

# Sedimentatie in natte stroken

door: R.H. Hooimeijer  
op verzoek van Rijkswaterstaat



Technische Universiteit Delft  
Faculteit der Civiele Techniek  
Vakgroep Waterbouwkunde

# **Sedimentatie in natte stroken**

**Op verzoek van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
van Rijkswaterstaat te Delft**

Maart, 1997  
Henrik Hooimeijer

Afstudeercommissie :

Prof. ir. K. d'Angremond

Sectie algemene waterbouwkunde,  
vakgroep waterbouwkunde,  
Faculteit der Civiele Techniek,  
TU Delft

ir. G.J. Schiereck

Sectie algemene waterbouwkunde,  
vakgroep waterbouwkunde,  
Faculteit der Civiele Techniek,  
TU Delft

dr. ir N. Booij

Sectie vloeistofmechanica,  
vakgroep waterbouwkunde,  
Faculteit der Civiele Techniek,  
TU Delft

ir. R.E.A.M. Boeters

Projectleider Oevers,  
Hoofdafdeling Water,  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde,  
Delft

## Samenvatting

Om flora en fauna de kans te geven zich langs scheepvaartwegen te vestigen en voort te planten zijn natuurvriendelijke oevers nodig. Voor kanalen is een speciale natuurvriendelijke oever ontworpen : de natte strook.

Tijdens onderzoeken naar het functioneren van de natte strook is een verondieping hiervan geconstateerd, hetgeen, in verband met ecologische doelstellingen van de natte strook, niet wenselijk is.

Het onderzoek, waarvan in dit rapport verslag is gedaan, had als doelstellingen :

- het analyseren van de oorzaak en aard van de sedimentatie;
- het voorspellen van de sedimentatie;
- het ontwikkelen van oplossingen die de sedimentatie voorkomt of vermindert;

Voor het analyseren van de oorzaak en aard van de sedimentatie is een procesanalyse gedaan. Hieruit bleek dat de waterstandsverandering ten gevolge van een passerend schip de maatgevende oorzaak van wateruitwisseling, tussen natte strook en kanaal, is. Verder bleek uit de procesanalyse dat het slib in de natte strook hoofdzakelijk bestaat uit zwevende sediment dat tijdens een scheepspassage wordt opgewoeld en vervolgens vanuit het kanaal de natte strook instroomt.

Het voorspellen van de sedimentatie is gedaan met behulp van twee ééndimensionale berekeningen. Deze berekeningen bleken, in vergelijking met praktijkgevallen, voor twee extreme gevallen goede resultaten op te leveren. Deze extreme gevallen zijn: een natte strook met een enkele opening in de vooroever en een natte strook met een poreuze vooroever.

Voordat met het ontwikkelen van oplossingen, die het probleem van sedimentatie voorkomen of verminderen, is begonnen, is eerst gekeken naar het sedimenttransportproces van en naar de natte strook. Uit dit proces blijkt dat, ten gevolge van een scheepspassage, eerst sediment-arm water de natte strook uitstroomt en wordt vervangen door sediment-rijk water vanuit het kanaal. De oplossingen die bedacht zijn om de sedimentatie te verminderen, zijn de volgende :

- het verminderen van wateruitwisseling door de openingen verder uit elkaar te plaatsen;
- de valsnelheid van de deeltjes in het water te verkleinen;
- het sediment in een beperkt en gecontroleerd gebied laten neerslaan door het maken van een slibvang achter de opening.

De oplossingen zijn met behulp van twee stromingsmodellen, PLONS en DUFLOW, doorgerekend waaruit bleek dat de aanpassingen een grote verbetering betekende ten opzichte van de huidige situatie. De keuze is gevallen op een combinatie van het verkleinen van de wateruitwisseling en het in een beperkt en gecontroleerd gebied neerlaten slaan van sediment.

Geconcludeerd kan worden dat de sedimentatie in de natte stroken niet te voorkomen is en

daarmee onderhoud onvermijdelijk. Het verminderen van deze sedimentatie, door het verkleinen van de wateruitwisseling, en de neerslag hiervan in een beperkt gebied is de beste oplossing gebleken.

## Voorwoord

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de aard en oorzaak van sedimentatie in de natte stroken. Aan de hand hiervan zijn mogelijke oplossingen aangedragen.

Met dit rapport rond ik mijn studie aan de Faculteit der Civiele Techniek, van de Technische Universiteit af. Mijn afstudeeropdracht vindt plaats bij de vakgroep Waterbouwkunde en is uitgevoerd op verzoek van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat te Delft.

Bij deze wil ik iedereen bedanken die mij hebben geholpen om dit rapport mogelijk te maken. In het bijzonder wil ik mijn begeleiders, de beheerders van de natte stroken die mij te woord hebben willen staan en Marianka Hooimeijer-van Delft bedanken voor hun tijd, hulp en steun.

Rijnsburg, maart 1997

Henrik Hooimeijer

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Samenvatting .....                                                           | 2  |
| Voorwoord .....                                                              | 4  |
| Hoofdstuk 1 Inleiding .....                                                  | 7  |
| Hoofdstuk 2 Probleemanalyse .....                                            | 10 |
| 2.1. Probleemanalyse .....                                                   | 10 |
| 2.2. Probleemstelling .....                                                  | 10 |
| 2.3. Doelstellingen .....                                                    | 10 |
| 2.4. Probleem aanpak .....                                                   | 11 |
| Hoofdstuk 3 Beschrijving van een natte strook .....                          | 12 |
| 3.1. Inleiding .....                                                         | 12 |
| 3.2. Beschrijving van de vooroevers .....                                    | 13 |
| 3.2.1. Inleiding .....                                                       | 13 |
| 3.2.2. Talud vooroevers .....                                                | 14 |
| 3.2.3. Verticale vooroevers .....                                            | 15 |
| Hoofdstuk 4 Procesanalyse .....                                              | 17 |
| 4.1. Inleiding .....                                                         | 17 |
| 4.2. Hydraulische processen .....                                            | 17 |
| 4.2.1. Inleiding .....                                                       | 17 |
| 4.2.2. Hydraulische processen in het kanaal. ....                            | 17 |
| 4.2.3. Hydraulische processen in de plasberm .....                           | 20 |
| 4.2.4. Hydraulische processen in de openingen .....                          | 22 |
| 4.3. Sedimentatie processen .....                                            | 23 |
| 4.3.1. Inleiding .....                                                       | 23 |
| 4.3.2. Sediment van uit het kanaal .....                                     | 24 |
| 4.3.3. Sediment uit de plasberm .....                                        | 24 |
| 4.3.4. Sedimentatie uit de oevers .....                                      | 25 |
| 4.3.5. Sediment van boven het wateroppervlak .....                           | 25 |
| 4.3.6. Resumé van de sedimentatieprocessen .....                             | 25 |
| 4.4. Overzicht van de sedimentatie- en transportprocessen .....              | 25 |
| 4.4.1. Inleiding .....                                                       | 25 |
| 4.4.2. Het sedimentatieproces in de natte strook .....                       | 25 |
| 4.4.3. Transportproces van het sediment in het water .....                   | 28 |
| 4.5. Globale berekening van de sedimentatie in de natte stroken .....        | 28 |
| 4.5.1. Inleiding .....                                                       | 28 |
| 4.5.2. Beschrijving van de berekeningsmethoden .....                         | 29 |
| 4.5.3. Vergelijking van de berekeningsresultaten en de gemeten waarden ..... | 31 |
| Hoofdstuk 5 Ontwikkeling van alternatieven .....                             | 35 |
| 5.1. Inleiding .....                                                         | 35 |

|                                                                             |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|
| 5.2. Randvoorwaarden                                                        | 35    |
| 5.2.1. Ecologische randvoorwaarden                                          | 35    |
| 5.2.2. Constructieve randvoorwaarden                                        | 36    |
| 5.2.3. Onderhoudsrandvoorwaarden                                            | 36    |
| 5.3. Beschrijving van de alternatieven                                      | 36    |
| 5.3.1. Inleiding                                                            | 36    |
| 5.3.2. Oplossingsrichtingen                                                 | 36    |
| 5.3.3. Oplossingen                                                          | 37    |
| 5.3.5. Beschrijving van de alternatieven                                    | 44    |
| Hoofdstuk 6 Berekeningen                                                    | 46    |
| 6.1. Inleiding                                                              | 46    |
| 6.2. Beschrijving van de modellen                                           | 46    |
| 6.2.1. Inleiding                                                            | 46    |
| 6.2.2. Beschrijving van de vergelijkingen voor de stromingsmodellen         | 46    |
| 6.2.3. De kwaliteitsmodule in DUFLOW                                        | 47    |
| 6.2.4. De beperkingen van DUFLOW en PLONS                                   | 49    |
| 6.3. Beschrijving van de afregelprocedure                                   | 50    |
| 6.3.1. Inleiding                                                            | 50    |
| 6.3.2. Invoer in DUFLOW                                                     | 50    |
| 6.3.3. De afregelfactoren                                                   | 52    |
| 6.3.4. De uitkomsten van de berekening                                      | 54    |
| 6.4. Berekeningen van de alternatieven                                      | 54    |
| 6.4.1. Inleiding                                                            | 54    |
| 6.4.2. Berekening van alternatief één : verkleining van de verversingsgraad | 55    |
| 6.4.3. Berekening van alternatief twee : het verkleinen van de valsnelheid  | 57    |
| 6.4.4. Berekening van alternatief drie : de slibvang                        | 57    |
| 6.5. Keuze van het beste alternatief                                        | 59    |
| Hoofdstuk 7 Conclusies en aanbevelingen                                     | 61    |
| 7.1. Conclusies                                                             | 61    |
| 7.2. Aanbevelingen                                                          | 62    |
| Literatuurlijst                                                             | 64    |
| Bijlage I : Verslag van de bezoeken aan verschillende natte stroken         | I.1   |
| Bijlage II : Berekeningen gemaakt met methode A en B                        | II.1  |
| Bijlage III : Invoer in de modellen                                         | III.1 |

## Hoofdstuk 1      Inleiding

Een scheepvaartkanaal heeft als doel twee punten te verbinden. Om op de kosten voor de grond en het grondverzet te besparen worden de kanalen zo smal mogelijk gemaakt. De minimale afmetingen van het kanaal worden bepaald door de grootte en intensiteit van de schepen die gebruik maken van het kanaal.

Het gevolg is dat de oevers zo steil mogelijk worden gemaakt. Daar de oevers worden belast door golven en stroming, opgewekt door varende schepen, is een verdediging tegen eroderen noodzakelijk. In eerste instantie bestonden deze oeververdedigingen uit houten beschoeiingen, stenen taluds of metselwerk; later werden de oevers ook verdedigd door damwandplanken en betonnen platen.

Het scheepvaartkanaal is naast een transportroute ook een ecosysteem. Door scheepvaartkanalen aan te sluiten op andere kanalen en rivieren ontstaan verbindingen met andere wateren. Deze verbindingen worden ook benut door vissen, door amfibieën en voor het transport van zaden. Een gezond ecosysteem heeft een diversiteit aan organismen. Voor het verder goed functioneren van een ecosysteem, is het noodzakelijk dat de flora en fauna zich kunnen vestigen en voortplanten.

Een geleidelijke overgang tussen land en water speelt hierbij een belangrijke rol. Dit vereist een oever met een flauw talud en een hydraulisch rustige omgeving (niet al te sterke stroming en golfslag).

Naast een verbinding voor waterorganismen, is het kanaal een barrière voor landgebonden dieren, zoals bijv. herten. Landgebonden dieren zullen het kanaal oversteken waardoor maatregelen moeten worden getroffen om het aan de oever komen van deze dieren mogelijk te maken. Ook hier is de meest ideale oever één met een flauw talud.

Tegenwoordig wordt meer aandacht besteed aan natuur en in dit licht zijn, voor land en water overgangen, natuurvriendelijke oevers ontwikkeld. Onder een natuurvriendelijke oever wordt verstaan : een oever waarbij naast de waterkerende functie, nadrukkelijk rekening wordt gehouden met natuur en landschap.

Zoals vaker ontstaat, in dit geval voor scheepvaartkanalen, een conflict tussen kosten en natuur. Vanuit een kosten oogpunt is een steile oever het voordeligst terwijl voor de natuur een flauw talud het gunstigst is. Om deze tegenstrijdigheid op te lossen is voor de kanaaloevers een compromis bedacht.

Een natuurvriendelijke oever voor scheepvaartkanalen moet, naast een natuurlijke overgang van land naar water, als oeverbescherming tegen golf- en stromingsbelasting dienen. De golf- en stromingsbelastingen hebben eveneens tot gevolg dat de, voor het ecosysteem, gewenste hydraulische rust niet aanwezig is. Dit heeft geleid tot het ontwerp van een speciale natuurvriendelijke oever. Deze wordt een natte strook genoemd (zie fig. 1.1).

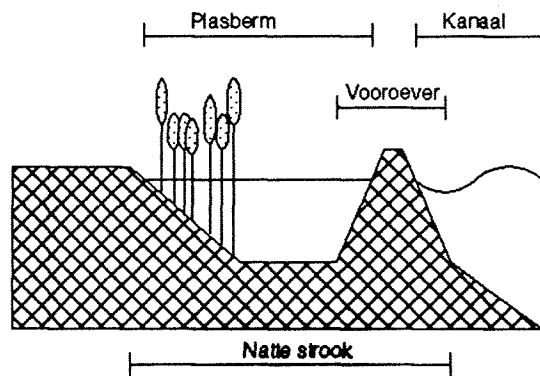


fig. 1.1 : de natte strook

De natte strook bestaat uit een vooroever en een plasberm. De vooroever dient als verdediging van de oever en de plasberm. In de plasberm kunnen de flora en fauna zich vestigen en voortplanten. Om wateruitwisseling tussen kanaal en plasberm mogelijk te maken worden in de vooroever openingen gemaakt.

Een doelstelling van de plasberm is dat een diversiteit aan flora en fauna zich daar kan vestigen en voortplanten. Hierdoor zijn een aantal eisen gesteld aan de natte strook, om de diversiteit van flora en fauna in de plasberm mogelijk te maken en te behouden. Deze eisen zijn :

- voldoende wateruitwisseling; dit om stilstaand water en daardoor ziektes en accumulatie van algen te voorkomen;
- verschillende waterdiepten; dit om verschillende soorten planten (met verschillende eisen aan de waterdiepte) de mogelijkheid te geven zich te kunnen vestigen;
- voorkomen van volledige begroeiing van de plasberm; dit om de mogelijkheid te geven aan fauna om zich te kunnen vestigen in de plasberm (in een volledig begroeide plasberm kunnen vissen niet zwemmen);
- hydraulische rust; dit om de gevestigde of zich vestigende flora en fauna de kans te geven zich te ontwikkelen.

Op verschillende plaatsen in Nederland zijn in kanalen een aantal natte stroken als proefvak aangelegd om te onderzoeken hoe een natte strook het best aan de gestelde eisen kan voldoen. Tijdens deze onderzoeken is gebleken dat een verondieping van de plasberm optreedt. Deze verondieping heeft tot gevolg dat de verschillende waterdiepten in de plasberm verloren gaan waardoor de diversiteit van organismen in de plasberm niet in stand kan blijven.

Om deze diversiteit te kunnen handhaven dient de plasberm verdiept te worden. Dit gaat gepaard met het aantasten van het ecosysteem in de plasberm. Een groot deel van het slib,

uit de plasberm, blijkt zwaar vervuild te zijn wat een extra behandeling, en dus kosten, van het slib noodzakelijk maakt.

Door Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, is een onderzoek ingesteld om de oorzaak van het verondiepen te bepalen en langs deze weg tot een goede oplossing van het probleem, het verondiepen van de plasberm, te komen.

In het kader van mijn afstudeerwerk ben ik hiervoor benaderd. Om inzicht in het probleem te krijgen heb ik een aantal natte stroken bezocht. Het betreft de natte stroken bij het Noordhollandsch kanaal, Wessum-Nederweert, Wilhelminakanaal, Zijkanaal Twenthekanalen en het Meppelerdiep.

In dit rapport zal als eerste de probleemanalyse worden beschreven (hoofdstuk 2) waarna een volledige beschrijving van een natte strook volgt (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 wordt de procesanalyse beschreven. Hierin worden de processen beschreven en waar mogelijk gekwantificeerd. Hierna kunnen de maatgevende processen worden aangegeven.

Voordat aan het oplossen van het probleem, het verondiepen van de plasberm, kan worden begonnen worden met het ontwikkelen van alternatieven (hoofdstuk 5). De volgende stap is de ontwikkelde alternatieven doorrekenen waarna een keuze wordt gemaakt (hoofdstuk 6). Als laatste worden de conclusies en aanbevelingen beschreven (hoofdstuk 7).

## Hoofdstuk 2      Probleemanalyse

### 2.1. Probleemanalyse

Het probleem van verondieping van de plasberm behoeft nader onderzoek. Uit rapporten (RWS Dienst Weg- en Waterbouw, 1995; RWS Directie Noord-Holland, 1995; RWS Directie Noord-Brabant, 1994 en 1995; RWS Dienstkring Twenthekanalen, 1995; RWS Dienst Noord-Brabant Rijksinstituut voor natuurbeheer, 1989; Oekologisch Adviesbureau Moller Pillot, 1994), gesprekken met beheerders en observaties van de natte stroken (zie bijlage I) is gebleken dat het probleem, sedimentatie of verondieping, in drie subproblemen is te verdelen. Deze zijn :

- 1) Indien de stroken verlanden verandert de plasberm langzaam maar zeker in een brede rietberm. Dit heeft tot gevolg dat aan de eis van beperkte begroeiing niet meer wordt voldaan.
- 2) Bij snelle verondieping is het noodzakelijk de stroken vaker te onderhouden om de gewenste diepte te behouden. Dit houdt in dat het sediment in de natte stroken gebaggerd moet worden. Baggeren heeft weer tot gevolg dat de flora en fauna die zich in de natte strook heeft gevestigd wordt weg gebaggerd.
- 3) Uit onderzoek is gebleken dat een groot deel van het neergeslagen sediment vervuild is. In sommige gevallen is er sprake van klasse 4 specie. Vervoer en opslag van dit sediment is zeer kostbaar.

### 2.2. Probleemstelling

Een aantal van de aangelegde natte stroken in natuurvriendelijke oevers ondervindt een sterke verondieping. Door deze verondieping kan niet aan de ecologische doelstelling van diversiteit, worden voldaan. De natte stroken moeten hierdoor verdiept worden. Verwijdering van sediment uit de natte strook gaat gepaard met het aantasten van het aanwezige ecosysteem. Het geborgen sediment is zwaar tot zeer zwaar vervuild waardoor het baggeren en opbergen ervan gepaard gaat met hoge kosten.

### 2.3. Doelstellingen

De doelstellingen van dit project zijn :

- a) het analyseren van de oorzaak en aard van de sedimentatie ;
- b) het voorspellen van de sedimentatie ;
- c) het beschrijven en toetsen van één of meer oplossingen die het gestelde probleem vermindert of wegneemt;

#### 2.4. Probleem aanpak

Het project is onderverdeeld in een onderzoeksgedeelte en een ontwerpgedeelte. Aan de hand van het onderzoek worden processen in de natte strook bekend die tijdens het ontwerp worden gebruikt bij het ontwikkelen van alternatieven.

Het onderzoek bestaat uit twee stappen :

De eerste stap is het beschrijven van de natte strook en de processen die van invloed zijn op de sedimentatie die daarin plaatsvindt. (hoofdstuk 3 en 4).

Nadat de processen, die zijn te onderscheiden in hydraulische en sedimentatie processen, zijn beschreven kunnen deze worden gekwantificeerd. De maatgevende processen worden hierdoor bekend.

Het ontwerpproces bestaat uit twee stappen :

De eerste stap is het ontwikkelen van alternatieven (hoofdstuk 5)

De volgende stap is berekenen van de alternatieven waarna, na vergelijking met het nul alternatief, een keuze voor één alternatief wordt gemaakt (hoofdstuk 6).

De allerlaatste stap bestaat uit de conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 7).

## Hoofdstuk 3 Beschrijving van een natte strook

### 3.1. Inleiding

Een natte strook is een vorm van een natuurvriendelijke oever. In dit geval gaat het specifiek om een natuurvriendelijke oever van een kunstmatig scheepvaartkanaal. Een natte strook heeft twee functies, deze zijn : een oeeververdediging tegen erosie en een plaats waar natuur zich kan ontwikkelen.

De vooroever is geconstrueerd om de oever en de flora en fauna te verdedigen. In de

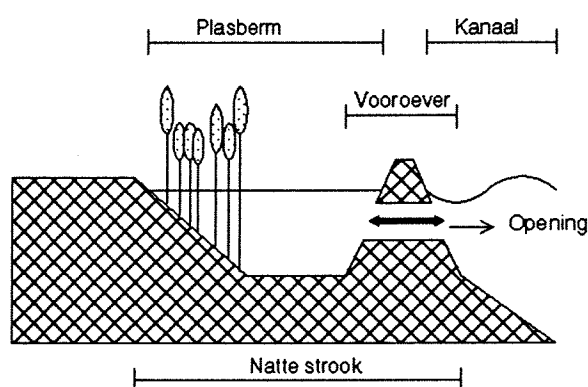


fig. 3.1 : de natte strook

plasberm dienen flora en fauna zich te kunnen vestigen. Deze heeft, om ziektes en accumulatie van algen te voorkomen, genoeg wateruitwisseling met het kanaal. In de vooroever moeten openingen komen om deze wateruitwisseling mogelijk te maken. De wateruitwisseling wordt aangedreven door waterstandsveranderingen in het kanaal veroorzaakt door passerende schepen.

Voor de plasberm houdt dit in dat deze beschermd moet worden tegen, en tegelijkertijd gevoed wordt door, een passerend schip.

In dit hoofdstuk worden verschillende natte stroken beschreven.

Voor de natte stroken zijn de eisen aan de plasberm gelijk. Voor het ontwerp van een plasberm moet rekening gehouden worden met het gegeven dat een gezond ecosysteem een diversiteit aan organismen bevat. Om voor verschillende soorten flora, met andere eisen aan de waterdiepten, de plasberm een goed leefgebied te maken wordt een oever met een flauw talud gemaakt (zie fig. 3.2).

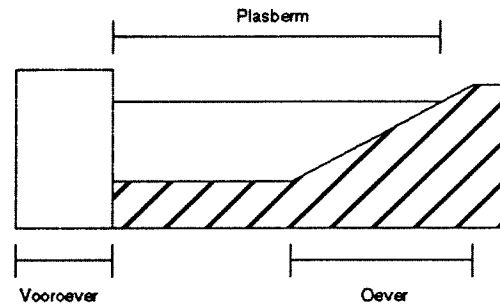


fig. 3.2 : de plasberm

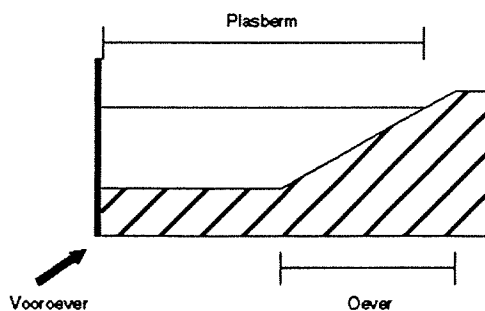
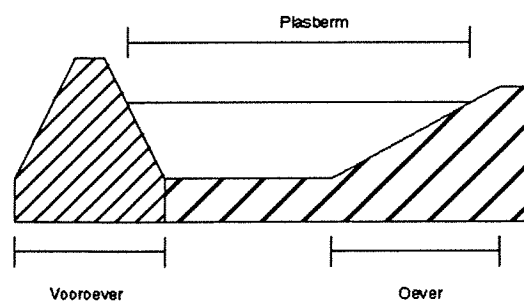
De verschillen tussen natte stroken zitten in het soort vooroever die de plasberm en oever beschermt. Deze verschillende vormen worden in 3.2 beschreven.

### 3.2. Beschrijving van de vooroever

#### 3.2.1. Inleiding

De vooroever vormt de scheiding tussen het kanaal en de plasberm en heeft als doel de achterliggende plasberm en oever tegen golf- en stromingsbelastingen van de passerende schepen te beschermen.

Vooroevers zijn te onderscheiden in twee vormen, een verticale- en een talud vorm (zie fig. 3.3<sup>A</sup> en 3.3<sup>B</sup> ).

fig. 3.3<sup>A</sup> : verticale vooroeverfig. 3.3<sup>B</sup> : talud vooroever

Tot de verticale vooroevers behoren oevers van damwanden, houten beschoeiing en betonnen platen.

Talud vooroevers worden van breuksteen gemaakt met of zonder grondkern (afhankelijk van de gewenste opening). De keuze van het soort vooroever, dat wordt toegepast, wordt

mede bepaald door de hoeveelheid ruimte die beschikbaar is voor de natte strook. In de vooroevers zitten openingen met als hoofddoel het mogelijk maken van wateruitwisseling tussen de natte strook en het kanaal. Een ander doel van de openingen is het mogelijk maken van migratie van vissen tussen plasberm en kanaal. Niet alle openingen hebben deze optie.

### 3.2.2. Talud vooroevers

Een aantal oplossingen zijn ontworpen om wateruitwisseling tussen het kanaal en de natte strook mogelijk te maken. De constructie van de vooroever is afhankelijk van de ruimte die beschikbaar is om de natte strook te maken. Daarnaast zijn nog allerlei combinaties met verschillende soorten openingen mogelijk.

#### *De poreuze vooroever*

Een vooroever van breuksteen wordt aangelegd met als doel het water door de poriën, ontstaan door de opeenstapeling van breuksteen, te laten stromen (zie fig. 3.4). Hierdoor is wateruitwisseling mogelijk. Daar de stroming door de poriën plaatsvindt is migratie van vissen niet mogelijk. Om uitspoeling van grond onder de vooroever te voorkomen wordt de grond onder de vooroever afgedekt met een geotextiel.

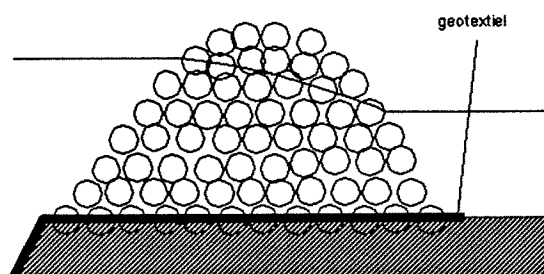


fig. 3.4 : poreuze vooroever

#### *Verlaging in de vooroever*

De kruin van de breukstenen vooroever wordt gedeeltelijk tot onder het waterniveau gelegd (zie fig. 3.5). De wateruitwisseling geschiedt door de verlaging in de vooroever. Migratie van vissen is mogelijk.

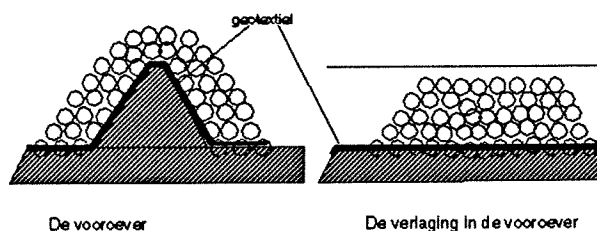


fig. 3.5 : verlaging in de vooroever

*Onderbreking van de vooroever*

Door onderbreking van de breukstenen vooroever wordt een opening gecreëerd. Het gevolg van deze oplossing is dat, om erosie te voorkomen, achter de opening de oever moet worden versterkt (zie fig. 3.6). Weer kan, om het graafwerk te beperken, de vooroever bestaan uit grond van de originele oever. Deze grondkern wordt afgestort met breuksteen. Om uitspoeling van de grond te voorkomen wordt over de grondkern een geotextiel gelegd. Migratie van vissen is mogelijk.

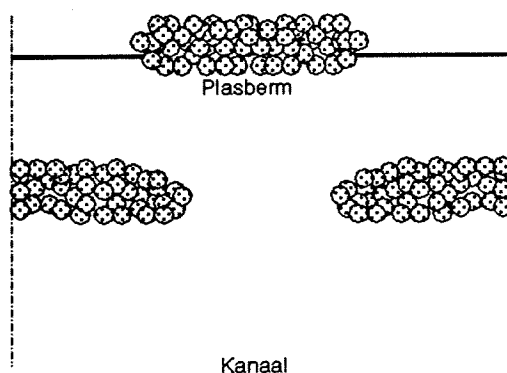


fig. 3.6 : onderbroken vooroever

*Buizen in de vooroever*

Het doel van buizen door de vooroever is wateruitwisseling. Ook voor dit alternatief geldt dat op graafwerk wordt bespaard waardoor de vooroever bestaat uit een grondlichaam met, daar tegen aan, als verdediging breuksteen (zie fig. 3.7). Om het grondlichaam tegen uitspoelen te beschermen wordt over het grondlichaam een geotextiel gelegd. Migratie van vissen is hier mogelijk.

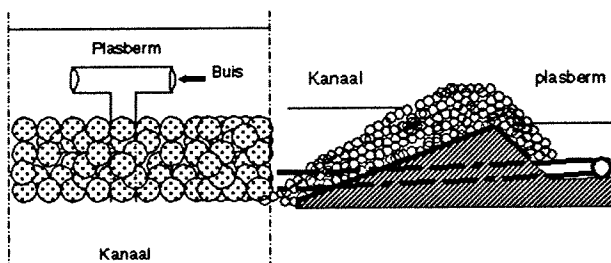


fig. 3.7 : buizen door de vooroever

*3.2.3. Verticale vooroever*

Verticale oevers worden gemaakt van damwanden, houten beschoeiing en betonnen platen. Voor vooroevers is het meest toegepaste alternatief de damwand. Voor dit alternatief zijn een aantal openingen uitgedacht.

*Damwandplanken dieper slaan*

Door een damwandplank tot onder het waterniveau te slaan ontstaat een opening in de bovenkant van de vooroever (zie fig 3.8). Een andere variant is het uitsnijden van een opening in de damwandplanken. Migratie van vissen is mogelijk.

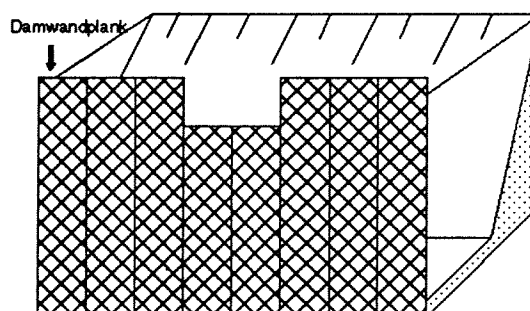


fig. 3.8 : vooraanzicht

*Openingen in de onderkant van de damwanden vooroever*

Naast de functie van wateruitwisseling is de bedoeling dat sediment uit de natte strook weer naar het kanaal wordt afgevoerd. Migratie van vissen is mogelijk.

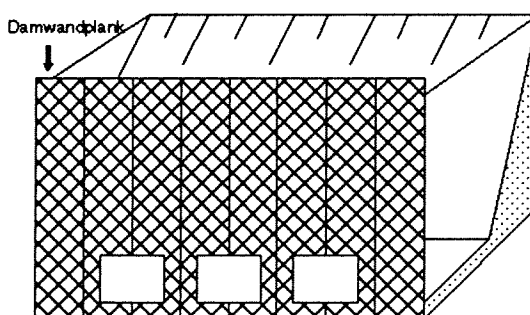


fig. 3.9 : slibgaten

## Hoofdstuk 4      Procesanalyse

### 4.1. Inleiding

Voor het probleem, het verondiepen van de plasberm, zijn de water- en sedimentuitwisseling belangrijke factoren. De wateruitwisseling is afhankelijk van de hydraulische processen in het kanaal, de plasberm en de openingen in de vooroever (4.2). De sedimentatie is afhankelijk van de processen van de in- en uitvoer van sediment in de plasberm (4.3).

Nadat de maatgevende processen bekend zijn worden deze nauwkeurig beschreven (4.4) en gekwantificeerd om inzicht te krijgen in de hoeveelheid en de plaats van de accumulatie van slib (4.5).

### 4.2. Hydraulische processen

#### 4.2.1. Inleiding

Als een waterstandsverschil optreedt tussen het kanaal en de natte strook ontstaat een stroming door de openingen. Het waterstandsverschil treedt op als een waterstandsverandering plaatsvindt in het kanaal. De waterstand in de natte strook reageert op deze waterstandsverandering omdat de natte strook en het kanaal door openingen in verbinding staan met elkaar.

In deze paragraaf worden de aan de stroming gerelateerde processen behandeld. Als eerste worden de oorzaken van de waterstandsveranderingen in het kanaal behandeld (4.2.2). Vervolgens wordt de stroming door de openingen (4.2.3) en in de plasberm besproken (4.2.4).

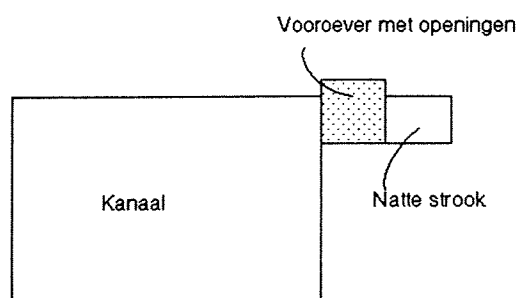


fig. 4.1 : Schematisatie van kanaal en natte strook

#### 4.2.2. Hydraulische processen in het kanaal.

De waterstand in de natte strook reageert op de waterstandsveranderingen in het kanaal. Vier processen hebben invloed op de waterstand in het kanaal. Deze processen zijn opwaaiing, windgolven, translatiegolven door schutten en scheepspassages.

##### Opwaaiing

Opwaaiing is een effect dat afhankelijk is van de windsterkte en de strijklengte. Door wrijving tussen het water en de wind vindt een opstuwing plaats.

Het effect veroorzaakt een kleine waterstandsverhoging en heeft een lange periode nodig om zich in te stellen.

Voorbeeld :

Bij een kanaal met een lengte van twee kilometer, een diepte van drie meter en een windsnelheid van 8 meter per seconde ontstaat op het kanaal een verhang van de waterspiegel van  $8.7 \cdot 10^{-6}$ . Dit houdt in dat tussen begin- en eindpunt een waterstandsverschil is van 17 mm. Deze verhoging van de waterstand is zeer langzaam en stelt zich pas na uren volledig in.

Deze langzame waterstandsverhoging heeft tot gevolg dat de waterstandsverschillen tussen kanaal en natte strook heel klein zijn en daardoor geen grote stroming tussen kanaal en natte strook veroorzaakt.

Dit effect is verwaarloosbaar.

### *Windgolven*

De wind veroorzaakt naast opwaaiing ook windgolven. De waterstandsverschillen die door deze golven optreden zijn van korte duur (seconden). Hierdoor ontwikkelt de stroming tussen kanaal en natte strook zich niet of nauwelijks. Verder is er niet altijd wind waardoor de effecten van de windgolven verwaarloosbaar zijn.

### *Translatiegolven door schutten*

Het schutten van sluizen heeft een translatiegolf, door het achterliggende kanaalpand, tot gevolg. De hoogte van de translatiegolf is afhankelijk van het waterstandsverschil over de sluizen, de breedte en de diepte van het kanaalpand. De snelheid van de translatiegolf is afhankelijk van de diepte van het kanaalpand. Ter indicatie van de grootte van een translatiegolf ten gevolge van het schutten van een sluis wordt het volgende voorbeeld gegeven :

De formule voor de hoogte van een translatiegolf wordt beschreven in formule (4.1) :

$$\Delta h = \frac{\Delta Q}{B\sqrt{ga_0}} \quad (4.1)$$

waarin :

|            |                                                  |                     |
|------------|--------------------------------------------------|---------------------|
| $\Delta h$ | : hoogte van de translatiegolf                   | [m]                 |
| $\Delta Q$ | : instromend debiet ten gevolge van het schutten | [m <sup>3</sup> /s] |
| B          | : breedte van het kanaal                         | [m]                 |
| $a_0$      | : diepte van het kanaal                          | [m]                 |
| g          | : valversnelling                                 | [m/s <sup>2</sup> ] |

Als voorbeeld wordt genomen een translatiegolf die door het Twenthekanaal loopt ten gevolge van het schutten van de Eefdensluis.

Deze sluis schut in totaal 10.000 m<sup>3</sup> in 10 minuten bij het leeg lopen. Dit komt neer op

een gemiddeld schutdebiet van  $17 \text{ m}^3/\text{s}$ . Voor de breedte en de diepte van het kanaal wordt respectievelijk 100 en 4 meter genomen. De grootte van de waterstandsverhoging bedraagt dan 2.7 cm.

Het maximaal aantal schuttingen per dag is 20. Bij hoogwater op de IJssel komt het echter voor dat een aantal dagen niet gesloten hoeft te worden. Dit komt omdat door het hogewater de schepen niet meer onder de bruggen door kunnen en het kanaal dus niet bevaren wordt.

De verhoging van de waterstand ten gevolge van de translatiegolf is klein en geleidelijk. De stroming die dit te weeg brengt is waarneembaar en zorgt voor wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook.

De stroming is echter niet krachtig genoeg om sediment dat op de kanaalbodem ligt in suspensie te brengen (zie paragraaf 4.2.3) met als gevolg dat in het water van het kanaal niet of nauwelijks sediment in suspensie is.

Daar niet in elk kanaalpand sluizen aanwezig zijn wordt in het kader van dit onderzoek niet verder ingegaan op deze translatiegolven.

### Scheepspassage

Ten gevolge van interactie tussen schip en kanaal veroorzaakt een passage van een schip door het kanaal een waterstandsverandering in het kanaal. Deze interacties zijn afhankelijk van de verhouding tussen het oppervlak van het dwarsprofiel van het kanaal en het natte oppervlak van het schip (zie fig. 4.2)

Naarmate de verhouding oppervlakte van het schip / dwarsprofiel van het kanaal groter wordt, is het effect van een passerend schip op de waterstanden in het kanaal groter.

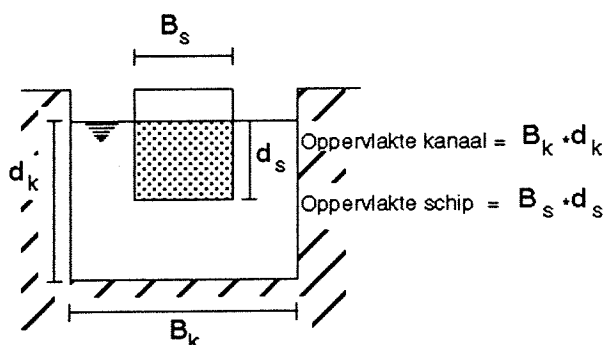


fig. 4.2 : dwarsdoorsnede van kanaal en schip

De effecten die een passerend schip op de waterstand in het kanaal heeft, worden afgebeeld in figuur 4.3. Het schip stuwt water voor zich uit. Door de opstuwing ontstaat een waterstandsverschil tussen de voor- en achterkant van het schip. Door effecten als dit waterstandsverschil en waterverplaatsing door het schip ontwikkelt zich een stroming tegen de vaarrichting in, die de retourstroom wordt genoemd. Deze retourstroom heeft tot gevolg dat een waterspiegeldaling optreedt. Na de waterspiegeldaling stijgt de waterstand weer. Deze stijging wordt de haalgolf genoemd. Verdere waterstandsveranderingen, veroorzaakt door een varende schip, zijn secundaire golven.

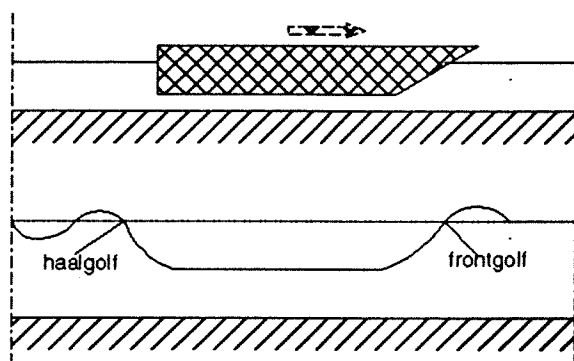


fig. 4.3 : waterspiegeldaling t.g.v. een scheeps-  
passage

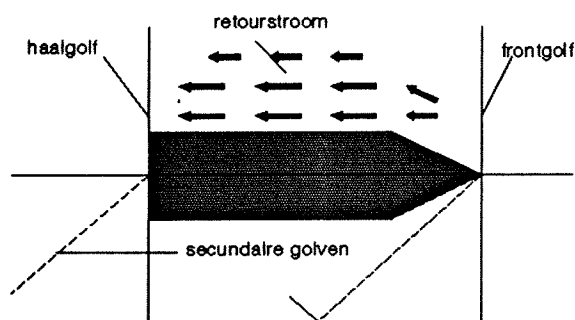


fig. 4.4 : golf- en stromingspatroon rondom  
een varend schip

Ter indicatie van de grootte van een scheepspassage op de waterstand in een kanaal : In het Noordhollandsch kanaal zijn, tijdens een scheepspassage, de waterstandsveranderingen gemeten. De gemeten waarden worden hieronder behandeld.

Het schip vaart met 2.5 m/s door een kanaal. De opstuwing ten gevolge van die passage bedraagt ongeveer 2.5 cm. Voor de waterspiegeldaling werd een waarde van 30 cm gemeten. Hierna zijn waarden gemeten voor de secundaire golven met pieken (ten gevolgen van interferentie) van 5 cm.

Voor een volledige beschrijving van de hydraulische effecten, van de snelheid en afmetingen van een schip ten opzichte van dimensies van een kanaal, op de waterstanden in het kanaal wordt verwezen naar methode van Schijf (Bouwmeester, 1994).

De waterstandsverandering ten gevolge van een scheepspassage is maatgevend waarbij vooral het effect van de waterstandsverlaging door de retourstroom de grootste invloed heeft. De secundaire golven zijn, vanwege de korte duur van de waterstandsverandering hiervan, verwaarloosbaar

#### 4.2.3. Hydraulische processen in de plasberm

De hydraulische processen in de plasberm zijn afhankelijk van de hydraulische processen in het kanaal en van de openingen.

Daar de plasberm in directe verbinding staat met het kanaal zal in de plasberm de waterstand reageren op de waterstand in het kanaal.

Voor de stroming van water tussen het kanaal en de natte strook zijn de openingen gemaakt. Het proces dat in de plasberm optreedt tijdens een scheepspassage is als volgt :

- de waterstand in het kanaal daalt waardoor water vanuit de plasberm naar het kanaal stroomt. In de plasberm daalt de waterstand vlak achter de opening;
- de daling van de waterstand achter de opening, waar het schip zich op dat moment bevindt, betekent een verhang in de plasberm waardoor een stroming in langsricting, naar de opening, ontstaat (zie fig. 4.5);
- nadat het schip is gepasseerd stijgt de waterspiegel in het kanaal waardoor een stroming naar de plasberm ontstaat, met als gevolg dat in de plasberm de waterstand weer stijgt;
- het gevolg van deze waterstandsstijging is dat een stroming in langsricting ontstaat, vanuit de opening;

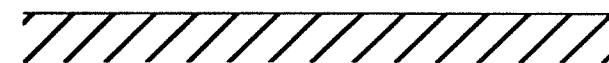
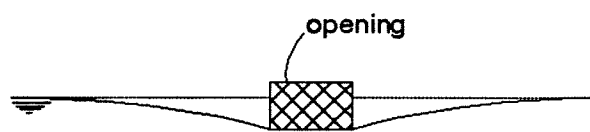
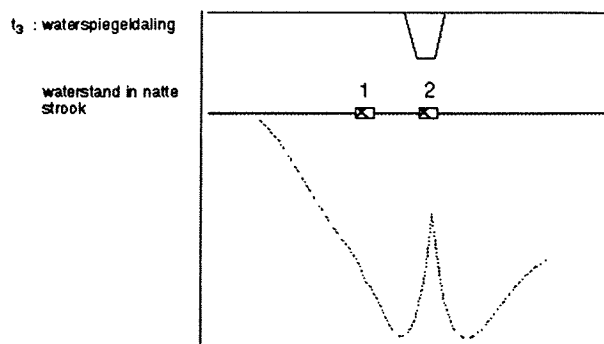
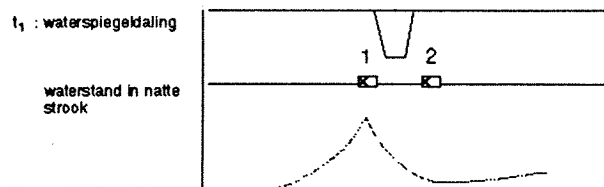
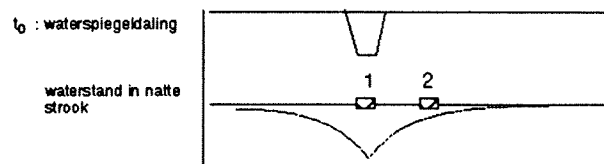


fig. 4.5 : waterspiegeldaling in de natte strook bij een enkele opening (langsdoorsnede van de natte strook)

Voor het geval dat meerdere openingen in de vooroever aanwezig zijn houdt dit in dat, bij een scheepspassage, de waterstand bij de ene opening eerder daalt dan bij de andere (vanwege de tijd die een schip nodig heeft om van de ene naar de andere opening te varen). Hierdoor ontstaat tussen de openingen een verhang die zorgen voor een stroming van de ene naar de andere opening. Dit effect is alleen merkbaar als de openingen bij elkaar in de buurt liggen. Het proces van de twee openingen is als volgt te beschrijven (zie fig. 4.6) :

- op  $t_0$  vaart het schip langs opening 1 wat een waterspiegeldaling in de natte strook tot gevolg heeft. Een stroming, in de langsricting van de natte strook, is hiervan het gevolg. Daar het schip nog niet bij opening 2 is, wordt de waterstand hierbij alleen beïnvloed door de waterstands daling bij opening 1;
- op  $t_3$  passeert het schip opening twee waardoor de waterstand hier bij daalt. De waterstand, in het kanaal, bij opening 1 is inmiddels in de beginsituatie waardoor de



waterstand in de natte strook langzaam stijgt. Nu is een verhang aanwezig die een stroming van opening 1 naar opening twee te weeg brengt;

- op  $t_4$  is het schip gepasseerd en zijn de waterstanden, in het kanaal, bij de openingen weer in de begin situatie. Vanwege het feit dat het schip als laatste opening 2 heeft gepasseerd is de waterstand, in de natte strook, nabij opening 2 lager dan nabij

opening 1. Dit heeft tot gevolg dat een stroming van opening 1 naar opening 2 blijft

bestaan. Dit blijft tot dat de waterstand ook in de natte strook weer in de begin situatie verkeerd.

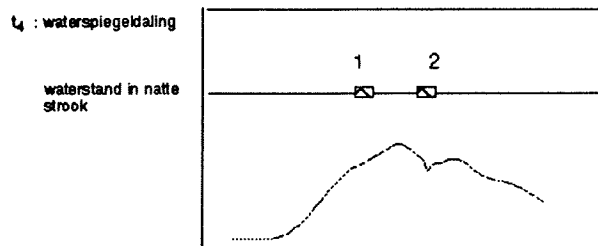


fig. 4.6 : waterspiegelverloop in de natte strook met twee openingen bij vier tijdstappen

#### 4.2.4. Hydraulische processen in de openingen

Stroming door de openingen is afhankelijk van het verschil van waterstanden tussen het kanaal en de natte strook. Deze waterstandsverschillen zijn in de voorgaande paragraaf beschreven. Vergelijking 4.2 beschrijft de stroming door een opening :

$$V = \mu \sqrt{2g\Delta h} \quad (4.2)$$

waarin :

$V$  : de snelheid van het water  
 $\mu$  : de afvoercoëfficiënt  
 $g$  : de valversnelling  
 $\Delta h$  : waterstandsverschil over de opening

[m/s]  
 [-]  
 [m/s<sup>2</sup>]  
 [m]

Van belang voor de stroming door een opening is dus, naast het waterstandsverschil, het energieverlies dat ontstaat door de stroming van water door de opening. Dit wordt de afvoercoëfficiënt van de opening genoemd. Deze is per opening verschillend en afhankelijk van een aantal aspecten van de opening. Deze aspecten worden in deze paragraaf per opening besproken en worden waarden gegeven (ontleend aan Vermeulen, 1996).

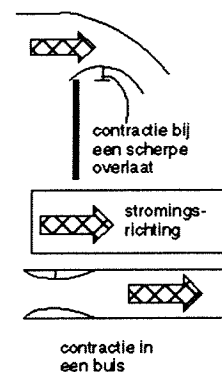


fig. 4.7 : contractie van stroming

### Openingen aan de boven- en onderkant van een verticale vooroever

De afvoercoëfficiënt is afhankelijk van de contractie van de stroming. Deze is afhankelijk van de randen van de openingen; hoe scherper de randen des te meer contractie ( $\mu \approx 0.6$ ).

### Verlaging in een talud vooroever

Deze opening wordt geschematiseerd als een brede overlaat waarbij de afvoercoëfficiënt afhankelijk is van de contractie en van de weerstand van de overlaat. De weerstand van de overlaat is weer afhankelijk van het materiaal dat gebruikt is om de opening te bekleden.

### Buizen door de vooroever

De afvoercoëfficiënt van een buis is afhankelijk van in- en uittreeverliezen en weerstand van de wand van de buis. De in- en uittreeverliezen zijn weer afhankelijk van de contractie bij de in en uitgang van de buis.

De weerstand van de buis is afhankelijk van het materiaal wat voor de constructie hiervan is gebruikt ( $\mu \approx 1.0$ ).

### De poreuze vooroever

De poreuze vooroever is een apart geval, omdat niet een duidelijke opening is aan te wijzen. Deze vooroever wordt vaak geschematiseerd als een filterlaag. De doorlatendheid hiervan wordt beschreven met de Forchheimer relatie (Vermeulen, 1996). Hierin is onder andere van belang wat de grootte en sortering van de stenen is die bij constructie van de vooroever gebruikt wordt.

## 4.3. Sedimentatie processen

### 4.3.1. Inleiding

Om achter de oorzaak van de sedimentatie in de natte stroken te komen moet inzicht worden verschaft in de mogelijke herkomst van het, in de natte strook, neerslaande sediment.

In het kader van het onderzoek naar de herkomst van het neerslaande sediment in de natte strook zijn een aantal mogelijkheden onderzocht. Het sediment kan op verschillende manieren in de natte strook zijn gekomen (zie fig. 4.9).

De verschillende manieren worden in deze paragraaf behandeld. Deze zijn :

- uit het kanaal (4.3.2)
- produktie in de plasberm (4.3.3)
- uit de oever (4.3.4)
- van boven het wateroppervlak (4.3.5)

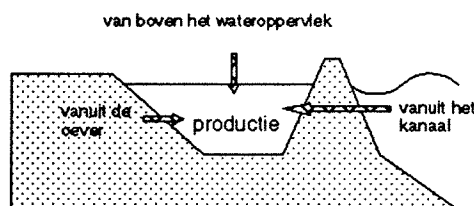


fig. 4.8 : herkomst van het sediment

Per paragraaf wordt omschreven hoe het sediment in de natte strook kan zijn gekomen en of het naar aanleiding van observaties al dan niet maatgevend of verwaarloosbaar is (4.2.6).

#### 4.3.2. Sediment van uit het kanaal

Het sediment dat in de kanalen aanwezig is, bestaat voornamelijk uit zwevend sediment. Zwevend sediment bestaat hoofdzakelijk uit klei en silt deeltjes ( $2\ \mu\text{m}$ -  $50\ \mu\text{m}$  doorsnee). Omdat in kanalen geen stroming aanwezig is slaat zwevend sediment, aanwezig in het water, neer. Een passage van een schip veroorzaakt een stroming en turbulentie in het kanaal waardoor de deeltjes in suspensie komen. De hoeveelheid zwevend sediment, gemeten in het kanaal na een scheepspassage, ligt tussen de 10 en de 25 mg/l (gemeten in verschillende kanalen (RWS Dienst Weg- en Waterbouw, 1995; RWS Directie Noord-Holland, 1995; RWS Directie Noord-Brabant, 1994 en 1995; RWS Dienstkring Twenthekanalen, 1995; RWS Dienst Nord-Brabant Rijksinstituut voor natuurbeheer, 1989; Oekologisch Adviesbureau Moller Pillot, 1994).

Klei- en siltdeeltjes hebben als eigenschap dat deze vettig aanvoelt. Daar in de natte stroken het neergeslagen sediment deze eigenschap heeft (zie bijlage I) is het goed mogelijk dat het, in de natte strook, neergeslagen sediment uit het kanaal afkomstig is.

#### 4.3.3. Sediment uit de plasberm

Uit metingen is gebleken dat een deel van het neergeslagen sediment in de plasberm uit organisch slib bestaat. Dit bestaat uit rottende planten- en dieren resten. Ophoping van dit slib levert een probleem op in delen van de natte strook waar niet of nauwelijks stroming aanwezig is. De verondieping ten gevolge van dit organische slib is gemeten in de Twenthe-kanalen waar het 2.5 cm per jaar bedraagt (RWS, Dienstkring Twenthekanalen, 1995).

#### 4.3.4. Sedimentatie uit de oevers

Uit observatie is gebleken dat het sediment in de plasberm zeer fijn en vettig is (zie bijlage I). Dit duidt op klei- en siltdeeltjes.

De oever van de natte stroken in het zijkanaal van de Twenthe-kanalen bestaan hoofdzakelijk uit zand. Hieruit is te concluderen dat het sediment niet uit de oevers komt. Bij andere natte stroken is geen uitspoeling van de oevers geconstateerd. Dit bevestigt de conclusie dat het fijne en vettige sediment niet uit de oevers afkomstig is.

#### 4.3.5. Sediment van boven het wateroppervlak

Het sediment van boven het wateroppervlak kan via de wind of door mensenhand de natte strook ingebracht zijn.

Sediment dat is meegenomen door wind is een bekend fenomeen. Het gaat dan vaak om löss of woestijnzand. Het gaat hier echter om een beperkt invloedsgebied en om zeer beperkte hoeveelheden. Gezien de kleine hoeveelheden sediment dat op deze manier wordt getransporteerd is de inbreng van dit sediment verwaarloosbaar.

Sediment door mensenhand in de natte strook ingebracht bestaat hoofdzakelijk uit drijvend vuil zoals blikjes en plastic zakken. Dit heeft geen invloed op de sedimentatie.

#### 4.3.6. Resumé van de sedimentatieprocessen

Uit alle beschreven manieren van sediment invoer blijft als maatgevende over het sediment vanuit het kanaal en het sediment dat in de plasberm zelf wordt geproduceerd.

### 4.4. Overzicht van de sedimentatie- en transportprocessen

#### 4.4.1. Inleiding

In de voorgaande paragrafen is onderzocht wat de wateruitwisseling tussen kanaal en natte strook drijft en wat de herkomst van het, in de natte strook, neerslaande sediment is.

De conclusies zijn dat de wateruitwisseling gedreven wordt door een scheepspassage en het neergeslagen sediment hoofdzakelijk afkomstig is van het in het kanaal aanwezige zwevende sediment. In 4.4.2 wordt het sedimentatieproces beschreven en in 4.4.3 wordt het totale transportproces van water en sediment bekeken.

#### 4.4.2. Het sedimentatieproces in de natte strook

Het proces van sedimentatie in een natte strook is uit te drukken in de volgende vergelijking (4.3):

$$\text{Sedimentatie} = \text{Instromend sediment} - \text{Uitstromend sediment} \quad (4.3)$$

Deze vergelijking maakt duidelijk dat twee factoren invloed hebben op de sedimentatie en wel :

- het in de natte strook stromende sediment;
- het uit de natte strook stromende sediment;

Naarmate de instroom van sediment groter is dan de uitstroom geeft dit sedimentatie. Het instromende sediment is het zwevende sediment dat in het kanaalwater aanwezig is en het uitstromende sediment is het sediment dat zich in het water in de natte strook bevindt.

Het zwevende sediment dat de natte strook instroomt bestaat hoofdzakelijk uit klei- en siltdeeltjes. De grootte van de deeltjes ligt tussen de 2  $\mu\text{m}$  en de 50  $\mu\text{m}$ .

Klei- en siltdeeltjes kunnen echter gaan klonteren. Dit verschijnsel treedt op in een biologisch actief water zoals in de natte strook. Hierin bevinden draadstructuren afgescheiden door schimmels en planten, waar de klei- en siltdeeltjes zich aan hechten. Hierdoor wordt een klont gevormd die tot 100 maal de doorsnede van een enkel klei- en siltdeeltje heeft (DELWEL, 1990; W.Bechteller, 1986).

De grootte van de klont heeft vervolgens invloed op de valsnelheid van de klei- en silt deeltjes. De valsnelheid van de deeltjes wordt bepaald met behulp van de wet van Stokes waarin voor de valsnelheid de volgende vergelijking is opgesteld :

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{D^2 g \Delta}{\nu} \quad (4.4)$$

waarin :

|          |                                                                                                                                                             |                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $w_s$    | : de valsnelheid van een deeltje                                                                                                                            | [m/s]               |
| $D$      | : doorsnede van het deeltje                                                                                                                                 | [m]                 |
| $g$      | : valversnelling                                                                                                                                            | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $\Delta$ | : $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$ , met $\rho_s$ = dichtheid van een deeltje [kg/m <sup>3</sup> ],<br>$\rho_w$ = dichtheid van water [kg/m <sup>3</sup> ], | [-]                 |
| $\nu$    | : viscositeit van het water                                                                                                                                 | [m <sup>2</sup> /s] |

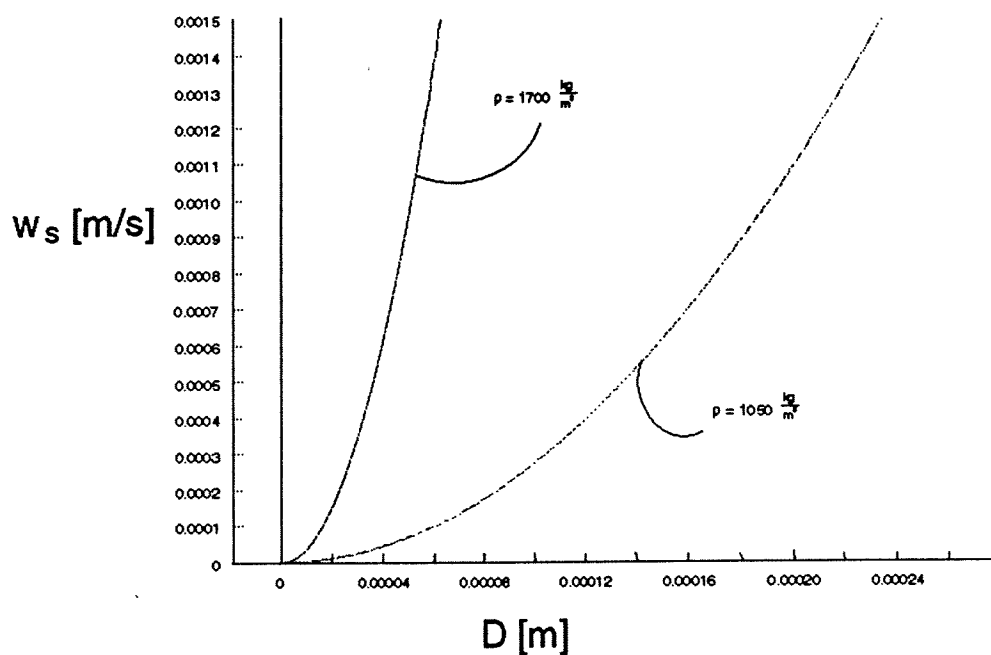


fig. 4.9 : grafiek van de wet van Stokes

De grafieken van de enkele deeltjes en de klonten zijn gegeven in figuur 4.9. De gegevens die aangenomen zijn, voor de dichtheid en doorsnede van de deeltjes, en de uitkomsten staan in de volgende tabel.

|                                   | enkel kleideeltje   | geklonterde kleideeltjes |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------|
| D [m]                             | $2 \cdot 10^{-6}$   | $2 \cdot 10^{-4}$        |
| g [m/s <sup>2</sup> ]             | 9.81                | 9.81                     |
| $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]     | 1700                | 1050                     |
| $\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]     | 1000                | 1000                     |
| $\Delta$                          | 0.7                 | 0.05                     |
| $\nu$ (20° C) [m <sup>2</sup> /s] | $10^{-6}$           | $10^{-6}$                |
| $w_s$ [m/s]                       | $1.5 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-3}$        |

De dichtheid van de enkele deeltjes is groter dan die van de klonten, omdat de klont een open structuur heeft en daardoor voor het grootste deel uit water bestaat. Deze open structuur heeft als gevolg dat de klont een hoge porositeit heeft en dus een lagere

dichtheid dan een enkel deeltje. Veronderstelt is dat de porositeit van een klont 0.9 is. Deze berekening geeft aan dat door het klonteren de valsnelheid flink toeneemt. Het gevolg is dat een deeltje in 17 minuten van het wateroppervlak op de bodem van de natte strook (bij een diepte van de natte strook van 1 meter) valt.

#### 4.4.3. Transportproces van het sediment in het water

Daar zwevende sediment als een quasi-opgeloste stof wordt beschouwd kan het sediment-transport worden beschreven met :

$$S = Q * c \quad (4.5)$$

waarin :

|   |                                               |                      |
|---|-----------------------------------------------|----------------------|
| S | : het transport van sediment door de opening  | [mg/s]               |
| Q | : het debiet van het uit- en instromend water | [m <sup>3</sup> /s]  |
| c | : de concentratie van sediment in het water   | [mg/m <sup>3</sup> ] |

Een belangrijk aspect van het probleem van sedimentatie in natte stroken is het stromingsproces van water, van en naar de natte strook.

Het stromingsproces is als volgt :

- bij een scheepspassage stroomt water uit de natte strook;
- als het schip is gepasseerd stroomt het water weer de natte strook in om het uitgestroomde water te vervangen;
- na de scheepspassage staat het water in het kanaal en de natte strook weer stil.

Voor het transportproces van het sediment is ook van belang dat het water dat uit de natte strook stroomt minder sediment bevat dan het water, dat vanuit het kanaal, de natte strook instroomt.

Dit heeft te maken met het feit dat tussen scheepspassages door het sediment in de natte strook grotendeels neerslaat vanwege de hoge valsnelheid ten gevolge van het klonteren (zie 4.4.2).

Het sediment in het kanaal komt in suspensie door de opwoeling veroorzaakt door het passerende schip.

De conclusie die uit het voorgaande getrokken wordt is dat, in de huidige situatie bij een scheepspassage, het transport van sediment uit de natte strook kleiner is dan het transport van sediment de natte strook in.

#### 4.5. Globale berekening van de sedimentatie in de natte stroken

##### 4.5.1. Inleiding

Deze paragraaf beschrijft twee hypothesen voor de sedimentatie in de natte strook, met als

doel inzicht te krijgen in de hoeveelheid en plaats van de accumulatie van sediment. De hypothesen zijn bepaald voor twee extreme gevallen die in de praktijk voor komen. Deze extreme gevallen zijn :

- een poreuze vooroever (instroom van water door de gehele vooroever);
- één opening in de vooroever (instroom van water in een klein gedeelte van de natte strook);

Bij de poreuze vooroever is een gelijk verdeelde sedimentatie geconstateerd (Oekologisch Adviesbureau Moller Pillot, 1994) terwijl bij de enkele opening in de vooroever een slibrug aanwezig is (RWS Dienstkring Twenthekanalen, 1995).

Als eerste worden de gezamenlijk parameters die de twee hypothesen gebruiken beschreven. Hierna worden de hypothesen afzonderlijk behandeld (4.5.2.). De uitkomsten van de berekeningen worden vervolgens gegeven en getoetst aan de gemeten en geobserveerde situaties (4.5.3). Onderzocht en berekend zijn het Noordhollandsch kanaal, Kanaal Wessum-Nederweert, het Wilhelmina kanaal en het zijkanaal van de Twenthekanalen. De berekeningen zijn te vinden in de bijlagen.

#### 4.5.2. Beschrijving van de berekeningsmethoden

Een aantal parameters die voor beide hypothesen gebruikt worden zijn :

- de diepte, breedte en lengte van de plasberm (in m.); hiermee wordt het volume, dwarsdoorsnede en het oppervlakte van de plasberm berekend (resp. in  $m^3$  en  $m^2$ );
- de concentratie zwevend sediment in het kanaal (in  $mg/l$ ); dit is gemeten;
- het aantal scheepspassages per jaar; deze parameter is nodig om te bepalen hoeveel de sliblaag per jaar toeneemt;

De aannames die gedaan zijn voor de berekeningsmethoden zijn dat :

- al het instromend sediment in de plasberm neerslaat (zie paragraaf 4.4).
- de waterspiegeldaling en de verversingsgraad, het percentage van water uit de natte strook dat vervangen wordt met water uit het kanaal, voor elke scheepspassage gelijk zijn;
- de dichtheid van het neergeslagen sediment (Massie, 1986) ;
- het organisch slib niet is meegenomen in het bepalen van de sliblaag dikte

De verschillen tussen de berekeningen worden gevonden in het gebied van neerslag van het sediment en de methode van berekening van de hoeveelheid instromend water.

## Methode A)

De hypothese van methode A) is dat het sediment dat in de plasberm neerslaat, over het gehele oppervlak van de plasberm wordt verdeeld. Hierbij ervan wordt uitgegaan dat een percentage van het volume water van de plasberm per scheepspassage wordt vervangen. Dit wordt de verversingsgraad genoemd. De verwachting is dat deze hypothese een goede benadering is voor de sedimentatie in een natte strook met een poreuze vooroever

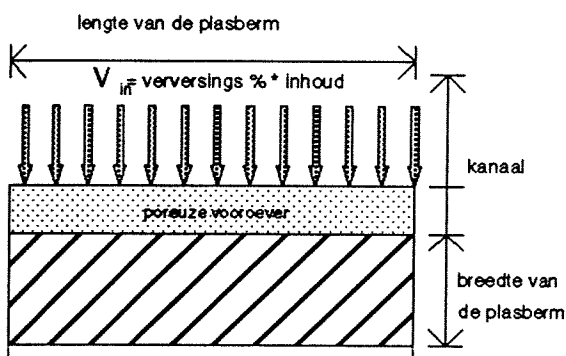


fig. 4.10 : Schematisatie methode A

Het berekeningsproces is als volgt :

- het volume van de plasberm wordt bepaald;
- de verversingsgraad wordt vermenigvuldigd met het volume water van de plasberm, het resultaat is het volume water dat per scheepspassage de natte strook binnenstroomt;
- de hoeveelheid zwevend sediment in het kanaal wordt afgelezen uit metingen;
- de hoeveelheid zwevend sediment in het kanaal wordt vermenigvuldigd met het volume water dat per scheepspassage de natte strook instroomt. Het resultaat is de hoeveelheid sediment dat per passage de natte strook binnen stroomt;
- met de aangenomen dichtheid, voor de gesedimenteerde sliblaag, wordt het volume, per scheepspassage, aan instromend sediment bepaald;
- door het volume aan instromend sediment te delen door het totale oppervlak van de plasberm wordt een dikte, van de gesedimenteerde sliblaag dat per scheepspassage ontstaat, bepaald;
- de berekende sliblaag wordt vermenigvuldigd met het aantal scheepspassages per jaar. Het resultaat is de gesedimenteerde sliblaag dikte per jaar;

## Methode B)

De hypothese van methode B) is dat slechts een deel van de natte strook wordt beïnvloed door wateruitwisseling, tussen plasberm en kanaal, ten gevolge van een scheepspassage. Dit wordt ook wel een propstroom genoemd. Bij een propstroom wordt het uit de plasberm stromend volume water beschouwd als een prop. De 'prop' wordt bij uitstroming uit de plasberm 'gezogen' en bij instroming wordt een andere 'prop' de plasberm 'ingeduwd'. De 'prop' heeft de afmetingen van de dwarsdoorsnede van de plasberm ( $m^2$ ) en een invloeds lengte (m). Het gevolg van deze beschouwing is dat al het in de natte strook stromend sediment neerslaat in dit invloedsgebied.

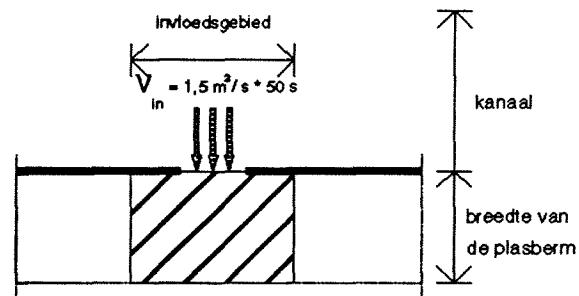


fig. 4.11 : Schematisatie methode B

Het berekeningsproces is de volgende :

- het totaal in de plasberm stromend volume water wordt bepaald met behulp van een debiet;
- de invloeds lengte van het instromend volume wordt bepaald. Dit is te berekenen door het in de plasberm stromend volume te delen door de dwarsdoorsnede van de plasberm (zie fig. 4.11);
- de bodemoppervlakte die, door het in de plasberm stromend volume wordt beïnvloed, wordt bepaald door de invloeds lengte te vermenigvuldigen met de breedte van de plasberm;
- de hoeveelheid, per scheepspassage, in de plasberm stromend sediment wordt bepaald door het in de plasberm stromend volume water te vermenigvuldigen met de concentratie van het in het kanaal aanwezige zwevend sediment;
- met de aangenomen dichtheid, van de gesedimenteerde sliblaag, wordt het volume, per scheepspassage, aan instromend sediment bepaald;
- door het volume aan instromend sediment te delen door het oppervlak van het invloedsgebied wordt een dikte van de gesedimenteerde sliblaag die per scheepspassage ontstaat bepaald;
- de berekende sliblaag wordt vermenigvuldigd met het aantal scheepspassage per jaar. Het resultaat is de dikte van de gesedimenteerde sliblaag per jaar;

#### 4.5.3. Vergelijking van de berekeningsresultaten en de gemeten waarden

Deze paragraaf beschrijft de toetsing van de berekening aan gemeten waarden en observaties. Daar de berekening geldt voor twee extreme gevallen, poreuze vooroever en één opening, worden eerst de natte stroken behandeld die hieraan voldoen. Deze natte stroken zijn aangelegd in het kanaal Wessem-Nederweert (de natte stroken met de poreuze vooroever) en het zijkanaal Twenthe-kanalen (enkele opening). De sliblagen in deze natte stroken zijn gemeten en geobserveerd. In kanaal Wessem-Nederweert is een accumulatie

van slib gemeten over de gehele natte strook terwijl in het zijkanaal Twenthe-kanalen een slibrug is geobserveerd.

De andere natte stroken zijn niet direct in te delen in een van deze vooroevers. Dit maakt dat de toetsing, van de berekening aan de gemeten waarde, van deze natte stroken moeilijker is.

#### **Beschrijving : Poreuze vooroever : Kanaal Wessem-Nederweert**

Het kanaal Wessem-Nederweert is een druk bevaren kanaal. Per jaar passeren 17600 schepen het kanaal. In de toekomst wil men het kanaal toegankelijk maken voor klasse IV schepen. De hoeveelheid zwevend sediment ligt tussen de 15 mg/l en 25 mg/l (Oekologisch Adviesbureau Moller Pillot, 1994). In 1991 zijn aan de oostelijke oever van het kanaal op het traject tussen de Spoorbrug en Kelperbrug vier natte stroken aangelegd. Deze natte stroken hebben een vooroever van breuksteen, waarbij twee natte stroken zijn uitgevoerd met een poreuze vooroever en twee met een waterdichte breukstenen vooroever met buizen voor de wateruitwisseling.

Als eerste wordt het extreme geval van de natte stroken met een poreuze vooroever behandeld. Deze zijn bijna volledig dichtgeslibd.

Bij een scheepspassage is er een grote uitwisseling van water door de breukstenen vooroever heen. Deze natte stroken hebben een verversingsgraad van 20 %.

Daar het hier een poreuze vooroever betreft wordt methode A toegepast.

#### **Beschrijving : Enkele opening : Zijkanaal Twenthe-kanalen**

Het zijkanaal van de Twenthe-kanalen is in de jaren dertig aangelegd. Tegenwoordig is het een kanaal dat geschikt is voor klasse IV vaart en beperkt klasse V. Per jaar passeren 5000 schepen het kanaal (Rijkswaterstaat Dienstkring Twenthekanalen, 1995). Gegevens over zwevend sediment in het kanaalwater is niet aanwezig. Uit een vergelijking met andere kanalen is aangenomen dat het rond de 15 mg/l is. In 1989 is over een lengte van 4 kilometer een natte strook aangelegd.

Deze natte strook heeft een vooroever van damwanden met openingen in de bovenkant. De openingen liggen 200 meter van elkaar verwijderd. Naast de openingen zijn slibruggen geconstateerd. Deze slibruggen strekken zich uit tot tien meter aan beide kanten van de openingen. Deze natte strook heeft een vooroever met een enkele opening en wordt berekend m.b.v. methode B.

#### **Berekeningsresultaten**

##### **Resultaten : Poreuze vooroever : Kanaal Wessem-Nederweert**

De volledige berekening is te vinden in bijlage I.

Voor de natte strook, met de poreuze vooroever, in het kanaal Wessem-Nederweert blijkt dat met berekening m.b.v. methode A (concentratie zwevend sediment is 25 mg/l) een accumulatie van slib ontstaat van 4.4 cm per jaar. De gemeten waarde is 7.5 cm per jaar. Dit komt redelijk goed overeen.

**Resultaten : Enkele opening : Zijkanaal Twenthe-kanalen**

Uit de berekening van de natte strook in het zijkanaal van de Twenthe-kanalen, m.b.v. methode B, komt een invloedslengte van de stroming van 30 m en een instromend volume sediment van 3.75 m<sup>3</sup>. De inhoud van de slibrug, die tijdens een bezoek is geobserveerd, is berekend.

Van de volgende afmetingen van de geobserveerde slibrug zijn :

- Hoogte slibrug : 0.95 m;
- Breedte van de basis : 2.2 m;
- Lengte van 10 m (zie fig. 4.12).

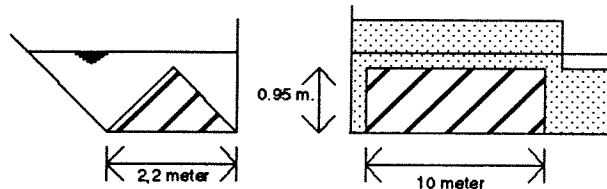


fig. 4.12 : de slibrug

De slibrug heeft met deze afmetingen een volume van 10.45 m<sup>3</sup>. Daar aan weerskanten van de opening een slibrug aanwezig is de inhoudt van het totaal ingestroomd sediment 20.9 m<sup>3</sup>.

Dit wordt gedeeld door de berekende waarde (3.75 m<sup>3</sup> instromend sediment per jaar zie bijlage II) :

$$20.9 / 3.75 = 5.6 \text{ jaar.}$$

Dit komt redelijk overeen met het aantal jaar dat de plasberm ligt, namelijk 6 jaar.

De overige bezochte natte stroken zijn tussenvormen.

**Beschrijvingen***Vooroever met buizen : Kanaal Wessem-Nederweert*

In de twee natte stroken met buizen door de breukstenen vooroever, zijn de buizen met een afstand van elkaar van 25 meter gelegd. Uit observatie is gebleken dat de wateruitwisseling niet alleen door de buizen plaatsvindt, maar ook duidelijk door de vooroever. De verversingsgraad in deze stroken is bepaald op 10 %. Deze plasberm is een tussenvorm van methode A en methode B. Tussen de buizen heeft zich een vorm van een slibrug ontwikkeld. Daar stroming door de stortstenen vooroever is geconstateerd is het moeilijk om te bepalen of het volume van deze slibrug over een komt met de berekende hoeveelheid instromend sediment. Het geeft echter wel aan dat een tendens van slibrugvorming aanwezig is.

*Noordhollandsch kanaal*

Het Noordhollandsch kanaal is een klasse IV vaarweg en telt een 7000 tal scheepspassages per jaar. De hoeveelheid zwevend materiaal blijkt uit onderzoek 10 mg/l te zijn (Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, 1995). In 1992 en 1993 zijn in de noordelijke oever van het kanaal op het traject tussen Kogerpolderbrug en Akersloot zes natte stroken aangelegd.

De natte stroken bestaan uit een vooroever van damwanden met openingen aan de bovenzijde. De afstanden tussen de openingen zijn 25 meter. Naast deze openingen zijn onder in de damwanden slibgaten gemaakt. Deze natte stroken zijn vervolgens nauwkeurig geobserveerd door Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw, 1995).

Met behulp van een rekenmodel PLONS is de verversingsgraad berekend. Deze berekening leverde een verversingsgraad tussen de 13 % en de 16 %. Dit is weer afhankelijk van het type schip dat passeert. De gemiddelde verversingsgraad van de natte stroken ligt op 15 % per scheepspassage. Met deze waarde voor de verversingsgraad wordt de eerste berekening uitgevoerd.

In de plasberm zijn geen duidelijke slibruggen te onderscheiden. De natte strook heeft geen poreuze vooroever en wel openingen die invloed op elkaar hebben. Zowel methode A als methode B voldoen niet volledig. Deze natte strook is een tussenvorm.

### *Het Wilhelminakanaal*

In de jaren twintig werd het Wilhelminakanaal aangelegd. In 1978 is een kanaalverbreding uitgevoerd om het kanaal toegankelijk te maken voor klasse IV en beperkt klasse V scheepvaart. Per jaar passeren 4500 schepen door het kanaal. De hoeveelheid zwevend sediment in het kanaal ligt tussen de 10 mg/l en de 15 mg/l (Rijkswaterstaat Directie Noord-Brabant, 1995). Nabij Dongen zijn zeven natte stroken aangelegd.

Deze natte stroken hebben een vooroever van damwanden met aan de bovenkant openingen met een afstand tussen de openingen van 20 meter. De verversing is met behulp van PLONS bepaald op 13.4 %. De plasberm vertoont geen duidelijke slibrug. Deze natte stroken zijn, even als de natte stroken in het Noordhollandsch kanaal, tussenvormen.

### **Resultaten**

Voor de overige natte stroken zijn eveneens de berekeningen gemaakt. De resultaten staan in de volgende tabel beschreven. De volledige berekeningen zijn te vinden in bijlage II.

|                          |            | Methode A) | Methode B) | Gemeten |
|--------------------------|------------|------------|------------|---------|
| Noordhollandsch kanaal   |            | 1.5 cm     | 5.6 cm     | 2.5 cm  |
| Kanaal Wessem-Nederweert | met buizen | 4.4 cm     | 8.8 cm     | 5.0 cm  |
| Wilhelmina kanaal        |            | 1.75       | 3.75 cm    | 3.5 cm  |

Uit de berekening is af te leiden dat de hypothese dat voor een poreuze vooroever methode A en voor een vooroever met een enkele opening methode B voldoet correct. Verder lijkt de aanname dat het in de plasberm stromend sediment daar neerslaat eveneens goed.

Voor sommige natte stroken zijn de verschillen tussen gemeten en berekend zeer klein.

## Hoofdstuk 5      Ontwikkeling van alternatieven

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden alternatieven aangedragen die de huidige situatie dienen te verbeteren. Om een beeld te krijgen van het probleem is daarom in de voorgaande hoofdstukken een procesanalyse gedaan.

De doelstelling voor deze verbetering luidt :

‘Het ontwerp moet overmatige sedimentatie in de natte strook, voorkomen of verminderen.’

De volgende stap is het bepalen van de randvoorwaarden waaraan de alternatieven moeten voldoen. Deze worden beschreven in paragraaf 5.2.

Vervolgens worden met behulp van de transportformule verschillende oplossingsrichtingen beschreven en afgewogen. Hierna worden met behulp van deze oplossingsrichtingen verschillende alternatieven ontwikkeld en beschreven in paragraaf 5.3.

### 5.2. Randvoorwaarden

#### 5.2.1. *Ecologische randvoorwaarden*

De natte strook dient een belangrijke rol in het ecosysteem van het kanaal te krijgen. De flora en fauna moeten zich in de natte strook kunnen vestigen en voortplanten, wat leidt tot een aantal randvoorwaarden. Deze zijn :

- hydraulische rust; dit houdt in dat te sterke stroomsnelheden en golfslag in de natte strook niet gewenst zijn. Bovendien mag de maximum stroomsnelheid in de natte strook, waarbij planten kunnen wortelen in de bodem van de plasberm, niet overschreden worden. Deze maximale golfbelasting en stroomsnelheid worden in dit rapport niet tot in detail beschreven. De waarden van de toegestane belastingen zijn laag. Ter indicatie : voor de maximale stroomsnelheid waarbij een plant zich nog kan vestigen wordt als vuistregel 0.2 m/s aangehouden.

Dit geeft aan dat de toegestane golf- en stromingsbelastingen in de natte strook zeer klein zijn;

- dat slechts een deel van de plasberm begroeid mag worden. Dit heeft als doel de overwoekering, en dus de verdwijning van de paaiplaats voor vissen, van de natte strook te voorkomen;

- dat zuurstofarm water in de natte strook voorkomen dient te worden, in verband met ziekten en accumulatie van algen. Een verversing van het water in de natte strook wordt geëist.

- dat verstoring van de natte strook, door onderhoudswerkzaamheden, zo min mogelijk is.

#### *5.2.2. Constructieve randvoorwaarden*

Daar het kanaal voornamelijk een verbinding is voor schepen wordt aan de natte strook een aantal randvoorwaarden gesteld die te maken hebben met de stabiliteit van de oever. Deze randvoorwaarden zijn dat :

- het kanaalprofiel in stand blijft. Hiermee wordt bedoeld dat de oevers niet instorten waardoor de scheepvaart wordt belemmerd. Deze eis geldt voor de vooroever;
- de achterliggende oever tegen erosie ten gevolge van golf en stromingsbelastingen van een passerend schip wordt beschermd;
- de scheepvaart niet wordt gehinderd door de aanwezigheid van de natte strook;

#### *5.2.3. Onderhoudsrandvoorwaarden*

Vanuit het oogpunt van onderhoud gelden de volgende randvoorwaarden :

- het onderhoud moet zoveel mogelijk beperkt blijven, want hoe meer onderhoud des te hoger de kosten. Deze randvoorwaarde is op te splitsen in de volgende punten. Deze zijn dat:
  - de onderhoudswerkzaamheden zo eenvoudig mogelijk moeten zijn;
  - zo min mogelijk vervuild sediment hoeft te worden gebaggerd en geborgen;
- bij onderhoud moet de schade aan de natuur in de natte strook zo min mogelijk zijn;

### *5.3. Beschrijving van de alternatieven*

#### *5.3.1. Inleiding*

Om tot een goede oplossing te komen is een systematiek in het ontwerpproces noodzakelijk. Deze systematiek bestaat uit het bepalen van de mogelijke oplossingsrichtingen (5.3.2).

De volgende stap is, met behulp van de oplossingsrichtingen, alternatieven te ontwikkelen die vervolgens, aan de hand van de eerder beschreven aspecten voor het transportproces, op haalbaarheid worden onderzocht (5.3.3).

Als laatste worden de haalbare alternatieven beschreven (5.3.4).

#### *5.3.2. Oplossingsrichtingen*

Het proces van sedimenttransport is in paragraaf 4.4 beschreven met vergelijking 4.3 :

$$Sedimentatie = Instromend\ sediment - Uitstromend\ sediment \quad (4.3)$$

Deze vergelijking maakt duidelijk dat twee oplossingen de sedimentatie doen afnemen. Deze twee oplossingen zijn :

- minder sediment in de natte strook laten stromen;
- meer sediment uit de natte strook laten stromen;

Een derde oplossing is, daar volledig voorkomen van sedimentatie niet aan de orde is, om het sediment in een beperkt gebied te laten neerslaan waar het vervolgens beter te verwijderen is.

### 5.3.3. Oplossingen

Het sedimenttransport wordt beschreven in vergelijking (4.5) :

$$S = Q * c \quad (4.5)$$

Uit deze vergelijking blijkt dat, om het sedimenttransport te verminderen, drie oplossingsrichtingen te vinden zijn. Deze zijn :

- het uitstromende, en daarbij instromende, volume verkleinen ;
- de instromende concentratie verkleinen ;
- de uitstromende concentratie vergroten.

De vierde oplossingsrichting is reeds genoemd en is het in een beperkt gebied neer laten slaan van sediment.

#### *Oplossingsrichting 1 : Het uit- en instromend volume verkleinen*

Het volume dat vervangen wordt, wordt uitgedrukt in een percentage van het volume van de natte strook. Dit wordt de verversingsgraad genoemd. De verkleining van de verversingsgraad is te realiseren door :

- de openingen in de vooroever kleiner te maken;
- de openingen met een grotere afstand van elkaar te plaatsen;

Deze oplossingsrichting levert dus twee oplossingen.

#### **Oplossing 1<sup>a</sup> :** *De openingen in de vooroever kleiner te maken.*

Door de openingen te minimaliseren wordt volume uit- en dus instromend water verkleind (zie vergelijking (4.2)).

Deze oplossing heeft als beperking dat de openingen voor fauna geen belemmering moeten vormen om van kanaal naar de natte strook te komen en andersom. Bij te kleine openingen zullen deze ook verstopt kunnen raken met drijven vuil. Als minimale afmeting

wordt genomen 20 cm bij 20 cm.

**Oplossing 1<sup>b</sup> :** *De openingen met een grotere afstand van elkaar te plaatsen.*

Door de openingen verder uit elkaar te plaatsen wordt de verversingsgraad, en dus het uit- en instromend volume water en sediment, van de natte strook verkleind.

Deze oplossingsrichting is afhankelijk van de minimale verversingsgraad. Deze verversingsgraad is nodig om te voorkomen dat het water zuurstofarm wordt en dat daardoor de flora en fauna in de natte strook afsterven. Over de benodigde verversingsgraad is zeer weinig bekend.

Deze oplossingen vermindert de sedimentatie maar voorkomt deze niet. De dichtslibbingstijd is wel langer geworden.

**Oplossingsrichting 2 :** *De uitstromende concentratie vergroten*

De uitstromende concentratie van sediment in het water vergroten kan op drie manieren. Deze zijn :

- de schepen zeer snel achter elkaar de natte strook te laten passeren. Hierdoor krijgt het sediment niet de kans volledig neer te slaan;
- de valsnelheid van het zwevend sediment verkleinen of klein houden zodat bij een volgende scheepspassage het sediment weer uitstroomt. Dit is te realiseren door plantengroei om en nabij de opening te vermijden en daardoor produktie van de draadstructuren te voorkomen (zie paragraaf 4.4.3);
- het neergeslagen sediment loswoelen en zo de concentratie van sediment in het water van de natte strook te vergroten.

**Oplossing 2<sup>a</sup> :** *Vaarfrequentie op het kanaal vergroten*

Het vergroten van de  $c$  van het uitstromende water heeft tot gevolg dat minder sediment neerslaat in de natte strook. Dit is mogelijk door de schepen snel na elkaar langs de natte strook te laten varen en daardoor een deel van het sediment dat, bij een vorige scheepspassage de natte strook is binnengestroomd, weer uit te laten stromen.

Deze oplossing is niet haalbaar vanwege de volgende punten :

- de scheepvaart niet in een bepaalde vaarfrequentie is te dwingen
- de kanalen vaak niet een volledig etmaal bevaarbaar zijn vanwege sluizen die van acht uur 's ochtends tot zeven uur 's avonds bediend worden. Het gevolg is dat 's nacht het sediment neerslaat.

**Oplossing 2<sup>b</sup> :** *Valsnelheid van de deeltjes verkleinen*

Door het klonteren van de klei- en siltdeeltjes te voorkomen, wordt de vergroting van de valsnelheid van de sedimentdeeltjes tegen gegaan. Dit is te realiseren door in plaats van de natte strook, om en nabij de opening, in de grond te graven, maar deze te bekleden met geotextiel of als bak uit te

voeren waardoor planten zich niet in de nabijheid van de opening kunnen vestigen. Hierdoor zal in het water om en nabij de opening minder draadstructuren in het water zweven waardoor het klonteren wordt verminderd.

Deze oplossing zal zeker de sedimentatie verminderen. Onderzocht moet wel worden of, door de kleinere valsnelheid, het sediment niet verder de natte strook wordt in getransporteerd.

De voorkeur van bekleding ten aanzien van kosten zal uitgaan naar een gespannen geotextiel. Geotextiel is echter kwetsbaar en zal bij eventuele onderhoudswerkzaamheden kapot gescheurd worden. Hiervoor is een betonnen bekleding minder gevoelig.

De vraag is, bij deze oplossing, of door de aanpassing in het beoogde gebied geen draden meer aanwezig zijn. De natte strook is, afgezien van het beklede deel, nog zeer biologisch actief met als gevolg dat de afwezigheid van draden in het 'dradenvrije' gebied niet gegarandeerd kan worden.

#### **Oplossing 2<sup>c</sup> : Deeltjes van de bodem loswoelen**

Door de uitstroomopening aan de onderkant van de vooroever te plaatsen is de mogelijkheid dat door stroming een gedeelte van het reeds neergeslagen sediment wordt losgewoeld, en door de opening uitstroomt, aanwezig.

Om tot een schatting te komen of het reeds neergeslagen sediment in beweging komt is met behulp van het Hjulstrom's diagram (zie fig 4.2) aangenomen dat het neergeslagen sediment niet volledig is geconsolideerd. Het grijze gebied in het diagram stelt de kritische snelheden van deeltjes, die gedeeltelijk geconsolideerd zijn, voor. Verondersteld wordt dat voor een kleideeltje van 2  $\mu\text{m}$  de kritische stroomsnelheid tussen de 50 cm/s en de 200 cm/s ligt.

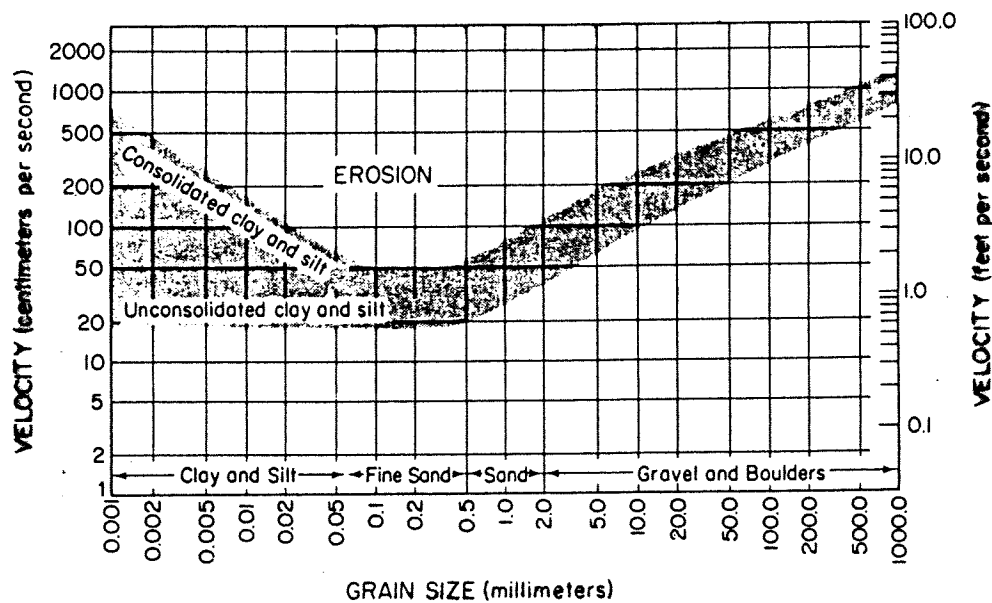


fig. 5.1 : Hjulstrom's diagram waarin de relatie tussen snelheid, korrelgrootte en beweging van deeltjes. (Volgens de aanpassingen van Sundborg (1956))

Om te toetsen of deze oplossing haalbaar is wordt de stroomsnelheid in de opening bepaald. Is deze kleiner dan de vereiste kritische snelheid dan is deze oplossing niet haalbaar (daar in de opening een grotere stroomsnelheid heerst dan in de natte strook).

Voor de stroomsnelheid in de opening geldt de volgende vergelijking (5.1) :

$$V_{\text{opening}} = \sqrt{2g\Delta z} \quad (5.1)$$

waarin :

|                      |                                                   |                     |
|----------------------|---------------------------------------------------|---------------------|
| $V_{\text{opening}}$ | : de stroomsnelheid van het water door de opening | [m/s]               |
| $g$                  | : de valversnelling                               | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $\Delta z$           | : de waterspiegeldaling in het kanaal             | [m]                 |

Voor  $\Delta z$  wordt een waterspiegeldaling genomen van 30 cm. Dit levert een snelheid van het uitstromende water van 2.4 m/s op. Dit ligt boven de vereiste kritische snelheid met als gevolg dat nader gekeken wordt naar de stroomsnelheid van het water in de natte strook.

Deze stroomsnelheid van het water is afhankelijk van het debiet dat bij een scheepspassage door de opening uit de natte strook stroomt. Het debiet door een opening wordt beschreven met behulp van vergelijking (5.2).

$$Q = \mu A_{\text{opening}} V_{\text{opening}} \quad (5.2)$$

waarin :

|                      |                                         |           |
|----------------------|-----------------------------------------|-----------|
| $Q$                  | : het door de opening stromend debiet   | $[m^3/s]$ |
| $\mu$                | : de contractiecoëfficiënt              | $[-]$     |
| $A_{\text{opening}}$ | : het stromingsoppervlak van de opening | $[m^2]$   |

De contractie van het water dat door de opening stroomt zorgt voor een kleiner doorstroom oppervlak en dus voor een kleiner debiet.

De stroomsnelheid in de natte strook is verdeeld over een bepaald gebied. Dit gebied is van belang omdat hoe groter het gebied waar over de stroming verdeeld wordt des te kleiner de stroomsnelheid.

In figuur 5.2 wordt een indicatie gegeven van hoe de verdeling wordt geschematiseerd.

Aan de hand van deze schetsen worden de volgende vergelijkingen voor de stroomsnelheid in de natte strook opgesteld.

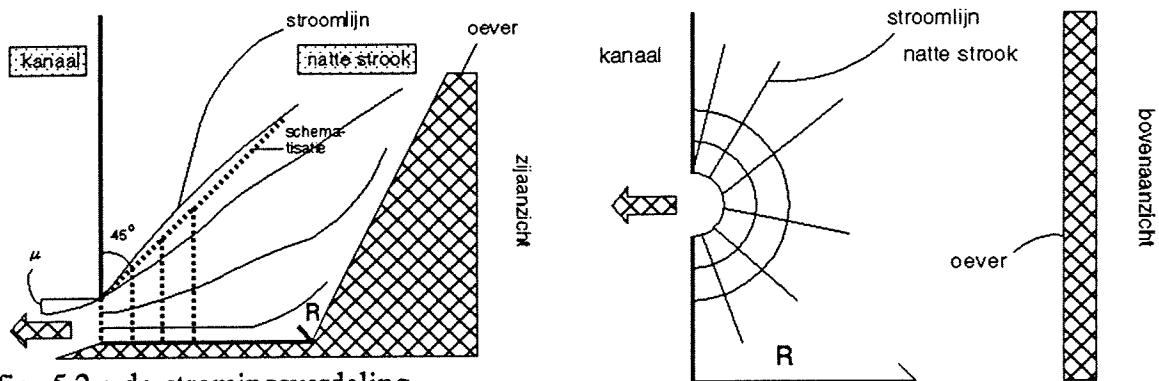


fig. 5.2 : de stromingsverdeling

$$V_{\text{natte strook}} = \frac{Q}{A} \quad \text{met} \quad A = \pi R^2$$

De stroomsnelheid wordt als functie van de afstand van de opening (5.2) in de grafiek (zie figuur 5.2) uitgezet. Hierin zijn de volgende waarden genomen :

$$\begin{aligned} \mu &= 0.6 \\ A_{\text{opening}} &= 0.2 * 0.2 = 0.04 \text{ m}^2 \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\ \Delta z &= 0.3 \text{ m} \end{aligned}$$

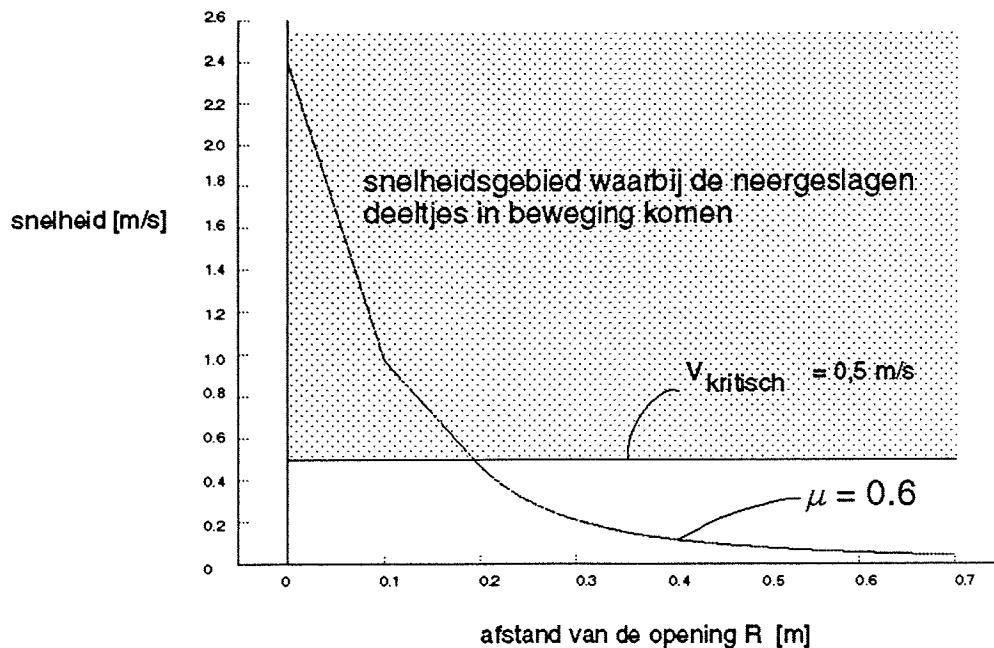


fig. 5.3 : verloop van de snelheid als functie van de afstand van de opening

Het is duidelijk te zien dat de kritische snelheid in een zeer beperkt gebied achter de opening wordt bereikt. Verder in de natte strook wordt deze niet gehaald.

Deze berekening houdt geen rekening met het effect dat de vegetatie in de natte strook op de stroming en de kritische stroomsnelheid van het neergeslagen sediment heeft.

### *Oplossingsrichting 3 : De instromende concentratie verkleinen*

Het verkleinen van de concentratie van het instromende water geeft de volgende oplossingen :

- water met een zo klein mogelijk concentratie aan zwevend sediment inlaten stromen. Dit is mogelijk door de verdeling van de concentratie van sediment over de verticaal te bekijken en vervolgens de opening daar te plaatsen waar de concentratie het laagst is;
- het water voor een scheepspassage of een periode na een scheepspassage laten instromen. Hierdoor stroomt water zonder sediment de natte strook binnen.

### **Oplossing 3<sup>a</sup> : Sediment-arme water inlaten stromen**

Door rekening te houden met de verdeling van de concentratie zwevend sediment in de verticaal in het kanaalwater wordt de instroomopening op de hoogte geplaatst waar deze concentratie het kleinst is. De instroomopening

worden gecreëerd door deze te voorzien van een klep. De uitstroom opening wordt eveneens met een klep voorzien. Hierdoor wordt de stroming geconcentreerd door de daarvoor bedoelde openingen.

Deze oplossing is moeilijk te toetsen omdat de verticale verdeling van de sedimentconcentratie in het kanaalwater niet makkelijk te bepalen daar de sedimentconcentratie in het kanaalwater afhankelijk is van de opwoeling ten gevolge van de waterbewegingen veroorzaakt door een passerend schip. Deze waterbewegingen zijn turbulent met als gevolg dat de verdeling over de verticaal grillig is (zie fig. 5.4).

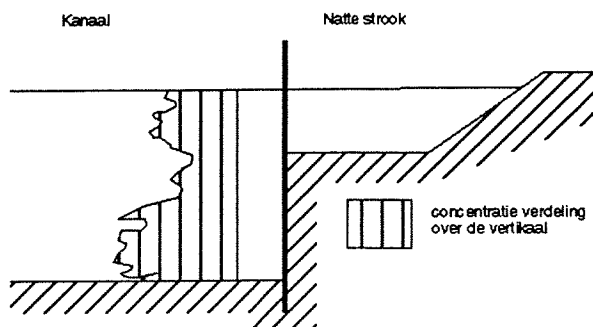


fig. 5.4 : concentratie verdeling

Een andere kanttekening moet worden geplaatst bij de toepassing van kleppen in de openingen. De kleppen vormen een kwetsbaar punt in de natte strook daar door drijvend vuil of vegetatie de kleppen vast kunnen komen te zitten. Daarnaast vormen de kleppen een extra obstakel voor fauna dat de natte strook in en uit wil.

### Oplossing 3<sup>b</sup> : De concentratie in het kanaal verkleinen

Het transport  $S$  kan ook verkleind worden door de concentratie  $c$  in het kanaal te verkleinen. Daar het sediment in suspensie raakt door een passerend schip moet gezocht worden naar een methode waarbij minder sediment in suspensie is als het water de natte strook instroomt. Een optie is om het sediment in het water, voordat het de natte strook instroomt, te laten neerslaan; dus het water als het schip reeds een periode weg is in te laten stromen.

Het water in laten stromen voordat het schip passeert is de tweede optie voor deze oplossing.

Beide oplossingen zijn zeer moeilijk tot niet uitvoerbaar. Het neer laten slaan van sediment gebeurt als geen schepen door het kanaal varen. Dit houdt in dat de waterstand in het kanaal tot rust is gekomen en dus de drijvende kracht achter de stroming weg is. Het water, voordat het schip passeert, in te laten stromen is eveneens vrijwel onmogelijk zonder hulpmiddelen, daar de waterstand voor een passage nog in rust verkeert. Dit houdt in dat geen verhang en dus geen stroming aanwezig is.

### Oplossingsrichting 4 : Het concentreren van sedimentophoping

De derde oplossingsrichting is, daar sedimentatie onvermijdelijk is, het sediment in een beperkt gebied te laten neerslaan.

Achter de opening wordt de natte strook dieper gemaakt waardoor de stroom snelheden

achter de openingen laag zijn en daardoor het sediment in de slibvang neerslaat.

### 5.3.5. Beschrijving van de alternatieven

Uit het voorgaande blijkt dat, met de huidige kennis, een drietal oplossingen overblijft om te onderzoeken. Deze oplossingen zijn :

- het verkleinen van de waterverversingsgraad door middel van het vergroten van de afstanden tussen de openingen;
- het verkleinen van de valsnelheid van de sedimentdeeltjes door het bekleden van de natte strook om en nabij de opening;
- het aanleggen van een slibvang achter de opening om zo de sedimentatie in een voor af gekozen gebied neer te laten slaan;

#### **Alternatief 1 :** *Het verkleinen van de waterverversingsgraad door middel van het vergroten van de afstand tussen de openingen*

Gebruik makend van oplossing 1<sup>b</sup> wordt geprobeerd de uit- en instroming van sediment te verkleinen. Dit alternatief is sterk afhankelijk van de minimale verversing van het water benodigd om zuurstofarm water in de natte strook tegen te gaan.

Deze minimale verversingsgraad, benodigd in de natte strook, is niet bekend, maar kan waarschijnlijk kleiner dan de verversingsgraad die voor de huidige natte stroken geldt (deze is bepaald, door berekeningen met PLONS, op 10 % verversing per scheepspassage. Aangenomen wordt, daar over de flora en fauna vereiste verversingsgraad niet veel bekend is, dat per dag het hele volume van de natte strook eenmaal wordt verversd (verversingsgraad = 100% per dag). Dit houdt in dat het, per dag, ingestroomde verse water gelijk is aan het volume van de natte strook. De verversingsgraad per schip is nu afhankelijk van de te verwachten hoeveelheid schepen die per dag de natte strook passeren. Hierbij wordt uitgegaan dat per schip al het uitstromende water wordt vervangen met vers kanaalwater en dat alle scheepspassages dezelfde verversingsgraad teweeg brengen.

Verder wordt uitgegaan van een gemiddelde waterspiegeldaling en een gemiddelde tijdsduur van deze waterspiegeldaling per scheepspassage. Hiervoor worden de volgende waarden genomen.

| verversingsgraad per dag (%) | gemiddelde waterspiegeldaling per passage (m) | gemiddelde tijdsduur van de waterspiegeldaling (s) |
|------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 100                          | 0.25                                          | 30                                                 |

In de volgende tabel wordt de verversingsgraad per schip bepaald, door de verversingsgraad per dag te delen door de hoeveelheid schepen die per dag de natte strook passeren.

| aantal schepen die de natte strook per dag passeren | benodigde verversingsgraad per schip |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 50                                                  | 2 %                                  |
| 100                                                 | 1 %                                  |
| 200                                                 | ½ %                                  |
| 1000                                                | 0.1 %                                |

Aan de hand van deze waarden wordt, met behulp van het stromingsmodel PLONS, bepaald hoe groot de afstanden tussen de openingen dienen te worden.

### Alternatief 2 : Het verkleinen van de valsnelheid van de sedimentdeeltjes

Door gebruik te maken van oplossing 2<sup>b</sup> wordt geprobeerd het klonteren van de klei- en siltdeeltjes tegen te gaan. Om de effectiviteit van deze ingreep te toetsen wordt voor verschillende valsnelheden doorerekend wat de grootte van de sliblaag wordt en hoe de concentratie van het sediment in het water in de natte strook zich heeft verspreid.

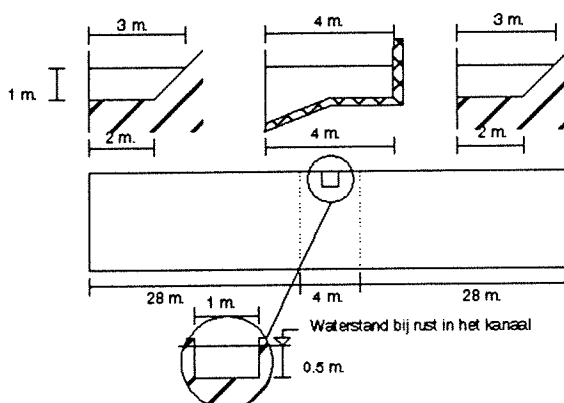
### Alternatief 3 : De slibvang

Bij dit alternatief wordt in het invloedsgebied van de opening een bak gegraven waarin het sediment neerslaat. Onderin de vooroever bij de slibvang kunnen spoelgaten worden geplaatst waar door het sediment kan worden uitgespoeld. In dat geval hoeft het verwijderde sediment niet te worden geborgen.

De afmetingen van de ontwikkelde natte strook met slibvang zijn aangegeven in figuur 5.5. De diepte van de natte strook verloop enigszins om zo de sedimentatie bij de vooroever te laten concentreren. Dit heeft een gunstig effect bij gebruik van eventuele spoelgaten.

De grotere dwarsdoorsnede van de natte strook zal het invloedsgebied ten opzichte een natte strook zonder slibvang verkleinen.

Bij het doorrekenen van dit alternatief wordt eveneens gerekend met verschillende valsnelheden voor de sedimentdeeltjes om te bepalen of een uitvoering van de slibvang met een bekleding gunstiger is.



## Hoofdstuk 6      Berekeningen

### 6.1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de haalbaarheid van de beschreven alternatieven bepaald aan de hand van berekeningen. Voor deze berekeningen zijn de modellen DUFLOW en PLONS gebruikt. Het moet duidelijk zijn dat het gebruik van een model, voor een berekening, slechts een hulpmiddel is, om inzicht te krijgen in het functioneren van een alternatief. Om de uitkomsten van een model op waarde te kunnen schatten dient als eerste het model te worden begrepen. Een beschrijving van de modellen, gedaan in 6.2 is daarbij van groot belang.

Voor het berekenen van de alternatieven, met behulp van een model, dient het model te worden afgeregeld. Deze afregeling gebeurt door middel van bestaande natte stroken waarvan voldoende gegevens over sedimentatie bekend zijn (6.3).

Na het afregelen is het mogelijk de alternatieven door te rekenen. Vervolgens kan aan de hand van de uitkomsten een oordeel worden gegeven over de alternatieven in vergelijking met de huidige natte stroken (6.4).

Als laatste is de keuze van een alternatief aan de orde (6.5).

### 6.2. Beschrijving van de modellen

#### 6.2.1. Inleiding

Om enigszins inzicht te krijgen in de modellen wordt als eerste de gebruikte vergelijkingen voor de stromingsmodellen beschreven (6.2.2) waarna de kwaliteitsmodule in DUFLOW wordt behandeld. Als laatste worden de beperkingen van deze ééndimensionale stromingsmodellen beschreven (6.2.4).

#### 6.2.2. Beschrijving van de vergelijkingen voor de stromingsmodellen

DUFLOW en PLONS zijn beide ééndimensionale stromingsmodellen die qua discretisatie van de bewegings- en balansvergelijking gelijk zijn.

Het verschil tussen de balansvergelijkingen (DUFLOW (6.2<sup>a</sup>) en PLONS (6.2<sup>b</sup>)) is, dat het debiet door de openingen in PLONS over een sectie wordt verdeeld (het verschil in waterstand wordt verdeeld over 2 waterstandspunten) en in DUFLOW in een waterstandspunt wordt geconcentreerd. In PLONS zijn de secties lang waardoor de waterstandsval in de natte strook over een grote lengte wordt verdeeld. De stroming om de opening wordt niet zo nauwkeurig berekend. In DUFLOW is het mogelijk de sectielengte te variëren, rond de openingen kan hier een meer nauwkeurige berekening worden gemaakt.

Bij DUFLOW is verder een kwaliteitsmodule toegevoegd aan de mogelijkheden. In deze paragraaf worden de formules, gebruikt voor de stromingsmodellen, besproken. Voor een volledige beschrijving wordt verwezen naar de handboeken voor DUFLOW en PLONS.

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta(\alpha Q v)}{\delta x} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + \frac{g |Q| Q}{C^2 AR} = 0 \quad (6.1)$$

$$B \frac{\delta H}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = 0 \quad (6.2^a)$$

$$B \frac{\delta H}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = \frac{q}{\Delta x} \quad (6.2^b)$$

Waarin :

|    |                                                      |                       |
|----|------------------------------------------------------|-----------------------|
| t  | : tijd                                               | [s]                   |
| x  | : plaats evenwijdig aan de kanaal-as                 | [m]                   |
| H  | : waterniveau in de natte strook                     | [m]                   |
| v  | : snelheid gemiddeld over het doorstroom oppervlak   | [m/s]                 |
| Q  | : debiet door een dwarsdoorsnede van de natte strook | [m <sup>3</sup> /s]   |
| q  | : debiet door de opening                             | [m <sup>3</sup> /s]   |
| Δx | : lengte stapgrootte (sectie)                        | [m]                   |
| R  | : hydraulische straal                                | [m]                   |
| A  | : doorstroom oppervlak                               | [m <sup>2</sup> ]     |
| B  | : bergende breedte                                   | [m]                   |
| g  | : versnelling van de zwaartekracht                   | [m/s <sup>2</sup> ]   |
| C  | : coëfficiënt van Chézy                              | [m <sup>1/2</sup> /s] |
| α  | : correctiefactor voor de snelheidsverdeling         | [-]                   |

Dit worden ook wel de één-dimensionale lange golf vergelijkingen genoemd. Deze vergelijkingen worden vervolgens gediscetiseerd met behulp van het vierpunts-impliciete Preismann-schema.

Daar DUFLOW en PLONS ééndimensionale stromingsmodellen zijn, houdt dat in dat over de diepte en breedte een gemiddelde parameter wordt genomen.

### 6.2.3. De kwaliteitsmodule in DUFLOW

De kwaliteitsmodule is toegevoegd om in het model DUFLOW te kunnen rekenen met het transport van chemische en biologische stoffen en sediment. De formules die gebruikt worden luiden :

$$\frac{\delta S}{\delta x} + \frac{\delta A_{tot} C}{\delta t} - P = 0 \quad (6.3)$$

en

$$S = Qc - A_s D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (6.4)$$

Waarin :

|                  |                                                            |                     |
|------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|
| S                | : transport van stof                                       | [mg/s]              |
| c                | : concentratie stof in het water                           | [g/m <sup>3</sup> ] |
| Q                | : debiet                                                   | [m <sup>3</sup> /s] |
| A <sub>s</sub>   | : doorstroom oppervlak                                     | [m <sup>2</sup> ]   |
| D                | : dispersie coëfficiënt                                    | [m <sup>2</sup> /s] |
| A <sub>tot</sub> | : totale oppervlak van de sectie                           | [m <sup>2</sup> ]   |
| x                | : x-coördinaat                                             | [m]                 |
| t                | : tijd                                                     | [s]                 |
| P                | : produktie van stof per eenheid van lengte van een sectie | [mg/(ms)]           |

In vergelijking (6.4) stelt  $Qc$  het advectief en  $A_s D \frac{\delta c}{\delta x}$  het dispersief transport voor.

Deze vergelijking moet numeriek worden opgelost waarvoor de methode gebruikt wordt die is toegepast in het programma FLOWS (Booij, 1978).

De productieterm wordt in het model beschreven door vergelijking (6.5).

$$P = k_1 c + k_0 \quad (6.5)$$

Waarin :

|                |                                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| c              | : de concentratie van de stof die sedimenteert                      |
| t              | : tijd                                                              |
| k <sub>0</sub> | : coëfficiënt die afhankelijk is van de stroming, concentratie e.d. |
| k <sub>1</sub> | : coëfficiënt die afhankelijk is van de stroming, concentratie e.d. |

Voor het doorrekenen van de kwaliteitsmodule worden de gegevens en berekeningen gebruikt die door middel van het stromingsdeel worden berekend zoals Q, A<sub>s</sub> en A<sub>tot</sub>.

De natte strook is te schematiseren als een balansgebied (zie fig. 6.1). De in- en uitstroom van sediment vindt plaats door de randen van het hiervan.

In het balansgebied vindt een toe- of afname van de concentratie plaats. Dit is het gevolg van resuspensie en sedimentatie van de deeltjes in het water.

De constanten ( $k_0$  en  $k_1$ ) in de productieterm ( $P$ ) zijn in dit geval afhankelijk van de kritische snelheid van de gesedimenteerde deeltjes en de valsnelheid (zie vergelijking (6.6)).

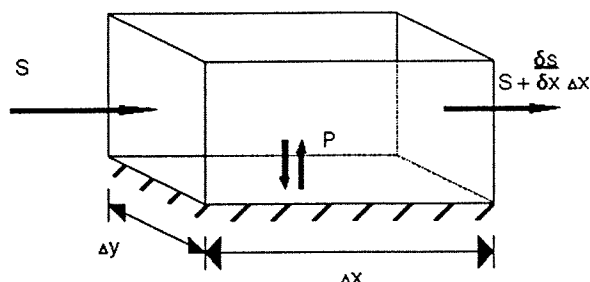


fig. 6.1. het balansgebied van de natte strook

#### 6.2.4. De beperkingen van DUFLOW en PLONS

Als beperking voor het model PLONS geldt dat hiermee geen sedimentatie kan worden berekend.

Daar het één-dimensionale stromingsmodellen zijn, betekent dit dat de snelheden over de dwarsdoorsnede worden gemiddeld.

Het gevolg van deze beperking is dat eventuele oplossingen, die ontworpen zijn

- om van het verschil van stroomsnelheid in de natte strook gebruik te maken;
- gebruik te maken van openingen die op verschillende hoogten in de vooroever worden geplaatst;

kunnen niet worden getoetst.

Verder geldt dat de uitkomsten van de berekening van de sedimentatie geen slibruggen opleveren omdat de sedimentatie over de breedte wordt gemiddeld.

Het model DUFLOW neemt eventuele dichtheidsverschillen niet in rekening.

Dit heeft tot gevolg dat de hogere dichtheid van met sediment beladen water geen invloed heeft op de stroming in de natte strook.

De stroming kan, in DUFLOW, met een minimale tijdstap grootte worden berekend van 0.1 minuut (6 seconden).

Het gevolg van deze beperking is, daar de waterstandsverlaging ten gevolge van een scheepspassage kort is, het stromingsgedeelte een benadering is van de werkelijke waterbeweging.

Voor het kwaliteitsmodel geldt dat het gebruik maakt van de gegevens berekend door het stromingsgedeelte. De berekende gegevens uit het kwaliteitsmodel kunnen niet worden teruggekoppeld naar het stromingsgedeelte.

Dit heeft tot gevolg dat de bodemophoging, ten gevolge van sedimentatie, geen invloed heeft op de stroming die berekend wordt in het stromingsgedeelte.

### 6.3. Beschrijving van de afregelprocedure

#### 6.3.1. Inleiding

Het stromings- en kwaliteitsmodel worden afgeregeld op praktijk gevallen. Deze gevallen dienen natte stroken te zijn waar de sedimentatie redelijk bekend is. Twee natte stroken komen in aanmerking namelijk de natte strook :

- in het zijkanaal van de Twenthekanalen;
- in het kanaal Wessem-Nederweert;

Deze natte stroken worden in paragraaf 4.4.3 beschreven.

Uit de beschrijving van de natte strook in het kanaal Wessem-Nederweert is af te leiden dat, door de stroming door de vooroever, de gemeten waarden moeilijk te gebruiken zijn voor het afregelen van het model.

De natte strook in het zijkanaal van de Twenthekanalen wordt gebruikt als afregel natte strook. Voor de natte strook wordt in DUFLOW een vergelijkend onderzoek gedaan waarna de kwaliteitsmodule zo wordt afgeregeld dat het mogelijk is om voor de alternatieven een voorspelling te doen van de hoeveelheid ophopend sediment. Het model wordt afgeregeld door middel van factoren die beschreven worden in 6.3.3. De resultaten van het afregelen worden beschreven in 6.3.4.

#### 6.3.2. Invoer in DUFLOW

De invoer van de natte strook in DUFLOW bestaat uit twee onderdelen. Als eerste zal de invoer in het stromingsgedeelte worden beschreven en daarna de kwaliteitsmodule. Voor de volledige invoer wordt verwezen naar bijlage III.2.

##### *Invoer stromingsgedeelte*

De natte strook wordt onderverdeeld in stukken van een meter lengte. De schematisatie wordt getoond in figuur 6.2. Aan de randen van de schematisatie van de natte strook wordt als randvoorwaarde opgegeven dat het debiet hierdoor nul is.

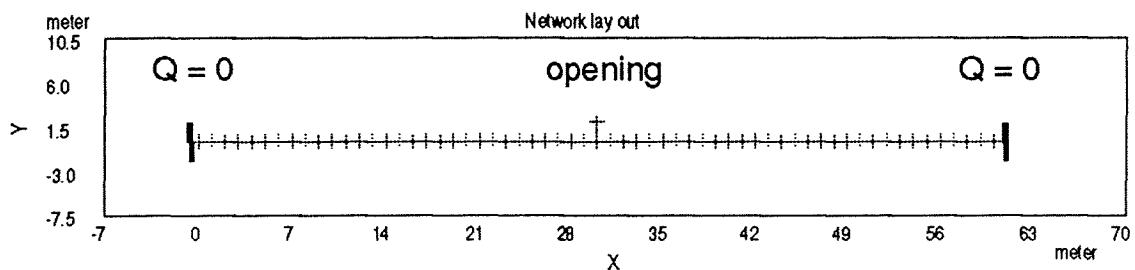


fig. 6.2 : Schematisatie van de natte strook in DUFLOW

De waterstandsverlaging wordt eveneens geschematiseerd. Het betreft hier een verlaging van de waterstand in het kanaal ten gevolge van een passerend schip. De schematisering van de waterstandsverlaging is te zien in figuur 6.3.

Daar het een korte waterstandsverlaging betreft wordt de kleinste tijdstap, in het model mogelijk, gekozen. Deze is 0.1 minuut (6 seconden).

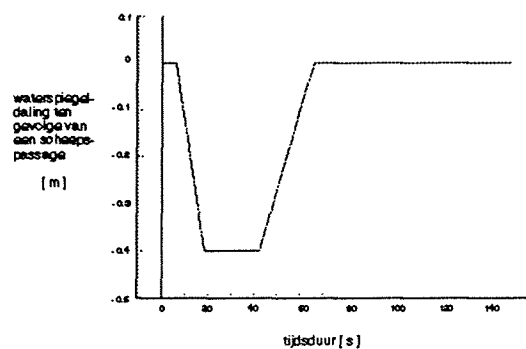


fig. 6.3 : schematisatie van de waterspiegeldaling

### *Invoer kwaliteitsmodule*

In de kwaliteitsmodule wordt de concentratie van zwevend materiaal en de bodemophoging berekend de productieterm stelt hier de sedimentatie voor. De produktie-functie voor de concentratie, van zwevend sediment in het water, is als volgt (gebruik makend van formule (6.6)) :

$$P = - \frac{w_s c}{z} \quad (6.6)$$

waarin :

|                |                                              |                      |
|----------------|----------------------------------------------|----------------------|
| c              | : concentratie zwevend sediment in het water | [mg/m <sup>3</sup> ] |
| w <sub>s</sub> | : neerslagsnelheid van een sedimentdeeltje   | [m/s]                |
| z              | : waterdiepte                                | [m]                  |

Hierin is veronderstelt dat de coincentratie over de vertikaal gelijk is.

De ophoping van sediment wordt met de volgende formules beschreven :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{w_s c}{\rho} \quad (6.7)$$

waarin :

|   |                                             |                      |
|---|---------------------------------------------|----------------------|
| h | : ophoging van de bodem t.g.v. sedimentatie | [m]                  |
| t | : tijd                                      | [s]                  |
| ρ | : dichtheid van het neergeslagen sediment   | [mg/m <sup>3</sup> ] |

### 6.3.3. De afregelfactoren

In de formules voor het transport van sediment worden een aantal constanten gevraagd waarmee de berekeningen beïnvloed kunnen worden. Deze factoren zijn :

|   |                            |
|---|----------------------------|
| D | : de dispersie-coëfficiënt |
| C | : coëfficiënt van Chézy    |

Voor de dispersie-coëfficiënt is door Fischer (1979) een semi-empirische uitdrukking afgeleid. Deze luidt :

$$D = 0.011 \frac{\bar{u}^2 B^2}{a u_*} \quad (6.8)$$

waarin :

|           |                                  |
|-----------|----------------------------------|
| $\bar{u}$ | : de gemiddelde stroomsnelheid   |
| B         | : de breedte van de natte strook |
| a         | : de diepte van de natte strook  |

$$u_* : \bar{u} \frac{\sqrt{g}}{C}$$

hierin is C de Chézy factor en g de valversnelling

In deze uitdrukking moet een gemiddelde snelheid en een Chézy-waarde worden ingevuld. Deze zijn nog onbekend.

Iteratief wordt het model afgeregeld op de natte strook in het zijkanaal-van de Twenthekanaalen.

Voor een aantal waarden van  $D$  is een berekening gemaakt en daarbij is gekeken hoe de concentratie in het langsprofiel verloopt. Gegeven is dat in de geobserveerde natte strook het invloedsgebied van de sedimentatie tot tien meter aan beide zijden van de opening strekt. In figuur 6.4 is te zien dat naarmate de dispersie-coëfficiënt kleiner wordt dat dan de vorm en het invloedsgebied meer overeenkomt met de geobserveerde waarden.

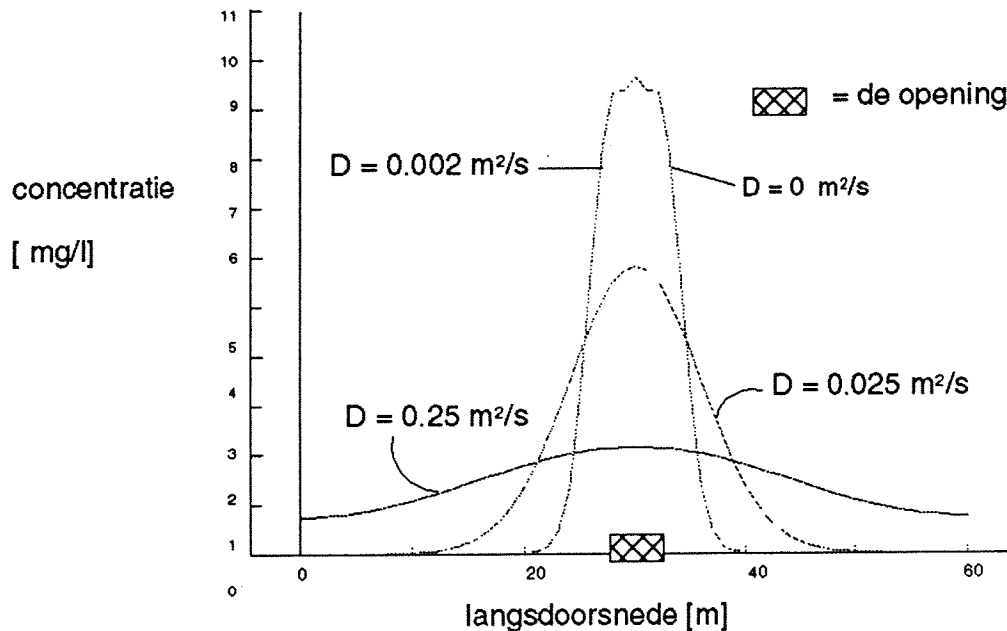


fig. 6.4 : verdeling van de concentratie zwevend sediment bij verschillende dispersie-coëfficiënten

Door in (6.8) de volgende waarden in te vullen wordt een benadering gegeven voor de dispersie-coëfficiënt.

$$\bar{u} = 0.01 \text{ m/s}$$

$$C = 65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

$$a = 1 \text{ m}$$

$$B = 1 \text{ m}$$

De waarde van de dispersie-coëfficiënt wordt dan  $0.002 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Uit berekeningen met het model waarbij  $D = 0.002 \text{ m}^2/\text{s}$  en  $D = 0 \text{ m}^2/\text{s}$  zijn ingevuld blijkt (zie fig. 6.4) dat voor het model de dispersie-coëfficiënt verwaarloosbaar is.

#### 6.3.4. De uitkomsten van de berekening

De ingevoerde gegevens zijn vervolgens :

|                       |                                                     |        |                   |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|--------|-------------------|
| $c$                   | : de concentratie zwevend sediment in het kanaal    | : 15   | mg/l              |
| $w_s$                 | : valsnelheid van geklonterde klei- en siltdeeltjes | : 0.15 | cm/s              |
| $\rho_{\text{bodem}}$ | : dichtheid van geconsolideerd slib                 | : 1500 | kg/m <sup>3</sup> |

|   |                         |      |                           |
|---|-------------------------|------|---------------------------|
| C | : Chézy                 | : 65 | $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ |
| D | : dispersie-coëfficiënt | : 0  | $\text{m}^2$              |

In figuur 6.6 is te zien hoe de bodemophoging, die berekend is met behulp van DUFLOW, verloopt. Het betreft hier één scheepspassage waarna de natte strook één uur in rust is om het sediment te laten neerslaan.

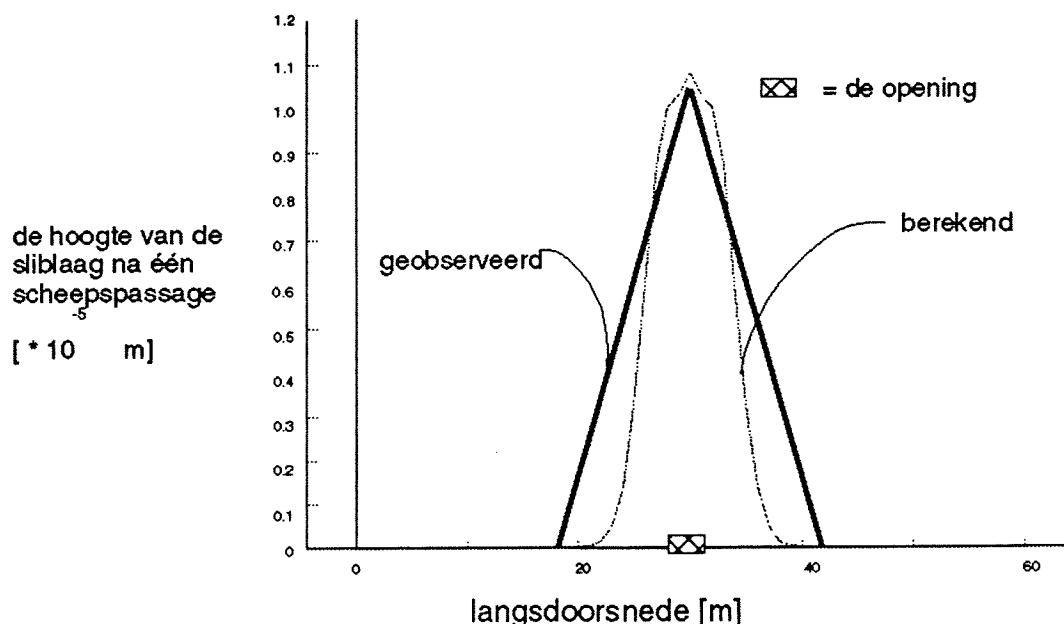


fig. 6.5 : verloop van de bodemophoging

Als de uitkomsten vergeleken worden met de geobserveerde slibrug in de natte strook in het zijkanaal van de Twenthekanalen (gedeeld door het aantal schepen dat in 6 jaar door het kanaal is gevaren) blijkt dat de ophoging per scheepspassage daar redelijk mee overeen komt. Dit geldt eveneens voor het invloedsgebied.

#### 6.4. Berekeningen van de alternatieven

##### 6.4.1. Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is reeds ingegaan op de mogelijkheid van het toetsen van de ontwikkelde alternatieven. Van de drie ontwikkelde alternatieven valt alternatief twee af daar deze moeilijk tot niet te toetsen is. De twee overgebleven alternatieven worden met behulp van twee ééndimensionale stromingsmodellen berekend. Alternatief één, het verkleinen van de verversingsgraad, wordt berekend met behulp van PLONS (6.4.2) en

alternatief twee en drie met behulp van DUFLOW (6.4.3).

#### 6.4.2. Berekening van alternatief één : verkleining van de verversingsgraad

De verkleining van de verversingsgraad wordt op een iteratieve manier berekend door in de invoer van PLONS alle parameters gelijk te houden en vervolgens de afstand tussen de openingen te vergroten. Deze berekeningen worden gedaan tot dat de gewenste verversingsgraden, bepaald in 5.3, worden bereikt. In de tabel zijn de uitkomsten af te lezen.

| verversingsgraad  |                       | afstand tussen de openingen<br>(de openingen zijn<br>0.2m. x 0.2 m.) |
|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| aantal<br>schepen | verver-<br>singsgraad |                                                                      |
| 50                | 2 %                   | 30 m.                                                                |
| 100               | 1 %                   | 50 m.                                                                |
| 200               | ½ %                   | > 75 m.                                                              |
| 1000              | 0.1 %                 | > 75 m.                                                              |

Door de berekende gevallen te vergelijken met de huidige situatie is het mogelijk om een uitspraak te doen over de effectiviteit van de ingreep.

In de huidige situatie is het zo dat per scheepspassage de natte strook voor 10% wordt ververst (zie paragraaf 4.5.2. de beschrijvingen van de natte stroken).

Door de verversingsgraad in de huidige situatie te vergelijken met die van de het alternatief wordt het duidelijk dat het alternatief een duidelijke verbetering is.

| Aantal scheepspas-<br>sages in een kanaal<br>per dag | verversingsgraad<br>per scheepspassage<br>in de huidige situa-<br>tie | verversingsgraad<br>per scheepspassage<br>in alternatief 1 | factor van verbete-<br>ring van de situatie |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 50                                                   | 10 %                                                                  | 2 %                                                        | 5                                           |
| 100                                                  | 10 %                                                                  | 1 %                                                        | 10                                          |
| 200                                                  | 10 %                                                                  | ½ %                                                        | 20                                          |
| 1000                                                 | 10 %                                                                  | 0.1 %                                                      | 100                                         |

De meest gunstige situatie is die met de kleinste verversingsgraad per scheepspassage. Uit de tabel is af te lezen dat dan de totale hoeveelheid van ververst water met een factor 100 wordt vermindert. Dit heeft tot gevolg dat eveneens de hoeveelheid instromend sediment met een factor 100 wordt vermindert.

Daarnaast heeft een kleinere verversingsgraad ook een kleiner invloedsgebied. Dit betekent

dat een kleiner deel van de natte strook belast zal zijn met sediment vanuit het kanaal. Een ander voordeel van het intensief bevaren van het kanaal is dat de schepen snel achter elkaar de natte strook zullen passeren. Hierdoor krijgt het ingestroomde sediment niet de kans om volledig neer te slaan (zie oplossing 2\*). Het gevolg is dat de concentratie van zwevend sediment, in het uit de natte strook stromende water, hoger zal zijn bij een kanaal met 1000 dan met minder passages per dag.

Voor alle natte stroken is de hoeveelheid instromend sediment gelijk. Dit komt omdat wordt uitgegaan van 100 % verversing per dag. De uitstroom van sediment hangt dus wel af van de vaarintensiteit op het kanaal.

Het vergelijken van de nieuwe situatie met de huidige natte strook geeft de conclusie dat door deze ingreep de sedimentatie vermindert (en dus de dichtslibbingstijd), maar dat het sediment uiteindelijk uit de natte strook gebaggerd moet worden.

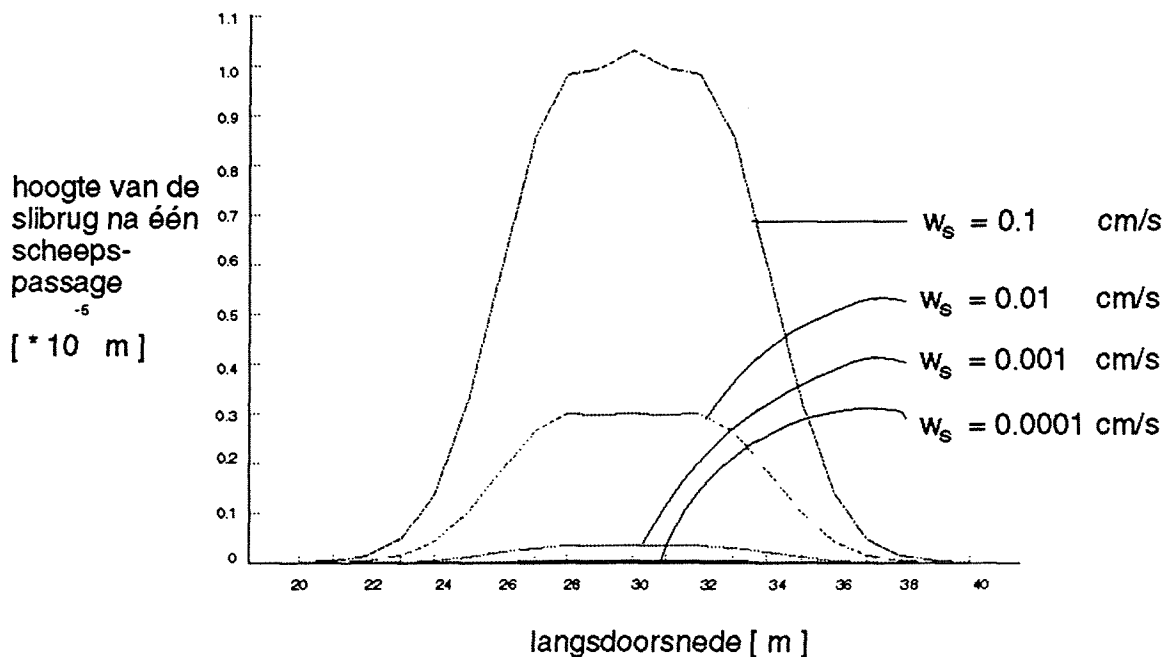


fig. 6.6 : de bodemophoging, na één scheepspassage, na één uur rust in de natte strook

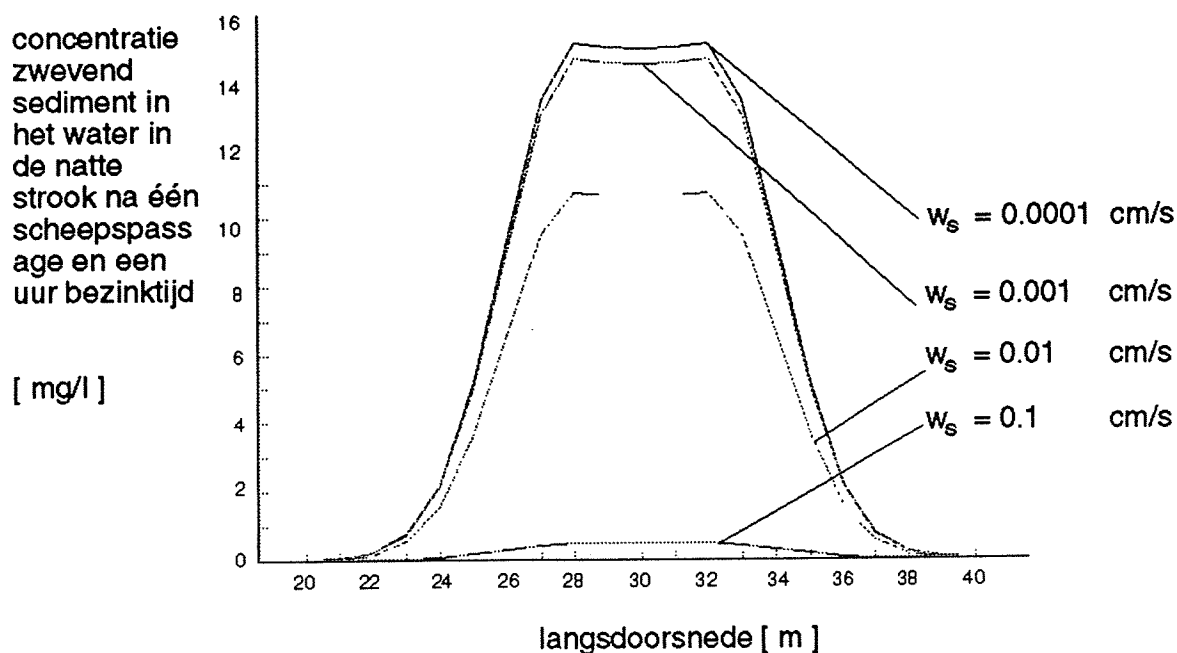


fig. 6.7 : de concentratie verloop van het zwevend sediment in het water van de natte strook.

#### 6.4.3. Berekening van alternatief twee : het verkleinen van de valsnelheid

Alternatief twee wordt berekend met behulp van DUFLOW. Hierbij is uitgegaan van het afregelvak waarbij, door het aanbrengen van een bekleding, klonteren wordt tegen gegaan en daarbij de valsnelheid van de deeltjes wordt verkleind. Om het effect van de verkleining van de valsnelheid te bekijken wordt voor vier verschillende valsnelheden de sedimentatie en de concentratie in de natte strook bepaald. Aan de hand hiervan kan iets worden gezegd over de effectiviteit van de ingreep.

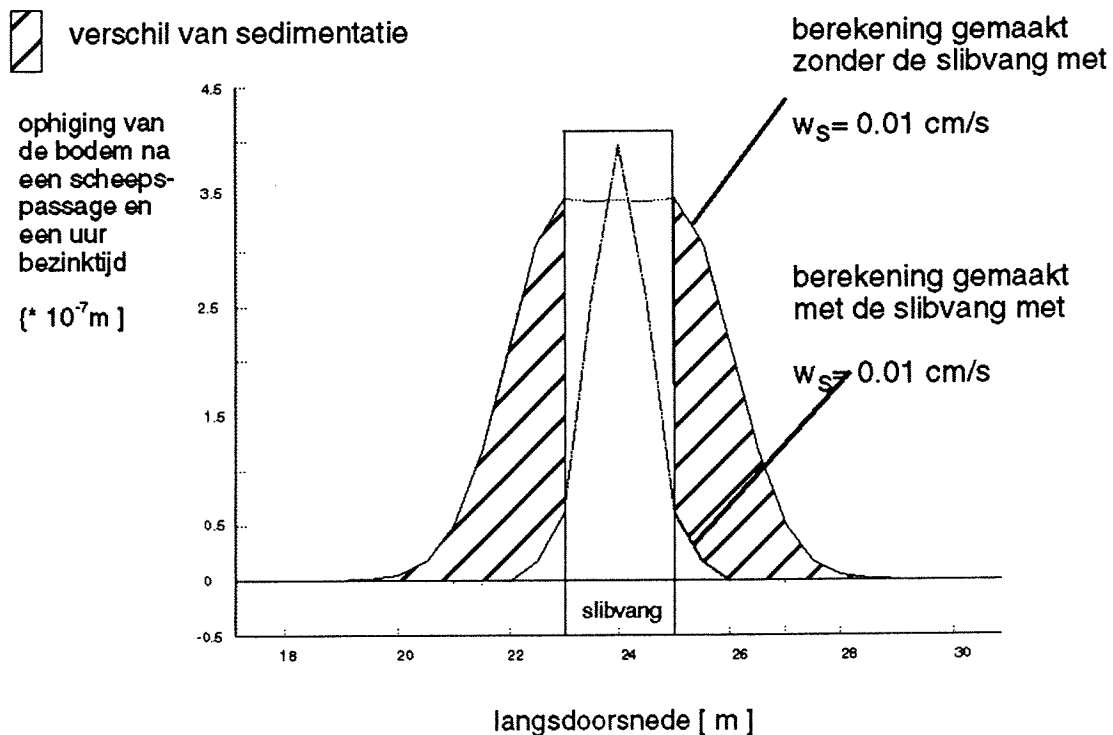
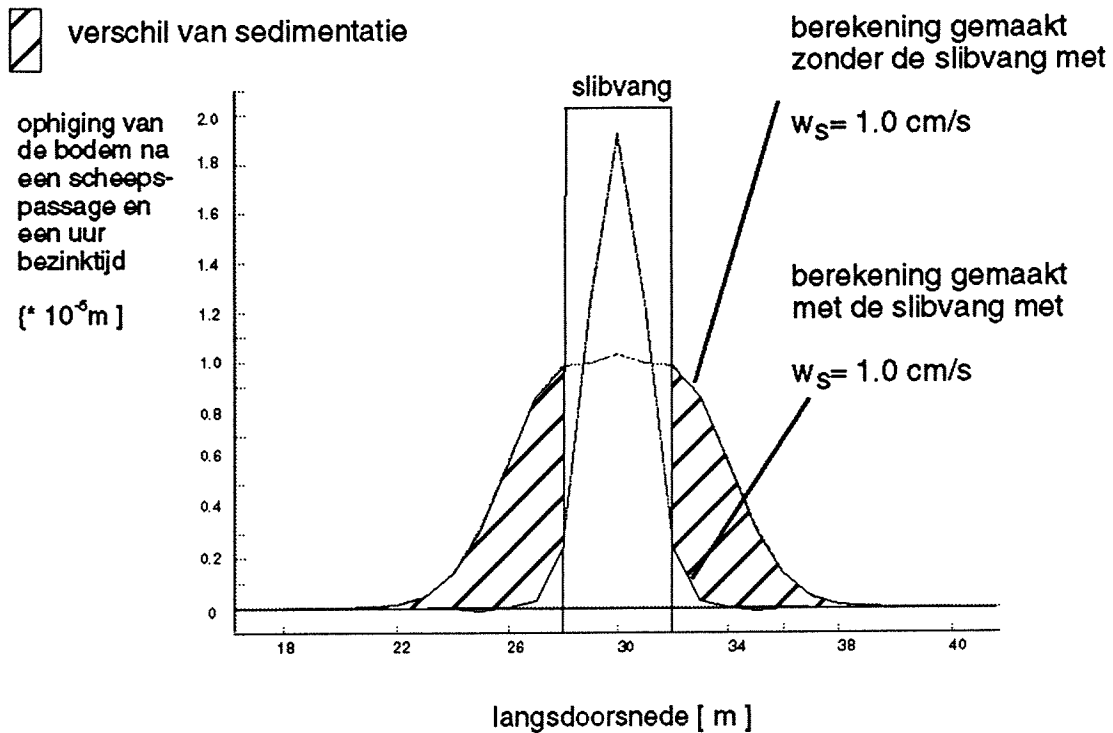
Uit de bovenstaande figuren (zie fig. 6.6 en 6.7) is goed te zien dat de ingreep zeer effectief is. Het zwevend sediment verspreidt zich in alle vier de gevallen over het zelfde invloedsgebied, allen slaat bij een hogere valsnelheid, de deeltjes allemaal neer. Bij en lagere valsnelheid is het sediment nog in suspensie (zelfs na één uur) en kan bij een volgende scheepspassage weer worden afgevoerd.

Indien daadwerkelijk de draadvorming door planten kan worden vermindert, wat nog ter discussie staat, is deze oplossing effectief.

#### 6.4.4. Berekening van alternatief drie : de slibvang

Alternatief drie wordt berekend met behulp van DUFLOW. De uitkomsten van de berekeningen voor de sedimentatie worden vergeleken met de berekeningen gedaan voor de natte strook in het zijkanaal van de Twenthekanalen. Voor de slibvang is nog

onderzocht of deze effectiever werkt indien de valsnelheid van de deeltjes kleiner worden door het voorkomen van klonteren.



In de bovenstaande figuren is te zien dat bij een slibvang het sediment voor het grootste

deel in de slibvang valt.

| valsnelheid                                           | $w_s = 0.01 \text{ cm/s}$ |              | $w_s = 1.0 \text{ cm/s}$ |              |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| percentage binnen de afmetingen van de slibvang       | zonder slibvang           | met slibvang | zonder slibvang          | met slibvang |
|                                                       | 54.7 %                    | 98 %         | 55.7 %                   | 99.7 %       |
| effectiviteit van de slibvang (met s.v./ zonder s.v.) | 1.8                       |              | 1.8                      |              |

De effectiviteit van de slibvang is duidelijk. In beide gevallen (van valsnelheid van de deeltjes) slaat het grootste gedeelte van het sediment neer in de natte strook. In vergelijking met de natte strook in het zijkanaal van de Twenthekanalen geeft dat bijna twee maal zoveel van het totale gesedimenteerde slib zich binnen de afmetingen van de slibvang concentreert.

Voor de slibvang is een grotere valsnelheid het gunstigst. Bij deze grote valsnelheid valt bijna al het ingestroomde sediment in de slibvang.

Bij een kleinere valsnelheid is de concentratie van zwevend sediment nog in suspensie wel hoger wat tot gevolg heeft dat bij een volgende scheepspassage meer sediment zal uitstromen. Wel moet, evenals bij alternatief twee, als beperking worden gesteld dat niet zeker is of de ingreep, van bekleding van de natte strook, veel effect heeft op het klonteren.

Ten aanzien van het onderhoud en eventuele spoelgaten kan een slibvang van beton overwogen worden. Het voordeel is dat bij onderhoud niet al te veel schade wordt aangericht.

#### 6.5. Keuze van het beste alternatief

Om het beste alternatief te kiezen, worden alle alternatieven getoetst aan de randvoorwaarden. De beide alternatieven onderscheiden zich vooral in de onderhouds- en aanlegkosten. Voor beide alternatieven worden de voor- en nadelen beschreven waarna een keuze volgt.

##### *Alternatief één : Verkleining van de verversingsgraad*

De voordelen van dit alternatief zijn :

- de sedimentatie vermindert maximaal met 99 %
- de reeds aangelegde natte stroken kunnen eenvoudig worden aangepast;
- de aanleg van nieuwe natte stroken worden niet duurder;

De nadelen zijn :

- het sediment slaat nog steeds neer in de natte strook;

##### *Alternatief twee : Verkleinen van de valsnelheid*

De voordelen van dit alternatief zijn :

- de sedimentatie vermindert, omdat het sediment langer in suspensie blijft en daardoor met een volgende scheepspassage weer uit de natte strook kan worden getransporteerd;

De nadelen zijn :

- afhankelijk van de soort bekleding moet de natte strook worden gereviseerd;
- bij het onderhoud is, wederom afhankelijk van de bekleding voorzichtigheid geboden om de bekleding niet te beschadigen;
- het gebaggerde slib moet, vanwege vervuiling, worden geborgen;
- over het voorkomen van draden en dus van klonten is niet veel bekend. Het is maar de vraag of bekleding van de natte strook hier invloed op heeft.

#### *Alternatief drie : De slibvang*

De voordelen van dit alternatief zijn :

- bij een hoge valsnelheid van de deeltjes in het water slaat 99.7 % van het sediment neer in de slibvang;
- het sediment slaat niet neer in de natte strook maar in een daarvoor ontworpen bak;
- het weghalen van het sediment geschiedt zonder veel schade toe te brengen aan de natte strook;
- door een spoelgat in de vooroever te maken is het mogelijk om het sediment uit de natte strook het kanaal in te spoelen;
- het spoelen kan met een hogedrukspuit wat inhoudt dat geen baggerschip nodig is;

De nadelen zijn :

- de kosten voor de aanleg zijn hoger;
- aanpassen van bestaande natte stroken gaat gepaard met aantasting van de natuur (al is dit eenmalig);

#### *De keuze*

De alternatieven zijn oplossingen die elkaar aanvullen. Daar het effect van de bekleding op het klonten niet zeker is wordt alternatief twee buiten beschouwing gelaten.

Voor de meest ideale oplossing geldt dan, uit het voorgaande, dat de verversingsgraad geminimaliseerd wordt door de openingen, in de vooroever, op een zo groot mogelijke afstand van elkaar aan te brengen. De natte strook wordt voorzien van een slibvang die bekleedt wordt, het liefst met beton om onderhoudswerkzaamheden te vergemakkelijken.

In de vooroever worden, om op bergingskosten van vervuild sediment te besparen, spoelgaten aangelegd die bij onderhoud kunnen worden opgezet om zo het in de slibvang neergeslagen sediment uit te spoelen.

## Hoofdstuk 7 Conclusies en aanbevelingen

Aan de hand van de doelstellingen en het onderzoek dat hiervoor is gedaan worden conclusies getrokken (7.1). Nadat de conclusies zijn behandeld, wordt een aantal aanbevelingen gedaan (7.2).

### 7.1. Conclusies

Conclusie ten aanzien van de oorzaak en de aard van de sedimentatie :

- De maatgevende waterstandverandering in het kanaal wordt aangedreven door een scheepspassage. De aard van het sediment dat neerslaat is direct gekoppeld aan de wateruitwisseling ten gevolge van deze waterstandverandering daar het grootste gedeelte van het neergeslagen sediment bestaat uit zwevend sediment, opgewoeld door een passerend schip, afkomstig uit het kanaal. De oorzaak van het sedimenteren is dat het sedimenttransport naar de natte strook groter is dan uit de natte strook. De stroming van water is namelijk als volgt :  
sediment-arm water stroomt uit de natte strook. Het uitgestroomde water wordt vervangen door sediment-rijk water uit het kanaal.

Conclusie ten aanzien van het voorkomen of verminderen van de sedimentatie :

- Het voorkomen van sedimentatie in de natte strook is niet mogelijk vanwege het stromingsproces en de kleinere sedimentconcentratie van het uitstromende ten opzichte van het instromende water. Verminderen van de sedimentatie is wel een optie. De beste optie is een natte strook met achter de opening een slibvang, deze is bekleed met beton om onderhoudswerkzaamheden te vergemakkelijken. Om de instroom van het sediment te verkleinen moet de verversingsgraad van de natte strook worden geminimaliseerd door de afstand tussen de openingen te vergroten. Deze optie heeft als voordeel dat het onderhoud makkelijk is en niet gepaard gaat met het aantasten van de, in de natte strook, aanwezige flora en fauna.

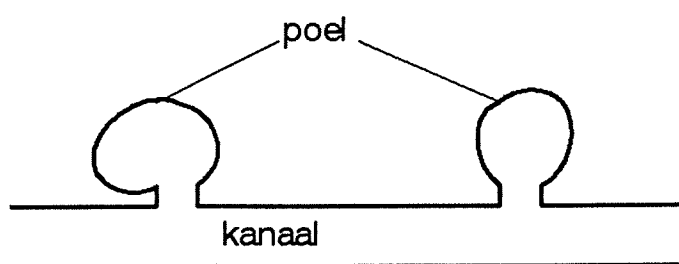
## 7.2. Aanbevelingen

Aanbevelingen voor een beter inzicht in de processen in de natte strook :

- het door rekenen van de sedimentatie met behulp van een driedimensionaal stromingsmodel
- de vegetatie in de natte strook zal effect hebben op de stroming daarin. Dit effect moet nader onderzocht worden. (Momenteel wordt in opdracht van Rijkswaterstaat hiermee proeven gedaan in het Waterloopkundig Laboratorium);
- naast het effect op de stroming heeft de vegetatie ook effect op de neerslagsnelheid van sedimentdeeltjes. Aanbevolen wordt om dit effect nader te onderzoeken;
- de vegetatie heeft ook effect op het neergeslagen sediment, daar sediment tussen de vegetatie gaat liggen. Hierdoor zal resuspensie van het sediment moeilijker zijn. Het effect van vegetatie op de kritische snelheid vereist nader onderzoek;
- de minimale verversingsgraad van de natte strook is essentieel voor het ontwerp van een natte strook. Deze minimale verversingsgraad is nog onbekend. Geadviseerd wordt om hierbij de mogelijke ziekten te onderzoeken, waarvan geheel of bijna stilstaand water een goed leefgebied is. Dit wordt aangehaald omdat vroeger, toen de rivieren nog niet gekanaliseerd waren, in Nederland nog de 'Maas-malaria-mug' leefde. Doordat allerlei stilstaande wateren worden gecreëerd is het zaak om te onderzoeken of niet bepaalde ziekten worden geïntroduceerd in Nederland;
- het effect van organisch slib in de natte strook is niet behandeld in dit onderzoek. De ophoping van dit organische slib is een probleem daar dit buiten de invloed van de opening ligt. Het kan dus alleen door middel van baggeren worden verwijderd. De opslibsnelheid van de natte strook ten gevolge van dit organische slib moet nader worden onderzocht. (Inmiddels liggen de plannen klaar om metingen te doen naar de organische slibdikten in de natte strook)

Verdere aanbevelingen ten aanzien van natuurvriendelijke oevers :

- daar uit dit onderzoek is gebleken dat sedimentatie in de natte stroken onvermijdelijk is en uit metingen in de natte stroken in de Twente-kanalen blijkt dat de organische sliblagen een reden tot zorg zijn (zie § 4.3.3), wordt geadviseerd om onderzoek te doen naar een andere oplossing, dan de natte strook, voor het vestigen en voortplanten van de flora en fauna in en om een kanaal. Als alternatief wordt aangedragen om, om een bepaalde afstand van elkaar, een soort poelen aan te leggen waarin de flora en fauna zich kan vestigen (zie fig. 7.1).



Zo hoeft niet een hele kanaaloever worden te voorzien van een natte strook.

## Literatuurlijst

- Aquatic pollution and dredging in the European community, DELWEL, 1990, Den Haag
- Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen, Ir.J.Bouwmeester, 1994, Delft
- Cursusmap DUFLOW waterkwaliteitsbeheer, IHE-stowa, 1995, Delft
- Coastal Engineering, Edited by W.W. Massie, 1986, Delft
- EDS, User's guide WAQUA, versie 8.12, 15 augustus 1995, Leischendam
- Hydraulische en morfologische monitoring van de natuurvriendelijke oevers langs het Noordhollandsch kanaal ter hoogte van het Alkmaardermeer, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw, 1995, Delft
- Inleiding transport van stoffen en zuivering van bodem, water en lucht, Prof. ir. J.H.Kop e.a., 1993, Delft
- Irrigatie, Prof. ir. R. Brouwer, 1993, Delft
- Lange golven, C. Verspuy, 1987, Delft
- Monitoring natuurvriendelijke oever langs het Noordhollandsch kanaal ter hoogte van het Alkmaardermeer rapportage 1992-1995, Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, 1995, Culemborg
- Monitoring natuurvriendelijke oever langs het Noordhollandsch kanaal ter hoogte van het Alkmaardermeer situatie 1995, Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, 1995, Culemborg
- Monitoring milieuvriendelijke oevers Zuidwillemsvaart (1994), Rijkswaterstaat Directie Noord-Brabant, 1994, Culemborg
- Monitoring milieuvriendelijke oevers langs het Wilhelminakanaal (1995), Rijkswaterstaat Directie Noord-Brabant, 1995, Culemborg
- Monitoring en tussentijdse evaluatie van natuurvriendelijke oevers langs de Twenthe kanalen (1995), Rijkswaterstaat Dienstkring Twenthekanalen, 1995, Markelo
- Natuurvriendelijke oevers met een natte strook, Ingrid Vermeulen, 1996, Delft
- Natuurvriendelijke oevers, CUR-rapport nr 168; Directoraat Rijkswaterstaat, Simons, Kolen, Verkade e.a., 1994, Gouda
- Onderzoek aan natte oeverstroken langs het Wilhelminakanaal, RWS Directie Noord-Brabant Rijksinstituut voor natuurbeheer, 1989, Leersum

- Onderzoek milieuvriendelijke oevers kanaal Wessem-Nederweert monitoring proefvak 1991-1994, Oekologisch Adviesbureau Moller Pillot, 1994, Tilburg
- Rivieren, Prof. dr. ir. M. de Vries, 1994, Delft
- Sedimenttransport in suspensie, P.J.B.Jetten, 1996, Delft
- Transport of suspended solids in open channels, edited by W.Bechteller, 1986, Rotterdam
- Validatie van Plons, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw, 1994, Delft
- Vloeistofmechanica, Prof. dr. ir. J.A. Battjes, 1990, Delft
- Waterbouwkunde, d'Angremond/Bezuyen e.a., 1992, Delft
- Waterbouwkundige kunstwerken, Prof. ir. A. Glerum, 1992, Delft

## Bijlage I : Verslag van de bezoeken aan verschillende natte stroken

### I.1 Noordhollandsch kanaal

In het Noordhollandsch kanaal zijn nabij Akersloot 4 proefvakken aan gelegd. Deze zijn intensief gemonitord. Er zijn 7000 scheepspassages waargenomen per jaar. De hoeveelheid zwevend materiaal is niet bekend. Men kan echter aannemen dat deze rond de 10 mg/l zal liggen. De waterdiepten zijn nauwkeurig gemeten. Men kan dus eenvoudig een volume berekenen. De verversing is vervolgens m.b.v. PLONS berekend. Deze ligt tussen de 13 en 16 %. Dit is hoger dan de gewenste 10 %.

### I.2 Kanaal Wessem-Nederweert

Het kanaal Wessem-Nederweert is een vrij druk bevaren kanaal. Het betreft hier dan vervoer van zand, grind en maïs. Het fungeert tevens als aanvoer kanaal van de Noordervaart. Dit kanaal verzorgt de waterlevering van de gebieden in het er achter gelegen gebied. Er passeren zo'n 60 schepen per dag het vak. Dit gebeurt tussen afgesproken tijden.

Men wil in de toekomst het kanaal verbreden en het zo voor grotere scheepvaart toegankelijk maken (Klasse IV).

Tijdens mijn bezoek aan de vakken werd er aan een oeververbetering gewerkt direct aan de overkant van de vakken. Het gevolg was dat de passerende schepen vaart moesten minderen. Hierdoor kon niet het volle effect van een passerend schip worden gezien. De vakken hebben een voor oever van breuksteen. Twee vakken worden ververst door het water dat door deze breukstenen vooroever komt en de andere twee hebben daarbij een buis door de vooroever. De vakken zonder buis waren zo goed als dichtgeslibd terwijl de vakken met buis in een vergevorderd stadium zijn. Verder leek het er op dat de buizen in grote mate waren dichtgeslibd. De stroming door de buis was zeer gering.

Uit observatie en uit monsters blijkt dat het water in het kanaal meer zwevend materiaal bevat dan het water in het vak. Het neer geslagen sediment is zeer fijn en vetig.

De hoeveelheid zwevend materiaal in het kanaal is niet bekend. Eerdere meting leverde een marge op van tussen de 10 en de 20 mg/l. Dit kan wel eens meer zijn gezien het feit dat door het bevaren van een kanaal er sediment wordt losgewoeld. De beheerders vertelden mij dat het nog weleens voor komt dat een schip te diep ligt. Het gevolg hier van is dat er meer sediment wordt opgewoeld.

Bij deze oevers lijkt het er op dat al het sediment dat in het vak wordt gevoerd daar neerslaat. Dit om dat 5 jaar na aanleg twee vakken bijna volledig zijn dichtgeslibd. Er is in de vakken 1 en 2 en verversing geconstateerd van 15-25 % en in de vakken 3 en 4 van 10 %. De hoeveelheid zwevend materiaal in het kanaal is gewoonlijk tussen de 10 en 20 mg/l. Men kan nu een globale voorspelling doen van de te verwachten aanslibbing. Er zijn een aantal van 339 scheepspassages per week geteld. Dit houdt in dat er  $52 \times 339 = 17600$  passages per jaar zijn.

### I.3 Wilhelminakanaal

Het kanaal is in de jaren twintig aangelegd. In het Wilhelminakanaal zijn nabij Dongen 7 plasbermen geplaatst. De plasbermen zijn verdeeld in ondiepe- en diepe bermen. Vakken 1 t/m 3 zijn diep en vakken 4 t/m 7 zijn ondiep. De hoeveelheid zwevend materiaal in het kanaal bedraagt tussen de 10 mg/l en de 15 mg/l. Ik kan vervolgens met behulp van een eenvoudig rekensommetje de hoeveelheid sediment bepalen die maximaal in het vak kan neerslaan. Dit doe ik door er van uit te gaan dat het water in het vak per scheepspassage voor 10% wordt ververs. Per jaar zijn er 4500 scheepspassages zijn. Ik heb het volume van een plasberm bepaald en vervolgens de hoeveelheid sediment dat het vak binnen komt. Men kan dan gemiddeld over de bodem een schatting geven van de afname van de diepte.

Nabij Schijndel wordt in mei een natte strook opgeleverd. Dit kan eventueel als nul-vak dienen.

### I.4 Zijkanaal Twenthe-kanalen

Het kanaal is in de jaren '30 aangelegd. In 1989 zijn er over een lengte van 4 kilometer ondiepe oeverstroken aangelegd. Deze oevers heeft een damwand vooroever en een plasberm. In de damwand zijn om de 200 à 300 meter openingen gemaakt. De verversingsgraad van deze vakken is nooit onderzocht. Over de hoeveelheid zwevend materiaal in het kanaal is niet veel bekend. In het Zij-kanaal vinden jaarlijks zo'n 5000 scheepspassages plaats. Uit eigen observatie is gebleken dat de invloed van het instromende water zich beperkt tot de eerste 5 à 10 meter aan beide kanten van de opening. Direct naast de opening ligt in het midden van het vak een slibrug. Langs deze slibrug zijn dan geultjes die voor de water toevoer zorgen. Na het invloedsgebied van de stroom is de plasberm nog redelijk in oude staat. Hier liggen in de diepe delen echter een laag organischslib. Dit is afkomstig van de flora en fauna.

### I.5 Zwarte water en het Meppelerdiep

Het Zwarte water is een rivier die een verbinding is tussen de IJssel en het IJsselmeer. De rivier stroomde in eerste instantie door Zwolle maar er is een bochtafsnijding aangelegd die de grote vaart buiten de stad houdt. Aan de oevers van het zwarte water zijn natuurvriendelijke oevers aangelegd die bestaan uit een zanddijkje bedekt met zinkstukken afgestort met breuksteen. Achter deze dijkjes is een plasberm. Deze plasberm is volledig begroeid met riet. Een riviertje de Vecht stroomt uit op het Zwarte water. Delen van de oevers van de Vecht bevatten eveneens plasbermen. De vooroever bestaat in dit geval uit schanskorven die op water niveau zijn aangelegd. Achter deze schanskorven is het reeds in grote mate dichtgeslibd. Het Meppelerdiep is een kanaal dat beton- en veevoederfabrieken bereikbaar maakt. In het kanaal zijn twee natte stroken aangelegd. Een met een breukstenen vooroever en een met een damwanden vooroever. Bij deze natte stroken is ook verre gaande aanslibbing aangetroffen.

Aangezien het met het Zwarte water een rivier betreft zijn er andere stromingsverschijnselen dan voorbij varende schepen van invloed op het wateruitwisselingspatroon van de natte strook. In de Vecht is goed te zien dat natte stroken in de binnen bocht zeer snel dichtslibben.

Het grote probleem bij deze natte stroken is de vervuiling van het slib en vooral de plaats van eventueel gebaggerd slib. Dit wordt geïllustreerd door de onmacht tot ingrijpen in de sedimentatie in de rivierbocht nabij Hasselt. Men wacht met smart op het klaarkomen van het slibdepot in het Ketelmeer. Er zijn zo'n 6000 à 7000 scheepspassage per jaar over het Zwarte water.

## Bijlage II : Berekeningen gemaakt met methode A en B

## II.1. Berekeningen met behulp van methode A)

## II.1.1. Noordhollandsch kanaal

| Verversingsgraad                               | 10 %        |             | 15 %        |             | 25 %        |            |
|------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Lengte van het vak [m]                         | 100         |             | 100         |             | 100         |            |
| Breedte van het vak [m]                        | 3           |             | 3           |             | 3           |            |
| Diepte van het vak [m]                         | 1           |             | 1           |             | 1           |            |
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ] | 1500        |             | 1500        |             | 1500        |            |
| Aantal scheepspassages per jaar                | 17600       |             | 17600       |             | 17600       |            |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]            | 15          | 25          | 15          | 25          | 15          | 25         |
| Hoeveelheid instromend sediment [kg]           | 2.02        | 3.38        | 3.04        | 5.06        | 4.05        | 6.75       |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]            | <b>0.45</b> | <b>0.75</b> | <b>0.68</b> | <b>1.13</b> | <b>0.90</b> | <b>1.5</b> |

Uit metingen is te zien dat op bepaalde plaatsen een sedimentatie plaats heeft gevonden. Deze sedimentatie is gering het gaat bij de berekeningen eveneens om geringe waarden.

## II.1.2. Kanaal Wesssem-Nederweert

| Verversingsgraad                                       | 10 %        |            | 15 %                |            | 25 %                |            |
|--------------------------------------------------------|-------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| Inhoud van het vak [m <sup>3</sup> ]                   | 150         |            | 150 m <sup>3</sup>  |            | 150 m <sup>3</sup>  |            |
| Instromend volume per scheepspassage [m <sup>3</sup> ] | 15          |            | 22.5 m <sup>3</sup> |            | 37.5 m <sup>3</sup> |            |
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ]         | 1500        |            | 1500                |            | 1500                |            |
| Oppervlakte van de bodem [m <sup>2</sup> ]             | 200         |            | 200                 |            | 200                 |            |
| Aantal scheepspassages per jaar                        | 17600       |            | 17600               |            | 17600               |            |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]                    | 15          | 25         | 15                  | 25         | 15                  | 25         |
| Hoeveelheid instromend sediment [kg]                   | 3.96        | 6.6        | 5.94                | 9.9        | 7.92                | 13.2       |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]                    | <b>1.32</b> | <b>2.2</b> | <b>1.98</b>         | <b>3.3</b> | <b>2.64</b>         | <b>4.4</b> |

De gemiddelde slib laag die gemeten is na 4 jaar is 31 cm. Dit houdt in dat er per jaar een hoeveelheid van 7.75 cm. is neergeslagen. Tussen de gemeten waarden en de berekende waarden zit een verschil. Dit verschil zit in het feit dat de gemeten waarden een gemiddelde zijn verder is in de berekening niet in gegaan op het door de vegetatie geproduceerde rottingsslib. Deze eenvoudige berekening is voor dit vak een goede benadering gezien het feit dat de plasberm over de volle lengte in verbinding staat met het kanaal.

### II.1.3. Wilhelminakanaal

| Verversingsgraad                               | 10 % |      | 15 % |      | 25 % |      |
|------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Lengte van het vak [m]                         | 106  |      | 106  |      | 106  |      |
| Breedte van het vak [m]                        | 3.25 |      | 3.25 |      | 3.25 |      |
| Diepte van het vak [m]                         | 0.75 |      | 0.75 |      | 0.75 |      |
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ] | 1500 |      | 1500 |      | 1500 |      |
| Aantal scheepspassages per jaar                | 7000 |      | 7000 |      | 7000 |      |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]            | 15   | 25   | 15   | 25   | 15   | 25   |
| Hoeveelheid instromend sediment [kg]           | 1.81 | 4.52 | 2.71 | 6.78 | 3.62 | 9.04 |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]            | 0.35 | 0.88 | 0.52 | 1.31 | 0.70 | 1.75 |

Er is een gemiddelde aanslibbing van 3 cm. per jaar geconstateerd. De berekening zit er dus een factor 1.7 naast. Dit kan liggen aan het niet meegenomen effect van rottingsslib en het feit dat de invloed van de stroming zich vooral rond de opening zal concentreren. Een reden kan eveneens zijn dat de hoeveelheid zwevend sediment in het kanaal hoger is dan 15 mg/l dit is mogelijkheid omdat bij een scheepspassage er sediment van de kanaalbodem kan loswoelen.

### II.2. Berekeningen met behulp van methode B)

#### II.2.1. Noordhollandsch kanaal

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| Uitstroom debiet [m <sup>3</sup> /s]     | 1.5 |
| Tijdsduur van uitstroom [s]              | 50  |
| Doorstroom oppervlakte [m <sup>2</sup> ] | 3   |
| Invloedsgebied van de stroming [m]       | 25  |

|                                                    |            |             |
|----------------------------------------------------|------------|-------------|
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ]     | 1500       |             |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]                | 10         | 25          |
| Volume van het sediment per jaar [m <sup>3</sup> ] | 3.5        | 8.75        |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]                | <b>5.6</b> | <b>6.36</b> |

Na de berekening van de gemiddelde waarden is dit een specificatie van het sedimentatie gebied.

### II.2.2. Kanaal Wessem-Nederweert : buizen door de waterdichte vooroever

|                                                    |            |           |
|----------------------------------------------------|------------|-----------|
| Uitstroom debiet [m <sup>3</sup> /s]               | 1.5        |           |
| Tijdsduur van uitstroom [s]                        | 50         |           |
| Doorstroom oppervlakte [m <sup>2</sup> ]           | 3          |           |
| Invloedsgebied van de stroming [m]                 | 25         |           |
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ]     | 1500       |           |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]                | 10         | 25        |
| Volume van het sediment per jaar [m <sup>3</sup> ] | 8.8        | 22        |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]                | <b>8.8</b> | <b>22</b> |

### II.2.3. Zijkanaal Twenthekanalen

|                                                    |             |             |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|
| Uitstroom debiet [m <sup>3</sup> /s]               | 1.5         |             |
| Tijdsduur van uitstroom [s]                        | 50          |             |
| Doorstroom oppervlakte [m <sup>2</sup> ]           | 2.5         |             |
| Invloedsgebied van de stroming [m]                 | 30          |             |
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ]     | 1500        |             |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]                | 15          | 25          |
| Volume van het sediment per jaar [m <sup>3</sup> ] | 3.75        | 6.25        |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]                | <b>6.25</b> | <b>10.4</b> |

Het invloedsgebied heeft betrekking op een gebied links en rechts van de opening van  $\frac{1}{2} \cdot 30 = 15$  m. Dit komt overeen met de waargenomen slibrug. Door een volume berekening van de slibrug kan men vergelijken of de uitkomsten reëel zijn. Wij gaan van de volgende afmetingen uit. Hoogte slibrug : 0.95 m ; breedte van de basis : 2.2 m ; lengte van 10 m (zie figuur 4. ). Men komt op een volume van 10.45 m<sup>3</sup> per slibrug. Voor

twee slibruggen komt men dus op 20.9 m<sup>3</sup>. Dit kan men delen door de berekende waarde :  $20.9 / 3.75 = 5.6$  jaar. Dit komt redelijk overeen met het aantal jaar dat de plasberm er ligt namelijk 6 jaar.

#### II.2.4. Wilhelminakanaal

|                                                    |      |      |
|----------------------------------------------------|------|------|
| Uitstroom debiet [m <sup>3</sup> /s]               | 1.5  |      |
| Tijdsduur van uitstroom [s]                        | 50   |      |
| Doorstroom oppervlakte [m <sup>2</sup> ]           | 2.5  |      |
| Invloedsgebied van de stroming [m]                 | 30   |      |
| Dichtheid van de sliblaag [kg/m <sup>3</sup> ]     | 1500 |      |
| Hoeveelheid zwevend sediment [mg/l]                | 15   | 25   |
| Volume van het sediment per jaar [m <sup>3</sup> ] | 3.8  | 5.60 |
| Dikte van de sliblaag per jaar [cm]                | 3.75 | 9.38 |

Gemeten zijn waarden van 3.5 cm. per jaar. Dit komt redelijk overeen met de berekende waarde van 3.75 cm. per jaar. Als kanttekening voor de identieke uitkomst is dat er geen rekening is gehouden met rottingsslib.

## Bijlage III : Invoer in de modellen

## III.1 Invoer in PLONS

## III.1.1. Verversingsgraad van 2 % per schip

## De grootte van de openingen

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening : 0.20 [m]  
 breedte opening : 0.20 [m]  
 hoogte onderkant opening : 0.60 [m + NAP]

## DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte : 1.00 [m]  
 taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]  
 bodemligging : -0.20 [m + NAP]  
 Chezy coefficient : 10.00 [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ]

## LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 150.00 [m]  
 hart op hart afstand openingen : 30.00 [m]

## HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0 : 0.80 [m + NAP]  
 grootte spiegeldaling kanaal : 0.25 [m]  
 duur van de spiegeldaling op kanaal : 30.00 [s]  
 vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

## BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 300.00 [ $\text{m}^3$ ]  
 Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 1.98 [%]

Openingnr Instroomsnelheid ( $u_{\text{in}}$ ) Stroomsnelheid talud ( $u_{\text{talud}}$ )

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.47  | 0.23  |
| 2 | 0.41  | 0.21  |
| 3 | 0.45  | 0.22  |
| 4 | 0.47  | 0.24  |
| 5 | 0.43  | 0.22  |

## Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr  $u_{\text{bo}}[0.00]$   $u_{\text{bo}}[0.70]$   $u_{\text{bo}}[1.00]$ 

|   | [m/s] | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|-------|
| 1 | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| 2 | 0.10  | 0.10  | 0.10  |

|   |      |      |      |
|---|------|------|------|
| 3 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 4 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| 5 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.06 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 195 [s]

#### *De afstand tussen de openingen*

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening : 0.20 [m]

breedte opening : 0.20 [m]

hoogte onderkant opening : 0.60 [m + NAP]

#### DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte : 1.00 [m]

taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]

bodemligging : -0.20 [m + NAP]

Chezy coefficient : 10.00 [m<sup>1/2</sup>/s]

#### LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 150.00 [m]

hart op hart afstand openingen : 30.00 [m]

#### HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0 : 0.80 [m + NAP]

grootte spiegeldaling kanaal : 0.25 [m]

duur van de spiegeldaling op kanaal : 30.00 [s]

vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

#### BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 300.00 [m<sup>3</sup>]

Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 1.98 [%]

Openingnr Instroomsnelheid (u<sub>in</sub>) Stroomsnelheid talud (u<sub>talud</sub>)

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.47  | 0.23  |
| 2 | 0.41  | 0.21  |
| 3 | 0.45  | 0.22  |
| 4 | 0.47  | 0.24  |
| 5 | 0.43  | 0.22  |

#### Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr u<sub>bo</sub>[0.00] u<sub>bo</sub>[0.70] u<sub>bo</sub>[1.00]

|   | [m/s] | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|-------|
| 1 | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| 2 | 0.10  | 0.10  | 0.10  |
| 3 | 0.11  | 0.11  | 0.11  |
| 4 | 0.12  | 0.12  | 0.12  |

5      0.11      0.11      0.11  
 De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsricting: 0.06 [m/s]  
 De totale passagetijd (rekentijd) : 195 [s]

### III.1.2. Verversingsgraad van 1 % per schip

#### De grootte van de opening

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening : 0.15 [m]  
 breedte opening : 0.13 [m]  
 hoogte onderkant opening : 0.65 [m + NAP]

#### DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodem breedte : 1.00 [m]  
 taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]  
 bodemligging : -0.20 [m + NAP]  
 Chezy coefficient : 10.00 [m<sup>1/2</sup>/s]

#### LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 150.00 [m]  
 hart op hart afstand openingen : 30.00 [m]

#### HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0 : 0.80 [m + NAP]  
 grootte spiegeldaling kanaal : 0.25 [m]  
 duur van de spiegeldaling op kanaal : 30.00 [s]  
 vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

#### BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 300.00 [m<sup>3</sup>]  
 Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 0.96 [%]

#### Openingnr Instroomsnelheid (u<sub>in</sub>) Stroomsnelheid talud (u<sub>talud</sub>)

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.60  | 0.21  |
| 2 | 0.60  | 0.21  |
| 3 | 0.60  | 0.21  |
| 4 | 0.60  | 0.21  |
| 5 | 0.60  | 0.21  |

#### Stroomsnelheden aan de bodem

| Openingnr | u <sub>bo</sub> [0.00] | u <sub>bo</sub> [0.49] | u <sub>bo</sub> [0.98] | u <sub>bo</sub> [1.00] |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|           | [m/s]                  | [m/s]                  | [m/s]                  | [m/s]                  |
| 1         | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   |
| 2         | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   |
| 3         | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   |
| 4         | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   | 0.15                   |

5      0.15      0.15      0.15      0.15  
 De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.03 [m/s]  
 De totale passagetijd (rekentijd) : 195 [s]

*De afstand tussen de openingen*

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen  
 hoogte opening : 0.20 [m]  
 breedte opening : 0.20 [m]  
 hoogte onderkant opening : 0.60 [m + NAP]

## DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte : 1.00 [m]  
 taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]  
 bodemligging : -0.20 [m + NAP]  
 Chezy coefficient : 10.00 [ $m^{1/2}/s$ ]

## LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 250.00 [m]  
 hart op hart afstand openingen : 50.00 [m]

## HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op  $t=0$  : 0.80 [m + NAP]  
 grootte spiegeldaling kanaal : 0.25 [m]  
 duur van de spiegeldaling op kanaal : 30.00 [s]  
 vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

## BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 500.00 [m<sup>3</sup>]  
 Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 1.06 [%]

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

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.37  | 0.18  |
| 2 | 0.36  | 0.18  |
| 3 | 0.40  | 0.20  |
| 4 | 0.44  | 0.22  |
| 5 | 0.46  | 0.23  |

## Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr  $u_{bo}[0.00]$   $u_{bo}[0.70]$   $u_{bo}[1.00]$ 

|   | [m/s] | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|-------|
| 1 | 0.09  | 0.09  | 0.09  |
| 2 | 0.09  | 0.09  | 0.09  |
| 3 | 0.10  | 0.10  | 0.10  |
| 4 | 0.11  | 0.11  | 0.11  |
| 5 | 0.12  | 0.12  | 0.12  |

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.05 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 245 [s]

### III.1.3. Verversingsgraad van 1/2 % per schip

#### De grootte van de openingen

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening : 0.10 [m]  
 breedte opening : 0.10 [m]  
 hoogte onderkant opening : 0.70 [m + NAP]

#### DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte : 1.00 [m]  
 taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]  
 bodemligging : -0.20 [m + NAP]  
 Chezy coefficient : 10.00 [m<sup>1/2</sup>/s]

#### LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 150.00 [m]  
 hart op hart afstand openingen : 30.00 [m]

#### HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op t=0 : 0.80 [m + NAP]  
 grootte spiegeldaling kanaal : 0.25 [m]  
 duur van de spiegeldaling op kanaal : 30.00 [s]  
 vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

#### BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 300.00 [m<sup>3</sup>]  
 Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 0.40 [%]

#### Openingnr Instroomsnelheid (u<sub>in</sub>) Stroomsnelheid talud (u<sub>talud</sub>)

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.49  | 0.12  |
| 2 | 0.49  | 0.12  |
| 3 | 0.49  | 0.12  |
| 4 | 0.49  | 0.12  |
| 5 | 0.49  | 0.12  |

#### Stroomsnelheden aan de bodem

| Openingnr | u <sub>bo</sub> [0.00] | u <sub>bo</sub> [0.35] | u <sub>bo</sub> [0.70] | u <sub>bo</sub> [0.85] | u <sub>bo</sub> [1.00] |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|           | [m/s]                  | [m/s]                  | [m/s]                  | [m/s]                  | [m/s]                  |
| 1         | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   |
| 2         | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   |
| 3         | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   |
| 4         | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   |
| 5         | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   | 0.12                   |

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.01 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 195 [s]

*De afstand tussen de openingen*

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening : 0.20 [m]  
 breedte opening : 0.20 [m]  
 hoogte onderkant opening : 0.60 [m + NAP]

DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte : 1.00 [m]  
 taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]  
 bodemligging : -0.20 [m + NAP]  
 Chezy coefficient : 10.00 [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ]

LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 375.00 [m]  
 hart op hart afstand openingen : 75.00 [m]

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op  $t=0$  : 0.80 [m + NAP]  
 grootte spiegel daling kanaal : 0.25 [m]  
 duur van de spiegel daling op kanaal : 30.00 [s]  
 vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 750.00 [ $\text{m}^3$ ]  
 Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 0.75 [%]

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

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.25  | 0.13  |
| 2 | 0.30  | 0.15  |
| 3 | 0.32  | 0.16  |
| 4 | 0.36  | 0.18  |
| 5 | 0.43  | 0.21  |

Stroomsnelheden aan de bodem

Openingnr  $u_{bo}[0.00]$   $u_{bo}[0.70]$   $u_{bo}[1.00]$

|   | [m/s] | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|-------|
| 1 | 0.06  | 0.06  | 0.06  |
| 2 | 0.07  | 0.07  | 0.07  |
| 3 | 0.08  | 0.08  | 0.08  |
| 4 | 0.09  | 0.09  | 0.09  |
| 5 | 0.11  | 0.11  | 0.11  |

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.03 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 308 [s]

## III.1.4. Verversingsgraad van 0.1 % per schip

## De grootte van de openingen

VOOROEVERCONSTRUCTIE: Damwand met openingen

hoogte opening : 0.05 [m]  
 breedte opening : 0.08 [m]  
 hoogte onderkant opening : 0.75 [m + NAP]

## DWARSPROFIEL NATTE STROOK

bodembreedte : 1.00 [m]  
 taludhelling oever (1:m) : 2.00 [-]  
 bodemligging : -0.20 [m + NAP]  
 Chezy coefficient : 10.00 [ $\text{m}^{(1/2)}/\text{s}$ ]

## LENGTE SCHEMATISERING NATTE STROOK

lengte natte strook : 150.00 [m]  
 hart op hart afstand openingen : 30.00 [m]

## HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN EN SCHEEPSGEGEVENS

waterstand in natte strook op  $t=0$  : 0.80 [m + NAP]  
 grootte spiegeldaling kanaal : 0.25 [m]  
 duur van de spiegeldaling op kanaal : 30.00 [s]  
 vaarsnelheid schip : 2.00 [m/s]

## BEREKENINGSRESULTATEN WATERUITWISSELING PLONS 2.0

Totale volume van de natte strook : 300.00 [m<sup>3</sup>]  
 Procentuele volume vaarweg naar natte strook: 0.10 [%]

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

|   | [m/s] | [m/s] |
|---|-------|-------|
| 1 | 0.35  | 0.05  |
| 2 | 0.35  | 0.05  |
| 3 | 0.35  | 0.05  |
| 4 | 0.35  | 0.05  |
| 5 | 0.35  | 0.05  |

## Stroomsnelheden aan de bodem

| Openingnr | $u_{bo}[0.00]$ | $u_{bo}[0.22]$ | $u_{bo}[0.44]$ | $u_{bo}[0.54]$ | $u_{bo}[0.89]$ | $u_{bo}[1.00]$ |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | [m/s]          | [m/s]          | [m/s]          | [m/s]          | [m/s]          | [m/s]          |
| 1         | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           |
| 2         | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           |
| 3         | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           |
| 4         | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           |
| 5         | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           |

De maximum opgetreden stroomsnelheid in langsrichting: 0.00 [m/s]

De totale passagetijd (rekentijd) : 195 [s]

*De afstand tussen de openingen*

Evenals de hiervoor berekende waarde daar de afstand tussen de openingen in PLONS niet groter genomen kan worden dan 75 meter.

## III.1 Invoer in DUFLOW

## III.1.1. Invoer van de natte strook met een slibvang

\* DUFLOW data file :DUFLOW\AFS\TWENTH.NET

\* Network data      program version: 2.04

\*

SECT 1      1      1      2      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 2      2      2      3      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 3      3      3      4      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 4      4      4      5      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 5      5      5      6      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 6      6      6      7      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 7      7      7      8      1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W           0.0   3.6  
H 0.0000 1.0000



BS 2.0000 3.0000

SECT 8 8 8 9 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 9 9 9 10 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 10 10 10 11 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 11 11 11 12 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 12 12 12 13 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 13 13 13 14 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 14 14 14 15 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 15 15 15 16 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 16 16 16 17 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 17      17    17    18    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 18      18    18    19    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 19      19    19    20    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 20      20    20    21    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 21      21    21    22    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 22      22    22    23    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 23      23    23    24    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 24      24    24    25    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 25      25    25    26    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 26      26    26    27    1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 27        27   27   28        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 28        28   28   29        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 2.0000  
 BS   4.0000 4.0000

SECT 29        29   29   30        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 2.0000  
 BS   4.0000 4.0000

SECT 30        30   30   31        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 2.0000  
 BS   4.0000 4.0000

SECT 31        31   31   32        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 2.0000  
 BS   4.0000 4.0000

SECT 32        32   32   33        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 2.0000  
 BS   4.0000 4.0000

SECT 33        33   33   34        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 34        34   34   35        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6  
 H   0.0000 1.0000  
 BS   2.0000 3.0000

SECT 35        35   35   36        1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
 W            0.0   3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 36 36 36 37 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 37 37 37 38 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 38 38 38 39 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 39 39 39 40 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 40 40 40 41 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 41 41 41 42 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 42 42 42 43 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 43 43 43 44 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000  
BS 2.0000 3.0000

SECT 44 44 44 45 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00  
W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 45 45 45 46 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 46 46 46 47 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 47 47 47 48 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 48 48 48 49 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 49 49 49 50 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 50 50 50 51 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 51 51 51 52 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 52 52 52 53 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

SECT 53 53 53 54 1 -1.00 -1.00 65.00 65.00

W 0.0 3.6

H 0.0000 1.0000

BS 2.0000 3.0000

|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
|---------|--------|--------|----|---|-------|-------|--------|-------|
| SECT 54 | 54     | 54     | 55 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| SECT 55 | 55     | 55     | 56 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| SECT 56 | 56     | 56     | 57 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| SECT 57 | 57     | 57     | 58 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| SECT 58 | 58     | 58     | 59 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| SECT 59 | 59     | 59     | 60 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| SECT 60 | 60     | 60     | 61 | 1 | -1.00 | -1.00 | 65.00  | 65.00 |
| W       | 0.0    | 3.6    |    |   |       |       |        |       |
| H       | 0.0000 | 1.0000 |    |   |       |       |        |       |
| BS      | 2.0000 | 3.0000 |    |   |       |       |        |       |
|         |        |        |    |   |       |       |        |       |
| STRU 1  | 301    | 62     | 31 | 0 | -0.50 | 1.00  | 999.00 |       |
| MU      | 1.000  | 1.000  |    |   |       |       |        |       |