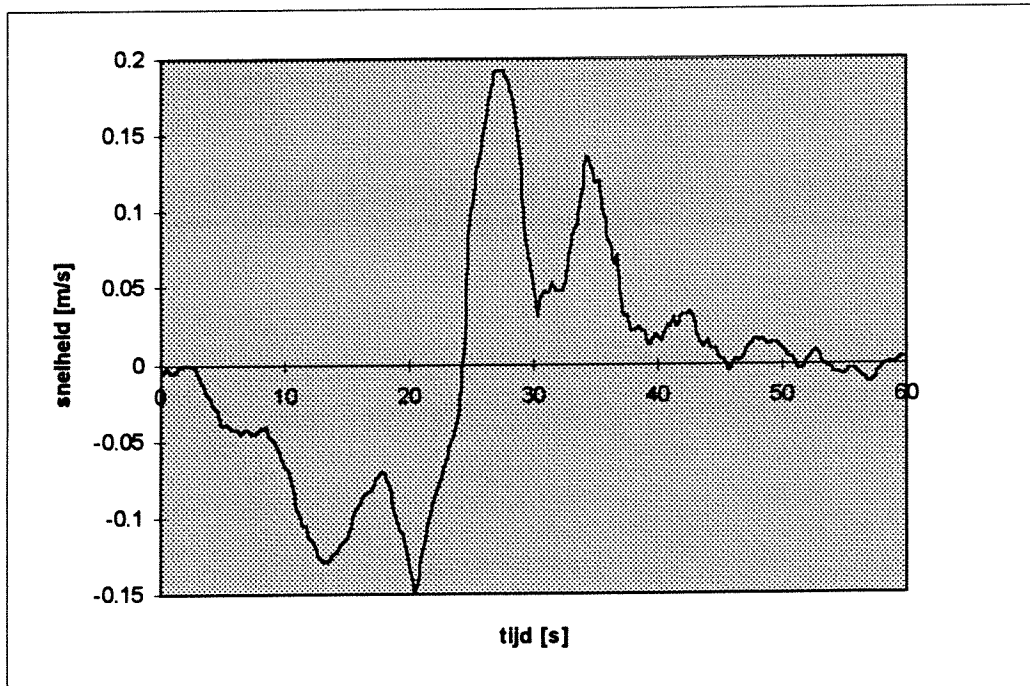


figuur; langssnelheid in de natte strook.

Experiment 6;

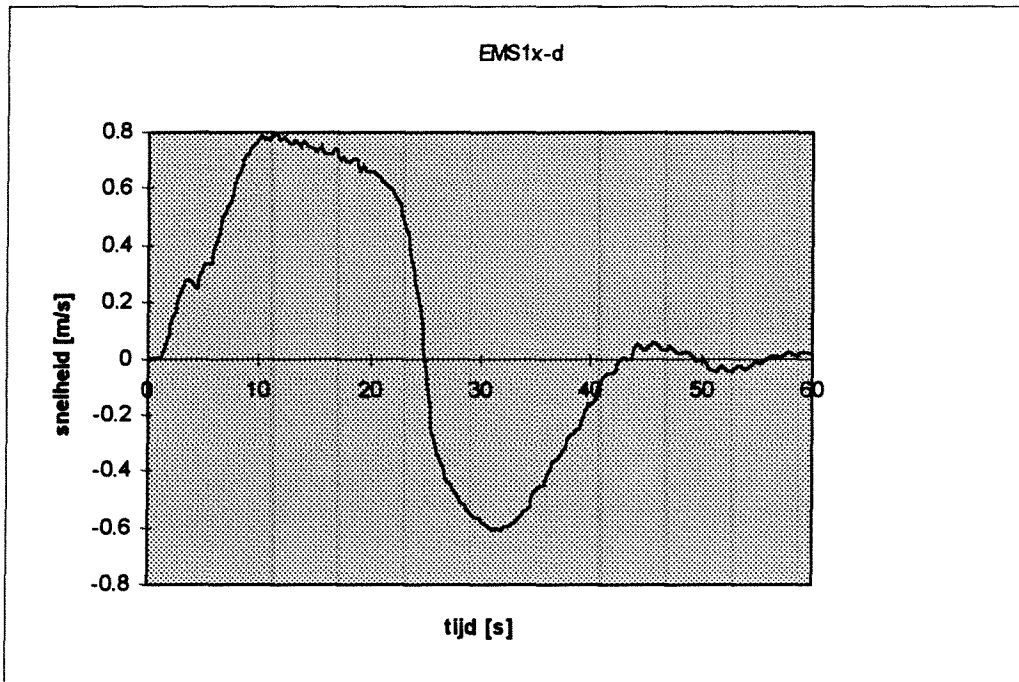


figuur; normaal snelheid in de opening

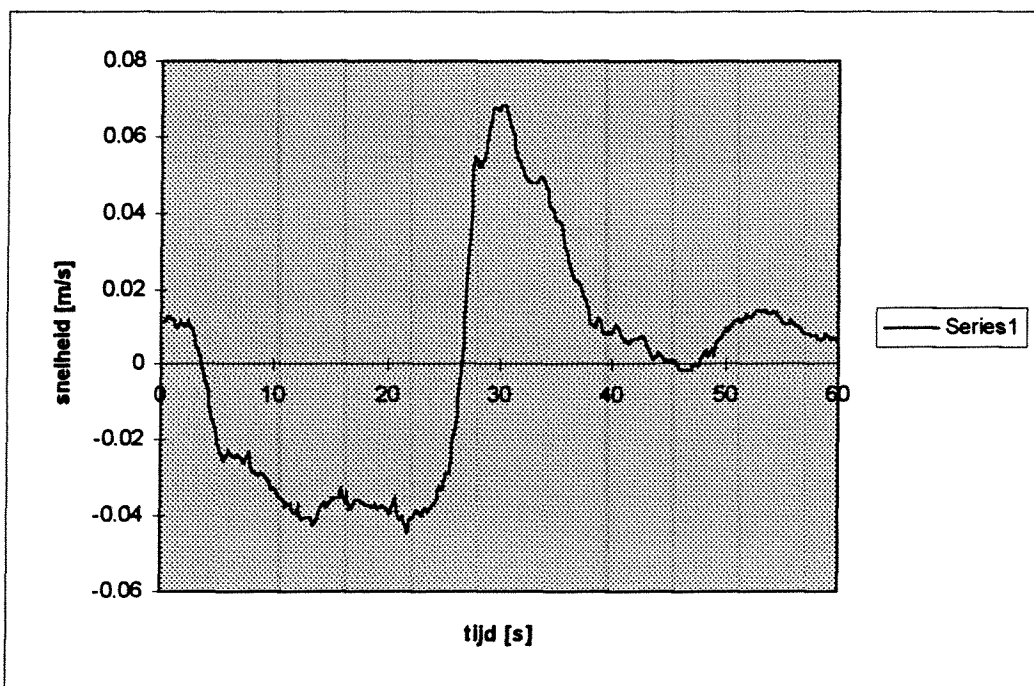


figuur; langssnelheid in de natte strook.

Experiment A;



figuur; normaal snelheid in de opening



figuur; langssnelheid in de natte strook.

Bijlage H5.3

Waterstanden

De metingen met de GHM- en WAVO-meters zijn allemaal ten opzichte van een bepaald referentie niveau. Deze is vrijwillig gekozen en ligt bij een peilnaaldstand van 0.32 m. (0.35 m boven de bodem van het kanaal, een niveau dat de waterspiegel nooit kan bereiken). De maximale waterstand in het kanaal is bij peilnaaldstand 0.3 m. De golfhoogte meters zijn bij die stand ingesteld op 5 volt.

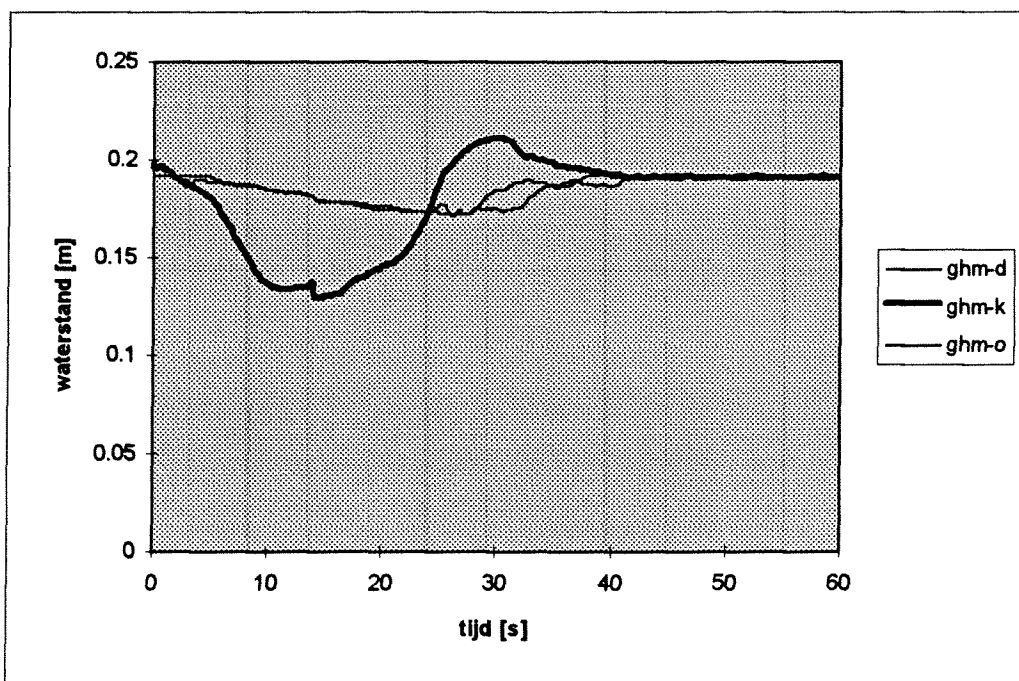
Het kanaal en de oever hebben niet hetzelfde bodemniveau. De bodem van het kanaal ligt 0.13 m lager. Ter plaatse van het bodemniveau van de oever is in het kanaal een rooster aangebracht om het water wat gelijkmatig te laten stijgen bij een peilverandering. Het rooster ligt dus op 0.13 m boven bodem niveau en de bodem van de natte strook ligt op roosterniveau. Bij 0 volt ligt het waterpeil dan $0.35 - 0.07 = 0.28$ m boven de bodem, dus 0.15m boven het rooster. ($0.07 = 0.05 + 0.02$ is het niveau van het wateroppervlak ten opzichte van het referentie niveau, als de golfhoogte meter meet met 1 volt per cm). Een golfhoogte meting kan dus in een waterstand in de oever worden omgezet middels een omrekening: $0.01 * GHM + 0.15$ [m] (bij een instelling van de golfhoogte meter van 1 volt per cm).

Elke dag voor een meting begint wordt de waterstand bepaald ten opzichte van dat niveau en daar worden de instrumenten op ingesteld. Een waterstands verandering is dus een verandering ten opzichte van dat zelfde niveau.

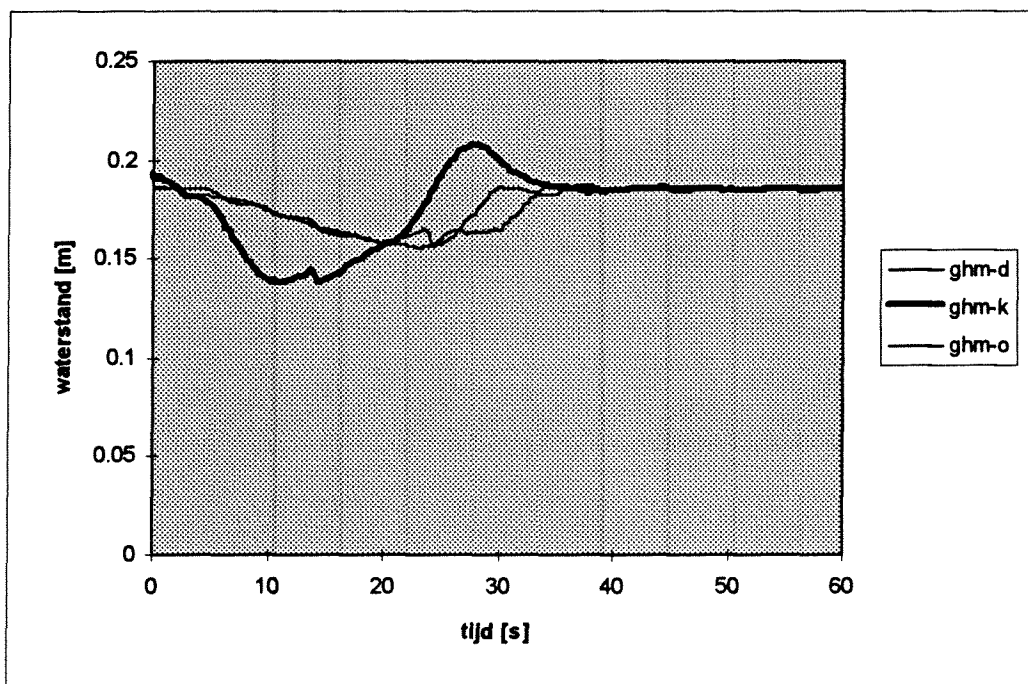
Hier volgen de waterstandsmetingen van de experimenten:

Figuren waterstanden.

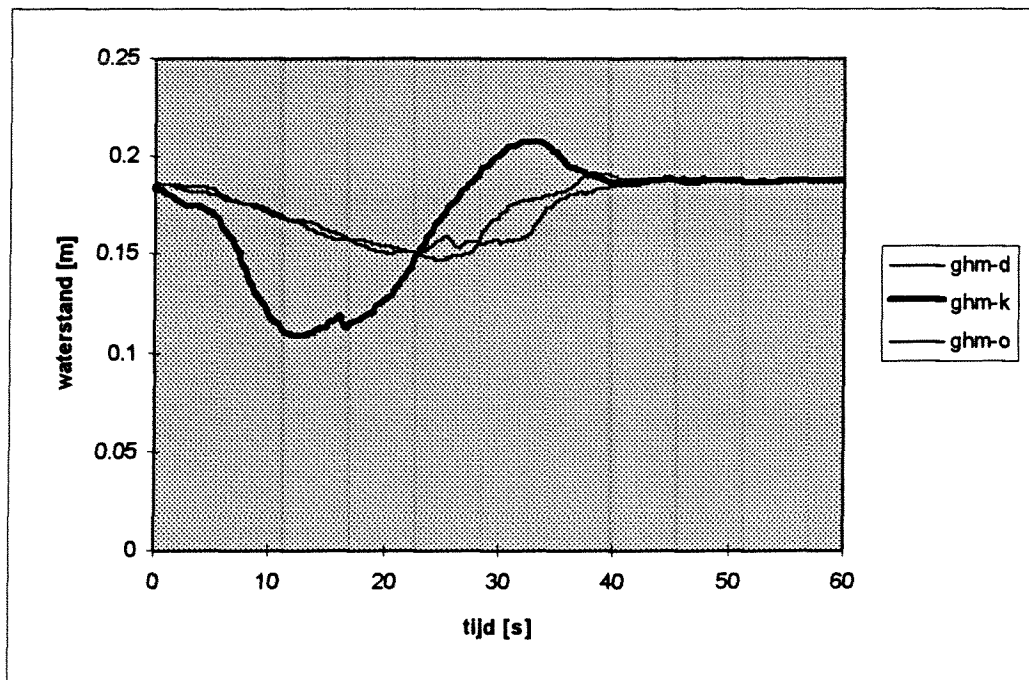
Experiment 1;



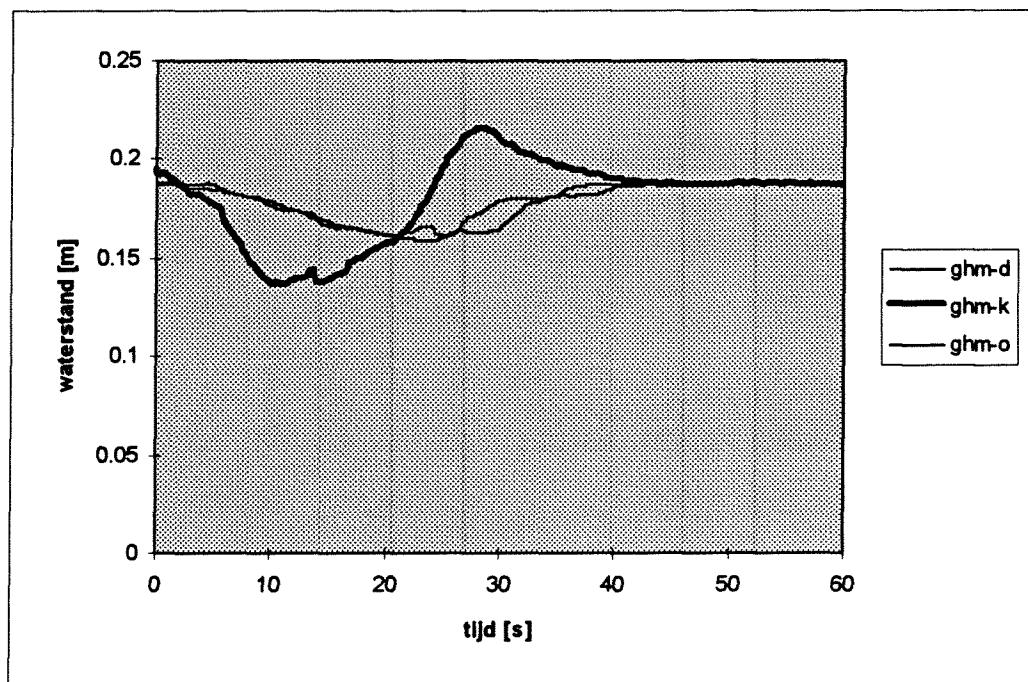
Experiment 2;



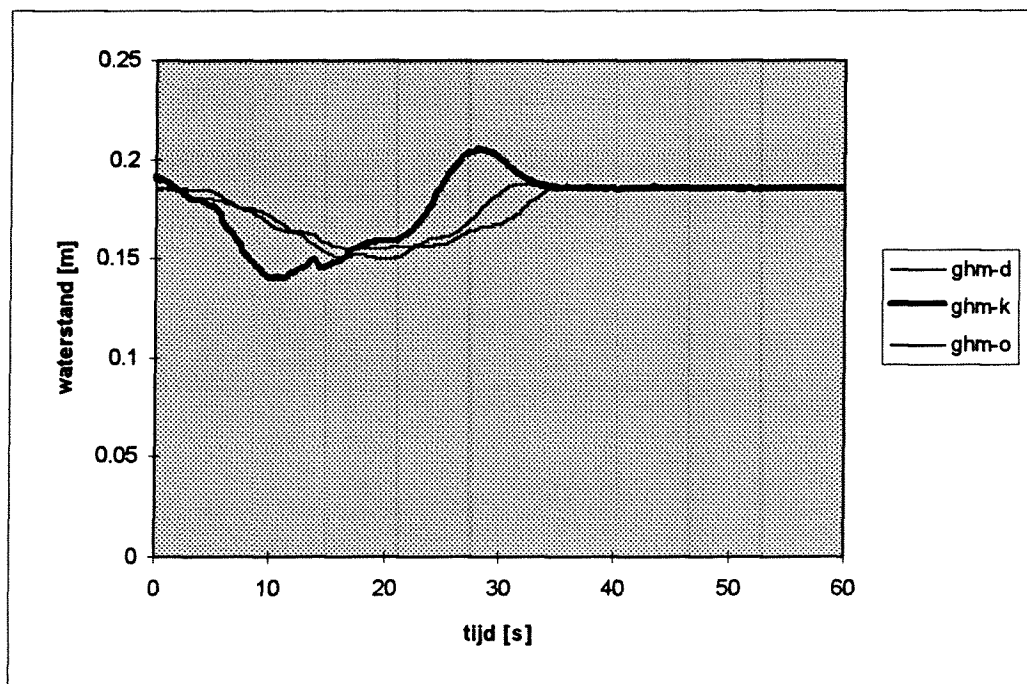
Experiment 3;



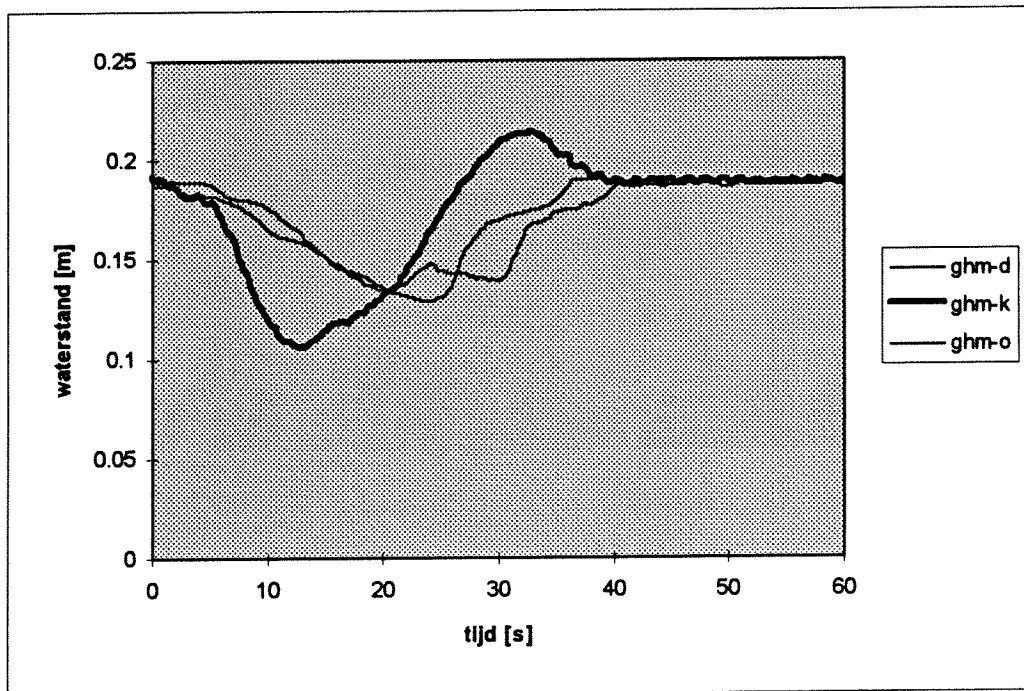
Experiment 4;



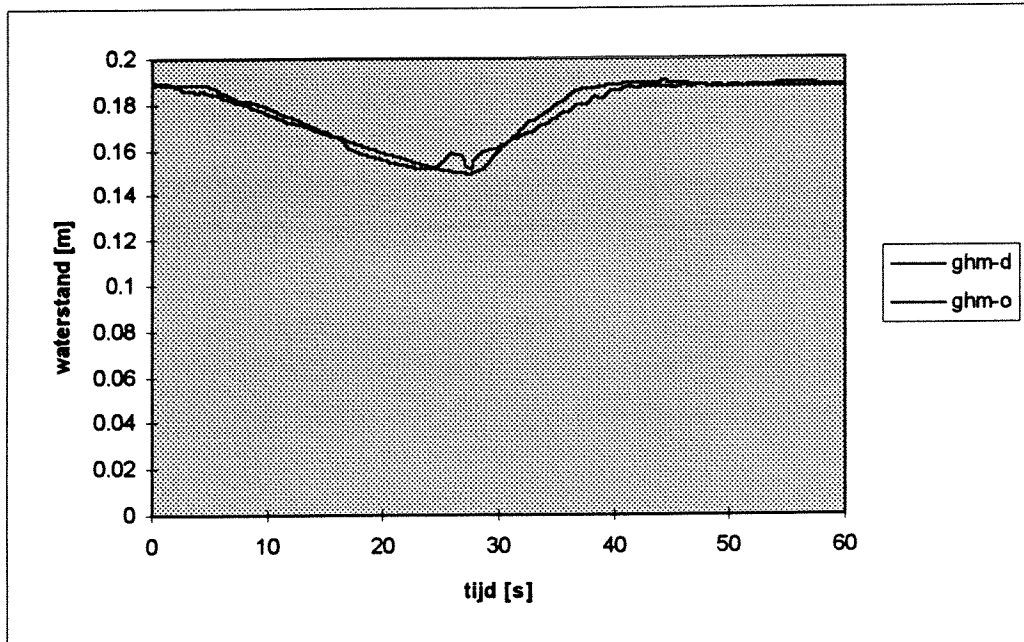
Experiment 5;



Experiment 6;



Experiment A;

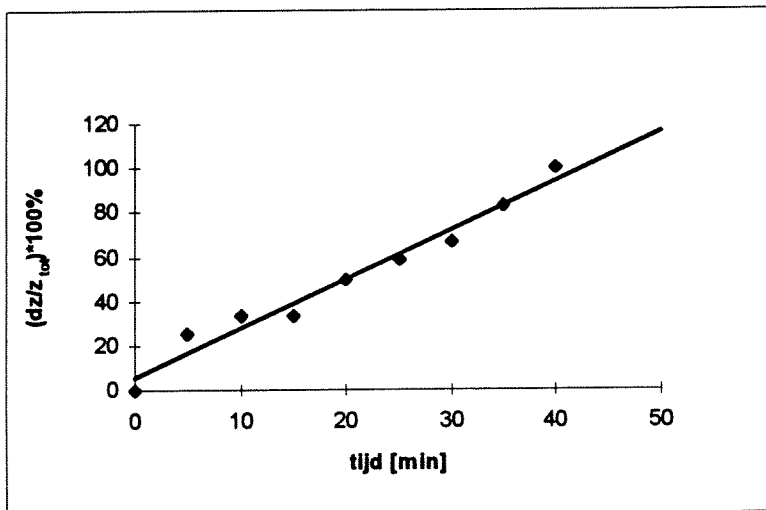


Bijlage H5.4 Bepaling valsnelheid

De valsnelheid is bepaald door in een kolomwater de aanslibbing in de tijd te bepalen. Hierbij is het principe gebruikt van de sedimentatie balans.

In een waterkolom is met een magneet roerder het sediment een tijd geroerd. Na een dag was dit sediment helemaal bezonken en is de totale dikte van de sedimentlaag bepaald. Vervolgens is dit slib weer geroerd en is de dikte van de sediment laag op de bodem als functie van de tijd gemeten. Dit is gedaan door om de 5 minuten met een liniaal de dikte te bepalen.

Per interval van 5 minuten is de verhouding bepaald van de dikte op dat moment gedeeld door de totale dikte van de sedimentlaag. Als dit in de tijd wordt uitgezet, is de helling van de raaklijn gelijk aan de valsnelheid van het slib.



figuur; sedimentatie in de tijd

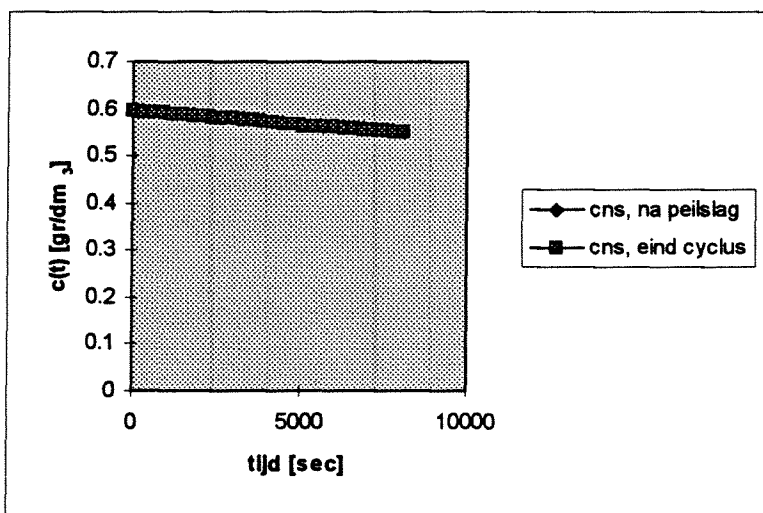
De valsnelheid volgt uit de helling van de getrokken lijn uit de figuur. Bij $t=40$ sec. Is de totale dikte van de sliblaag bereikt. De totale dikte van de bezonken sliblaag is 6mm en de valhoogte is 280mm.

De valsnelheid wordt:

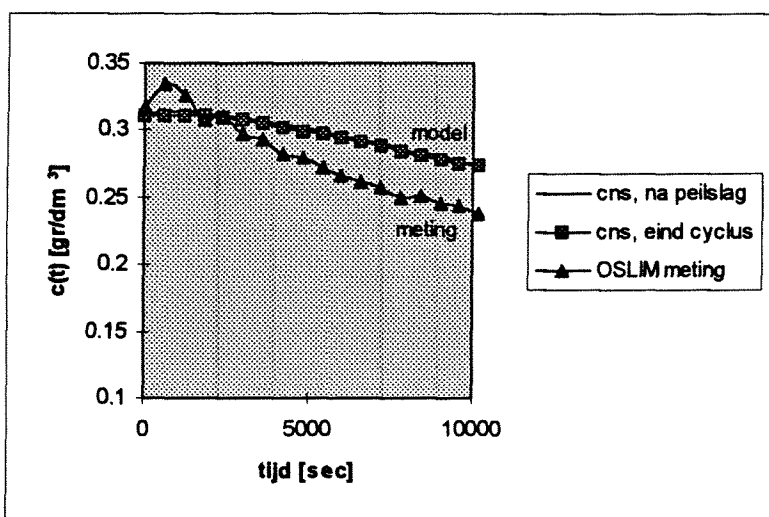
$$w = 280 - 6 / 40 \cdot 60 = 0.1 \text{ mm/s} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s.}$$

Bijlage H6 Concentratieverloop volgens analytisch model.

Hier volgen de figuren voor het concentratie verloop zoals berekent met het analytisch model (zie hoofdstuk 6.4). Ook de gemeten natte strook concentraties zijn in de figuren erbij gedaan ter vergelijking. Bij experiment 7 en 11 zijn in de figuren 1 en 5 alleen de resultaten van het analytisch model omdat bij die experimenten de concentratie metingen in de natte strook niet zijn gelukt. Verder zijn de verschillen tussen de concentraties direct na een peilslag en aan het eind van een peilslag te klein om ze in de figuren goed te zien. Het lijkt alsof de lijnen samenvallen.

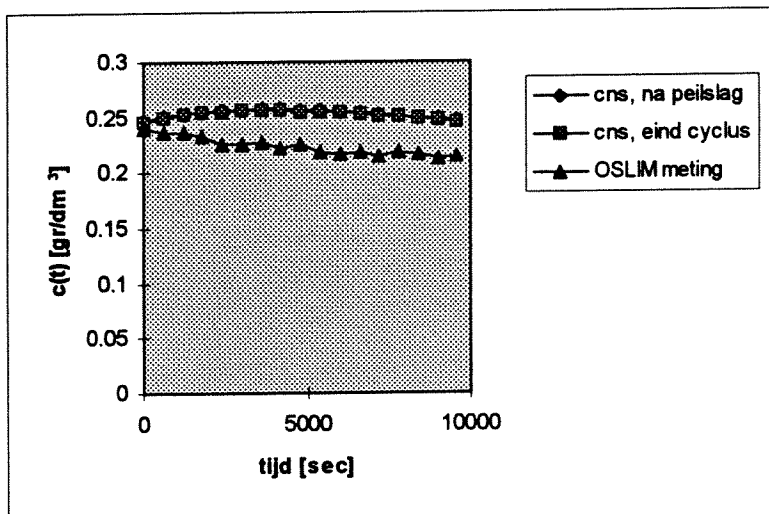
Experiment 7

Figuur 1; Alleen model resultaat.

Experiment 8

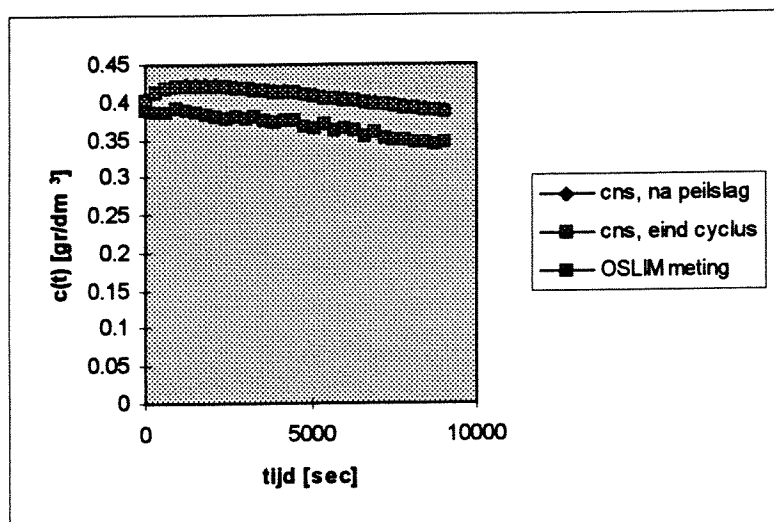
Figuur 2

Experiment 9



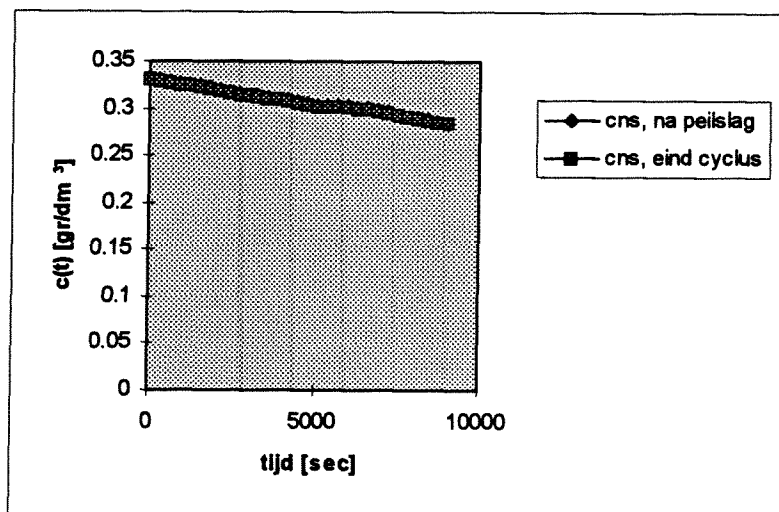
Figuur 3

Experiment 10



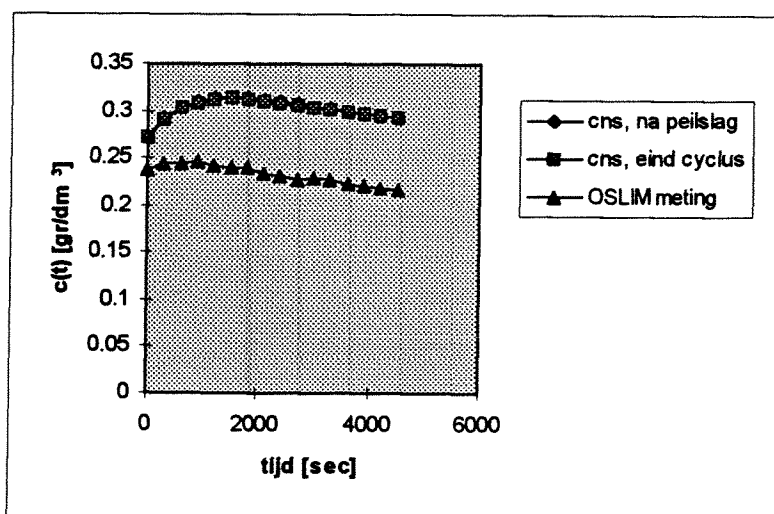
Figuur 4

Experiment 11

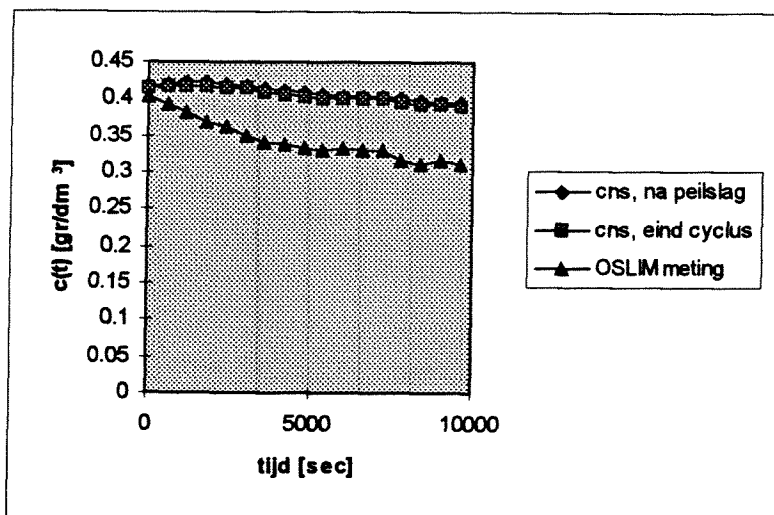


Figuur 5

Experiment 12

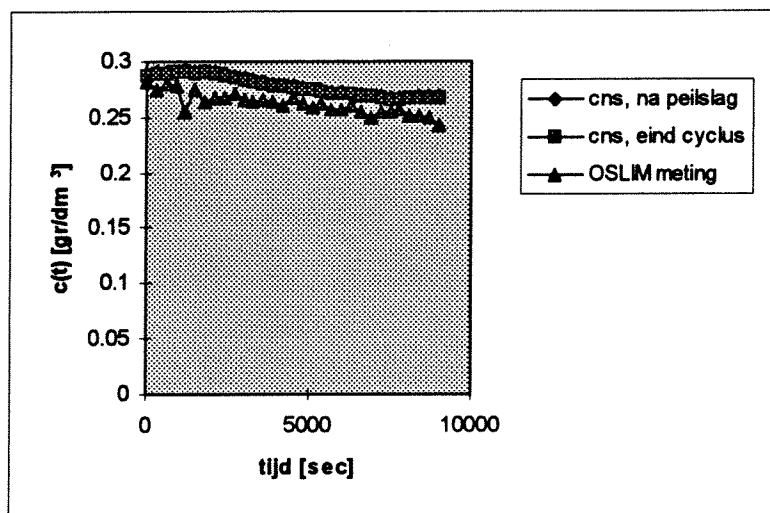


Figuur 6



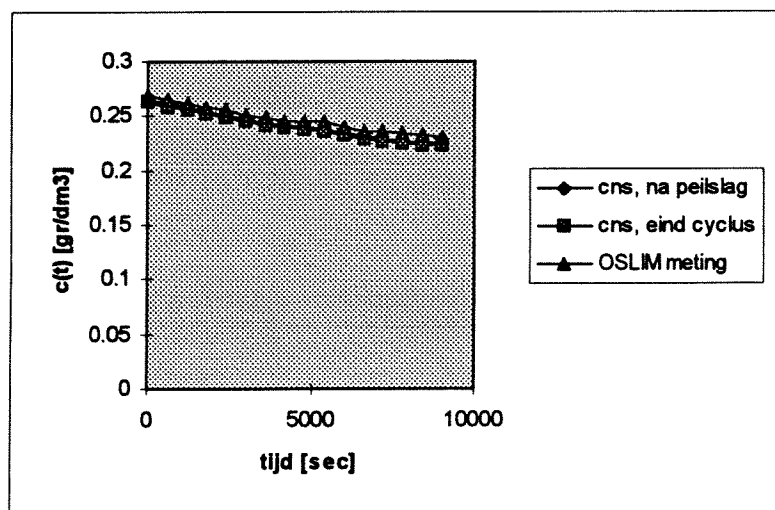
Figuur 7

Experiment C



Figuur 8

Experiment D



Figuur 9