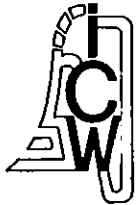


ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ICW Nota 1600
februari 1985



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

DE INVLOED VAN VEGETATIE OP HET WATERDOORVOEREND VERMOGEN
VAN EEN WATERLOOP

ing. E.P. Querner

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, 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

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. HET WATERDOORVOEREND VERMOGEN VAN EEN WATERLOOP	3
2.1. De stromingsformules	3
2.2. Invloed van de variabelen op het waterdoorvoerend vermogen	3
2.3. Wandruwheidscoëfficiënt	5
2.4. Theoretische beschouwing stromingsweerstand	6
2.5. Conclusie	10
3. DE BEGROEIING IN EEN WATERLOOP	11
3.1. Vegetatietypen	11
3.2. Vegetatieontwikkeling in het groeiseizoen	12
3.3. Invloed van onderhoud	12
3.4. Conclusie	13
4. LITERATUUR ONDERZOEK	15
4.1. Inleiding	15
4.2. Nederlands onderzoek	15
4.3. Amerikaans onderzoek	24
4.4. Duits onderzoek	33
4.5. Conclusie	36
5. MOGELIJKE OPZET VAN HET ONDERZOEK	39
5.1. Inleiding	39
5.2. Onderzoeksmodulen	40
5.2.1. Theoretisch onderzoek	40
5.2.2. Vegetatieontwikkeling	40
5.2.3. Hydraulische metingen	41
5.2.4. Model voor verifiëren onderhoud open waterlopen	41
6. LITERATUUR	49
7. GEBRUIKTE SYMBOLEN	52
BIJLAGE A - De formule van Manning en Chézy	54

ALTERRA
Rijksuniversiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

1. INLEIDING

Deze nota behandelt een literatuurstudie over stromingsweerstand in open waterlopen. De vegetatieontwikkeling en de invloed hiervan op de stromingsweerstand wordt in detail besproken. De resultaten van het tot op heden uitgevoerde onderzoek worden gebruikt om aan te geven in welke richting het onderzoek het beste kan worden voortgezet.

Omdat vegetatie in open waterlopen gevarieerd in vorm en afmeting voorkomt, is hierover nog maar weinig bekend. De vele aspecten die een rol spelen bij het bepalen van de stromingsweerstand worden behandeld.

De factoren die een grote invloed hebben op de stromingsweerstand en waarvoor men tot op heden nog geen goede relaties heeft vastgesteld, zijn:

- de invloed van de stroomsnelheid op de stromingsweerstand
- de invloed van een grote variatie in de wandruwheid over het natte profiel
- de ontwikkeling van vegetatie gedurende het groeiseizoen en de daarbij optredende stromingsweerstand

De stroomsnelheid heeft een belangrijk effect op de stromingsweerstand. Bij een groter wordende snelheid zullen bijvoorbeeld de lange stengels door de stroming worden omgebogen of plat gedrukt, waardoor de stromingsweerstand zal afnemen. Het ombuigen van de vegetatie door de stroomsnelheid hangt af van het soort, dat in de waterloop voorkomt.

Bij een variatie in de stromingsweerstand over het natte profiel, kan men niet zomaar met de formules van Manning of Chézy de afvoer berekenen. Het waterdoorvoerend vermogen is afhankelijk van de ruwheden en van het verschil in ruwheid. Bij een groot verschil in ruwheid over het natte profiel geeft het een sterke turbulentie in het overgangsg gebied van de ruwheden, met daardoor een groot energieverlies. Dit heeft weer tot gevolg dat het waterdoorvoerend vermogen wordt verkleind.

De ontwikkeling van de vegetatie gedurende het groeiseizoen staat in principe los van de hydraulische stromingsaspecten. Een bepaalde vegetatieontwikkeling kan men vertalen in factoren zoals afmeting, stengel flexibiliteit, percentage profielvulling en vegetatietype. Met deze variabelen, gedefinieerd als functie van de stromingsweerstand kan men bij elke vegetatieontwikkeling de stromingsweerstand bepalen.

In hoofdstuk 2 zijn enige algemene beschouwingen over de stromingsweerstand opgenomen en de factoren die van invloed zijn op deze weerstand.

In hoofdstuk 3 worden de kenmerken van de vegetatie besproken. Voor een algemeen toepasbare methode om de stromingsweerstand te bepalen, is het nodig om de aanwezige vegetatie naar verschillende categorieën te onderscheiden. Per categorie kan dan geprobeerd worden om relaties op te stellen die de stromingsweerstand als functie van de vegetatie definiëren.

In hoofdstuk 4 is een overzicht gegeven van de literatuurstudie. Onderzoeken die zijn uitgevoerd om met eenvoudige relaties de stromingsweerstand te bepalen en fundamenteel onderzoek, worden uitvoerig besproken. Aan de hand van de literatuurstudie kan men concluderen welke methoden men kan gebruiken onder de Nederlandse omstandigheden.

In hoofdstuk 5 wordt aangegeven in welke vorm het onderzoek het beste uitgevoerd kan worden. Hier wordt onderscheid gemaakt in onderzoek, zowel theoretisch (ook modellen), als in de vorm van praktijkmetingen.

2. HET WATERDOORVOEREND VERMOGEN VAN EEN WATERLOOP

2.1. De stromingsformules

De twee afvoerformules die in de praktijk het meest worden gebruikt, zijn de formule van Chézy en Manning. In bijlage A worden deze beide formules gegeven en verder besproken.

De afvoer in een waterloop is:

$$Q = V A \quad (2.1)$$

hierin is V de gemiddelde stroomsnelheid en A het doorstroomprofiel. In het algemeen heeft de gemiddelde stroomsnelheid de volgende empirische relatie:

$$V = F R^x S^y \quad (2.2)$$

In vergelijking (2.2) is F een factor die de stromingsweerstand aangeeft, R is de hydraulische straal met een exponent x en S is het verhang van de energielijn (meestal ook bodemverhang) met exponent y .

De factor F wordt bepaald door de wandruwheid van het natte profiel te vertalen naar een stromingsweerstand. Voor het vaststellen van de factor F heeft men een relatie bepaald, of men werkt via tabellen waarin de waarde van F wordt gegeven voor verschillende ruwheden en afmeting van de leiding (beide meestal empirisch afgeleid).

De exponent x varieert in het algemeen tussen de 0,50 en 0,66, en de exponent y voor het verhang van de energielijn heeft meestal de waarde 0,50.

2.2. Invloed van de variabelen op het waterdoorvoerend vermogen

Aan de hand van vergelijking (2.1) en (2.2) kan men uitspraken doen over wat het effect van de variabelen uit deze vergelijkingen is op het waterdoorvoerend vermogen.

Het doorstroomprofiel is recht evenredig met het debiet. Het kan nauwkeurig worden gemeten of vastgesteld bij een nieuw ontwerp. Het doorstroomprofiel varieert meestal maar weinig in de tijd, bijvoorbeeld

door verlanding in de vorm van aanslibbing of afsterven van de begroeiing. In waterlopen met veel verlanding moet hiermee rekening worden gehouden (zie ook paragraaf 4.4 en met name figuur 4.15). Het veronderstelde minimum gedegenereerde profiel wordt dan ontwerpprofiel. Het doorstroomprofiel wordt gekozen in relatie met de benodigde maximum afvoercapaciteit en de toelaatbare stroomsnelheid.

De hydraulische straal heeft een geringe invloed op het waterdoorvoerend vermogen. De hydraulische straal is afhankelijk van de geometrie van de waterloop. De hydraulische straal varieert globaal tussen de 0,45h en 0,70h voor kleine waterlopen tot 6,00 m breed. Hierbij is h de waterdiepte van een verondersteld trapeziumvormig profiel.

Het verhang heeft een geringe invloed op het waterdoorvoerend vermogen. De rol van deze helling op de stroomsnelheid wordt verhoudingsgewijze verkleind doordat het verhang tot de macht 0,5 in vergelijking (2.2) voorkomt.

De stromingsweerstand is rechtevenredig met de afvoer. Deze factor is zeer belangrijk en kan door een foute inschatting van de wandruwheid, een onjuiste waarde van het waterdoorvoerend vermogen van een waterloop geven.

Een onjuiste inschatting van de ruwheidsparameter in de formule van Manning of Chézy geeft een verschillend resultaat van het waterdoorvoerend vermogen. Hier vergelijken we even alleen de invloed van de ruwheidsparameters en niet de juistheid of nauwkeurigheid van de beide formules. Een km-waarde kan uit de vele literatuur gehaald worden (bijv. CHOW, 1959) en de daarbij behorende C-waarde uit de formule van Chézy, die gegeven is in Bijlage A, vergelijking (A.3). Met vergelijking (A.4) kan men de corresponderende ruwheid bepalen. De volgende gegevens werden aangenomen:

$$\left. \begin{array}{l} h = 0,75 \text{ m} \\ b = 1,00 \text{ m} \\ z = 2 \end{array} \right\} \rightarrow R = 0,43 \text{ m}$$

$$S = 0,001$$

$$km = 30 \rightarrow C = 26,1 \rightarrow k = 0,18 \text{ m}$$

Met bovenstaande gegevens is in tabel 1 een overzicht gegeven van een gevoeligheidsanalyse. Bij een verdubbeling van de k-waarde wordt de stroomsnelheid, uitgerekend met de formule van Chézy, 20% kleiner. Daarentegen bij een halvering van de kM-waarde worden de stroomsnelheid en het debiet ook gehalveerd. De formule van Manning is dus veel gevoeliger voor de ruwheidsparameter dan de formule van Chézy. Vooral bij het ontwerpen van waterlopen waarbij men van een zekere ontwerpruwheid uitgaat, zijn deze aspecten van groot belang.

Tabel 1. Gevoeligheidsanalyse van de ruwheids-parameters in de formule van Manning en Chézy.

Manning			
kM	V	% verschil	
	(m/s)	kM	V
30	0,54	-	-
15	0,27	50	50
45	0,81	50	50

Chézy			
k (m)	V	% verschil	
	(m/s)	k	V
0,18	0,54	-	-
0,36	0,43	100	20
0,09	0,66	50	22

De factoren die in het algemeen van invloed zijn op de stromingsweerstand van vegetatie, worden in paragraaf 2.3. behandeld.

2.3. Wandruwheidscoëfficiënt

In het algemeen kan men stellen dat de optredende stromingsweerstand afhankelijk is van de factoren:

- grondsoort
- onregelmatigheid van profiel
- vegetatie
- stroomsnelheid
- waterdiepte

De grondsoort is van belang bij een aarden profiel zonder vegetatie of bij een diepere sloot waar de zijkanten begroeid zijn, maar de slootbodem geen begroeiing heeft.

Onregelmatigheden in het lengteprofiel, zoals kleine ribbels of oneffenheden kunnen als ruwheid beschouwd worden, die turbulentie en daardoor een verhoging van de stromingsweerstand veroorzaken.

Door KAZEMIPOUR en APELT (1980) zijn metingen uitgevoerd in een meetgoot waar de breedte en diepte sterk varieerden, maar op zo'n manier, dat het doorstroomprofiel constant of bijna constant bleef. Voor zulke onregelmatigheden in het profiel, zelfs met variaties in de breedte van 100%, geeft dit geen aanleiding tot extra energieverliezen. Voorwaarde is wel dat er geen neren ontstaan (doodwatergebieden). Indien er wel neren optreden, dan veroorzaakt dit draaikolken of werfels, die een groot energieverlies geven.

Beschrijvingen van de vegetatie in de vorm van factoren die de afmeting, bedekkingsgraad, profielvulling, enz. beschrijven, zijn voor enkele soorten vegetaties wel bekend. In Amerika is vooral onderzoek verricht naar de stromingsweerstand van grassoorten (zie paragraaf 4.3.). Van de vele soorten waterplanten die in Nederland voorkomen is nog maar weinig bekend over de hiervoor genoemde factoren. In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op deze aspecten.

De stroomsnelheid heeft invloed op de profielvulling. Bij een toenemende stroomsnelheid neemt deze af (vegetatie wordt platgedrukt), waardoor het waterdoorvoerend vermogen toeneemt.

De optredende waterdiepte in een waterloop is van belang. Uit vele metingen is al gebleken dat de waarde van de stromingsweerstand ook afhankelijk is van de waterdiepte. Hierop wordt in paragraaf 2.4. en hoofdstuk 4 verder op ingegaan.

2.4. Theoretische beschouwing stromingsweerstand

Door GOURLAY (1970) is experimenteel vastgesteld dat er bij stroming over een vegetatie in principe drie zones te onderscheiden zijn. De eerste zone is gelegen boven de bodem en tussen de waterplanten. In dit gebied is er een zeer kleine stroomsnelheid die niet of heel weinig

varieert in verticale richting en afhankelijk is van de schuifspanning op de wand. De tweede zone is het gebied waar de waterplanten kunnen worden omgebogen door de stroming. Er is nu een duidelijke variatie van de stroomsnelheid in verticale richting. De derde zone geeft een grote snelheidsgradiënt te zien die een duidelijk logaritmisch verloop heeft, zoals men die ook aantreft in waterlopen met een constante wandruwheid (ROUSE, 1965).

De derde zone begint in het algemeen op de grens tussen vegetatie en het vrij stromende water erboven. Bij een groter wordend verhang is er geen onderscheid meer tussen de tweede en derde zone.

Afhankelijk van de optredende stroomsnelheid zijn er een aantal stromingstoestanden te definiëren. Bij een toenemende stroomsnelheid zijn er drie fasen te onderscheiden:

- de plantengroei wordt niet omgebogen
- de plantengroei wordt door de stroming omgebogen en vertoont een golvende beweging
- de plantengroei wordt geheel platgedrukt.

Deze drie fasen kunnen vergeleken worden met de beweging van sediment in een rivier. Er is geen sediment transport, het sediment beweegt over de grond en vormt er ribbels of zandduinen en het sediment wordt nagenoeg geheel in suspensie getransporteerd.

Er wordt dus aangenomen dat de stroming van water in waterlopen met een plantengroei duidelijke overeenkomsten vertoont met het transport van sediment. Het essentiële punt dat beide processen gelijk hebben, is dat de wand of de ruwheidselementen vervormd kunnen worden door de stroming. De stromingsweerstand is dus een functie van de stroomsnelheid en heeft geen constante waarde. Een oplossingsprocedure moet dus relaties bevatten die de (gemiddelde) stroomsnelheid koppelen aan de eigenschappen van de begroeiing.

Men zal dus moeten weten wat de ruwheidshoogte is van de omgebogen stengels. Op deze plaats begint namelijk een snelheidsverdeling die een logaritmisch verloop heeft. De ruwheidshoogte moet als een functie worden bepaald, waarin de stroomsnelheid en de eigenschappen van de begroeiing in ieder geval als variabelen voorkomen. Op eenzelfde manier heeft BAGNOLD (1956) het sedimenttransport afhankelijk van de stroomfunctie (stroomsnelheid x waterdiepte x verhang) gedefinieerd.

Een beschouwing van de parameters die een invloed hebben op een stationaire stroming met constant verhang en geen zijwaartse instroming wordt hieronder gegeven. Als de invloed van de schuifspanning aan het wateroppervlak wordt verwaarloosd (geen windgolven), dan wordt de stroming in waterlopen met een begroeiing van waterplanten bepaald door de afhankelijke variabelen:

$$\begin{aligned} \emptyset_1 : & \frac{\bar{\tau}}{\rho V^2}, \frac{V}{\sqrt{g h}}, \frac{V h \rho}{\mu}, \frac{\rho V^2 h^4}{J}, \frac{k_s}{h}, \frac{L_1}{h}, \dots, \\ & \dots, \frac{L_n}{h}, F_p : = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Hierin is $\bar{\tau}$ de gemiddelde schuifspanning langs de wand van het profiel, ρ is de dichtheid van water, V is de stroomsnelheid, g is de versnelling van de zwaartekracht, h is de waterdiepte, μ is de dynamische viscositeit, J is een flexibiliteitsfactor van een waterplant, k_s is de hoogte van een omgebogen plant (optredende ruwheidshoogte), L_n is een karakteristieke lengte om de afstand tussen de platen weer te geven en F_p is een factor om de effectieve vorm van de planten uit te drukken.

In vergelijking (2.3) wordt verondersteld dat de bodemsoort geen invloed heeft op de stromingsweerstand en dat de plantengroei uniform is verdeeld in alle richtingen.

Uit metingen is gebleken dat het Froude getal geen invloed heeft, mits er geen golfvorming aan het wateroppervlak optreedt. Ook de parameter die de effectieve vorm van de planten weergeeft kan worden verwaarloosd. Voor het Reynolds-getal $V h \rho / \mu$, wordt verondersteld dat het onafhankelijk is van deze effectieve plantvorm.

De parameter L_n / h varieert maar zeer weinig, namelijk alleen door de variatie in waterdiepte. Het effect van deze parameter op de afhankelijke parameters kan daarom worden verwaarloosd.

Onder al deze veronderstellingen gaat vergelijking (2.3) over in:

$$\emptyset_2 : \frac{\bar{\tau}}{V^2}, \frac{\rho V^2 h^4}{J}, \frac{k_s}{h} : = 0 \quad (2.4)$$

De stijfheidsfactor van de waterplanten J is gelijk aan de elasticiteitsmodulus (E) vermenigvuldigd met het traagheidsmoment (I). Ook moet het effect van de schuifspanning (zie vergelijking 4.10) nog expliciet in rekening worden gebracht, zodat vergelijking (2.4) geschreven kan worden als:

$$\frac{V}{V_*} = \left(\frac{ks}{(mEI/\rho V_*^2)^{1/4}} \right)^{0.5} \cdot \frac{ks}{k} \cdot \frac{ks}{h} \quad (2.5)$$

Hierin is m de intensiteit van de vegetatie en V_* is de wrijvings-snelheid gedefinieerd als:

$$V_* = \left(\frac{\bar{\tau}}{\rho} \right)^{0.5} \quad (2.6)$$

Vergelijking (2.5) geeft dus aan dat V/V_* een functie is van de relatieve ruwheid en het ombuigen van de ruwheidselementen.

Omdat vegetatie variabel is in afmeting, vorm, intensiteit, enz. is het nodig om de onvervormde lengte van de vegetatie en de intensiteit als variabelen in te voeren. De term ks/k is aan vergelijking (2.5) toegevoegd en de variabele m als de intensiteit van de waterplanten per eenheid van oppervlak.

Vergelijking (2.5) is de basis geweest, waarmee Kouwen, Li en Simons de semi-empirische relaties voor het berekenen van de effectieve ruwheid en een kritische schuifspanning afgeleid hebben (zie verder paragraaf 4.3).

Door ROUSE (1965) is gesteld dat boven een ruw oppervlak de snelheidsverdeling logaritmisch verloopt. Door GOURLAY (1970) werd boven Kikuyugras een zelfde snelheidsverdeling gemeten. Zodoende kan voor de verdeling boven een vegetatie de relatie gelden:

$$\frac{v}{V_*} = \frac{v_k}{V_*} + \frac{1}{K} \log \left(\frac{h}{ks} \right) \quad (2.7)$$

In vergelijking (2.7) is v_k een snelheid op afstand ks van de wand en K is Von Karman's turbulentie coëfficiënt. Vergelijking (2.7) over het natte profiel geïntegreerd geeft een relatie voor de gemiddelde stroomsnelheid:

$$\frac{V}{V_*} = a_1 + a_2 \log \left(\frac{h}{ks} \right) \quad (2.8)$$

Vergelijking (2.8) wordt in paragraaf 4.3 verder behandeld, als de factoren a_1 en a_2 als functie van een kritische schuifspanning

gegeven worden. Deze kritische schuifspanning is afhankelijk van het type vegetatie.

2.5. Conclusie

In een waterloop met een begroeiing is het zeer belangrijk om de stromingsweerstand goed te bepalen. Deze weerstand heeft van alle factoren de grootste invloed op het waterdoorvoerend vermogen.

De stromingsweerstand is meestal als een constante factor beschouwd. Paragraaf 2.4 toont aan dat de stroomsnelheid en dus het waterdoorvoerend vermogen, afhankelijk is van de stijfheid, vorm en lengte van de begroeiing, de optredende ruwheidshoogte, de schuifspanning langs de wand en de waterdiepte. Als men uit metingen in waterlopen de stromingsweerstand wil afleiden, dan zal dit moeten gebeuren aan de hand van deze variabelen.

De begroeiing beïnvloedt de ruwheid van de waterlopen en verkleint het effectieve stromingsprofiel. Afhankelijk van de stroomsnelheid wordt de begroeiing vervormd en neemt hierdoor een andere hoogte aan. Deze effectieve hoogte van de begroeiing is een maat voor de ruwheidscoëfficiënt. Uit de theoretische beschouwing blijkt dat voor dit proces relaties opgesteld moeten worden, die de effectieve ruwheid en de logaritmische snelheidsverdeling boven deze ruwheid bepalen. Deze benadering heeft veel overeenkomst met de manier waarop de C-waarde uit de formule van Chézy wordt berekend.

3. DE BEGROEIING IN EEN WATERLOOP

3.1. Vegetatietypen

Een begroeiing in een waterloop kan men in het algemeen karakteriseren naar een bepaald soort en naar afmeting en dichtheid.

De soorten die in of aan de rand van een waterloop voorkomen, zijn onder te verdelen in drie categorieën. Of de waterplant geheel of gedeeltelijk onder het wateroppervlak blijft, geeft een onderscheid in de categorieën:

1. ondergedoken waterplanten
2. boven water uitgroeiende waterplanten
3. drijvende waterplanten

Aan de hand van de vorm en de afmeting kan men de plantensoorten onderverdelen naar één of meerdere categorieën.

Een onderverdeling van de belangrijkste kenmerken van de vegetatie naar de categorieën is in tabel 2 gegeven.

Tabel 2. Klassificatie van slootvegetatie

Omschrijving	Categorie
korte en homogene vegetatie (bijvoorbeeld gemaaid gras)	1 en 2
stengels (bijvoorbeeld riet, biezten, enz.)	1 en 2
compacte vegetatie (bijvoorbeeld mannagrass)	1 en 2
drijvende vegetatie (bijvoorbeeld waterlelie)	3

Van elke begroeiingstype zal men de eigenschappen moeten bepalen die van belang zijn voor de stromingsweerstand. Door KOUWEN, LI en SIMONS (1981) is voor een aantal grassoorten de stijfheid bepaald. Deze stijfheid is weer een factor die aangeeft of de vegetatie rechtop blijft staan, omgebogen of platgedrukt wordt door de stroomsnelheid (zie ook paragraaf 4.3).

3.2. Vegetatieontwikkeling in het groeiseizoen

Gedurende het groeiseizoen is de vegetatieontwikkeling afhankelijk van een groot aantal factoren. De belangrijkste aspecten die een invloed hebben op de ontwikkeling van de vegetatie zijn:

- grondsoort
- waterkwaliteit
- waterdiepte
- temperatuur
 - water
 - lucht
- stralingswarmte
- neerslag
- grondwaterstand
 - draineren
 - infiltreren
- onderhoud
 - methode
 - frequentie
- begroeiing
 - soorten
 - bedekkingsgraad

Waterlopen in een lichte grond begroeien veelal minder snel dan waterlopen in een zware grond.

Indien er "vruchtbaar" water door de leiding stroomt, zal deze sneller begroeien. De verontreiniging van het water en de vele soorten bemesting van aanliggende percelen hebben effect op de vegetatieontwikkeling. Het evenwicht in een begroeiingsgradatie kan hierdoor verstoord worden, waardoor één of meer soorten gaan overheersen en zich sneller ontwikkelen.

Ondiepe waterlopen begroeien sneller dan diepe. Een constant waterpeil of een zomer- en winterpeil heeft een duidelijke invloed.

De temperatuur van het water staat vaak in nauw verband met het aspect of de leiding hoofdzakelijk functioneert als een drainerende of infiltrerende leiding.

3.3. Invloed van onderhoud

Gedurende het groeiseizoen wordt er op één of meerdere plaatsen begonnen met het onderhoud. De stromingsweerstand in de waterlopen neemt af, maar in de andere blijft deze nog toenemen. Gedurende het

onderhoud is het mogelijk dat er veel neerslag optreedt, waardoor wateroverlast kan voorkomen. Deze situaties zijn afhankelijk van het waterlopenpatroon, de inzet van materieel voor onderhoud, de actuele vegetatieontwikkeling en gebiedskenmerken. De gebiedskenmerken zijn het optreden van kwel of infiltratie, berging van water in de grond (verzadigde en onverzadigde zone), enz.

Het onderhoud begint meestal benedenstrooms, zodat bij een verhoging van de afvoer het water goed weg kan stromen. Zou men bovenstrooms beginnen, dan kan in dit gedeelte een snelle afvoer mogelijk zijn. Deze hoge afvoer komt in het nog niet opgeschoonde gedeelte van het stelsel en kan daar mogelijk leiden tot wateroverlast.

Om voor elke situatie een acceptabele oplossing te verkrijgen, is het nodig om het waterlopenstelsel met een simulatiemodel door te rekenen. Zo'n model zal de vegetatieontwikkeling, de afvoeren in het leidingstelsel en de grondwaterstromingen moeten simuleren. In paragraaf 5.2.4 is de opzet van zo'n simulatiemodel in grote lijnen uitgewerkt.

3.4. Conclusie

De begroeiing die voorkomt in open waterlopen is zeer gevarieerd in soort, vorm en afmeting. Om met deze scala aan variabelen een hydraulische weerstand te kunnen definiëren, is het noodzakelijk om aan de hand van categorieën en klasse-indeling de relaties vast te stellen. Deze relaties kunnen door metingen in meetgoten worden vastgesteld. Per soort begroeiing moet een relatie voor de stromingsweerstand worden vastgelegd, anders kan men bij een situatie in het veld, waar er een variatie in vegetatie is, niet een gemiddelde stromingsweerstand berekenen.

De vegetatieontwikkeling is afhankelijk van zeer veel parameters. Het kan onafhankelijk van hydraulische metingen in de praktijk worden vastgesteld. De invloed van de onderhoudsmethode kan men daarbij betrekken.

Om een vegetatieontwikkeling te kunnen relateren aan een stromingsweerstand zal men specifieke parameters in het veld moeten meten. Deze

variabelen volgen uit een theoretische beschouwing over de stromingsweerstand (bijv. vergelijking 2.5). Men moet dus eerst fundamenteel onderbouwen welke variabelen nodig zijn om de stromingsweerstand als functie van de vegetatieontwikkeling te definiëren.

4. LITERATUUR ONDERZOEK

4.1. Inleiding

In de periode 1950 tot 1970 is er in Nederland veel onderzoek gedaan en metingen uitgevoerd naar de stromingsweerstand in sloten en beken. De resultaten en conclusies van deze studies, voorzover ze van belang kunnen zijn voor het richting geven aan toekomstig onderzoek, worden behandeld in paragraaf 4.2. Sinds 1970 is het onderzoek teruggelopen, zodat aan het eind van de zeventiger jaren alleen het drijfplantenonderzoek van het laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie van de Landbouw Hogeschool te Wageningen nog overbleef.

In 1983 is er bij het CABO (Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek) een project van start gegaan naar de relatie tussen vegetatie en stromingsweerstand en de betekenis daarvan voor het onderhoud.

In paragraaf 4.2 worden alle van belang zijnde Nederlandse onderzoeksresultaten besproken.

In Amerika en Australië is er vanaf de dertiger jaren intensief onderzoek gedaan naar de optredende stromingsweerstand in open waterlopen. Er zijn vele metingen verricht door verschillende laboratoria in prototype waterlopen. Sinds ongeveer 1965 wordt er ook gewerkt met schaalmodellen, waarin plastic strips worden gebruikt om de vegetatie na te bootsen. Over al deze onderzoeken wordt in paragraaf 4.3 verslag gedaan.

Ook in Duitsland is er sinds het begin van de zestiger jaren intensiever onderzoek gepleegd naar de stromingsweerstand. Metingen van stromingsweerstand en vegetatieontwikkeling gedurende het groeiseizoen zijn daarbij uitgevoerd. In paragraaf 4.4 worden deze resultaten besproken.

4.2. Nederlands onderzoek

Onderzoek naar de stromingsweerstand van een aantal onderzoekers heeft de volgende resultaten en relaties opgeleverd:

Bos en Bijkerk

Door hun wordt gesteld dat de waarde van de wandruwheidscoëfficiënt kM wordt bepaald door twee factoren, namelijk de waterdiepte en de tijdsduur van het groeiseizoen. Voorgesteld is om de kM -waarde te bepalen met de relatie:

$$kM = a h^c \quad (4.1)$$

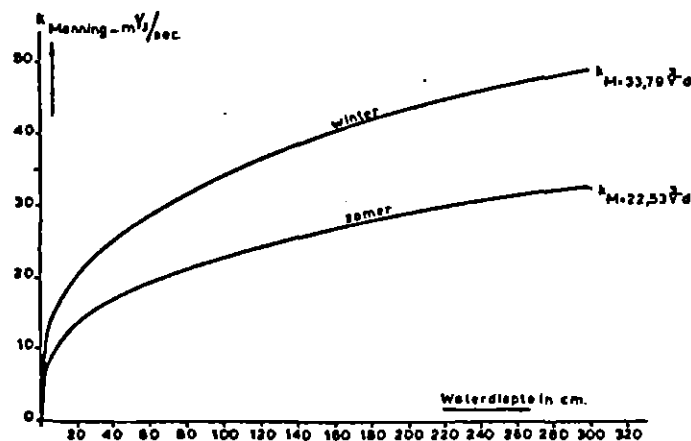
Hierin is a een soort basis kM -waarde onafhankelijk van de waterdiepte h . Door BOS en BIJKERK (1963) wordt voor de factoren a en c gegeven:

winter : $a = 33,8$

zomer : $a = 22,5$

$c = 0,33$

Vergelijking (4.1) voor de zomer- en de wintersituatie is weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1. Relatie tussen stromingsweerstand en waterdiepte
(BOS en BIJKERK, 1963)

Smaalen

Door SMAALEN (1970) is voorgesteld om de factoren a en c uit vergelijking (4.1) te vervangen door de waarden:

$a = kM$ bij 1,00 m waterdiepte

$c = 0,25$

Naar zijn mening gaven de waarden voor a en c zoals door Bos en Bijkerk voorgesteld bij grote diepte een te hoge waarde voor kM . Een

theoretische beschouwing of meetresultaten worden niet gebruikt om dit argument te onderbouwen.

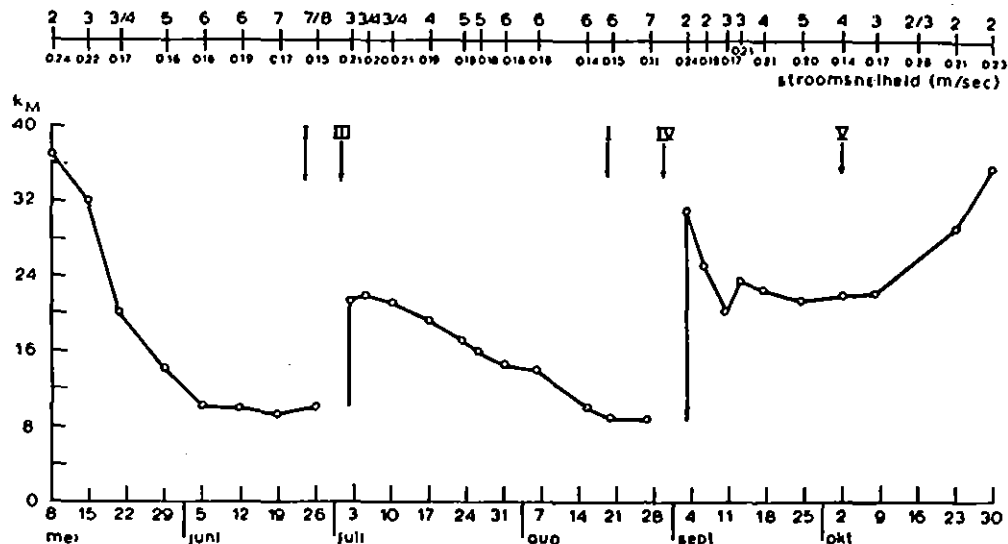
Flach en Pieters

Door FLACH en PIETERS (1966) zijn veel hydraulische metingen verricht. Zij definieerden een begroeiingstoestand, waarbij de vulling van een dwarsdoorsnede corresponderend werd ingeschat (zie tabel 3).

Tabel 3. Klasse-indeling van de begroeiing in open waterlopen

Begroeiings graad	Begroeiingsklasse	Profielvulling %
1	ideaal schoon	0 - 5
2	zeer schoon	5 - 10
3	schoon tot vrij schoon	10 - 15
4	schoon tot matig schoon	15 - 25
5	matig schoon	25 - 35
6	matig tot sterk begroeid	35 - 50
7	sterk begroeid	50 - 75
8	dicht begroeid	75 - 100

Er werden metingen verricht in een aantal waterlopen in de Noord-oostpolder en in het stroomgebied van de Oostermoerse Vaart. De metingen werden verricht over een groeiseizoen (zie figuur 4.2). In het algemeen waren de conclusies dat in de loop van mei tot juni/juli er een sterke daling van de kM-waarde optreedt. Gemiddeld van kM = 35 tot kM = 8 à 10. Na het reinigen van de sloten daalt de kM-waarde ongeveer in hetzelfde tempo als in de voorafgaande maanden. Omstreeks oktober stijgt de kM-waarde door natuurlijke afsterving van de begroeiing. Uit figuur 4.2 blijkt ook dat het reinigen van de slootbodem relatief het beste resultaat geeft (zie het oplopen van de kM-waarde begin juli en begin september). De ingeschatte begroeiingsgraad is ook in figuur 4.2 gegeven.



Figuur 4.2. Verloop van ruwheidscoëfficiënt gedurende het groeiseizoen
(FLACH en PIETERS, 1966)

- I : taluds boven water en de taludzoom met zeis gemaaid;
- III: bodem met schakelmes gemaaid;
- IV : bodem met schakelmes gemaaid en onderwater gedeelte taluds met zeis;
- V : afsterven van bodembegroeiing.

Ook is gebleken dat een hoge afvoergolf het effect heeft van het verhogen van de k_M -waarde. De planten worden door de hoge stroomsnelheid neergedrukt en het heeft een zekere tijd nodig om weer overeind te komen. Ook is het mogelijk dat de stengels zijn geknakt. Dit aspect is door meerdere onderzoekers waargenomen (zie ook HUMBERT, 1967).

Bon

Door BON (1967) is een taxatieschema opgesteld. Dit is een verfijnder systeem als dat in tabel 3. Voor een aantal begroeiingsgraden in het horizontale vlak en met een zestal aspecten, zoals vorm en obstakels, etc., wordt een taxatiewaarde berekend (zie figuur 4.3). Met een gemiddelde taxatiewaarde uit de zes aspecten kan met behulp van figuur 4.4 een k_M -waarde worden vastgesteld. De k_M -waarde is hier afhankelijk gesteld van de stroomsnelheid, wat een zeer grote verbetering is ten opzichte van de hiervoor besproken relaties voor het bepalen van de stromingsweerstand. De ruwheidscoëfficiënt per onderhoudsgraad zoals in figuur 4.4 gegeven, kan ook uitgedrukt worden als een exponentiële relatie:

$$k_M = a_i \exp \{c_i V\} \quad (4.2)$$

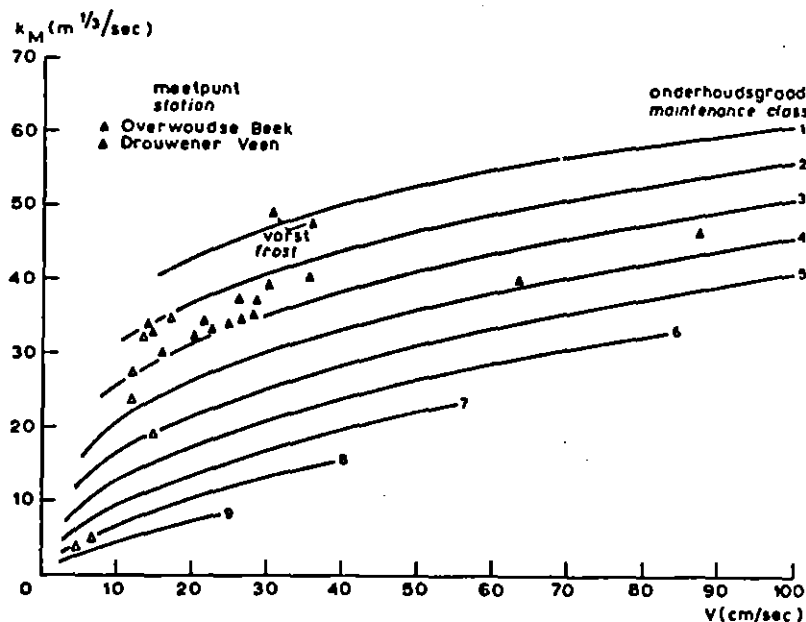
In vergelijking (4.2) zijn a en c constanten afhankelijk van de onderhoudsgraad i. Bijvoorbeeld voor onderhoudsgraad 3 uit figuur 4.4 geldt:

$$a = 21$$

$$c = 1,12$$

	A	B	C	D	E	
taxatie	1-5	5-10	10-15	15-20	20-25	appraisal
1 waterbreedte bij h = 10cm id bij h = 10cm						width water level at depth = 10cm do at h = 10cm
2 bodembedekking (bovenaanzicht)						bed vegetation (top view)
3 verkleining door stromingsprofiel						reduction wet profile
4 onder water talud						under water talus
5 obstakels in verhouding tot waterdiepte						obstacles in relation to water depth
6 of opstuwung door duikers, pijlers						rise water level by culverts piers
6 materiaal transport						transport of material

Figuur 4.3. Taxatieschema van onderhoudsgraad voor bepaling van de stromingsweerstand (BON, 1967).



Figuur 4.4. Relatie tussen stromingsweerstand en stroomsnelheid voor verschillende onderhoudsgraden (BON, 1967).

Drijfplanten-onderzoek LH

Het drijfplanten-onderzoek is in 1977 van start gegaan onder auspiciën van de Werkgroep Regulering Slootvegetaties. In deze werkgroep zijn het CABO, de Katholieke Universiteit Nijmegen, de Landbouw Hogeschool en het Waterschap Salland vertegenwoordigd. In het laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie van de LH (De Nieuwlanden) zijn in een drietal proefsloten en in enkele waterlopen in Salland, metingen uitgevoerd (PITLO, 1979 en 1982). De aangeplante vegetatie in de proefsloten aan de Nieuwlanden waren hoofdzakelijk gele plomp, waterlelie, watergentiaan en drijvend fonteinkruid.

Indien niet vermeld, wordt als referentie voor de hierna gegeven overzicht van het drijfplanten onderzoek het artikel van PITLO (1982) aangehouden.

In figuur 4.5 is de ruwheidscoëfficiënt van Manning gegeven over de groeiseizoenen 1977 tot en met 1981, voor een begroeiing van waterlelies. De metingen waren uitgevoerd bij een debiet van 60 l/s, maar de stroomsnelheid en waterdiepte waaronder de metingen zijn verricht worden niet vermeld. Ook worden grafieken gegeven van de relatie verhang tot de gemiddelde stroomsnelheid. Voor de gele plomp en waterlelie is de gemeten stroomsnelheid in verhouding met S^1 . Voor drijvend fonteinkruid ging dit niet op en verandert het verhang lineair met de stroomsnelheid. Hierbij wordt door PITLO (1979) aan toegevoegd: "In de andere sloten met minder dichte ondergedoken begroeiing was dit verschijnsel minder uitgesproken". Door een dichte ondergedoken begroeiing moet men het doorstroomprofiel kleiner nemen dan het opgeschoonde profiel, omdat een logaritmische snelheidsverdeling pas op een zekere afstand boven de bodem begint (zie ook paragraaf 2.4). Dit kan het aspect van de variatie in verhouding stroomsnelheid tot het verhang verklaren. Bij drijvend fonteinkruid was een dichte ondergedoken begroeiing aanwezig. Door deze begroeiing stroomt maar zeer weinig water. Het doorstroomprofiel moet in zo'n situatie worden verkleind. De verklaring dat de stroomsnelheid evenredig is met het verhang, in plaats van de wortel uit het verhang kan door dit aspect niet opgaan. De resultaten zijn ook in tegenspraak met de theoretische formule van de stromingsweerstand (zie vergelijking 4.11).

De stroomsnelheid van alle metingen varieerde tussen 0,01 en 0,10 m/s voor waterlelie en gele plomp en voor drijvend fonteinkruid tussen 0,01 en 0,30 m/s.

De ruwheidscoëfficiënt wordt voor drijfplanten als functie van de bedekkingsfactor geschreven:

$$kM = \frac{kMo \cdot Cb}{a} \quad (4.3)$$

Hierin is kMo de ruwheidscoëfficiënt bij geen begroeiing (in de maand maart), Cb is de bedekkingsfactor (% van het wateroppervlak wat door bladeren worden bedekt) en a is een coëfficiënt afhankelijk van de hydraulische straal (relatie alleen uitgewerkt voor waterlelies). Voor het bepalen van vergelijking (4.3) is uitgegaan van de vergelijking:

$$V = a S^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

Vergelijking (4.4) geeft aan dat de ruwheidscoëfficiënt constant verondersteld is, onafhankelijk van de optredende stroomsnelheid en ook de hydraulische straal. Door een bedekking van drijfplanten is er een zekere weerstand langs het wateroppervlak. Deze weerstand zal men expliciet mee moeten nemen, of onderbrengen in andere variabelen. Als men een percentage van de bedekking vertaalt in een vergroting van het natte profiel, houdt dit in dat de hydraulische straal afhankelijk is van de bedekkingsgraad. Als men deze aspecten in beschouwing neemt, dan gaat vergelijking (4.3) en (4.4) niet op.

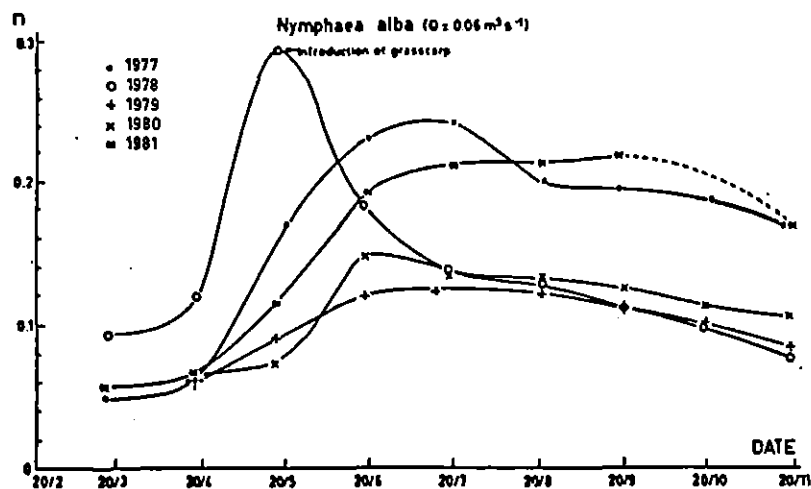
Er zijn enkele ruwheidscoëfficiënten berekend, die aantonen dat bij een verschil in waterdiepte de waarde van Mannings n ($= 1/kM$) ook varieert. De stroomsnelheid en het doorstroomprofiel voor deze resultaten worden niet vermeld.

Voor een aantal soorten drijfplanten is de verhouding minimale-maximale ruwheidscoëfficiënt gegeven over het groeiseizoen (zie figuur 4.6). In figuur 4.6 duidt n_{40} op een ruwheidscoëfficiënt die optreedt bij een debiet van 40 l/s. De verhouding blijft per soort nagenoeg constant over het groeiseizoen. Als conclusie wordt gesteld dat de beheerder van een waterlopendsysteem voldoende kennis moet bezitten over de aanwezige begroeiing en het bedrag gedurende het groeiseizoen, om zodoende het beste tijdstip voor onderhoud te kunnen vaststellen. Dit lijkt mij duidelijk, maar de figuur toont ook, dat de ruwheidscoëfficiënt afhankelijk is van de optredende stroomsnelheid per type en nagenoeg onafhan-

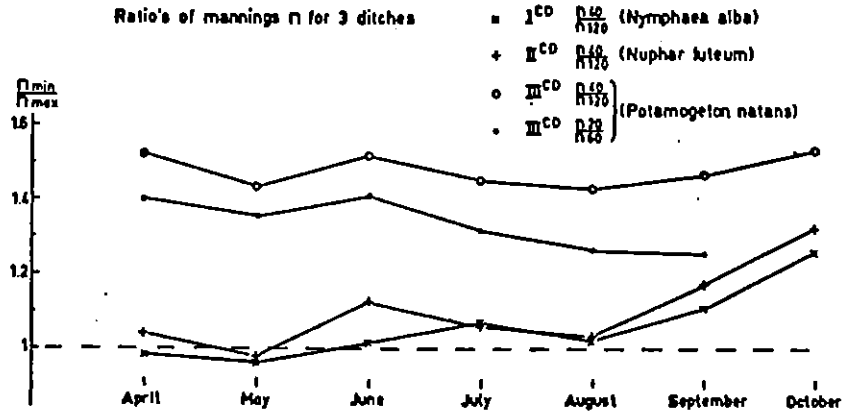
kelijk is van de ontwikkelingsfase van de vegetatie.

De resultaten van drijvend fonteinkruid worden ook vergeleken met een n-VR grafiek van TEMPLE (1980). De n-VR methode wordt uitvoerig in paragraaf 4.3 behandeld, waar deze methode sterk in twijfel wordt getrokken voor toepassing bij een klein verhang. De metingen waarop de n-VR methode is gebaseerd, werd uitgevoerd in waterlopen met een helling van 3% en steiler. Het verhang in het drijfplanten-onderzoek varieert tussen 0,01 en 0,001%.

Momenteel worden metingen verricht om de ruwheidscoëfficiënt over een groeiseizoen te bepalen en invloed van het Reynolds-getal op de stromingsweerstand.



Figuur 4.5. Variatie van ruwheidscoëfficiënt over het groeiseizoen voor begroeiing van waterlelies (PITLO, 1982),



Figuur 4.6. Verhouding minimale-maximale ruwheidscoëfficiënt (PITLO, 1982).

CABO-onderzoek

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. Bij drie waterschappen worden hydraulische metingen verricht in een aantal proefsloten (1984 en 1985). Met verschillende onderhoudsmethoden en intervallen tussen het uitgevoerd onderhoud worden metingen verricht. Het onderzoek zal moeten aangeven bij welke onderhoudsmethode het onderhoud door middel van opschonen zo lang mogelijk kan worden uitgesteld (ZWIERING, 1983). Met deze resultaten kan een ontwerper of beheerder van een waterlopenstelsel het onderhoud zo efficiënt mogelijk kiezen. De veldmetingen houden in:

- vegetatiekartering
- hydraulische metingen
- biomassa bepaling aan het einde van het groeiseizoen.

Onder de vegetatiekartering wordt verstaan het in kaart brengen van de verschillende soorten planten in de sloten. De vegetatiekartering en de hydraulische metingen worden enkele keren tijdens het groeiseizoen herhaald om zodoende de variatie in stromingsweerstand te kunnen bepalen.

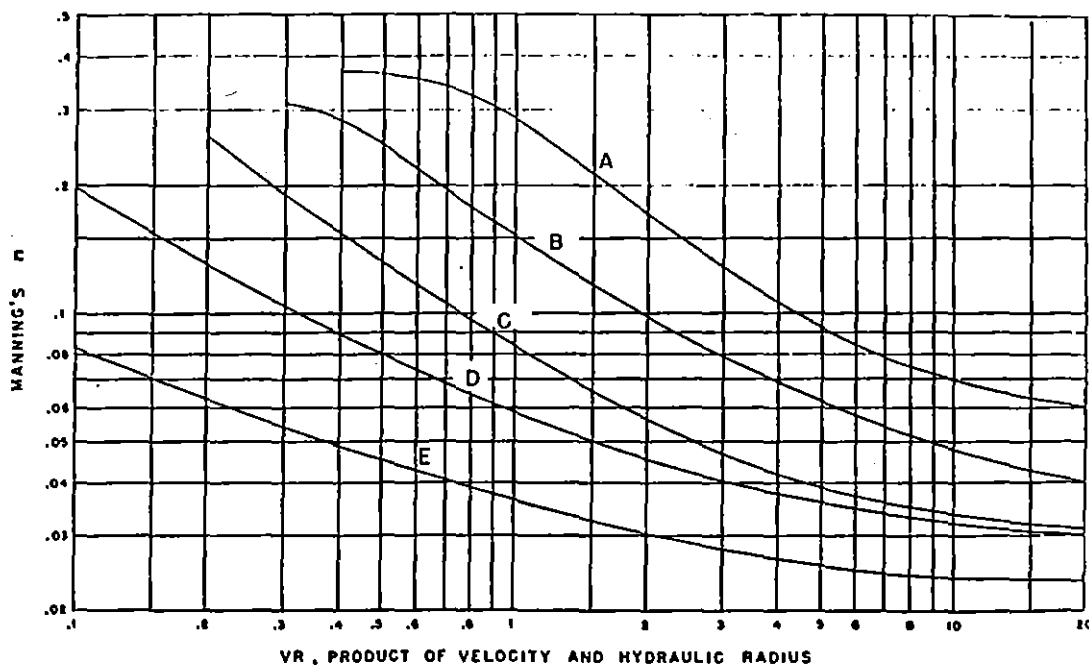
De variabelen die gebruikt worden bij de hydraulische metingen zijn de kM -waarde en een weerstandsfactor als functie van het verhang ($S^{\frac{1}{2}}$ en/of $S^{\frac{1}{3}}$).

Eind 1985 wordt het huidige project afgesloten met een rapportage.

4.3 Amerikaans onderzoek

Het onderzoek in Amerika is in het verleden vooral gericht op het bepalen van de stromingsweerstand van (meestal aangelegde) waterlopen, die begroeid zijn met gras. Deze waterlopen hebben de functie van irrigatiekanaal of waterloop voor de afvoer van hemelwater van stedelijke bebouwing. Om een zo efficiënt mogelijk systeem te kunnen ontwerpen, zijn de onderzoeken sterk gericht op het voorspellen van de maximale stroomsnelheid die mag optreden om geen uitschuring (erosie) te krijgen. Ook zijn er voor vele soorten vegetatie en dan vooral grassoorten stromingsweerstand bepaald.

In 1947 heeft men aan de hand van uitgebreide metingen (Palmer en Ree, U.S. Department of Agriculture, Stillwater Outdoor Hydraulic Laboratory en de Oklahoma Agricultural Experiment Station) grafieken opgesteld die de stromingsweerstand van vegetatie weergeven (zie figuur 4.7). Deze metingen waren uitgevoerd in de periode 1937 tot 1946.



Figuur 4.7. Stromingsweerstand voor vegetatieklassen A t/m E (USDA, 1947).

Uit metingen bleek dat de ruwheidscoëfficiënt van Manning als functie van het produkt stroomsnelheid en hydraulische straal in een aantal curves onder te verdelen waren. Sinds het uitbrengen van de grafieken zoals weergegeven in figuur 4.7 spreekt men over de n-VR methode. Een theoretische beschouwing over de achtergrond van deze benadering en of het fundamenteel wel korrekt is, ontbreekt echter tot op heden.

De stromingsweerstand wordt bepaald aan de hand van vegetatietype, -lengte en -intensiteit. Voor deze factoren is een klasse-indeling gemaakt. Klasse A geldt voor een zeer dichte en lange vegetatie, daarentegen geldt klasse E voor zeer kort gemaaid gras van ongeveer 40 mm lang. In tabel 4 is een globaal overzicht gegeven van de klasse-indelingen met een globale lengte van de vegetatie.

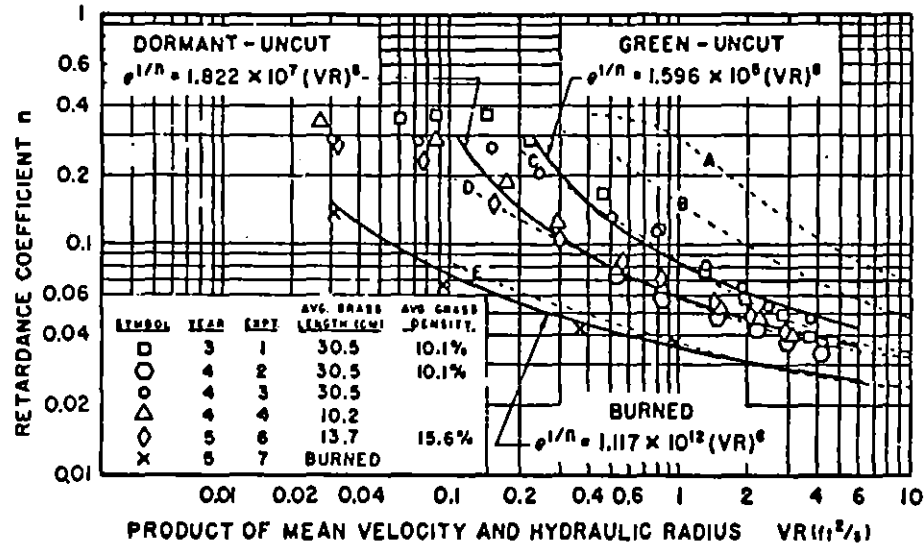
Tabel 4. Beschrijving van de klassen A tot E voor stromingsweerstand-indeling.

Klasse	Omschrijving	Lengte
A	zeer lang gras	700 - 900
B	matig lang gras	300 - 700
C	lang gras	150 - 300
D	kort gras	50 - 150
E	zeer kort gras	< 50

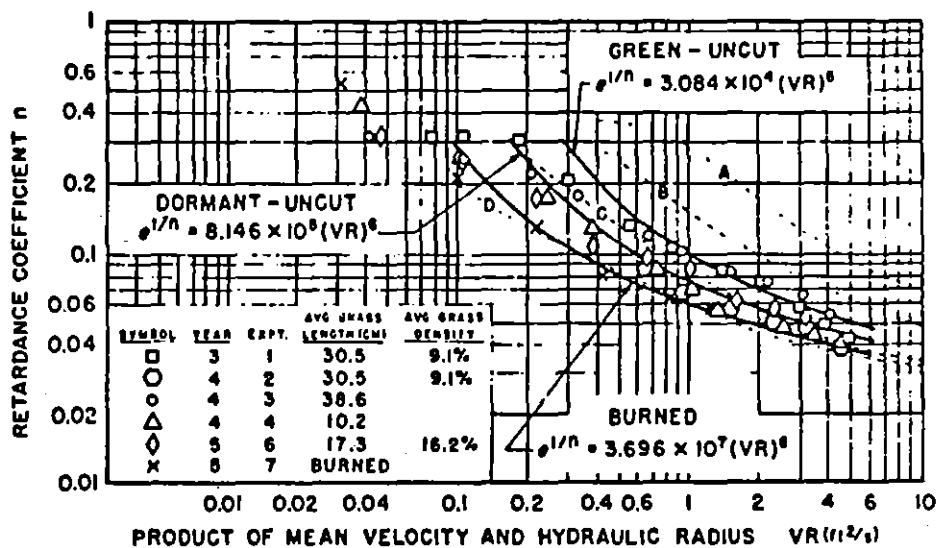
Sinds het uitbrengen van deze resultaten zijn er naderhand nog veel metingen in enkele van de oorspronkelijke meetgoten verricht (GWINN en REE, 1980). Deze metingen werden verricht bij geen of zeer gering onderhoud over de laatste 20 jaar. Bij een verhang van 3 en 6 procent zijn in de figuren 4.8 en 4.9 de resultaten gegeven.

In 1977 werden er resultaten gepubliceerd van metingen in waterlopen met een zeer klein verhang (0,1%). Bij deze metingen zijn een aantal grassoorten, tarwe en katoen gebruikt. Nu is de waterdiepte meestal kleiner dan de lengte van de vegetatie. In figuur 4.10 is de beplanting van "Sudan"gras gegeven en in figuur 4.11 de n-VR relatie voor dit gras. De gestippelde lijnen zijn de vegetatieklassen uit tabel 4 en figuur 4.7.

Omdat de vegetatieklassen zijn gebaseerd op metingen in waterlopen met een verhang van 3% en steiler en de laatste metingen bij een verhang van 0,1%, werd als conclusie getrokken dat de n-VR methode onafhankelijk zou zijn van het verhang.



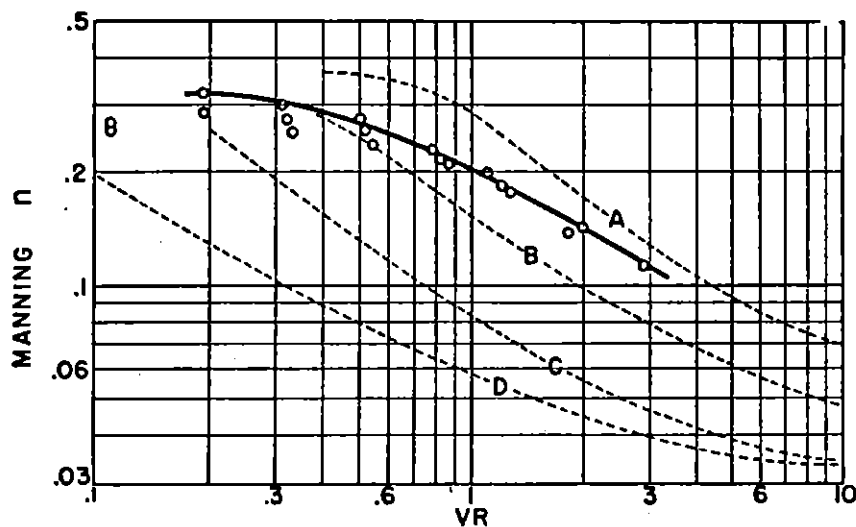
Figuur 4.8. Stromingsweerstand bij verhang van 3% (GWINN en REE, 1980).



Figuur 4.9. Stromingsweerstand bij verhang van 6% (GWINN en REE, 1980).



Figuur 4.10. Sudangras gebruikt bij metingen
(REE en CROW, 1977)



Figuur 4.11. Stromingsweerstand van Sudangras
(REE en CROW, 1977)

Door TEMPLE (1983), GREEN en GARTON (1983) zijn de oorspronkelijke meetgegevens van Palmer en Ree opnieuw geanalyseerd. De Manning ruwheidscoëfficiënt is uitgedrukt als functie van het debiet of van het Reynoldsgetal. Voorwaarde voor het gebruik van deze functie is dat het gras niet boven het wateroppervlak mag uitkomen en flexibel moet zijn, zodat het met de stroom mee kan buigen (dus geen stijve stengels). De ruwheidscoëfficiënt van Manning kan dan berekend worden als:

$$n = \exp \{ C_i (0,0133 [\ln(Rv)]^2 - 0,0954 [\ln(Rv)] + 0,297) - 4,16 \} \quad (4.5)$$

In vergelijking (4.5) is C_i een factor die de lengte en bedekkingsgraad van het gras weergeeft en Rv is een referentie Reynolds getal.

De factor C_i wordt berekend met de relatie:

$$C_i = 2,5 (k m)^{0,33} \quad (4.6)$$

In vergelijking (4.6) is k de lengte van de vegetatie en m is de bedekkingsgraad uitgedrukt als het aantal sprieten per vierkante meter. Voor de bedekkingsgraad worden van enkele grassoorten gemiddelde waarden gegeven (TEMPLE, 1983).

Het referentie Reynolds getal wordt berekend als:

$$Rv = \frac{V R}{\gamma} * 10^{-5} \quad (4.7)$$

hierin is V de gemiddelde stroomsnelheid, R is de hydraulische straal en γ is de referentie kinematische viscositeit ($74^{\circ}\text{F} \sim 23^{\circ}\text{C}$, watertemperatuur van oorspronkelijke metingen Palmer en Ree). Door TEMPLE (1980) wordt aangegeven dat nog onderzocht zal worden of men voor deze viscositeit de feitelijk voorkomende waarde moet nemen, of dat de constante gehandhaafd blijft. Over dit aspect wordt in een latere publicatie niet meer gesproken en blijft vermeld als de referentie viscositeit bij 74°F .

De vergelijkingen (4.5) tot en met (4.7) zijn toepasbaar als het referentie Reynolds getal voldoet aan de volgende voorwaarde:

$$0,0025 C_i^{2,5} \leq Rv \leq 36 \quad (4.8)$$

Deze vergelijkingen geven dezelfde resultaten als bij het toepassen van een vegetatieklasse uit figuur 4.7. Men moet wel voor C_i een karakteristieke waarde per vegetatieklasse gebruiken.

Door KAO en BARFIELD (1978) is de vegetatie in een open waterloop nagebootst door op een willekeurige manier smalle strips met een zekere afmeting en flexibiliteit als wandruwheid te gebruiken. Hiermee zijn hydraulische parameters bepaald. Er is een bladweerstand R_d vastgesteld als functie van bladafmeting, bladstijfheid, waterdiepte en Reynolds-getal.

Als het water rond de strips stroomt, heeft de ruwheid van de vegetatie een grote invloed op de stromingsweerstand. Veel minder is de invloed van de schuifspanning langs de bodem op de stromingsweerstand. De schuifspanning wordt van invloed als de vegetatie is ondergedompeld en wordt meegenomen door de stroming. Koa en Barfield concluderen dan ook dat door deze aspecten de hiervoor beschreven n-VR methode niet algemeen toepasbaar is. Voor situaties met een grote stroomsnelheid en kleine hydraulisch straal is de n-VR methode juist. Bij deze situaties zijn de metingen ook uitgevoerd, namelijk een steil verhang. Maar bij een klein verhang van de waterloop, wat resulteert in een geringe stroomsnelheid en een relatief grote hydraulische straal zal de n-VR methode onjuiste resultaten geven. Een conclusie van hen is dan ook, dat het verhang van de leiding een effect heeft op de stromingsweerstand.

Door KOUWEN, LI en SIMONS (1981) wordt verslag gedaan van metingen met plastic strips. Zij stellen zeer duidelijk dat de n-VR methode niet zomaar toegepast mag worden. Een nieuwe berekeningsmethode waarin ook de stijfheid van de vegetatie een rol speelt, wordt door hun gegeven.

Om aan te tonen dat men de n-VR methode niet zo maar bij elke situatie mag gebruiken en dat het verhang geen invloed heeft op de stromingsweerstand, wordt hieronder besproken.

De weerstand, die door de stroming van water rond een stengel van een plant wordt ondervonden, kan men berekenen met de vergelijking:

$$Fr = Rd \cdot m \cdot As \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (4.9)$$

In vergelijking (4.9) is Rd een weerstandscoefficiënt voor de obstructie, die maar weinig varieert met het locale Reynolds-getal, As is de oppervlakte van een stengel loodrecht op de stroming, ρ is het soortelijke gewicht van het water, v is de locale stroomsnelheid en m is het aantal stengels of sprieten per eenheid van oppervlak.

De schuifspanning langs de wand die veroorzaakt wordt door het verhang is:

$$\bar{\tau} = \rho \cdot g \cdot h \cdot S \quad (4.10)$$

Door de lange vegetatie kan de schuifspanning op de bodem worden verwaarloosd, zodat deze schuifspanning geheel door de vegetatie moet

worden opgevangen. Als Fr gelijk wordt gesteld aan τ , dan volgt uit vergelijking (4.9) en (4.10):

$$V = \sqrt{\frac{2g}{Rd \cdot m \cdot As}} \sqrt{h S} \quad (4.11)$$

Vergelijking (4.11) is gelijk aan de formule van Chézy, als men het eerste lid achter het gelijkteken beschouwd als een ruwheidscoëfficiënt.

Indien men uitgaat van de Manning-formule dan geeft vergelijking (4.11) de relatie:

$$kM = \frac{1}{h^{1/6}} \sqrt{\frac{2g}{Rd \cdot m \cdot As}} \quad (4.12)$$

Uit vergelijking (4.12) volgt dat de waterdiepte een functie is van het verhang. Deze aspecten gaven aanleiding om de toepasbaarheid van de n-VR methode voor een klein verhang in twijfel te trekken (KOUWEN, LI en SIMONS, 1981).

De waarden van de variabele Rd is moeilijk te kwantificeren of te relateren aan de vegetatieparameters. Daarom wordt met een weerstandscoefficiënt uit de formule van Darcy-Weisbach gewerkt (weerstandscoefficiënt van Fanning of meestal genoemd als de weerstandscoefficiënt van Darcy-Weisbach). Deze weerstandscoefficiënt wordt ook veel gebruikt om de stromingsweerstand in pijpleidingen en open waterlopen met een vaste wand te definiëren. De stromingsweerstand wordt berekend aan de hand van een equivalente diameter van een zandkorrel, die de ruwheid van het oppervlak moet voorstellen. Zo'n zelfde principe is ook al gebruikt om de stromingsweerstand van uiterwaarden met struiken en boomgaarden te berekenen (KLAASSEN en VAN DER ZWAARD, 1974).

De weerstandcoëfficiënt f is:

$$f = \frac{8g h S}{v^2} \quad (4.13)$$

ook geschreven als:

$$\frac{1}{f} = \frac{V}{V_*} \quad (4.14)$$

Uit vergelijking (4.13) en (2.8) volgt voor kM :

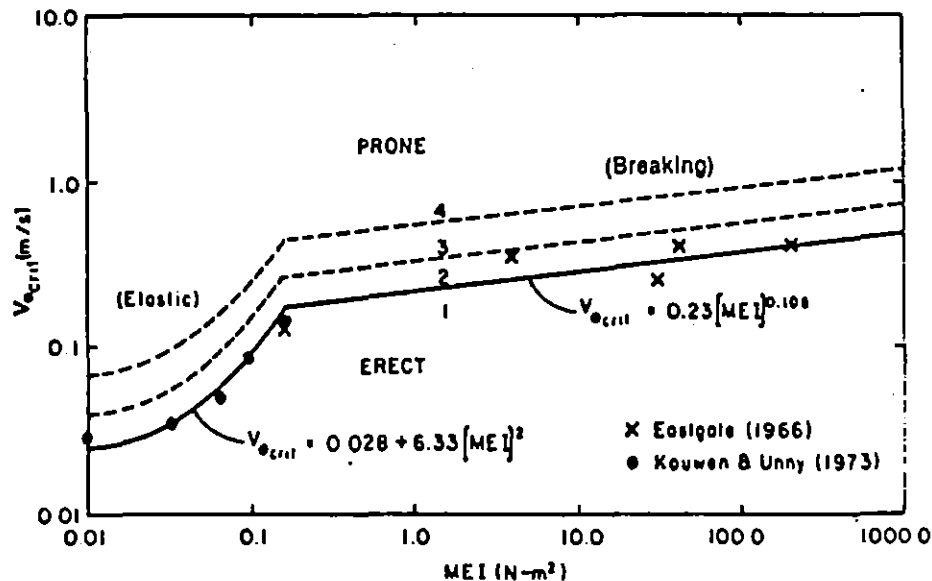
$$kM = \frac{\sqrt{8g [a_1 + a_2 \log(h/k_s)]}}{h^{1/6}} \quad (4.15)$$

Voor de mate van ombuiging van de vegetatie is een kritische schuifspanning gedefinieerd. Als de wandschuifspanning kleiner is dan deze kritische schuifspanning, dan blijft de vegetatie overeind staan en als hij groter is, dan wordt de vegetatie omgebogen. Met behulp van vergelijking (2.5) konden semi-empirische relaties worden opgesteld. Twee relaties afhankelijk van de flexibiliteit van de ruwheid waren noodzakelijk voor het vaststellen van de kritische schuifspanning (zie ook figuur 4.12):

$$V_{*crit} = 0,028 + 6,33 (mEI)^2 \quad (4.16)$$

of

$$V_{*crit} = 0,23 (mEI)^{0,106} \quad (4.17)$$



Figuur 4.12. Kritische schuifspanning (KOUWEN, LI en SIMONS, 1981).

De laagste waarde uit een van beide formules wordt nu gebruikt. De relatie wandschuifspanning tot de kritische schuifspanning bepalen nu de waarde van de coëfficiënten a_1 en a_2 uit vergelijking (4.15). In tabel 5 zijn voor een viertal condities de bijbehorende factoren gegeven.

Tabel 5. Coëfficiënten a1 en a2 als functie van de schuifspanning

Criteria	V*/V* _{crit}	Classificatie	Parameters	
			a1	a2
min	max	van vegetatie		
-	1,0	rechttop	0,15	1,85
1,0	1,5	omgebogen	0,20	2,70
1,5	2,5	omgebogen	0,28	3,08
2,5	-	omgebogen	0,29	3,50

De effectieve ruwheid van de omgebogen waterplanten is experimenteel vastgesteld met behulp van de variabelen uit vergelijking (2.5) en berekent men met de relatie:

$$k_s = 0,14 k \left[\frac{(m E I / \rho g h S)^{1/4}}{k} \right]^{1.59} \quad (4.18)$$

Indien het natte profiel niet rechthoekig is, dan zal men het profiel moeten opdelen in segmenten. Voor elk segment berekent men de ruwheidscoëfficiënt met de hierboven gegeven vergelijkingen. Door MOTAYED en KRISHNAMURTHY (1980) zijn een aantal formules geëvalueerd om een gemiddelde ruwheidscoëfficiënt te bepalen van de waarden voor elk segment. Gegevens van 36 meetstations zijn hiervoor gebruikt. Per segment van een meetraai werd met behulp van de gemeten stroomsnelheid een ruwheidscoëfficiënt bepaald. Met deze gegevens per segment kan men met behulp van vele formules een gemiddelde ruwheidscoëfficiënt bepalen. Met behulp van het gemeten verhang, gemiddelde stroomsnelheid en doorstroomprofiel is de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt bekend. Deze kan vergeleken worden met de berekende ruwheidscoëfficiënt kMg. De formule met de kleinste standaardafwijking was (MOTAYED en KRISHNAMURTHLY, 1980):

$$kMg = \frac{\sum_{i=1}^N kM_i P_i R_i^{5/3}}{P R^{5/3}} \quad (4.19)$$

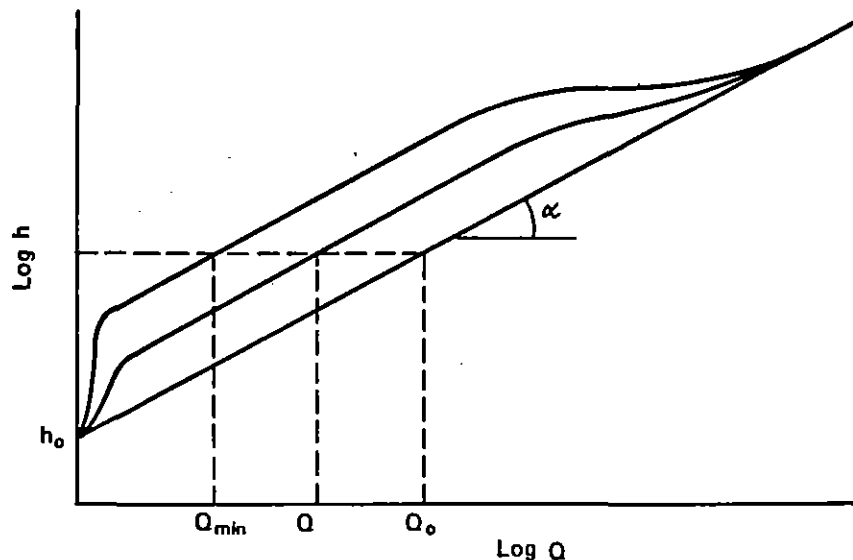
Hierin is i het beschouwde segment, P is de natte omtrek en kMg de gemiddelde ruwheidscoëfficiënt van het gehele doorstroomprofiel.

4.4. Duits onderzoek

Door VON GILS (1962) is er een begroeiingsgraad gedefinieerd die afhankelijk is van de relatie onbelemmerde tot de belemmerde afvoer. Deze factor is gedefinieerd als:

$$a = \frac{Q_0 - Q}{Q_0 - Q_z} \quad (4.20)$$

De afvoeren zijn in figuur 4.13 gegeven. De afvoer Q_z is gedefinieerd als de minimaal optredende afvoer bij een maximale vegetatieontwikkeling. Deze minimale afvoer kan optreden in de maanden juni tot augustus indien er geen onderhoud wordt uitgevoerd.



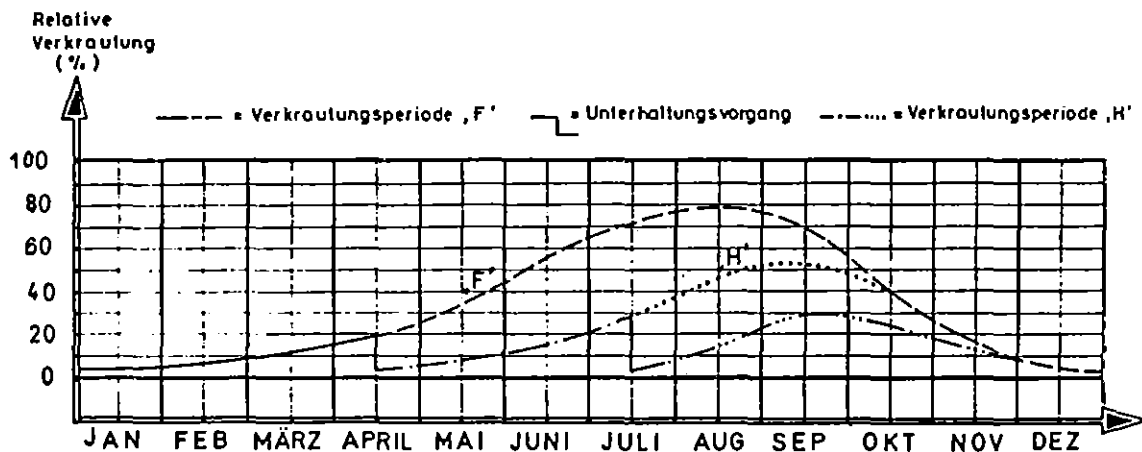
Figuur 4.13. Afvoerrelatie bij begroeiingsstadia (VON GILS, 1962).

De vergelijking voor de afvoer uit figuur 4.13 is:

$$\log Q = \log h_0 + \cot \alpha * \log (h - h_0) \quad (4.21)$$

Aan het Institut für Städtebau, Siedlungswesen und Kulturtechnik zijn in de periode 1968 - 1970 hydraulische metingen verricht naar de stromingsweerstand in open waterlopen bij een vegetatieontwikkeling gedurende het groeiseizoen (RADEMACHER, 1970).

In figuur 4.14 is de relatieve vegetatieontwikkeling in de tijd gegeven. Door seizoensinvloeden wordt niet uitgegaan van de maximale vegetatieontwikkeling.



Figuur 4.14. Relatieve begroeiing van een waterloop gedurende het groeiseizoen (RADEMACHER, 1970)

Er wordt door Rademacher net zoals door Von Gils een onbelemmerde afvoer gedefinieerd. Bij een bepaalde vegetatieontwikkeling zal bij constante waterdiepte de afvoer afnemen. Voor deze reductie in afvoer zijn tabellen en grafieken opgesteld.

De vegetatieontwikkeling is per seizoen als constant te beschouwen en niet afhankelijk van enige factoren zoals vermeldt in paragraaf 3.2.

Voor het berekenen van de afvoer in een waterloop met een zekere mate van begroeiing wordt door Rademacher een aantal grafieken gegeven. De onbelemmerde afvoer wordt berekend als functie van een aantal factoren:

$$Q_0 = f \{ h, b, z, S \} \quad (4.22)$$

In vergelijking (4.22) is b de bodembreedte en z is de helling van het talud. Door de ontwikkeling van de vegetatie wordt de onbelemmerde afvoer verkleind met een factor F_v . De gereduceerde afvoer Q_t en de factor F_v zijn:

$$Q_t = Q_0 * F_v \quad (4.23)$$

en

$$F_v = \left(1 - \frac{1 - V_0}{F_a} \right) F_z \quad (4.24)$$

Met de factoren F_a en F_z als een functie van:

$$F_a = f \{ h, b \} \quad (4.25)$$

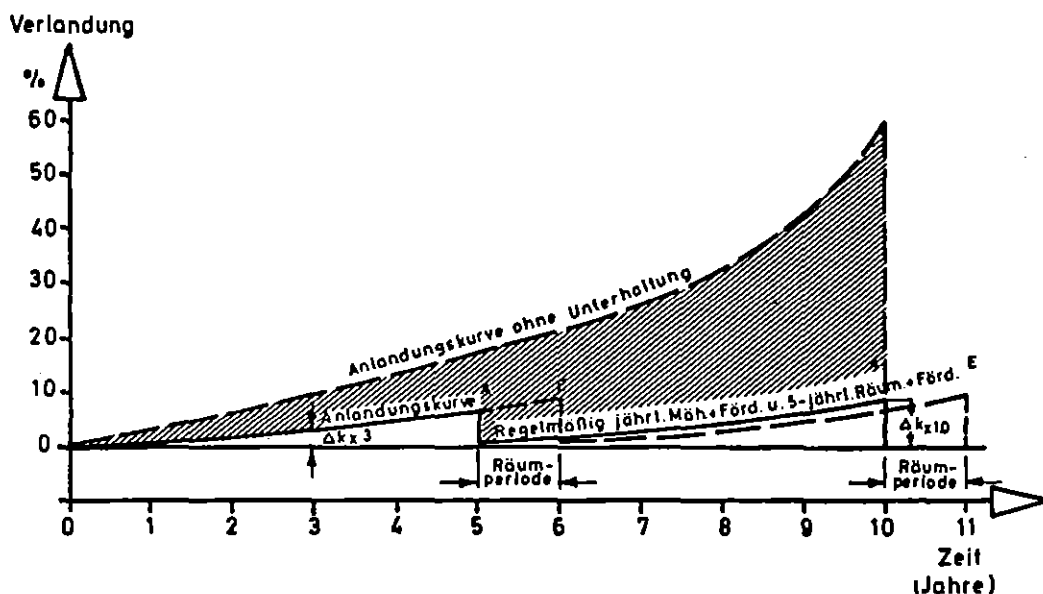
$$F_z = f \{ z \} \quad (4.26)$$

Hierin is V_0 een standaard begroeiingsfactor voor een trapezium-vormig profiel met een bodembreedte van 0,60 m en een taludhelling van 1 : 1,5. De factoren F_a en F_z zijn nodig voor een afwijkend profiel. De begroeiingsfactor is een functie van:

$$V_0 = f \{ (t - t_0), h, S \} \quad (4.27)$$

Hierin is $(t - t_0)$ de tijdsduur van de vegetatieontwikkeling.

Ook wordt door BAITSCH en RADEMACHER (1969) een grafiek gegeven (figuur 4.15) die het degenereren van het profiel in de tijd weergeeft. Uit figuur 4.15 blijkt dat het onderhoud een belangrijk effect heeft op het degenereren. Bij geen onderhoud is dit in de orde van 3 - 12% per jaar en met jaarlijks onderhoud in de orde van 1 - 2% per jaar.



Figuur 4.15. Degenereren van profiel in relatie tot het onderhoud (BAITHSCH en RADEMACHER, 1968).

4.5. Conclusie

Van de Nederlandse onderzoeksresultaten voor 1970 zijn er twee die goede en gedetailleerde resultaten geven. Verder wordt per onderzoeksgroep uit de paragrafen 4.2. tot 4.4. een conclusie gegeven.

Flach en Pieters

De metingen die het verloop van de ruwheidscoëfficiënt gedurende het groeiseizoen laat zien, zijn in feite tot op heden uniek (figuur 4.2). Het geeft een goed beeld van de variatie in stromingsweerstand over een groeiseizoen en de invloeden van onderhoud.

Bon

Met het taxatieschema van Bon kan een onderhoudsgraad bepaald worden. Hieruit volgt een ruwheidscoëfficiënt die afhankelijk is van de stroomsnelheid. Het geheel heeft een praktische opzet en zou de basis kunnen zijn voor een verbeterde berekeningsmethodiek. Een soort taxatieschema met daarbij nieuwe relaties om de ruwheidscoëfficiënt te bepalen.

Drijfplantenonderzoek

De resultaten in officiële publikaties geven een beeld van de variatie in stromingsweerstand over een groeiseizoen. Niet alle factoren die een invloed hebben op deze stromingsweerstand worden vermeld, waardoor het gevaar ontstaat, dat waarden worden gebruikt, door bijvoorbeeld een ontwerper, die niet goed zijn onder die omstandigheden of condities.

Bij drijfplanten wordt over de stromingsweerstand aan het wateroppervlak niet gesproken. Dit aspect is zeer belangrijk in zo'n situatie. De vergelijking die voor het berekenen van de stromingsweerstand wordt gegeven, is niet volledig.

Uit een eenvoudige theoretische beschouwing van de stromingsweerstand blijkt dat de stroomsnelheid in verhouding is met $S^{\frac{1}{2}}$. Waarom in dit onderzoek hier nog aan getwijfeld wordt, omdat enkele metingen anders uitwijzen, is onduidelijk.

CABO-onderzoek

Met de opzet van het onderzoeksprogramma is een te breed veld gekozen, waardoor de resultaten niet zo maar in eenvoudige relaties zijn weer te geven.

Er wordt intensief gemeten gedurende het groeiseizoen en bij verschillende onderhoudsmethoden. De hieruit verkregen ruwheidscoëfficiënten zal men moeten relateren aan kenmerken, zodat een ontwerper of beheerder deze resultaten kan gebruiken. Omdat bijvoorbeeld geen vegetatieontwikkeling wordt meegenomen, maar alleen soort en plaats, ontbreekt één van de belangrijkste afhankelijke variabelen. Eén van de belangrijkste kenmerken van een vegetatie is de lengte of men kan de vegetatieontwikkeling relateren aan een profielvulling van de waterloop.

Seizoens- en plaatsafhankelijke invloeden op de vegetatieontwikkeling zoals in paragraaf 3.2. vermeld, komen zeker bij dit onderzoek voor. Door de opzet van het onderzoek kunnen ze niet gekwantificeerd worden. Voor bepaalde waterlopen met daarbij de toegepaste onderhoudsmethode kan het een vertekend of zelfs foutief beeld geven van de ruwheidscoëfficiënt. Het effect wordt dan toegeschreven aan de onderhoudsmethode.

In de proefsloten komen een aantal soorten waterplanten voor. Wat nu de invloed is van een soort komt men niet te weten. Dit kan noodzakelijk zijn, omdat in een ander systeem een andere soort overheerst.

Amerikaans onderzoek

De resultaten van vele onderzoeken geven een duidelijk beeld van de factoren die een invloed hebben op de stromingsweerstand. De n-VR methode is vele jaren de enige manier geweest waar de stromingsweerstand gekoppeld is aan vegetatiekenmerken. Fundamenteel is de methode nooit onderbouwd en sinds een tiental jaren is het duidelijk dat deze methode alleen voor waterlopen met een stijl verhang gebruikt mag worden ($> 1\%$). In Nederland komt meestal een zeer klein verhang voor, zodat deze berekeningswijze niet voldoet.

Met behulp van laboratoriumproeven is het mogelijk geweest om relaties vast te stellen, die het gedrag van vegetatie weergeven. Zo is uit het onderzoek van Kouwen, Li en Simons een effectieve ruwheid naar voren

gekomen die eenduidig in elke stromingsformule gebruikt kan worden. Het principe is dat een vegetatie met een bepaalde lengte wordt omgebogen door de stroming. Hierdoor wordt de effectieve hoogte van de waterplanten verkleind. In deze effectieve ruwheid zitten dan alle factoren die een invloed hebben op de stromingsweerstand, zoals stroomsnelheid, vorm, afmeting en flexibiliteit van de begroeiing. Deze opzet heeft veel weg van de benadering gebruikt in de formule van Chézy.

Duits onderzoek

In de onderzoeksresultaten is het accent gelegd op de reductie van de afvoer door een zekere vegetatieontwikkeling. Men berekent een afvoer bij een opgeschoond profiel en een reductiefactor op deze maximale afvoer, die de vegetatieontwikkeling weergeeft. De reductiefactor geeft dan ook aan hoe lang in een waterloop het onderhoud uitgesteld kan worden. Men kan namelijk voor elke waterloop vaststellen wat de kleinste reductiefactor mag zijn om aan zekere randvoorwaarden te voldoen (bijv. wateroverlast).

Een beperking van het onderzoek is dat het type begroeiing niet expliciet in de vergelijkingen voorkomt. Ondanks dit is het geheel praktisch van opzet en heel geschikt om in computermodellen toe te passen.

5. MOGELIJKE OPZET VAN HET ONDERZOEK

5.1. Inleiding

Het onderzoek naar de stromingsweerstand in open waterlopen en de invloed hierop van onderhoudsfrequentie kan in vier afzonderlijke onderdelen gesplitst worden. Deze onderdelen zijn:

1. Theoretisch onderzoek naar fundamentele relaties tussen vegetatie en stromingsweerstand;
2. Vaststellen vegetatieontwikkeling gedurende het groeiseizoen;
3. Hydraulische metingen;
4. Ontwikkelen van modellen voor vaststellen onderhoud waterlopen.

Om de veldmetingen doelgericht te kunnen uitvoeren, is het noodzakelijk om eerst vast te stellen welke variabelen gemeten moeten worden. Dit onderzoek is het fundament waar het verdere onderzoek uit voortvloeit. Om zo maar metingen te verrichten, zonder dat men weet of men wel de juiste variabelen in het meetprogramma meeneemt, is niet juist.

De metingen van de stromingsweerstand en de vegetatieontwikkeling moet men gescheiden uitvoeren. Voor de hydraulische metingen moet men beschikken over voldoende afvoercapaciteit om zodoende bij realistische stroomsnelheden de metingen te kunnen uitvoeren. Door deze belangrijke eis, komen er maar een beperkt aantal lokaties voor in aanmerking.

Voor het meten van de vegetatieontwikkeling heeft men andere eisen ten aanzien van de lokatie, dan die voor de hydraulische metingen.

De ontwerper of een beheerder van een waterlopendsysteem heeft behoefte aan een instrument, om tot verantwoorde besluitvorming ten aanzien van ontwerp of onderhoud te komen. Hiervoor zijn computermodellen een efficiënt hulpmiddel om dit te realiseren.

In paragraaf 5.2 worden de vier onderzoeksmodulen meer gedetailleerd besproken.

5.2. Onderzoeksmodulen

5.2.1. Theoretisch onderzoek

In paragraaf 2.4 is al aangegeven welke afhankelijke variabelen men voor hydraulische metingen zou kunnen gebruiken. Of de afhankelijke variabelen voor alle soorten begroeiing dezelfde zijn, of alleen per categorie, zal uit een onderzoek over dit aspect moeten blijken.

Als uitgangspunt van het theoretisch onderzoek zal het werk van Kouwen, Li en Simons genomen worden. Men zal de vegetatie in bepaalde categorieën moeten verdelen, zoals bijvoorbeeld in paragraaf 3.1 gedaan is. Nagegaan moet worden of voor elke categorie de methode die door Kouwen, Li en Simons is voorgesteld, kan worden toegepast, of dat er aanpassing nodig is voor sommige specifieke plantensoorten. Door later hydraulische metingen uit te voeren kan men de gekozen berekeningsmethode verifiëren.

Door gebruik te maken van numerieke modellen kan het mogelijk zijn om de hydraulische metingen te ondersteunen. De snelheidsverdeling in een doorsnede van een waterloop is met behulp van de eindige elementen methode opgelost (bijvoorbeeld RODI, 1980 en QUERNER, 1981). Deze modellen gaan uit van een vaste wand met een zekere ruwheid die zeer klein is. De stroming door de begroeiing moet in zo'n model dan worden ingebouwd. Nadat het numerieke model geijkt is, kan het gebruikt worden om problemen zoals ruwheidsverschillen over het natte profiel op te lossen. Het veldwerk dat lang kan duren en veel tijd kost, kan zodoende kleiner in omvang zijn.

5.2.2. Vegetatieontwikkeling

Voor de metingen van de vegetatieontwikkeling kan men een groot aantal proefsloten nemen. Omdat in principe geen hydraulische metingen in deze waterlopen worden uitgevoerd, is de keuze eenvoudiger. Gedurende een aantal seizoenen zal men de vegetatie moeten meten aan de hand van de variabelen uit het theoretisch onderzoek (bijv. afmeting, biomassa, enz.). De effecten van verschillende onderhoudsmethoden kunnen dan ook goed bepaald worden.

5.2.3. Hydraulische metingen

Allereerst zal men per soort begroeiing een stromingsweerstand moeten meten. Door dit bij een aantal ontwikkelingsstadia te doen, kan men een relatie vastleggen, of de relaties verifiëren die volgen uit de berekeningsmethode van het theoretische onderzoek. Het zal nodig zijn om de metingen in verschillende profielen uit te voeren en bij een voldoende variatie in stroomsnelheid.

Als verschillende soorten vegetatie in een waterloop aanwezig zijn, dan kan men met behulp van numerieke modellen en aanvullende metingen deze situaties analyseren.

5.2.4. Model voor verifiëren onderhoud open waterlopen

Het peil in een waterloop hangt af van de aanwezige begroeiing en de afstroming als gevolg van neerslag en/of afwatering. Met behulp van analytische methoden zoals Kraijenhoff van de Leur en De Zeeuw-Hellinga kan het ontwateringsproces worden berekend. Deze benaderingswijze geeft als resultaat een afvoer voor een bepaald gebied, zonder dat het waterlopenpatroon hierop van invloed is. Aspecten zoals ontwatering afgewisseld met wateraanvoer zijn niet goed te berekenen met dit soort modellen.

Neemt men een hydraulische model van een waterlopenstelsel met daaraan gekoppeld een model die het aanvoer- of afvoerproces berekent, dan kan men voor elke situatie, hoe complex ook, de stromingen in het stelsel simuleren.

Doordat er vele verschillende mogelijkheden zijn om het onderhoud uit te voeren en er een zekere kans bestaat, dat hevige of langdurige neerslag optreedt, zou men in principe een groot aantal controleberekeningen moeten uitvoeren, voordat men de beste oplossing gevonden heeft. Een optimalisatieprogramma zou hier efficiënter zijn, maar door de complexiteit van zo'n model zal eerst een simulatiemodel ontworpen worden. In een later stadium kan met de ervaring opgedaan met dit model alsnog een optimalisatieprogramma ontwikkeld worden.

Voor het simulatiemodel zijn een aantal relaties nodig, zoals de relaties voor de vegetatieontwikkeling en hieraan gekoppeld een stromingsweerstand.

De vegetatieontwikkeling gedurende het groeiseizoen wordt berekend als een functie van de groeitijd en andere factoren, zoals enkele die in paragraaf 3.2 genoemd zijn. De vegetatieontwikkeling over een groeiseizoen wordt dan (zie ook figuur 5.1):

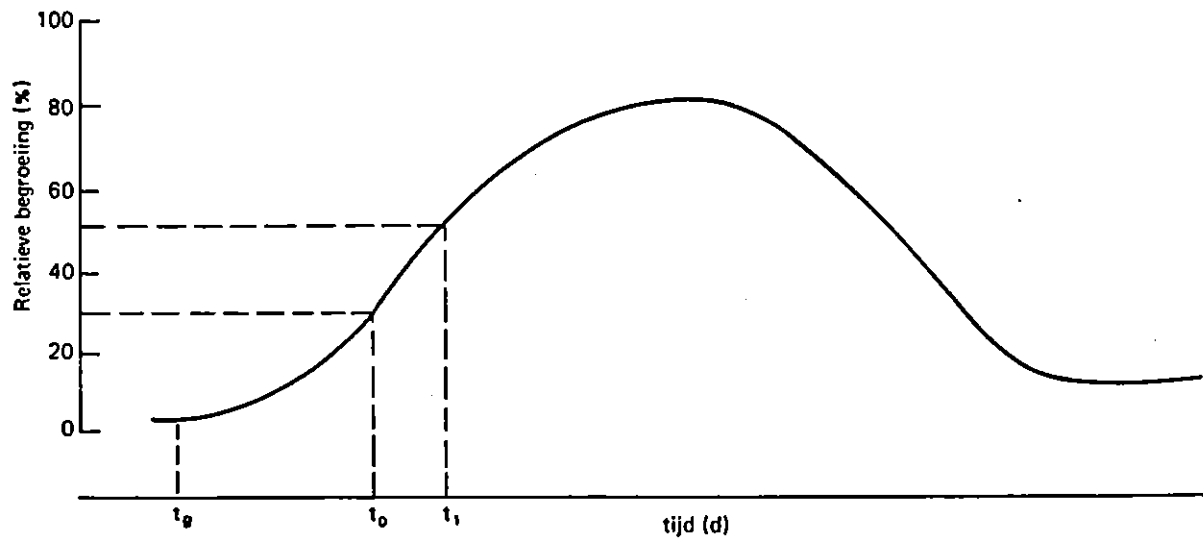
$$V_o = f \{ t - t_g, \dots \} \quad (5.1)$$

In vergelijking (5.1) is t het beschouwde tijdstip en is t_g het tijdstip waarop de vegetatie begint te groeien.

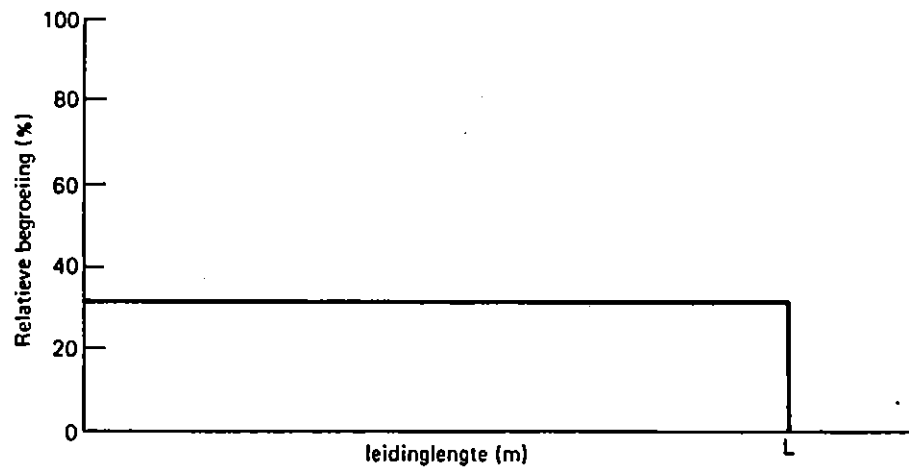
Bij een zekere vegetatieontwikkeling hoort een stromingsweerstand die afhankelijk is van het profiel, de stroomsnelheid en stijfheid en vorm van de vegetatie. De stromingsweerstand F uit vergelijking (2.2) is dan:

$$F = f \{ V_o, h, b, z, V, P_s, m \} \quad (5.2)$$

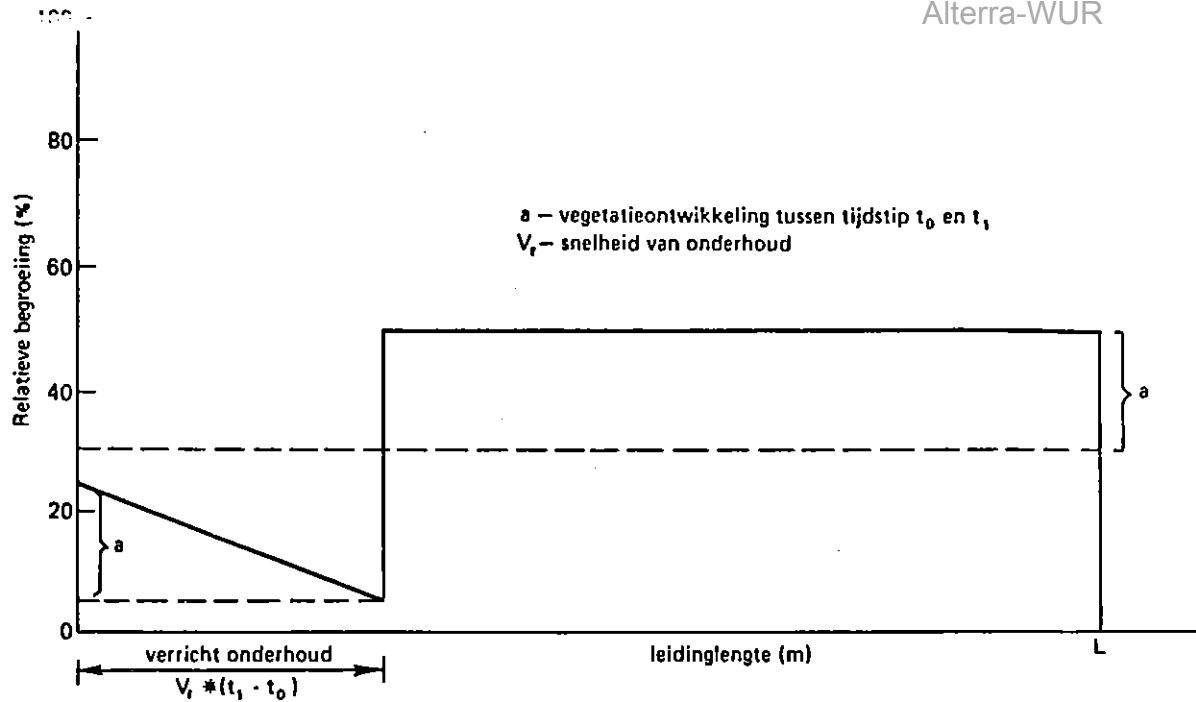
Hierin is P_s de karakteristieke eigenschappen van de planten en m de bedekkingsgraad als een intensiteit per eenheid van oppervlakte. Op een tijdstip t_0 begint men met het onderhoud van de waterlopen. Dit is in figuur 5.2 weergegeven, waarin L de lengte is van het waterlopenstelsel in een afvoergebied en de relatieve begroeiing over het gehele stelsel 30% is. Het reinigen heeft een snelheid V_r , zodat op een tijdstip t_1 een gedeelte van de leidingen gereinigd is en de rest een nog grotere profielvulling als op tijdstip t_0 heeft (zie figuur 5.3). Het gedeelte wat eerst gereinigd is, heeft al weer een zekere vegetatieontwikkeling ondergaan. Omdat in figuur 5.1 de relatie voor de vegetatieontwikkeling tussen t_0 en t_1 zo goed als lineair verloop, wordt dit in figuur 5.3 ook nagenoeg een rechte lijn. Aan het begin en eind van het groeiseizoen is de relatie niet-lineair in de tijd. Door dat men na elke tijdstap in de berekening (1/2 tot 2 weken) de vegetatieontwikkeling berekent, volgt men de begroeiing in de waterlopen nauwkeurig.



Figuur 5.1. Schematisatie van vegetatieontwikkeling over groeiseizoen



Figuur 5.2. Vegetatieontwikkeling over waterlopenstelsel op tijdstip t_0



Figuur 5.3. Vegetatieontwikkeling met gedeeltelijk uitgevoerd onderhoud op tijdstip t

Om een onderhoudsschema voor een leidingenstelsel op te stellen, zal men gebruik willen maken van een aantal berekeningsmethoden. Allereerst wil men een globaal schema opstellen aan de hand van ervaring en kennis over het gebied. Een model kan hier behulpzaam zijn door het vaststellen van de acceptabele begroeiing per leiding. De knelpunten komen dan tot uiting als die leidingen waar weinig begroeiing wordt toegelaten. Met het daarna gekozen onderhoudsschema kan men met een simulatiemodel het leidingenstelsel doorrekenen en verifiëren of aan alle gestelde criteria wordt voldaan. De twee modellen waarover men dan moet beschikken zijn:

- Vaststellen van maximale begroeiing per leiding voor een bepaalde afvoergolf (tijdsduur berekening 1 – 2 weken);
- Doorrekenen van het waterlopenstelsel over een jaar met een neerslagpatroon en vastgesteld onderhoudsschema en controleren op ontoelaatbare situaties.

De tijdsduur van de berekening is afhankelijk van de grote en zekere karakteristieken van het gebied.

Voor het bepalen van de maximale begroeiing per leiding (methode a) berekent men voor een zeker neerslagpatroon voor elke leiding of de

vegetatieontwikkeling toelaatbaar is. Indien de gekozen begroeiingstoestand toelaatbaar is, wordt deze in de volgende berekeningsstap verhoogd. Hiervoor kan men een vegetatieontwikkeling nemen, die bijvoorbeeld 2 weken later in de tijd optreedt. In die leidingen waar de maximaal toelaatbare begroeiing is bereikt, blijft deze constant.

De berekening wordt nu herhaald voor de volgende begroeiingstoestand en met hetzelfde neerslagpatroon. Voor iedere leiding in het systeem wordt zodoende de maximale begroeiingstoestand berekend, die kan optreden bij de gekozen uitgangspunten, zoals neerslagpatroon, grondwaterstand, vochttoestand in de onverzadigde zone, enz. Hierdoor kan het model alleen dienen als hulpmiddel voor het vaststellen van een onderhoudsschema. Met het model van berekeningsmethode b moet nog gecontroleerd worden, of aan zekere hydraulische en hydrologische eisen wordt voldaan.

Bij berekeningsmethode b rekent men een jaar door. De neerslag kan een gemeten of een ontwerp situatie (met een zekere frequentie) weergeven. Hieruit zal blijken of tijdens zo'n periode met het voorgestelde onderhoudsschema voldaan wordt aan zekere criteria.

Stromingsmodel

Het stromingsmodel zal een niet-permanente afvoer moeten simuleren. Omdat er een lange periode doorgerekend moet worden, is het gewenst dat de tijdstap zo groot mogelijk gekozen kan worden. Door het langzaam veranderen van de afvoer kan voor de waterbeweging het effect van de versnelling van de zwaartekracht worden verwaarloosd. In plaats van een dynamische golf rekent men dan met een kinematische golf (GRIJSEN en VREUGDENHIL, 1976). Dit heeft het voordeel dat voor de tijdstap geen beperkingen gelden. Het computermodel SIMWAT (simulation of flow in surface water systems) is voor deze situaties ontworpen (QUERNER, 1985) en kan uitgebreid worden met enkele submodellen om de vegetatieontwikkeling en het neerslag-afvoer proces te simuleren.

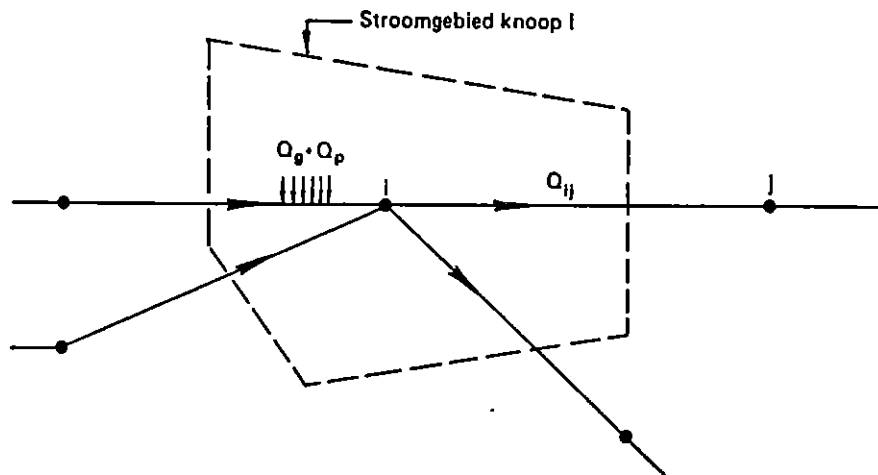
Het waterlopenstelsel wordt in het model SIMWAT geschematiseerd tot een stelsel van leidingen en knooppunten. In elk knooppunt kunnen meerdere leidingen samenkomen. In de knooppunten wordt een waterstand berekend en in de leidingen een debiet. In elk knooppunt wordt een externe invoer opgelegd afhankelijk van de waterstand in de leiding ten opzichte van de grondwaterstand als drainage of infiltratie.

Afvoerschematisatie

De waterbalans voor elk knooppunt kan geschreven worden als:

$$\sum_{j=i}^N Q_{ij} - Q_p (Q_g / F_d) = 0 \quad (5.3)$$

Hierin is Q_{ij} de stroming in de leiding van knooppunt i naar j , Q_p is de toevoer in knooppunt i door middel van neerslag minus de verdamping rechtstreeks op het open water, Q_g is de toevoer door drainage (of infiltratie) en F_d is de omrekeningsfactor van m^3/s naar m^3/d . De drainage geldt voor een gebied dat afstroomt op knoop i zoals in figuur 5.4 is gegeven.



Figuur 5.4. Schematisatie van belasting op een knooppunt i .

Voor de neerslag die op de grond valt zal een model gebouwd moeten worden, die het afvoerproces beschrijft. De aspecten waar men rekening mee moet houden, is een berging in de onverzadigde en verzadigde zone, kwel of wegzijging, verdamping en drainage of infiltratie (zie figuur 5.5). Voor de onverzadigde zone kan een waterbalans worden opgesteld van de wortelzone als (QUERNER en VAN BAKEL, 1984):

$$\Delta V = (P - E_a + Q_c) \Delta t \quad (5.4)$$

Hierin is P de neerslag, E_a de actuele verdamping, Q_c de flux naar de verzadigde zone en ΔV de berging van vocht in de wortelzone over een zekere tijdsperiode. De flux Q_c hangt af van de vochtvoorraad in de

wortelzone over een zekere tijdsperiode. De flux Q_c hangt af van de vochtvoorraad in de wortelzone en de grondwaterstand. Als de vochtvoorraad groter is dan een zekere evenwichtsvochtvoorraad, dan zal percolatie optreden. Als de vochtvoorraad kleiner is dan treedt capillaire opstijging op.

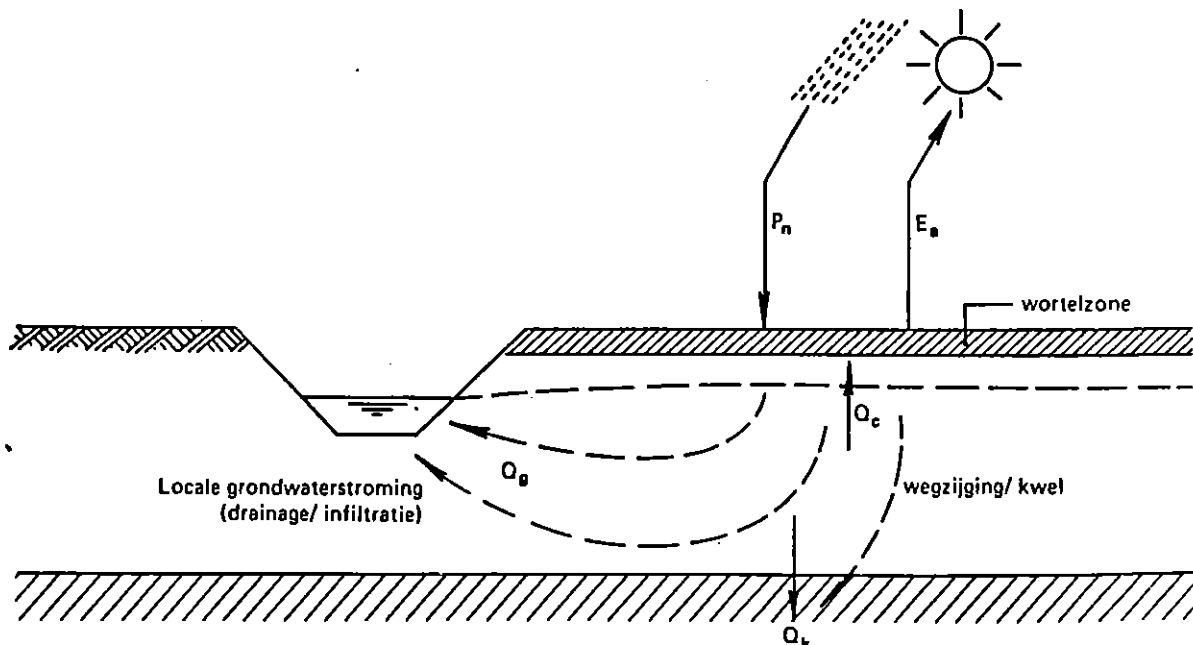
Voor de verzadigde zone wordt er een grondwaterstand berekend aan de hand van een toename of afname van de watervoorraad. Deze is:

$$B \frac{\Delta h_g}{\Delta t} = - (Q_c + Q_g + Q_k) \quad (5.5)$$

Hierin is B de bergingscoëfficiënt, Δh_g de grondwaterstandsverandering over tijdstap Δt en Q_k de afvoer naar de ondergrond (diepe kwel). Voor het berekenen van de drainage Q_g wordt de formule van Ernst gebruikt:

$$Q_g = \frac{(h_g - h_w)}{Y} \quad (5.6)$$

In vergelijking (5.6) is h_g de gemiddelde grondwaterstand van het gebied dat op knooppunt i afstroomt, h_w de waterstand in de leiding en Y de drainageweerstand.



Figuur 5.5. Model om berging in onverzadigde en verzadigde zone te simuleren

Vegetatieontwikkeling

Per tijdstap zal de ruwheidscoëfficiënt moeten worden aangepast. Voor zekere waterlopen waar het onderhoud is uitgevoerd, wordt de ruwheidscoëfficiënt sterk verkleind en voor de rest een beetje verhoogd, aan de hand van de vergelijkingen (5.1) en (5.2).

Onderhoud

De snelheid van het onderhoud moet gegeven worden aan de hand van een aantal machines en met welke snelheid deze machines werken. De snelheid van het reinigen kan als functie van de vegetatieafmeting worden verondersteld. Voor elke machine of groep van machines zal men de volgorde van waterlopen moeten opgeven, die achtereenvolgens worden afgewerkt. Een mogelijkheid is ook om aan de hand van zekere criteria, bijvoorbeeld aan de hand van de waterstanden het materieel over de waterlopen te verdelen (dynamisch onderhoudsschema).

Criteria

Voor berekeningsmethode a wordt in een aantal stappen de vegetatieontwikkeling doorlopen. Na elke berekeningsstap zal men controleren of aan specifieke hydraulische en hydrologische criteria wordt voldaan, voordat de toelaatbare vegetatieontwikkeling wordt verhoogd voor de volgende berekeningsstap.

Voor berekeningsmethode b wordt een jaar doorgerekend. Na elke berekeningsstap zal men controleren of aan specifieke hydraulische en hydrologische criteria wordt voldaan, zoals stroomsnelheid, overschrijding hoogwaterlijn, overschrijding minimale grondwaterstand, enz. Indien niet wordt voldaan aan de eisen, dan zal dit als uitvoer moeten worden gegeven. Het onderhoud zal men anders uitvoeren, bijvoorbeeld door meer of ander materieel in te zetten, of de waterlopen groter dimensioneren bij ontwerpberoekeningen. Met de aangepaste invoergegevens moet men een nieuwe berekening uitvoeren.

6. LITERATUUR

- BAGNOLD, R.A., 1956. The flow of cohesionless grains in fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 249(A), pp. 239-297.
- BAITSCH, B. en H. RADEMACHER, 1968 - 1972. Gewasserunterhaltung, Teil 1 (Allgemeine Hinweise), Teil 2 (Machines und Geräte), Teil 3 (Konstruktive Gestaltung von Abflussquerschnitten), Teil 4 (Hydraulische Bemessung). Verlag Wasser und Boden.
- BON, J., 1967. Bepaling van de km voor het ontwerpen van leidingen. Waterschapsbelangen 52(21), 12 pp.
- BOS, W.P. De en C. BIJKERK, 1963. Een nieuw nomogram voor het berekenen van waterlopen. Cultuur Technisch Tijdschrift, 3(4), pp. 149-155.
- CHOW, V.T., 1959. Open channel hydraulics. Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 680 pp.
- COWAN, W.L., 1956. Estimating hydraulic roughness coefficients. Agricultural Engineering, 37(7), pp. 473-475.
- FLACH, A.J. en J. PIETERS, 1966. Verandering in de wandruwheidsfactor van open waterlopen tijdens het groeiseizoen. Waterschapsbelangen 51(18), pp. 257-261 en 273-277.
- FLACH, A.J., 1963. Invloed van de begroeiing op de stromingsweerstand in open waterlopen. Cultuur Technisch Tijdschrift, 3(5), pp. 209-216.
- GILS, H. VON, 1962. Die wechselnde Abflusshemmung in verkrauteten Gewässern. Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, 6(5), pp. 102-110.
- GOURLAY, M.R., 1970. Discussion of "Flow retardance in vegetated channels, by Kouwen Unny and Hill, Journal of the Irr. and Drainage Div., ASCE 96(IR3), pp. 351-357.
- GREEN, J.E.P. en J.E. GARTON, 1983. Vegetation lined channel design procedures. Trans. ASAE 26(2), pp. 436-439.
- GRIJSEN, J.G. en C.B. VREUGDENHIL, 1976. Numerical representation of flood waves in rivers. Int. Symp. on unsteady flow in open channels. Newcastle-Upon Tyne, England, pp. K1.1-K1.14.
- GWINN, W.R. en W.O. REE, 1980. Maintenance effects on the hydraulic properties of a vegetation lined channel. Trans. ASAE 23(3), pp. 636-642 .

- HEUVER, M., 1963. Toepassing van onkruidbestrijdingsmiddelen bij het onderhoud van open waterlopen. *Cultuur Technisch Tijdschrift* 3(5), pp. 197-204.
- HUMBERT, H. 1967. Verhangvariaties in beken. ICW nota 415, 10 pp.
- KAISER, W. 1984. Fliesswiderstandsverhalten in Gerinnen mit durchstromten Ufergehölzzonen. Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Wasserbau, Konstruktiver Wasserbau und Wasserwirtschaft. *Wasserbau-Mitteilungen* nr. 23, 96 pp.
- KAO, D.T.Y. en B.J. BARFIELD, 1978. Prediction of flow hydraulics for vegetated channels. *Trans. ASAE* 21(3), pp. 489-494.
- KAZEMIPOUR, A.K. en C.J. APELT, 1983. Energy losses in irregular channels. *Journal of Hydr. Eng.*, 109(HY10), pp. 1374-1379.
- KLAASSEN, A.J. en J.J. VAN DER ZWAARD, 1974. Roughness coefficients for vegetated flood plains. *Journal of Hydr. Research*, 12(1), pp. 23-30.
- KOUWEN, N. en T.E. UNNY, 1973. Flexible roughness in open channels. *Journal of the Hydr. Div., ASCE* 99(HY5), pp. 713-728.
- KOUWEN, N. en R.M. LI, 1980. Biomechanics of vegetative channel linings. *Journal of the Hydr. Div., ASCE* 106(HY6), pp. 1085-1103.
- KOUWEN, N., R.M. LI en D.B. SIMONS, 1981. Flow resistance in vegetated waterways. *Trans. ASAE* 24(3), pp. 684-690, 698.
- LIDNER, K. 1982. Der Stromungswiderstand von Pflanzenbeständen. Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, *Mitteilungen* 75, 235 pp.
- MOTAYED, A.K. en M. KRISHNAMURTHY, 1980. Composite roughness of natural channels. *Journal of the Hydr. Div., ASCE* 106(HY6), pp. 1111-1116.
- PITLO, R.H., 1979. Biologisch slootonderhoud met behulp van drijvende vegetaties. *Waterschapsbelangen*, 64(13), pp. 283-290.
- PITLO, R.H., 1982. Flow resistance of aquatic vegetation. *Proc. EWRS, 6th Symp. on aquatic weeds*. Novi Sad, pp. 225-234.
- QUERNER, E.P., 1981. The finite element method applied to turbulent open channel flow. *Numerical methods in laminar and turbulent flow*. Door C. Taylor en B.A. Schrefler. *Proc. of the 2nd Intern. Conference, Venice*, Pineridge Press.
- QUERNER, E.P., 1984. Hydraulische aspecten t.a.v. meten stromingsweerstand in open leidingen bij een niet-permanente afvoer. ICW Nota 1552, 21 pp.

- QUERNER, E.P. en P.J.T. VAN BAKEL, 1984. Description of second level water quantity model, including results. ICW nota 1586, 67 pp.
- QUERNER, E.P., 1985. Program SIMWAT - The simulation of flow in surface water systems. ICW Nota in voorbereiding.
- RADERMACHER, H., 1970. Hydraulik und Bemessung offener Entwässerungsgraben mit geringen Dimensionen unter besonderer Berücksichtigung von Verkräutung und Unterhaltung. Dissertatie, 193 pp.
- REE, W.O. en F.R. CROW, 1977. Friction factors for vegetated waterways of small slope. USDA. ARS-S-151, 56 pp.
- RICHTLIJNEN, 1958. Richtlijnen voor het ontwerpen van open waterlopen en sommige bijbehorende kunstwerken. Werkgroep waterlopen van de Cultuurtechnische Vereniging. Van Gorcum, Assen, 83 pp.
- RODI, W., 1980. Turbulence models and their application in hydraulics. International Association for Hydraulic Research (IAHR), Delft.
- ROUSE, H., 1965. Critical analysis of open channel resistance. Journal of the Hydr. Div., ASCE, 91(HY4), pp. 1-25.
- SMAALEN, H. VAN, 1970. Nieuwe grafieken voor het berekenen van open waterlopen. Nota voor de vergadering van Hoofden van Civieltechnische Afdelingen van de C.D. Class. 31-04, 7 pp.
- TEMPLE, D.M., 1980. Tractive force design of vegetated channels. Trans. ASAE 23(4), pp. 884-890.
- TEMPLE, D.M., 1983. Design of grass-lined open channels. Trans. ASAE 26 (4), pp. 1064-1069.
- USDA, 1947, Rev. 1954. USDA. Handbook of channel design for soil and water conservation. SCS-TP-61, 34 pp.
- ZWAMBORN, J.A., 1970. Results of research carried out in Australia on by-wash spillways for farm dams. The Civil Engineer in South Africa, 12(3), pp. 49-53.
- ZWIETERING, F.W., 1983. Waterdoorvoerend vermogen van watergangen. Waterschapsbelangen, 68(29), pp. 523.

7. GEBRUIKTE SYMBOLEN

	eenheid
A - doorstroomprofiel	m^2
As - oppervlakte van plant loodrecht op stroming	m^2
a1 - constante	
a2 - constante	
B - bergingscoëfficiënt verzadigde zone	
b - bodembreedte waterloop	m
C - afvoercoëfficiënt van Chézy	$m^{1/2}/s$
c - constante	
Cd - bedekkingsfactor wateroppervlak door bladeren	
Ci - factor (vergl. 4.6)	
E - elasticiteitsmodulus	N/m^2
Ea - actuele verdamping	m/d
F - stromingsweerstand	
Fd - omrekeningsfactor	
Fp - factor voor effectieve plantvorm	
Fr - stromingsweerstand van plant	N/m^2
Fv - afvoer reductiefactor door vegetatie	
f - weerstandscóëfficiënt van Fanning	
g - versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
h - waterdiepte	m
hg - grondwaterstand	m
hw - waterniveau in waterloop	m
I - traagheidsmoment	kg/m^2
J - stijfheidsfactor	
K - constante van Von Karman	
k - lengte ruwheidselementen	m
kM - wandruwheidsfactor	$m^{1/3}/s$
kMg - gemiddelde ruwheidscoëfficiënt van dwarsdoorsnede	$m^{1/3}/s$
kMo - ruwheidscoëfficiënt bij geen begroeiing	$m^{1/3}/s$
ks - hoogte van omgebogen vegetatie	m
Ln - karakteristieke afstand tussen planten	m
m - intensiteit van planten	$/m^2$
n - weerstandscóëfficiënt van Manning	$s/m^{1/3}$
P - natte omtrek	m
Pn - neerslag	m/d

Q	- afvoer	m^3/s
Qc	- percolatie	m^3/d
Qg	- drainage	m^3/d
Q_{ij}	- debiet in leiding tussen knooppunt i en j	m^3/s
Qk	- diepe kwel	m^3/d
Qo	- afvoer bij opgeschoond profiel	m^3/s
Qp	- netto neerslag op leiding	m^3/s
Qz	- afvoer bij maximal vegetatieontwikkeling	m^3/s
R	- hydraulische straal	m
Rv	- referentie Reynoldsgetal	
Rd	- weerstandsfactor van plant	
S	- verhang	-
t	- tijdstip	d
V	- gemiddelde stroomsnelheid	m/s
Vo	- standaard begroeiingsfactor	
Vr	- snelheid van uitgevoerd onderhoud	m^1/d
V	- wrijvingssnelheid	m/s
x	- constante (vergl. 2.2)	
Y	- drainageweerstand	d
y	- constante (vergl. 2.2)	
z	- taludhelling	
Δh_g	- grondwaterstandsverandering over tijdstap	m
Δt	- tijdstap	d
$\bar{\tau}$	- gemiddelde schuifspanning langs de wand	N/m^2
ρ	- dichtheid van water	kg/m^3
μ	- dynamische viscositeit	kg/ms
γ	- kinematische viscositeit	m^2/s

BIJLAGE A

De formule van Manning en Chézy.

De stroming van water in een open leiding wordt meestal berekend met de formule van Manning of Chézy. Deze formules luiden:

Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

Chézy:

$$v = C R^{1/2} S^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

In plaats van de weerstandscoefficiënt n wordt in Nederland meestal de coëfficiënt kM ($= 1/n$) genomen om de stromingsweerstand in een waterloop te definiëren. De waarde van kM varieert in het algemeen voor waterlopen met een begroeiing globaal tussen de 5 en 50.

De ruwheidscoëfficiënt C in de formule van Chézy is gerelateerd aan de kM -waarde als men vergelijking (A.1) gelijk stelt aan vergelijking (A.2). Dit geeft de relatie:

$$C = kM R^{1/6} \quad (\text{A.3})$$

Voor het berekenen van de C -waarde voor waterlopen met een ruwe wand zijn vele vergelijkingen opgesteld. De meest gebruikte vergelijking in Nederland is de "Delftse" formule. Deze formule luidt:

$$C = 18 \log \left(\frac{12 R}{k} \right) \quad (\text{A.4})$$