

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

HYDRAULISCHE ASPECTEN T. A. V. METEN STROMINGSWEERSTAND IN  
OPEN LEIDINGEN BIJ EEN NIET-PERMANENTE AFVOER

E. P. Guerner

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties. Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten. Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking.

YSH 216621-01

## INHOUD

	blz.
1. INLEIDING	1
2. NIET-PERMANENTE STROMING	2
2.1. Bewegingsvergelijking	2
2.2. Dynamische- of kinematische golf	3
2.3. Rekenschema	6
2.4. Berekening tijdstap en strenglengte	8
2.5. Conclusie	11
3. CRITERIA VOOR DE METINGEN	13
3.1. Debiet	13
3.2. Meetpunten	14
4. BEREKENEN STROMINGSWEERSTAND MET BEHULP VAN COMPUTER MODEL	16
4.1. Aanpassen weerstand	16
4.2. Invloed type afvoergolf	17
4.3. Modelrand	17
4.4. Stuw	18
5. CONCLUSIE	19
6. LITERATUUR	20
7. GEBRUIKTE SYMBOLEN	21

## 1. INLEIDING

Door het CABO wordt op voordracht van de Werkgroep Beheer en Onderhoud Waterlopen onderzoek verricht naar de relatie tussen vegetatie en stromingsweerstand en de betekenis daarvan voor het onderhoud. Om het effect van vegetatie op de stromingsweerstand vast te kunnen stellen is door het CABO voorgesteld om een reeks van metingen uit te voeren. Voor verschillende soorten slootvegetatie zal de stromingsweerstand in het veld worden gemeten. Deze metingen worden meerdere keren tijdens het groeiseizoen herhaald, om zodoende de variatie in weerstand te kunnen bepalen. De resultaten van deze metingen moeten leiden tot een uitspraak over de mate en frequentie van onderhoud. Dit houdt in dat een relatie bepaald zal moeten worden tussen frequentie van onderhoud en het risico van wateroverlast.

Bij de uitvoering van stromingsmetingen wordt meestal gezocht naar situaties met een permanente stroming. Een permanente stroming kan voor bijna alle meet-trajecten niet bereikt worden, of alleen met een te gering debiet. Door het CABO is daarom voorgesteld om een gemeten niet-permanente afvoergolf te simuleren met een computermodel en daarmee de stromingsweerstand te herleiden.

De metingen zullen door het aspect van de niet-permanente stroming aan bepaalde eisen moeten voldoen, zodat het mogelijk is om de afvoergolf te kunnen simuleren met een computermodel. Het doel van deze nota is om weer te geven in hoeverre thans beschikbare berekeningsmodellen voor niet-permanente stroming gebruikt kunnen worden en vast te stellen aan welke eisen de metingen moeten voldoen.

## 2. NIET-PERMANENTE STROMING

### 2.1. Bewegingsvergelijking

Om de stroming van water in een waterloop te simuleren wordt gebruik gemaakt van de continuïteits- en de bewegingsvergelijking. Deze luiden :

$$\frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{\delta A}{\delta t} = 0 \quad (1)$$

en

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left( \alpha \frac{Q \cdot Q}{A} \right) + g A \frac{\delta h}{\delta x} + g A I = 0 \quad (2)$$

hierin is  $Q$  het debiet in de waterloop,  $h$  de waterdiepte,  $A$  het doorstroomoppervlak,  $\alpha$  een coëfficiënt afhankelijk van de snelheidsverdeling over het oppervlak,  $g$  de versnelling van de zwaartekracht en  $I$  de helling van de energielijn.

De continuïteitsvergelijking geeft de verandering in de tijd van het natte dwarsprofiel  $\delta A / \delta t$ , als gevolg van debietsveranderingen  $\delta Q / \delta x$  in de stroomrichting. De bewegingsvergelijking (2) is in een iets andere vorm het eerst voorgesteld door de Saint-Venant in 1871. In de literatuur wordt vergelijking (2) daarom veelal de Saint-Venant vergelijking genoemd.

Vergelijking (2) geldt voor turbulente en een-dimensionale stroming, waarbij de verticale snelheidscomponent is verwaarloosd. Er is dan sprake van een "lange golf", die optreedt indien de snelheidsverandering relatief langzaam en gelijkmatig verloopt ( geen wind- of translatie golf ).

De eerste term in vergelijking (2) beschrijft de invloed van de traagheid en de tweede en derde term de invloed van respectievelijk een niet-uniforme stroomverdeling en hydrostatische druk.

De helling van de energielijn komt tot uiting in de laatste term. Deze kan gesplitst worden in een term ten gevolge van het bodemverhang ( $I_0$ ) en de stromingsweerstand ( $I_f$ ) :

$$g A I = g A I_f - g A I_0 \quad (3)$$

De stromingsweerstand kan berekend worden met de formule van Chezy of Manning :

Chezy :

$$g A I_f = g \frac{Q |Q|}{C^2 R A} \quad (4)$$

Manning :

$$g A I_f = g \frac{n Q |Q|}{R^{4/3} A} \quad (5)$$

De omrekening Manning naar Chezy of andersom gaat met de relatie :

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (8)$$

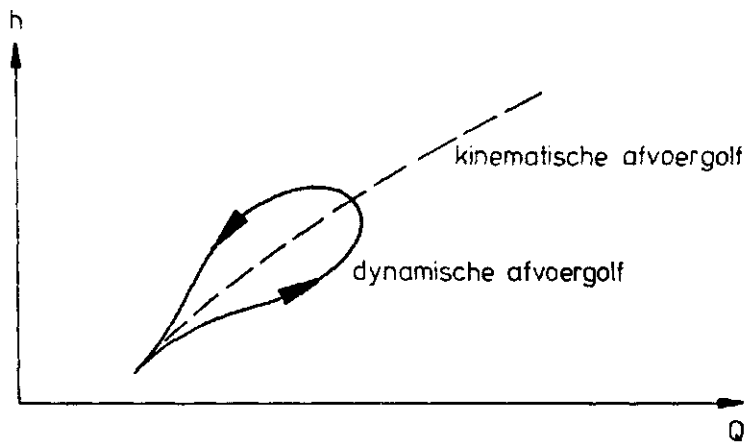
Hierin is C de Chezy coëfficiënt, R de hydraulische straal en n de ruweheidsfactor in de formule van Manning. De waarde  $1/n$  wordt doorgaans aangeduid als  $K_M$ .

Voor sommige typen afvoergolven kunnen enkele termen uit de Saint-Venant vergelijking worden verwaarloosd i.v.m. hun geringe invloed. Zo kunnen de traagheid en de niet-uniforme stroomverdeling een zeer geringe invloed hebben, bijvoorbeeld bij een zeer traag systeem waar de afvoergolf zeer langzaam verandert, zoals in grote rivieren. Men spreekt dan van een kinematische golf. Daarentegen kan men met de volledige bewegingsvergelijking dynamische golven (incl. kinematische golven) simuleren. Dit zijn golven die een snellere variatie van het debiet hebben.

De voorgestelde afvoergolven voor het meten van de stromingsweerstand zullen relatief snelle veranderingen van het debiet voortbrengen ( $Q_{min}$  tot  $Q_{max} = 1$  uur), zodat het vermoedelijk nodig is om voor het simuleren van de afvoergolf in het computermodel de volledige Saint-Venant vergelijking te gebruiken. Of dit altijd nodig is kan bepaald worden met een methode die in paragraaf 2.2 wordt besproken.

## 2.2. Dynamische- of kinematische afvoergolf

Indien het bodemverhang klein is en het debiet snel varieert, dan speelt de traagheidsterm een belangrijke rol. Voor een bepaald debiet zijn er dan twee waterdieptes mogelijk. Bij een stijgende waterspiegel is het debiet groter dan bij een dalende (zie figuur 1).



Figuur 1 - Afvoerkromme

Uit metingen is gebleken dat voor rivieren met een bodemverhang kleiner dan 0,001, de invloed van de traagheid te verwaarlozen is (CUNGE, J.A. et. al., 1980).

Voor afvoergolven in het algemeen zijn door GRIJSEN (1976) criteria opgesteld die het karakter van een golf definiëren. Hiervoor zijn twee dimensieloze parameters gebruikt, namelijk het getal van Froude :

$$Fr = \frac{Q}{(g A^3 / B)^{1/2}} \quad (6)$$

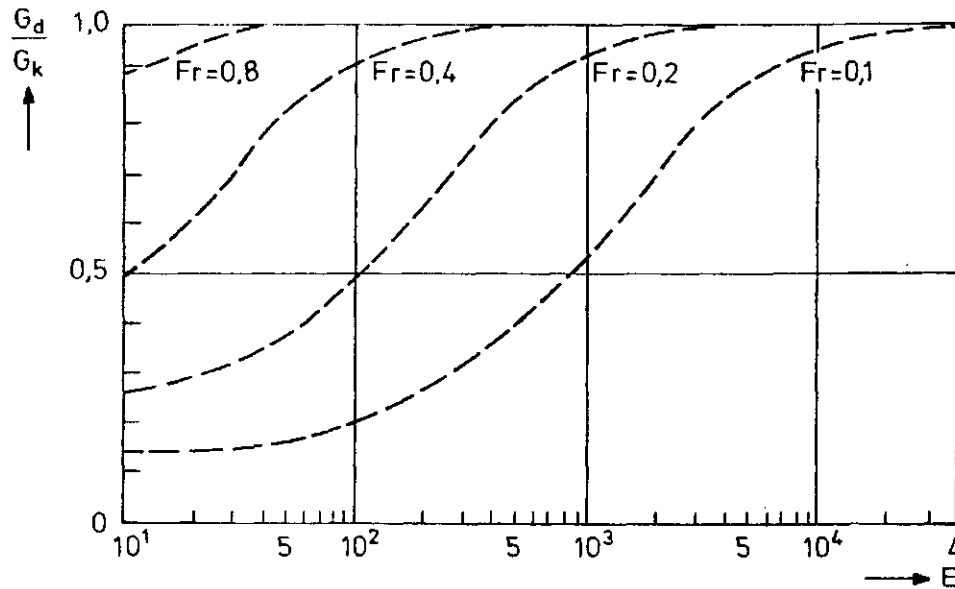
en een factor :

$$E = \frac{n^4 g^3 A B T^2}{B^2 R^{8/3}} \quad (7)$$

waarin B de breedte van de waterspiegel is en T de golfperiode. Voor vergelijking (6) en (7) kunnen de maximale waarden worden genomen, dus het debiet en waterstanden tijdens hoogwater.

Met behulp van figuur 2 kan het verschil in voortplantingssnelheid worden berekend tussen een oplossing gebaseerd op een dynamische golf ( $G_d$ ) en kinematische golf ( $G_k$ ). Uit figuur 2 blijkt dat voor een oplossings procedure gebaseerd op een kinematische golf al gauw niet genoeg demping wordt berekend, waardoor de golf niet genoeg vervormt. Indien uit de berekening blijkt dat de verhouding tussen de voortplantingssnelheden groter dan 0,97 is, dan

mogen alleen de termen voor een kinematische golf in de bewegingsvergelijking aanwezig zijn en de traagheids termen kunnen worden verwaarloosd.



Figuur 2 - Verhouding tussen voortplantingssnelheid van kinematische en dynamische afvoergolf

Als voorbeeld nemen we een open leiding waarin een afvoergolf optreedt met de volgende gegevens :

debiet	$Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$
doorstroom profiel	$A = 1,0 \text{ m}^2$
breedte waterspiegel	$B = 2,0 \text{ m}$
stromingsweerstand	$n = ,035$
golfperiode	$T = 2 \text{ uur}$
hydraulische straal	$R = 0,30 \text{ m}$

Vergelijking (6) en (7) geeft :

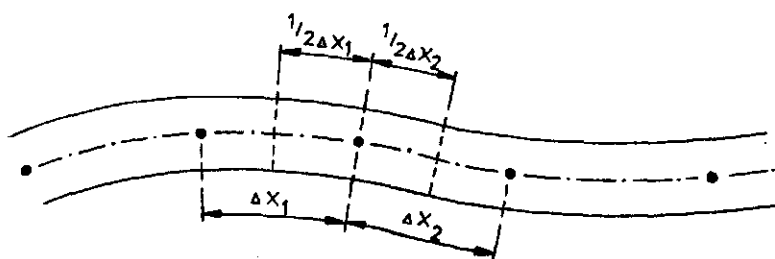
$$Fr = 0,22 \quad \text{en} \quad E = 675$$

Uit figuur 2 volgt dat  $G_d / G_k = 0,90$ .

Met alleen de bewegingsvergelijking gebaseerd op een kinematische golf zal de voortplantingssnelheid groter zijn dan bij een oplossing met de volledige vergelijking ( dynamische golf ). Bij een iets groter getal van Froude of de factor E, zal de verhouding  $G_d / G_k$  groter dan 0,97 zijn. Deze afvoergolf heeft dan een karakter die met of zonder verwaarlozingen in de bewegingsvergelijking gesimuleerd kan worden. In paragraaf 4.2. wordt hier verder op ingegaan, wat voor gevolgen dit kan hebben op de berekeningsprocedure van de wrijvingsweerstand.

### 2.3. Rekenschema

Vergelijking (2) geeft de hydraulische relatie waarmee de stromingsparameters van opeenvolgende punten langs een waterloop gerelateerd zijn. Dus voor een open waterloop, waarbij de stroming voldoet aan de criteria voor de Saint Venant vergelijking, kan een eindige differentie schema worden opgesteld met twee punten op een afstand  $\Delta x$  van elkaar. Elk punt is dan representatief voor een lengte waterloop van  $1/2 \Delta x_1 + 1/2 \Delta x_2$  zoals weergegeven in figuur 3. De afstand tussen twee knooppunten  $\Delta x$  is de strenglengte. Voor de knooppunten wordt de waterhoogte berekend en voor iedere streng een debiet.

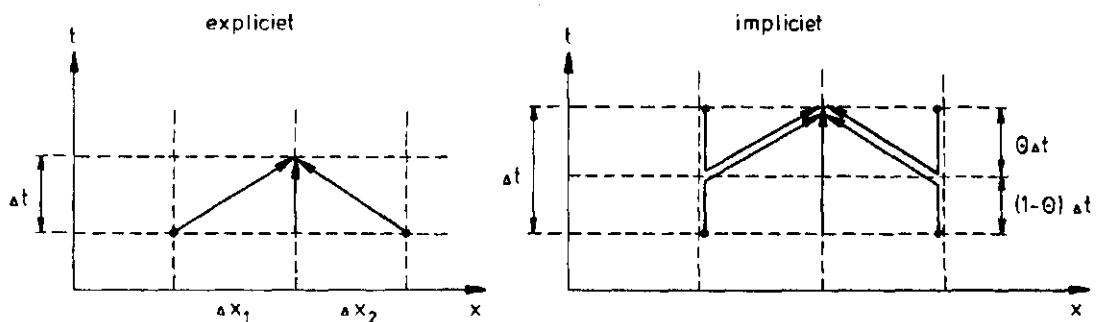


Figuur 3 - Schematisatie van een waterloop

Met de eindige differentiemethode kan de waterstand op een tijdstip  $t + \Delta t$ , berekend worden uit alleen de situatie op tijdstip  $t$ . In dit geval spreekt men van een expliciet rekenschema ( zie figuur 4 ). Indien voor het berekenen van de waterstanden en debieten op tijdstip  $t + \Delta t$  ook gebruik wordt gemaakt van de onbekende naburige waarden op hetzelfde tijdsniveau, dan spreekt men van een impliciet rekenschema. De grootste stabiliteit van het rekenproces geeft een



impliciete rekenmethode. Hier wordt meestal een wegingsfactor  $\theta$  geïntroduceerd. Deze factor dient voor de weging van tijdsafhankelijke en niet-afgeleide termen uit de vergelijkingen tussen tijdstap  $t$  en  $t + \Delta t$  ( zie figuur 4 ).



Figuur 4 - Expliciet- en impliciet rekenschema

Indien  $\theta = 0,5$ , dan wordt de grootste nauwkeurigheid verkregen ( VREUGDENHIL, 1973 ). Echter de stabiliteit is nu marginaal. Een grotere zekerheid dat het rekenproces stabiel is, wordt verkregen door de wegingsfactor iets groter dan 0,5 te nemen. De waarde 0,55 is gebleken het optimale resultaat te geven t. a. v. nauwkeurigheid en stabiliteit.

Indien een expliciet rekenschema wordt gehanteerd, dan moet de tijdstap en de strenglengte zodanig gekozen worden, dat voldaan wordt aan de Courant voorwaarde :

$$\mu = \frac{2 \cdot c \cdot \Delta t}{x_k} \quad (9)$$

Het Courant getal  $\mu$  geeft aan of de stabiliteit van de oplossing kan worden gegarandeerd. Bij een expliciet rekenschema moet het Courant getal kleiner dan 1,0 zijn. In vergelijking (9) is  $x_k$  de kleinste strenglengte in de schematisatie van de open leidingen en  $c$  de voortplantingssnelheid van een storing. De voortplantingssnelheid kan benaderd worden met de vergelijking :

$$c = \sqrt{g h} \quad (10)$$

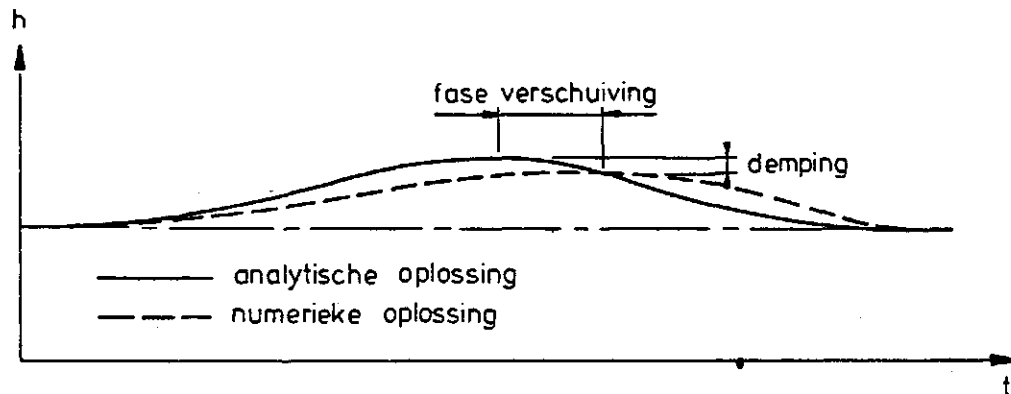
waarin  $h$  de gemiddelde waterdiepte is.

Bij een impliciet rekenschema kunnen de tijdstap en de strenglengte in principe willekeurig worden genomen, maar met een beperking in de relatie tot de lengte en de periode van de golf die berekend moet worden. Hierbij is in de meeste gevallen een grotere tijdstap mogelijk, zonder dat dit grote consequenties heeft voor de nauwkeurigheid van de resultaten. In de volgende paragraaf wordt nader op de nauwkeurigheid ingegaan bij het vast stellen van deze parameters.

De meeste computermodellen zijn thans gebaseerd op een impliciet rekenschema. In het navolgende zal daarom alleen uitgegaan worden van een impliciet rekenschema, zonder dat dit vermeld wordt.

#### 2.4. Berekening tijdstap en strenglengte

Zoals in de vorige paragraaf al is vermeld, is de keuze van de tijdstap en strenglengte vrij, maar niet willekeurig ( impliciet ). Onnauwkeurigheden bestaan uit numerieke damping en een onjuiste weergave van de voortplantingssnelheid van een afvoergolf. Deze kunnen ontstaan als een onjuiste keuze van de stapgrootte wordt gedaan ( zie figuur 5 ).



Figuur 5 - Verschil analytische- en numerieke oplossing

De tijdstap en strenglengte dienen gekozen te worden in relatie tot de golflengte en periode ( VREUGDENHIL, 1973 ). De berekening van de toelaatbare tijdstap in combinatie met een gekozen strenglengte kan duidelijk worden gemaakt met onderstaand voorbeeld. Hiervoor nemen we een afvoergolf in een meettraject met de volgende gegevens :

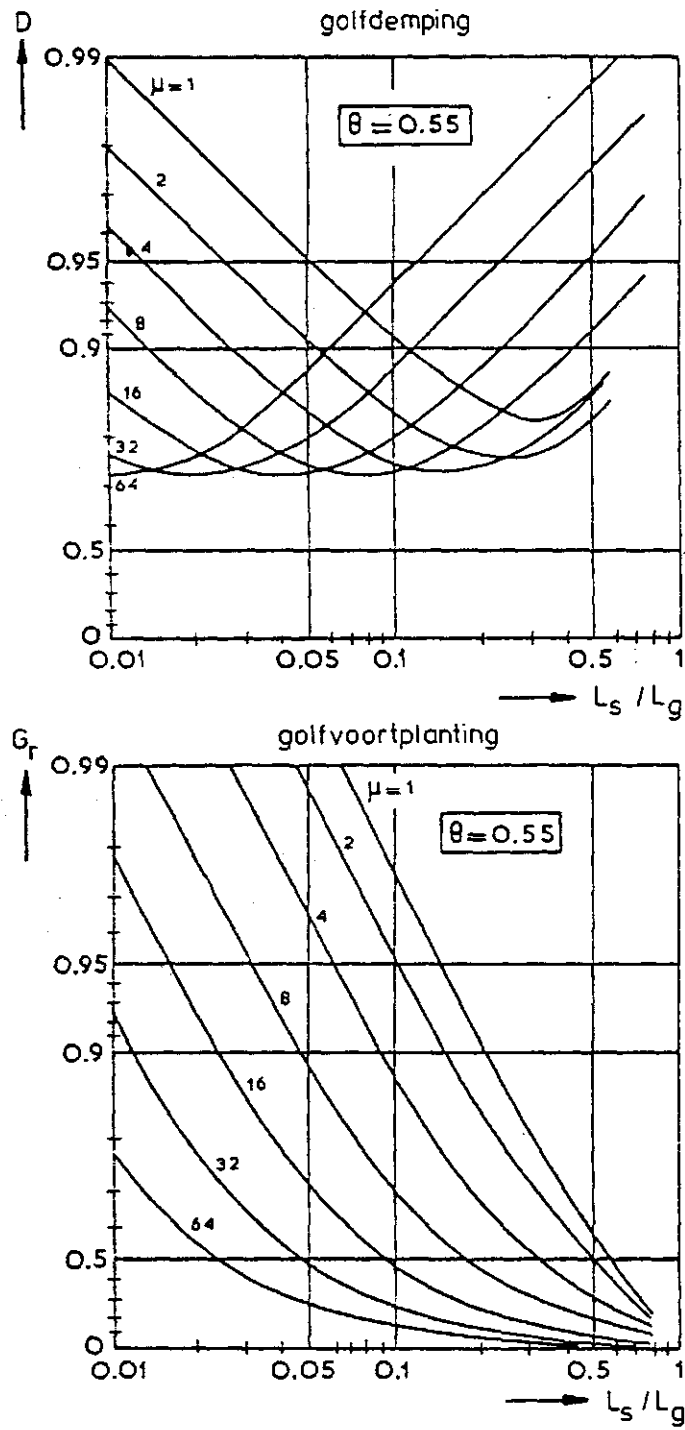
slootlengte	$L$	=	1000 m
strenglengte	$L_s$	=	20 m
waterdiepte	$h$	=	0,5 m
tijdsduur van afvoergolf	$T$	=	2 uur

De relatieve demping en golfvoortplanting geeft de verhouding tussen analytische en numerieke oplossing. De gewenste nauwkeurigheid hiervoor is :

relatieve demping	$D^{L/L_g}$	>	0,98
relatieve golfvoortplanting	$G_T$	>	0,98

Resultaat :

Voortplantingssnelheid ( vergl. 10 )	=	2,2 m/s
Golflengte ( $L_g$ )	=	$2,2 * 2 * 3600 = 15.800$ m
$L_s / L_g$	=	$20 / 15.800 = 0,0013$



Figuur 6 - Nauwkeurigheid van de numerieke oplossing

Uit figuur 6 kan voor demping en golfvoortplanting een maximale waarde voor  $\mu$  verkregen worden. Met vergelijking (9) wordt dan de maximale tijdstap berekend.

Demping :

$$D = \frac{1000}{24000} > 0,98$$
$$D > 0,62$$
$$\mu = 64 \text{ ( zie figuur 6 )}$$
$$t = L \mu / 2 C \text{ ( vergl. 9 )}$$
$$t = 20 * 64 / 2 * 2,2 = 290 \text{ sec}$$

Golfvoortplanting :

$$G_r > 0,98$$
$$\mu = 15 \text{ ( zie figuur 6 )}$$
$$t = 20 * 15 / 2 * 2,2 = 68 \text{ sec}$$

Voor een meettraject van 1 km lengte is de invloed van numerieke golfdemping geringer dan de relatieve voortplantingssnelheid. De toe te passen tijdstap wordt dus bepaald door de gewenste nauwkeurigheid van de golfvoortplanting. De hier gegeven berekeningsprocedure is niet stringent, maar moet gezien worden als een leidraad.

## 2.5. Conclusie

Met een rekenschema gebaseerd op de volledige Saint-Venant vergelijking kan met voldoende zekerheid worden gesteld dat afvoergolven in open waterlopen kunnen worden gesimuleerd. De tijdstap en strenglengte kunnen meestal vrij worden gekozen, maar beperkingen zijn soms nodig om aan de eis van een toelaatbare nauwkeurigheid te kunnen voldoen.

In het algemeen kan men wel stellen dat door een verfijning van het aantal punten in het netwerk ( kleinere strenglengte ) de analytische oplossing wordt benaderd.

De stromingsweerstand in vergelijking (2) kan dus gebaseerd worden op de Chezy of Manning formule. Vergelijking (8) geeft ook weer dat tussen deze twee

formules een verhouding bestaat met als relatie de hydraulische straal tot de macht eenzesde. Doordat met een afvoergolf wordt gewerkt die in de tijd een variabele waterdiepte en dus ook hydraulische straal heeft, kan nu niet eenduidig een C-waarde berekend worden met een gegeven n-waarde, of andersom. Dit impliceert dat de wrijvingsformule in het computermodel ook gebaseerd moet zijn op bijvoorbeeld de Manning formule, als men met dit model een n-waarde wil verifiëren.

Het debiet mag niet te snel variëren, omdat dan niet meer voldaan wordt aan de criteria voor de Saint-Venant vergelijking. Het debiet moet dus langzaam toenemen tot een maximum. Op de vorm van de afvoergolf zal in het volgende hoofdstuk nader worden ingegaan.

### 3. CRITERIA VOOR DE METINGEN

#### 3.1. Debiet

Aangezien men een niet-permanente golf in een waterloop met een computermodel wil simuleren, moet men alle factoren die de vorm van een afvoergolf bepalen, kwantificeren. Dit zijn in de eerste plaats de afmetingen en ligging van de waterloop, en het debiet in de tijd.

Een mogelijk waterverlies in het meettraject kan verder van invloed zijn. Omdat men met een afvoergolf werkt is dit verlies niet eenvoudig te kwantificeren. Dit verlies kan een gevolg zijn van de invloed van de omliggende grondwaterstand of het aanwezig zijn van zijsloten.

Variatie in drainage of infiltratie is niet te verwaarlozen. Doordat de waterspiegel stijgt tijdens de afvoergolf, neemt de infiltratie toe of neemt de drainage hoeveelheid af. Over een traject van bijvoorbeeld 1 km ligt de variatie in het debiet in de orde van 10 - 20 l/sec. Voor de trajecten moet dit gecontroleerd worden door tijdens de afvoergolf continue het debiet zowel boven als benedenstrooms van het meettraject te meten.

Zijsloten moeten geheel afgedamd worden gedurende de metingen of anders moet hun effect in het computermodel gebracht worden. Dit kan in de meeste gevallen gedaan worden door per niveau het toegevoegde bergingsoppervlak op te geven.

Over het gehele traject zal het doorstroomprofiel bekend moeten zijn. Niet alleen het meettraject is van belang, maar dat gedeelte wat door het computermodel nagerekend wordt. Verschil in werkelijke en aangenomen dwarsprofielen zal leiden tot een opstuwung of verlaging van de waterstand die niet in het computermodel tot uiting komt, zodat geen calibratie mogelijk is. Of er wordt een foute stromingsweerstand berekend.

De stromingsweerstand van de vegetatie in de open leidingen is in zekere mate afhankelijk van de stroomsnelheid. Bij een groter wordende snelheid zullen lange stengels door de stroming worden omgebogen, zodat de stromingsweerstand zal afnemen. Bij een afvoergolf zal men zodoende een gemiddelde stromingsweerstand bepalen die representatief is voor een bepaald debiet. Voor soorten vegetatie, gekarakteriseerd met betrekking tot de dichtheid en stengellengte, zal men dus enkele afvoergolven moeten meten met een verschillend maximaal debiet (bijv.  $1/3 Q_m$ ,  $2/3 Q_m$ ,  $Q_m$ ). Hieruit kan de invloed van de stroomsnelheid op de stromingsweerstand enigszins bekeken worden.

Het is noodzakelijk om een zekere minimum stroomsnelheid te bereiken gedurende de piek van de afvoergolf. Om een

redelijk verschil in waterstand tussen twee opeenvolgende meetpunten te verkrijgen is dit nodig. Voor een open leiding met een bodembreedte van 1,0 m, een taludhelling van 1 : 2, en een waterdiepte van 0,5 m, zijn de waterstandsverschillen over een lengte van 100 m in Tabel I gegeven.

Tabel I - Verschil in waterstand over 100 m bij enkele gemiddelde stroomsnelheden en permanente stroming (  $n = 0,032$  )

gem stroom- snelheid m/s	waterstands verschil m
0,1	0,005
0,2	0,020
0,3	0,045
0,4	0,081
0,6	0,184

Bij een stroomsnelheid kleiner dan 0,3 m/s tredt er nauwelijks een meetbaar niveau verschil op. Onnauwkeurigheden in het meten van de waterstanden zal dan een te grote invloed hebben op het niveau verschil. De onnauwkeurigheid van de stromingsweerstand zal dan groter zijn.

### 3.2. Meetpunten

De plaats van de meetpunten in het veld kan het beste zo gekozen worden dat tussen de meetpunten geen grote verschillen in dwarsprofiel optreden en geen bochten of andere factoren aanwezig zijn, die de stroming beïnvloeden. Tussen de meetpunten kan een minimum afstand van 50 m en een maximum van 150 m worden aangehouden. Bij langere meettrajecten is de kans groot dat er toch een variatie in vegetatie ( dus weerstand ) optreedt, die weer moeilijk te kwantificeren is voor het computermodel.

Een slootpand met eenzelfde stromingsweerstand kan het beste in twee stukken worden verdeeld van ongelijke lengte met drie meetpunten. Om bij het optreden van onvoorziene effecten, zoals waterstandsverschillen, dit te kunnen signaleren en mogelijk de reden en invloed hiervan te bepalen. Een ideale afstand van een meettraject is daarom



een stuk van 60 - 80 m en een stuk van 90 - 120 m.

Meetpunten mogen niet te dicht bij een verstoring worden gesitueerd. Objecten die de stroming verstoren zijn bijvoorbeeld stuwen, duikers, scherpe bochten, verandering van begroeiing, enz. Bij stuwen en duikers moet men afhankelijk van de verandering in de stroomsnelheid en de turbulentie die deze veroorzaken ten minste hier 20 - 30 m benedenstrooms van deze objecten verwijderd blijven.

Bij een overgang in weerstand heeft het water een zekere afstand nodig om zich van de ene wandruwheid zich in te stellen op de andere.

Als er meer meettrajecten achter elkaar liggen, dan zullen deze elkaar kunnen beïnvloeden, vooral als er een groot verschil in stromingsweerstand is. Indien er bovenstrooms van een meettraject met een grote stromingsweerstand een traject ligt met een kleine weerstand, dan heeft de grote opstuwung in het benedenstroomse stuk tot gevolg dat er over het traject met de kleine weerstand een veel geringer waterstandsverschil zal optreden. Dit beïnvloedt dan weer de nauwkeurigheid van de berekende weerstand met het computermodel. Het is daarom aan te bevelen om in zulke gevallen een afstand van tenminste 100 m tussen de meettrajecten aan te houden. Voor andere gevallen is 20 m voldoende.

#### 4. BEREKENEN STROMINGSWEERSTAND MET BEHULP VAN COMPUTER MODEL

##### 4.1. Aanpassen weerstand

Met het computermodel is het nu nodig om de gemeten afvoergolf te simuleren. Dit levert dan de wrijvingsweerstand op van de vegetatie in de waterloop.

Het simuleren heeft een iteratief karakter. Met een aangenomen stromingsweerstand rekent men de waterstanden in de waterloop uit. Door het verschil in de berekende en gemeten waterstanden te vergelijken, komt men tot een nieuwe weerstand voor het computermodel. Wanneer de uitkomsten van de simulatie goed overeenstemt met de gemeten waarden, dan is de juiste stromingsweerstand gevonden.

Het aanpassen van de weerstand voor het computermodel na elke berekening zal afhangen van het verschil in gemeten en berekende resultaten. Omdat er met een niet permanente stroming wordt gerekend kan hier niet eenvoudig een formule voor worden opgesteld. Indien er sprake zou zijn van een permanente stroming dan kan men de nieuwe stromingsweerstand eenvoudig berekenen. Nemen we de Manning formule als uitgangspunt, dan volgt :

$$Q = K I^{1/2} \quad (11)$$

$$K = 1/n A R^{2/3} \quad (12)$$

$$\frac{1}{n_{cp}} = \frac{1}{n_m} \cdot \left( \frac{h_m}{h_{cp}} \right)^{5/3} \cdot \left( \frac{I_m}{I_{cp}} \right)^{1/2} \quad (13)$$

In vergelijking (13) staat de index cp voor computermodel en m voor gemeten waarden. Verondersteld is dat de hydraulische straal benaderd kan worden met de relaties :

$$R_{cp} \approx a h_{cp}$$

$$R_m \approx a h_m$$

Voor een afvoergolf is vergelijking (13) eigenlijk niet geheel juist. De waterdiepte die in de vergelijking nodig is, varieert immers in de tijd. Het kan echter wel als ruwe

aanname dienen voor het vaststellen van een nieuwe stromingsweerstand. Voor de waterdiepte  $h_m$  en  $h_{cp}$  kan men dan de gemiddelde waterdiepte nemen.

#### 4.2. Invloed type afvoergolf

Indien het karakter van een afvoergolf als kinematisch beschouwd kan worden, dan kan eenvoudig als eerste aanname de stromingsweerstand bepaald worden. Met het gemeten debiet en de daarbij corresponderende waterstanden in de meetpunten kan onder aanname van een permanente stroming de weerstand direct worden berekend. Over het meettraject kan er een niet te kwantificeren fout in de grootte van het debiet voorkomen. Dit verschil wordt dan veroorzaakt door het afnemen van het debiet door berging van water in het systeem. De zo berekende stromingsweerstand zal met het computermodel nog moeten worden gecontroleerd. Uit de praktijk zal moeten blijken in hoeverre deze eenvoudige benadering toepasbaar is en welke onnauwkeurigheid er in het bepalen van de stromingsweerstand optreedt.

#### 4.3. Modelrand

Als randvoorwaarde benedenstrooms moet er in principe een stuw aanwezig zijn. Anders moet er een grote afstand liggen tussen het laatste meetpunt en de modelrand. Indien geen stuw aanwezig is, dan kunnen storingen benedenstrooms van het laatste meetpunt van invloed zijn op de waterstand bovenstrooms van dit meetpunt (bijv. opstuwing). Deze effecten zijn dan niet in het computermodel te ondervangen, waardoor geen juiste calibratie mogelijk is. Wat er bij een stuw benedenstrooms gebeurt, is niet van invloed op de waterstand bovenstrooms van de stuw. Dit geldt alleen bij een volkomen overlaat. Indien geen stuw aanwezig is, zal de sloot ver na het laatste meetpunt nog ingemeten moeten worden en in het computermodel gebruikt moeten worden. De afstand hiervoor is sterk afhankelijk van het debiet en de situatie die benedenstrooms van het laatste meetpunt aanwezig is (bijv. duiker of vernauwing), en moet in de orde van 200 - 500 m liggen.

#### 4.4. Stuw

Bij het simuleren van een stuw in het computermodel wordt meestal het debiet berekend met behulp van de bovenstroomse waterhoogte. De snelheidshoogte ( $v^2/2g$ ) wordt dan verwaarloosd, omdat in de meeste gevallen dit van zeer geringe invloed is op de berekening. Indien de snelheidshoogte voor sommige gevallen niet verwaarloosd mag worden, kan men dit ondervangen door in het rekenschema de sloot vlak voor de stuw fictief zeer breed te maken. Dit heeft tot gevolg dat de waterspiegel bovenstrooms van de stuw gelijk zal zijn aan de totale energiehogte en het debiet over de stuw zal dan juist berekend worden. De fictief brede streng zal men een kleine lengte moeten geven, om door de verbreding geen grote fout in de berging ter plaatse van de stuw te creëren.

## 5. CONCLUSIE

Het is mogelijk om met behulp van een niet-permanente afvoergolf de stromingsweerstand te herleiden. Het simuleren van de gemeten afvoergolf kan met de huidige computermodellen gedaan worden. Er zijn restricties t.a.v. de tijdstap en strenglengte, die voornamelijk van invloed zijn op de nauwkeurigheid van de resultaten.

Het afleiden van de stromingsweerstand is mogelijk, maar deze berekende weerstand moet gezien worden als een gemiddelde weerstand bij een gegeven afvoergolf. Hierbij is de opgetreden stroomsnelheid van invloed op de stromingsweerstand. Door PITLO ( 1979 ) is gemeten dat bij een dichte begroeiing er een andere relatie tussen stroomsnelheid en verhang bestaat dan volgt uit de meeste stromingsformules ( bijv. Manning ). Door het herleiden van de weerstand via een computermodel, die gebaseerd is op deze formules, komt dit effect niet tot uiting. Het wordt dan vertaald in een onjuiste waarde van de herleide stromingsweerstand.

De methode brengt wel een hoeveelheid werk met zich mee die bij meten onder permanente stromingstoestand zeer eenvoudig is, of niet van belang. Bijvoorbeeld het verlies van water door infiltratie of berging in zijsloten, is een niet te verwaarlozen factor. Een nauwkeurige meting van debiet en waterstanden in de tijd zal een eerste vereiste zijn.

Fouten kunnen moeilijk opgespoord worden, doordat men met een afvoergolf te maken heeft die in de meeste gevallen alleen te simuleren is met een model. Bijvoorbeeld een onjuiste inschatting van de infiltratie hoeveelheid zal leiden tot een stromingsweerstand van het model die niet overeen komt met de werkelijkheid. Omdat het verschil niet direct aan de infiltratie toegeschreven kan worden, maar resulteert in een grotere stromingsweerstand berekend met het model.

## 6. LITERATUUR

- BOOIJ, N., - Report on the ICES subsystem FLOWS - Communications on Hydraulics. T.H. Delft. Report No 78-3, blz 1-40
- CHOW, V.T., 1959 - Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Kogakusha LTD, Tokyo, 680pp
- CUNGE, J.A., F.M. HOLLY Jr., A VERWEY, 1980 - Practical Aspects of Computational River Hydraulics. Pitman, Londen,
- GRIJSEN, J.G. en C.B. VREUGDENHIL, 1976 - Numerical Representation of Flood Waves in Rivers, International Symposium on Unsteady Flow in Open Channels. Newcastle-Upon Tyne, England, blz K1.1 - K1.14
- PITLO, R.H., 1979 - Biologisch slootonderhoud met gehulp van drijvende vegetaties. Waterschapsbelangen, Vol. 64, blz. 283-290
- VREUGDENHIL, C.B., 1973 - Computational Methods for Channel Flow, Hydraulic Research for Water Management. TNO Verslagen en Mededelingen No 18, Den Haag, blz. 38-79

## 7. GEBRUIKTE SYMBOLEN

A	-	doorstroomoppervlak	$m^2$
B	-	stroomvoerende breedte van waterloop	m
C	-	coëfficiënt van Chezy	$m^{1/2}/s$
c	-	voortplantingssnelheid	m/s
D	-	relatieve demping	-
E	-	dimensieloze parameter	-
Fr	-	getal van Froude	-
G	-	voortplantingssnelheid van een golf	m/s
g	-	versnelling van de zwaartekracht	$m/s^2$
h	-	waterdiepte	m
I	-	verhang	-
L	-	lengte	m
n	-	weerstandsfactor van Manning	$m^{1/3}/s$
Q	-	debiet	$m^3/s$
R	-	hydraulische straal	m
T	-	golfperiode	s
t	-	tijd	s
x	-	plaats	m
$\alpha$	-	coëfficiënt afhankelijk van snelheidsverdeling	-
$\Theta$	-	wegingsfactor	-