

---

# Hoogwatervoorspelling: Fysisch gebaseerde regen-afvoermodellering

## Dilemma of Dèjà vu?

T. Rientjes  
W.J. Zaadnoordijk

---

*In dit artikel wordt een verbeterde kalibratiemethodiek voorgesteld voor fysisch gebaseerde regen-afvoermodellering in hellende stroomgebieden met natuurlijke afstroming. Voor de kalibratie worden meerdere variabelen gebruikt en er wordt automatische parameteroptimalisatie toegepast. Het hoofddoel van dit artikel is de voorgestelde methodiek te bespreken. Voor de parameteroptimalisatie wordt gebruik gemaakt van het parameterschattingspakket PEST terwijl als afvoercode FLOWSIM wordt gebruikt. De opzet van FLOWSIM en het gebruik van PEST worden kort besproken. Momenteel wordt onderzocht of de voorgestelde methodiek ook daadwerkelijk tot betere modelresultaten leidt.*

*Dit artikel bespreekt het natuurlijke afvoergedrag in hellende stroomgebieden en de fysisch gebaseerde modellering ervan. In het verlengde wordt duidelijk gemaakt waarom fysisch gebaseerde afvoermodellen volgens veel literatuur nu nog onvoldoende in staat zijn het afvoergedrag weer te geven.*

*Met dit (methodische) artikel willen wij een bijdrage leveren in de fundamentele discussie of we met fysisch gebaseerde regen-afvoer-modellen wel in staat zijn het afvoergedrag te voorspellen.*

## 1 Inleiding

Sinds de hoogwaters van de Maas in 1993, 1995 en 1998 zijn nieuwe impulsen nodig om het stroomgebiedsgedrag tijdens extreme neerslaggebeurtenissen beter te kunnen voorspellen. Afvoervoorspellingen van belangrijke zijrivieren in de Belgische Ardennen (bijvoorbeeld Sambre, Ourthe en Lesse) werden uitgevoerd met Nash-cascademodellen. Deze modellen bleken wel betrouwbaar in hun voorspelling voor korte zichttijden, voor langere zichttijden werden voorspellingen onnauwkeurig. Een belangrijke oorzaak hiervan was dat de Nash-cascademodellen het afvoergedrag als gevolg van de extreme meteorologische omstandigheden onvoldoende voorspelden. Op zich is dit niet echt verwonderlijk als we bedenken dat de Nash-cascademodellen gelumpete modellen zijn met weinig fysische betekenis en dat de

---

**T.H.M. Rientjes** is werkzaam bij de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de TU Delft, sectie Hydrologie en Ecologie, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, tel (015) 278 42 86, e-mail: t.rientjes@ct.tudelft.nl.

**W.J. Zaadnoordijk** is werkzaam bij IWACO, Adviesbureau voor water en Milieu, Postbus 8520, 3009 AM Rotterdam, tel (010) 286 55 44 en bij de sectie Hydrologie en Ecologie van de TUD, e-mail: w.j.zaadnoordijk@ct.tudelft.nl.

opgetreden neerslag ver buiten het bereik van de historische vielen waarmee de modellen gekalibreerd zijn.

De Commissie Boertien II (1994) schreef dan ook "de onzekerheid over modelvoorspellingen kan op langere termijn gereduceerd worden door meer inzicht in het hydrologisch/hydraulisch gedrag van de rivieren". Om het afvoergedrag tijdens extreem hoogwater beter te kunnen voorspellen moet gestreefd worden naar het gebruik van modellen met een fysische basis (Rientjes e.a., 1998). Voor afvoermodellering moet daarom voor een 'op het afvoerproces' gerichte aanpak gekozen worden, d.w.z., de hydrologische en de meteorologische processen die tijdens hoogwater binnen een stroomgebied een dominante rol spelen zullen beter beschreven en gemodelleerd moeten worden. Deze stelling werpt direct twee vragen op: *hoe ziet het afvoergedrag er dan uit* en *hoe moeten de modellen dan opgebouwd zijn?* In de volgende paragrafen zullen eerst de afvoerprocessen en het afvoergedrag kort besproken worden.

Om het werkelijke afvoergedrag in ruimte en tijd te beschrijven zal een gedistribueerd model gebruikt moeten worden waarin waterberging en waterbeweging berekend wordt met stroomvergelijkingen. Uit diverse modelstudies is bekend dat 'Physically Based' Rainfall Runoff (PBRR) codes onvoldoende gekalibreerd kunnen worden. Om deze afvoermodellen toe te kunnen passen zullen modellen versimpeld moeten worden en zal naar een verbeterde kalibratiemethodiek gezocht moeten worden. Wat betreft deze methodiek wordt in dit artikel voorgesteld om de automatische parameteroptimalisatie uit te voeren. Deze methode van parameterbepaling wordt, hoewel nog beperkt, in de grondwatermodellering toegepast terwijl de toepassing hiervan in de fysisch gebaseerde regen-afvoer-modellering nog vrijwel onbekend is. In dit stadium van het meerjarige onderzoek speelt nog het fundamentele vraagstuk of de modelresultaten van PBRR-modellen wel verbeterd kunnen worden door gebruik te maken van automatische parameteroptimalisatie. In dit artikel is er daarom voor gekozen om, weliswaar beknopt, het geheel van afvoergedrag, afvoermodellen, automatische parameteroptimalisatie en de verbeterde kalibratiemethodiek te bespreken.

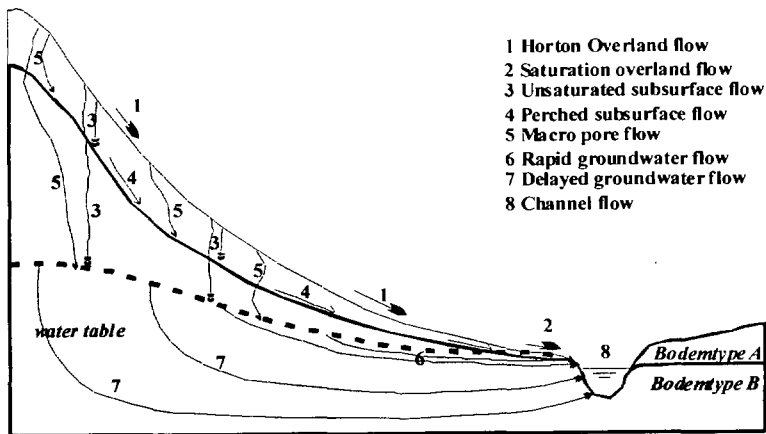
## 2 Afvoerprocessen en afvoergedrag

Het inzicht in het voorkomen en gedrag van afvoerprocessen in hellende gebieden is voornamelijk verkregen door uitvoerige meetcampagnes en modelstudies in stroomgebieden in de VS. Figuur 1 geeft een schematische weergave van stroomprocessen die op kunnen treden in hellende gebieden. In dit figuur en in dit artikel wordt de Engelstalige terminologie gehanteerd omdat de Nederlandse vertalingen omslachtig zijn.

**Horton overland flow** ontstaat indien de neerslagintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit en de neerslagduur langer is dan de zogenaamde 'ponding time'. **Saturation overland flow** ontstaat bij exfiltratie van grondwater aan het maaiveld. Veelal is exfiltratie het gevolg van een stijging van de grondwaterstand tot aan het maaiveld. De stijging wordt veroorzaakt door percolatie en door laterale aanvoer van (grond)water van bovenstroomse gebieden. Een uitvoerige beschrijving met betrekking tot overland-flow-afvoermechanismen is te vinden in Dunne (1978, 1983). **Unsaturated subsurface flow** wordt

---

<sup>1</sup> Een 'physically based model' is gebaseerd op fysische wetmatigheden zoals beschreven in de hoofdwetten van de hydrodynamica, te weten de behoudswetten van massa, impuls en energie (Nemec, 1993).

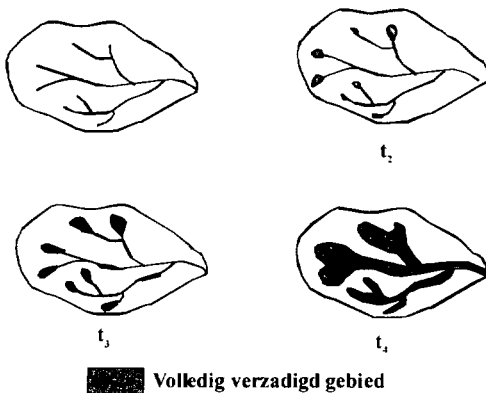


**Figuur 1:** Schematische weergave van afvoerprocessen in een dwarsdoorsnede van een hellend gebied.

omschreven als de stroming van water in de bodemmatrix onder onverzadigde bodemvochtcondities waarbij waterbeweging plaatsvindt ten gevolge van drukhoogtegradiënten. De voornaamste stroomrichting van het water is verticaal gezien de dominantie van de zwaartekracht.

**Macro-pore flow** is de stroming van water door grote poriën en bodemscheuren in de bodemmatrix waarbij de waterbeweging niet of nauwelijks onderhevig is aan capillaire krachten. Geïnfiltreerd water kan zo zeer snel het grondwater bereiken of, eventueel, **perched subsurface flow** genereren. Dit proces kan ontstaan indien een goed doorlatende, bijvoorbeeld organische, toplaag aanwezig is boven een minder goed doorlatende laag (laag A resp. laag B in figuur 1). Indien de infiltratiecapaciteit van laag B veel kleiner is dan die van laag A kan zich, tijdens een neerslagperiode, boven laag B een schijngrondwaterspiegel vormen. Geïnfiltreerd water in laag A kan dan als gevolg van unsaturated subsurface flow en macro-pore flow tot afvoer komen. Verder wordt nog onderscheid gemaakt tussen **rapid groundwater flow** en **delayed groundwater flow**. Deze begrippen hebben betrekking op de verblijftijd van water; het laatste begrip duidt op de 'normale' (trage) grondwaterafvoer terwijl het eerste begrip duidt op een 'versnelde' afvoer. Grondwater komt versneld tot afvoer als gevolg van een (snelle) toename van de gradiënt van de grondwaterspiegel. Een relatief snelle toename ontstaat als gevolg van macro-pore flow en unsaturated subsurface flow met name wanneer de onverzadigde zone dun is. In de omgeving van het afwateringssysteem kan perched subsurface flow ook bijdragen aan een grondwaterstandsstijging. Het spreekt voor zich dat de omvang van de processen nauw verbonden is met de (heterogeniteit van de) fysiografie, geologie en topografie van een stroomgebied en dat een afvoerproces geïnterpreteerd moet worden als een integrale responsfunctie van alle bovenstroomse processen.

Afvoeren als gevolg van bovengenoemde processen worden gegeneerd in delen van een stroomgebied. In de regen-afvoerhydrologie worden deze (deel)gebieden de 'runoff source areas' genoemd. Het belangrijkste kenmerk van runoff source areas is dat deze tijdens een neerslagperiode in grootte variëren en daardoor dus plaats- en tijdgebonden zijn. Daarnaast kunnen meerdere afvoerprocessen hetzelfde brongebied hebben en kunnen processen gelijktijdig voorkomen en elkaar versterken. Dit wordt duidelijk indien saturation overland flow gegeneerd wordt waarbij de verzadiging van de ondergrond kan ontstaan ten gevolge van unsaturated flow, macro-pore flow, perched subsurface flow en groundwater flow. Uit meetcampagnes van o.a. Dunne and Black (1970a, b) is gebleken dat saturation overland flow met name voorkomt in de omgeving van het afwateringssysteem waarbij, gedurende de regenperiode, de volledig verzadigde gebieden (i.e. de runoff source areas) variabel in grootte zijn. Het is bekend dat in geval van een meerdaagse regenperiode de afvoerbijdragen t.g.v. saturation overland flow zeer groot kunnen zijn en dat hoogwaterafvoeren zich snel kunnen ontwikkelen. Wij veronderstellen dat dit afvoermechanisme optreedt in de heuvels van de Belgische en de Franse Ardennen waardoor zich ook de hoge afvoeren van 1993, 1995 en 1998 in de Maas konden ontwikkelen.



**Figuur 2:** Ontwikkeling van volledig verzadigde gebieden rondom het hoofdafwateringssysteem (Dunne, 1978).

### 3 Fysisch gebaseerde regen-afvoermodellen

In de laatste tien jaar zijn een beperkt aantal PBRR-codes ontwikkeld. Deze beschrijven de afvoermechanismen van Horton overland flow en saturation overland flow met een fysisch gebaseerd mathematisch model. Bekendere computercodes uit de onderzoekswereld zijn *Distributed Basin SIMulator*; *DBSIM* (Cabral e.a., 1995), *Institute of Hydrology Distributed Model*; *IHDM* (Beven e.a., 1987), *THALES* (Moore en Grayson, 1991) en het *Système Hydrologique Européen*; *SHE* (Abbott e.a., 1986). De codes verschillen nogal wat betreft de ruimtelijke discretisatie van het modeldomein, de mathematische algoritmen, het gebruik van randvoorwaarden, de benodigde stroomgebiedsdata en de gemodelleerde processen. Enkele conclusies met betrekking tot de modelconcepten zijn (zie Rientjes 1999a):

- 1 de gekozen ruimtelijke discretisatie wat betreft de vorm van de gridelementen (recht-hoekig/niet-rechthoekig) en het gekozen aantal modellagen voor de onverzadigde en de verzadigde zone hebben geen aantoonbaar (positief) effect op de modelresultaten.
- 2 complexe (stroom)vergelijkingen waarin veel parameters zijn opgenomen hebben geen aantoonbaar positief effect op de modelresultaten, mathematische modellen kunnen daarom (relatief) simpel blijven.
- 3 de gekozen mathematische subsurface-modellen zijn vooral toepasbaar om waterbeweging in homogene en isotrope bodems te berekenen waardoor macro-pore flow niet gemodelleerd kan worden en waardoor, binnen de schaal van het stroomgebied, de bodem niet gekenmerkt moet worden door een hoge mate van heterogeniteit (Rientjes, 1999a).

De belangrijkste conclusie is echter dat voor elk van deze codes geldt dat het (hoog-) dynamische afvoergedrag niet goed gemodelleerd kan worden waardoor de ontwikkeling van PBRR-codes de laatste tien jaar ernstig stagneert. De belangrijkste redenen voor de matige 'modelperformance'<sup>2</sup> zijn:

- Modellen vragen zeer veel invoergegevens om de afzonderlijke afvoerprocessen te kunnen beschrijven. Met uitzondering van het overland flow<sup>3</sup> proces zijn in het algemeen onvoldoende stroomgebiedsgegevens beschikbaar om voor de afvoerprocessen een unieke en identificeerbare parameterset te bepalen waarin de geologie, fysiografie en topografie zijn opgenomen. Overigens speelt de schaalproblematiek hierin een belangrijke rol; de waarnemingschaal, de processchaal en de modelschaal verschillen vaak sterk waarbij elk afvoerproces (zie figuur 1) ook nog gekenmerkt wordt door eigen processchalen. In Blöschl and Sivapalan (1995) wordt deze problematiek uitvoerig besproken.
- Fysisch gebaseerde modellen zijn over-geparameteriseerd met parameters die niet goed uit veldwaarnemingen bepaald kunnen worden. Ook kunnen door het gebruik van de vele parameters meerdere parametersets gedefinieerd worden waarmee hetzelfde afvoerverloop gemodelleerd kan worden. Daarnaast zijn de parameterstructuur en de samenhang onvoldoende bekend en zijn veel parameters gecorreleerd. In review-artikelen van o.a. Beven (1989) en Klemeš (1983, 1986) krijgt dit probleem ruime aandacht waarbij de toepasbaarheid van PBRR-modellen sterk in twijfel wordt getrokken.
- De gehanteerde kalibratiemethoden zijn ontoereikend voor de complexe modellen. Tot dusver worden modellen kloppend gemaakt door handmatige aanpassing van parameterwaarden (i.e. trial and error) waarbij het afvoerverloop de enige kalibratievariabele vormt.

Om de modelperformance van PBRR-codes te verhogen moet gestreefd worden naar het gebruik van een code waarin het aantal te ijken parameters beperkt is. Hiervoor moeten de complexe mathematische algoritmen versimpeld worden en moeten parameterzonerings toegepast worden. Ook moet bij de kalibratie gebruik worden gemaakt van meer informatie. Nu vormt het afvoerverloop de enige kalibratievariabele terwijl ook gebruik gemaakt kan worden van bijvoorbeeld de grondwaterstand. Daarnaast is automatische parameteroptimalisatie een zeer nuttig hulpmiddel aangezien de te voorspellen grootheden gevoelig zijn voor parameters die redelijk te ijken zijn.

---

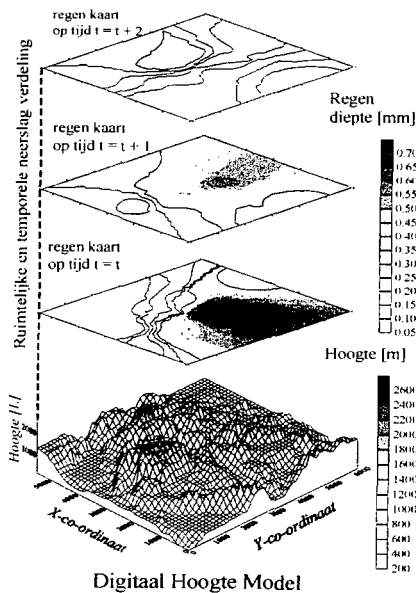
<sup>2</sup> De performance is hoog indien een model het werkelijke stroomgebiedsgedrag goed weer geeft terwijl de performance laag is indien dit gedrag niet goed wordt weergegeven.

<sup>3</sup> Overland flow wordt gemodelleerd door gebruik te maken van een Digitaal Terrein Model (DTM) waarin de topografie en het landgebruik zijn gemodelleerd.

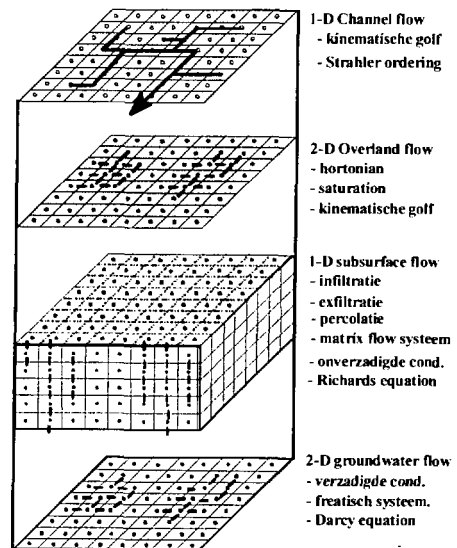
#### 4 Het fysisch gebaseerd regen-afvoermodel FLOWSIM

FLOWSIM (van FLOW SIMulation) (Rientjes, 1999b) is een computercode voor de gedistribueerde fysisch gebaseerde modellering van de stroomgebiedsafvoer in hellende gebieden tijdens perioden van langdurige regen. De code is binnen de sectie Hydrologie en Ecologie van de TU-Delft ontwikkeld.

In FLOWSIM kan regen alleen op natuurlijke wijze tot afvoer komen. Stroomprocessen worden gemodelleerd m.b.v. stroomvergelijkingen die ontstaan door substitutie van bewegingsvergelijking in een massabalansvergelijking. Het mathematisch model wordt opgelost met differentiemethoden waarbij per berekeningstijdstap de hydrologische toestand berekend wordt voor vier sub-modellen, te weten het landoppervlak, de onverzadigde zone, de verzadigde zone en het riviersysteem. Uitwisseling van water tussen deze submodellen is hierbij mogelijk. Het modeldomein van FLOWSIM is opgesplitst in gridlagen en bestaat uit uniforme, rechthoekige gridelementen. De invoer van modelparameters en variabelen wordt in een Geografisch Informatiesysteem (GIS) voorbereid. In de figuren 3 (neerslagmodel) en 4 (afvoermodel) wordt het modelconcept van FLOWSIM weergegeven (Rientjes, 1999b).



Figuur 3: Neerslagmodel



Figuur 4: Afvoermodel

Regen wordt gemodelleerd als een plaats- en tijdsafhankelijk fenomeen. Met geostatistische interpolatiemethoden zoals (co)kriging en/of lokale interpolatietechnieken zoals een inverse-afstand-methode worden puntwaarnemingen bewerkt om tot vlakdekkende data te komen. Channel flow wordt gemodelleerd met een 1-D impliciet stroommodel waarbij de ligging van het afwateringsysteem wordt weergegeven met gridelementen uit het digitale

**Tabel 1:** Modelvergelijkingen van FLOWSIM

Proces	Massabalansvergelijking	Bewegingsvergelijking
Overland flow	$\frac{\partial h_{of}}{\partial t} + \frac{\partial q_{of,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{of,y}}{\partial y} = S_{of}$	$q_{of} = k_m \sqrt{i_{dem}} h_{of}^{5/3}$
Subsurface flow Onverzadigde bodem	$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial q_{sf,z}}{\partial z} = S_{sf}$	$q_{sf} = -k(\theta) \left( \frac{\partial(h_m(\theta))}{\partial z} + 1 \right)$
Groundwater flow Verzadigde bodem	$S \frac{\partial h_{gf}}{\partial t} + \frac{\partial q_{gf,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{gf,y}}{\partial y} = S_{gf}$	$q_{gf} = -k_s d_{gf} \frac{dh_{gf}}{dx}$
Channel flow	$b \frac{\partial h_{ch}}{\partial t} + \frac{\partial Q_{ch}}{\partial x} = S_{ch}$	$Q = k_m A R^{2/3} \sqrt{i_{ch}}$

**Tabel 2:** Parameters en variabelen in FLOWSIM.

Proces	Parameters en variabelen		
Rainfall	P	=	specifieke neerslag (regen) (L)
Overland flow	$h_{of}$	=	waterhoogte op landoppervlak (L)
	$q_{of,x}$	=	specifieke debiet 'overland flow' in x-richting ( $L^2 T^{-1}$ )
	$q_{of,y}$	=	specifieke debiet 'overland flow' in y-richting ( $L^2 T^{-1}$ )
	$S_{of}$	=	bronterm overland flow ( $L T^{-1}$ )
	$k_m$	=	Manning weerstandcoëfficiënt ( $L^{1/3} T^{-1}$ )
	$i_{dem}$	=	helling gradiënt v/h digitale hoogtemodel (-)
Subsurface flow	$\theta$	=	bodemvochtgehalte (-)
Onverzadigde bodem- condities	$q_{sf,z}$	=	specifiek debiet 'subsurface flow' in z-richting ( $L T^{-1}$ )
	$S_{sf}$	=	bronterm subsurface flow ( $T^{-1}$ )
	$k(\theta)$	=	doorlaatcoëfficiënt als functie van $\theta$ ( $L T^{-1}$ )
	$h_m(\theta)$	=	drukhoogte als functie van $\theta$ (L)
Groundwater flow	S	=	bergingscoëfficiënt (-)
Verzadigde bodemcondities	$h_{of}$	=	grondwaterstand (L)
	$q_{of}$	=	specifiek debiet 'groundwater flow' ( $L^2 T^{-1}$ )
	$S_{of}$	=	bronterm 'groundwater flow' ( $L T^{-1}$ )
	$k_s$	=	doorlaatcoëfficiënt ( $L T^{-1}$ )
	$d_{of}$	=	dikte doorstroomprofiel freatisch pakket (L)
Channel flow	$k_m$	=	Manning weerstandcoëfficiënt ( $L^{1/3} T^{-1}$ )
	$S_{ch}$	=	bronterm 'channel flow' ( $L T^{-1}$ )
	A	=	natte doorstroomoppervlak ( $L^2$ )
	$h_{ch}$	=	waterniveau in watergang (L)
	R	=	hydraulische straal (L)
	$i_{ch}$	=	bodemgradiënt in watergang (-)
	b	=	stroombreedte (L)

De cartesische coördinaten 'x,y,z' en de tijd 't' zijn niet opgenomen in de tabel.

hoogtemodel. Horton en saturation overland flow worden gemodelleerd met een 2-D impliciet stroommodel waarbij een digitaal hoogtemodel wordt ingevoerd voor de bepaling van de hellinggradiënten. Overland flow en channel flow worden gemodelleerd met de Strickler–Manning-weerstandvergelijking. Unsaturated subsurface flow wordt gemodelleerd met een 1-D expliciet stroommodel en is gebaseerd op Richards' vergelijking. Voor de

bepaling van de functies  $h_m(\theta)$  en  $k(\theta)$  worden de Van-Genuchten-relaties (Van Genuchten, 1980) toegepast. Groundwater flow wordt gemodelleerd met een 2-D expliciet stroommodel en is gebaseerd op de Darcy-vergelijking. Verdamping en interceptie worden niet gemodelleerd gezien hun beperkte procesrelevantie in geval van een meerdaagse regenperiode. Tabel 1 geeft een overzicht van de modelvergelijkingen.

De betekenis van parameters en variabelen is vermeld in tabel 2. De selectie van de modelvergelijkingen komt voort uit Rientjes (1999a). Voor een uitvoerige beschrijving van het mathematisch model wordt verwezen naar Rientjes (1999b).

## 5 Modelkalibratie

Uitgangspunt voor modelkalibratie is dat kalibratie moet leiden tot een unieke set van parameters die zo optimaal mogelijk bepaald is en die, na verdere aanpassing, niet zal leiden tot verbeterde modelresultaten. Bij voorkeur moet kalibratie ook gegevens opleveren over de parameterstructuur, de onderlinge samenhang en de identificeerbaarheid van parameters. Het is duidelijk dat (handmatige) parameteraanpassingen volgens de gebruikelijke trial-and-error-procedure hiertoe niet geschikt is.

Om modelkalibratie van PBRR-modellen te verbeteren moet (a) meer informatie gebruikt worden waarmee de hydrologische toestand beschreven kan worden, (b) het aantal teijken parameters beperkt blijven en (c) parameteroptimalisatie automatisch uitgevoerd worden middels inverse modellering. Voor automatische parameteroptimalisatie wordt gekozen omdat het hiermee mogelijk wordt op simpele wijze de gevoeligheid en de correlaties van parameters te bepalen. Voor de optimalisatie moet een doelfunctie (vergelijking 1) samengesteld worden die geminimaliseerd moet worden. De bepaling van de optimale parameterwaarden is een iteratief proces waarbij per iteratiestap de parameterwaarden aangepast worden. Tot dusver is nog geen ervaring opgedaan met automatische parameteroptimalisatie in gedistribueerde neerslag-afvoermodellen, in tegenstelling tot grondwatermodellering.

### *Doelfuncties en modelkalibratie*

In de praktijk wordt vaak een doelfunctie gebruikt gebaseerd op gewogen kleinste kwadrateen:

$$\vartheta = \sum_{i=1}^m w_i (h_{sm} - h_{sc})^2 = ((h_{sm} - Xp)^T Q (h_{sm} - Xp)) \quad (1)$$

waarin

$\vartheta$	=	doelfunctiewaarde
$w_i$	=	(kwadratische) gewichten voor de restfouten
$h_{sm}$	=	gemeten waarden van variabelen
$h_{sc}$	=	berekende waarden van variabelen
$X$	=	een $n * m$ -matrix met systeemeigenschappen
$p$	=	$n$ -dimensionale kolommatrix met parameters.

$Q$  is een diagonaalmatrix met wegingsfactoren en vormt feitelijk een covariantiematrix.

Voor de bepaling van de gewichten zijn diverse methoden beschikbaar. Voor dit onderzoek wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van gewichten gebaseerd op de nauwkeurigheid



van de meting (Hill, 1998). Het spreekt voor zich dat het gebruik van deze wegingsfactoren erg aantrekkelijk is voor PBRR-modellen aangezien wij te maken hebben met een systeem waarin meerdere processen een rol spelen met verschillende grootheden en spreiding.

De automatische parameteroptimalisatie levert schattingen van de parameterwaarden, de covariantie en correlatiematrix van parameters, een matrix met eigenwaarden en eigenvectoren en een Jacobiaanmatrix. Met de eerste drie matrices komt informatie beschikbaar over de onderlinge samenhang en over de identificeerbaarheid van parameters. Met de Jacobiaanmatrix komt informatie beschikbaar over de gevoeligheid van de variabelen voor veranderingen van parameterwaarden. Deze matrix is vooral zeer bruikbaar indien verschillende type variabelen en parameters gebruikt worden in het optimalisatieproces. Gezien de geschetste problemen is het duidelijk dat PBRR-modellen een grote behoefte hebben aan deze informatie.

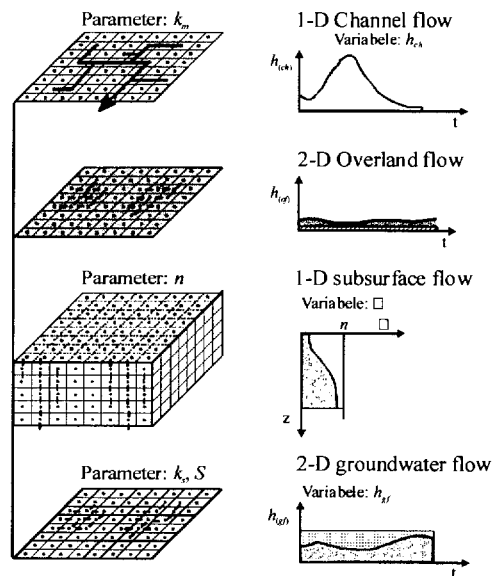
### Doelfuncties en FLOWSIM

In deze studie wordt een stroomgebied benaderd als een set van interacterende subsystemen. In principe kan dan per subsysteem een kalibratievariabele geselecteerd worden. Het is duidelijk dat met deze benadering het gebruik van het afvoerverloop als enige kalibratievariabele komt te vervallen.

In de doelfunctie kunnen drie makkelijk meetbare variabelen opgenomen worden te weten het afvoerverloop (debiet en/of waterhoogte), het bodemvochtgehalte in de onverzadigde zone en de grondwaterstand van het freatische systeem. Hoewel het afvoerverloop de belangrijkste kalibratievariabele blijft is het gebruik van de grondwaterstand en het bodemvochtgehalte vooral belangrijk om de vulling van het systeem tijdens een neerslaggebeurtenis en hiermee de ontwikkeling van de runoff source areas van het saturation-overland-flow-proces (zie figuur 2) te modelleren. Waarnemingen van bodemvocht en grondwaterstanden zijn vooral nodig in de nabijheid van het afwateringssysteem.

Om het aantal te optimaliseren parameters beperkt te houden zullen voor de kalibratie van een stroomgebiedsmodel maximaal 5 tot 6 parameters geselecteerd kunnen worden terwijl de overige parameterwaarden onveranderd moeten blijven. Als basis voor de selectie geldt een gevoeligheidsanalyse. In het volgende is een selectie van parameters en variabelen opgenomen (zie tabel 1 en 2 voor modelvergelijkingen en variabelen en parameters in FLOWSIM).

Parameters die wij in eerste instantie willen optimaliseren zijn de Strickler-Manning-coëfficiënt voor het channel-flow-model, de porositeit voor het 1-D subsurface-model en de verzadigde doorlaatcoëfficiënt en bergingscoëfficiënt van het 2-D groundwater-flow-model.



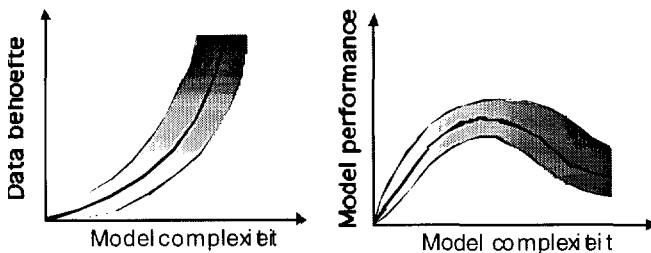
Figuur 5: Selectie van parameters en variabelen per submodel (Rientjes e.a., 1999)

Zoals gesteld, deze selectie is voorlopig en zal bijgesteld worden afhankelijk van modelresultaten.

In figuur 5 is de selectie van variabelen en parameters weergegeven en gevoegd bij de submodellen van FLOWSIM. Voor automatische kalibratie van een stroomgebiedsmodel wordt het PEST-software pakket (van Parameter ESTimation) (Watermark Computing, 1994) gebruikt.

### *Dilemma of déjà vu?*

In de literatuur wordt het gebruik van PBRR-modellen vaak afgeraden aangezien de modellen als te complex worden ervaren. Het gevolg hiervan is dat de ontwikkeling van deze modellen de laatste 10 jaar ernstig stagneert. Op zich genomen is deze stagnatie eigenaardig aangezien in de hydrologische beroepspraktijk vaak veel waarde wordt toegekend aan modelberekeningen van complexe modellen. Bovendien zijn de voorspellingen van de huidige niet-fysisch gebaseerde modellen te onnauwkeurig onder extreme meteorologische omstandigheden waardoor de noodzaak voor PBRR-modellieren toegenomen is. In de grondwaterhydrologie leidt het gebruik van complexere modellen zoals meefase en dichtheidsafhankelijke stromingsmodellen er toe dat computercodes steeds verder ontwikkeld worden waardoor de modelcomplexiteit toeneemt. Met name door de gedetailleerdheid waarmee processen beschreven worden en de (geavanceerde) numerieke modellering ervan schept een schijnbaar vertrouwen. Paradoxaal echter, door de toegenomen complexiteit zal de modelperformance weer achteruit gaan omdat allerlei aanvullende gegevens nodig zijn die niet of nauwelijks voorhanden zijn. Deze verbanden hebben wij in figuur 6 weergegeven en gelden feitelijk voor veel modellen. Het is duidelijk dat een optimum bestaat tussen de modelperformance en de modelcomplexiteit.



**Figuur 6:** Relaties tussen databehoeftes en modelcomplexiteit en 'model performance' en model complexiteit (Rientjes e.a., 1999).

Voor de fysisch gebaseerde regen-afvoer-modellen stellen wij dat wat betreft de relatie tussen modelcomplexiteit en modelperformance het optimum gepasseerd is. Modellen moeten daarom minder complex worden gemaakt waardoor de databehoeftes afneemt terwijl ook vernieuwende modelleertechnieken geïntroduceerd moeten worden om de modelperformance te verhogen. Om deze redenen hebben wij FLOWSIM ontwikkeld en maken wij gebruik van het parameterschattingspakket PEST. In hoeverre met de voorgestelde aanpak het afvoergedrag beter valt te modelleren zijn wij momenteel nog aan het onderzoeken, het is duidelijk dat wij van mening zijn dat de performance van PBRR-modellen toe zal nemen.

## 6 Discussie

Om meer inzicht te krijgen in het ontstaan van hoogwaters en het hydrologisch gedrag van een stroomgebied tijdens perioden van langdurige neerslag zijn fysisch gebaseerde modellen nodig. Tot op heden zijn deze modellen beperkt in hun toepassing door hun (te) grote behoefte aan stroomgebiedsdata, door overparameterisatie en schaal-problemen en door het gebruik van gebrekkige kalibratiemethoden.

In dit artikel wordt een methodiek besproken om de modelperformance van PBRR-modellen te verbeteren. De hoofdlijnen voor de methodiek zijn als volgt:

- voor de afvoermodellering moeten modellen gebruikt worden met een, relatief, beperkte behoefte aan stroomgebiedsdata en
- modelkalibratie moet ter vervanging van de tot dusver gangbare trial-and-error-methode gebruik maken van automatische parameteroptimalisatie waarbij meerdere kalibratievariabelen gebruikt worden.

Het belangrijkste voordeel van automatische parameteroptimalisatie in PBRR-modellering is dat, naast het feit dat de geselecteerde parameterset zo optimaal mogelijk geschat wordt, er ook informatie beschikbaar komt over de parameterstructuur en samenhang en de mate waarin parameters geïdentificeerd zijn. Aan deze informatie bestaat in PBRR-modellering een grote behoefte aangezien de gemodelleerde afvoerprocessen veelal gelijktijdig voorkomen en elkaar ook kunnen versterken.

## Literatuur

- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connel, en J. Rasmussen (1986)** An introduction to the European Hydrological System, Système Hydrologique Européen "SHE", history and philosophy of a physically based, distributed modelling system; in: *Journal of Hydrology*, 87, pag 45–59.
- Beven, K., (1989)** Changing ideas in Hydrology — The Case of Physically-Based Models; in: *Journal of Hydrology*, nr 105 pag 157–172.
- Beven, K., A. Calver, en E.M. Morris (1987)** The Institute of Hydrology Distributed Model, Report No. 98, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Blöschl, G. en M. Sivapalan (1995)** Scale issues in hydrological modelling: a review; in: *Hydrological Processes*, vol 9, pag 251–290.
- Cabral, M.C., R.L. Bras, D. Tarboton en D. Entekhabi (1990)** A distributed physically based rainfall-runoff model incorporating topography for real-time flood forecasting; Ralph M. Parsons Laboratory, Hydrology and water resource systems, Report Number 332.
- Commissie Boertien II (1994)** Onderzoek Watersnood Maas; Hoofdrapport De Maas Meester; Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Dunne, T.D. (1978)** Field studies of hillslope flow processes; in: M.J. Kirkby (red) *Hillslope hydrology*, pag 227–294, John Wiley, New York.
- Dunne, T.D. (1983)** Relation of Field Studies and Modelling in the prediction of storm runoff; in: *Journal of Hydrology*, vol 65, pag 25–48.
- Dunne, T.D. en R.D. Black (1970a)** An experimental investigation of runoff production in permeable soils; in: *Water Resources Research*, vol 6(2), pag 478–490.

- Dunne, T.D. en R.D. Black (1970b)** Partial area contributions to storm runoff; in: *Water Resources Research*, vol 6, pag 1296–1311.
- Genuchten, M.Th. van** (1980) Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils; in: *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 44, pag 892–898.
- Hill, M.C. (1998)** Methods and guidelines for effective model calibration, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations report 98-4005.
- Klemeš, V. (1983)** Conceptualization and scale in hydrology; in *Journal of Hydrology*, vol 65, pag 1–23.
- Klemeš, V. (1986)** Dilletantism in hydrology; in: *Water Resources Research*, 22(9), pag 177–188.
- Moore, I.D. en R.B. Grayson (1991)** Terrain based catchment Partitioning an Runoff Prediction using Vector Elevation Data; in: *Water Resources Research*, vol 27, nr 6, pag 1177–1191.
- Nemec, J. (1993)** Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales; in: *CHR, International Commission for the Hydrology of the River Rhine*, Report no. II-7, 74 pag.
- Rientjes, T. (1999a)** Physically Based Rainfall-Runoff modelling applying a Geographical Information System; in: *Communications of the Water Management and Sanitary Engineering Division* Report no 83. Delft University of Technology, 74 pag.
- Rientjes, T. (1999b)** Description of the Physically Based Rainfall-Runoff model FLOWSIM; In: *Communications of the Water Management and Sanitary Engineering Division*, Report no 84, Delft University of Technology, 16 pag.
- Rientjes, T., C. van den Akker en P. van der Veer (1998)** Een hoog(water)standje; in: *Watertovenaars: Delftse ideeën voor nog 200 jaar Rijkswaterstaat*; bèta Imaginations publishers, pag 190–201.
- Rientjes, T., C. van den Akker en P. van der Veer (1999)** Improved catchment parameterisation for runoff modelling; in: *Calibration and reliability in groundwater modelling*, Proceedings of the Modelcare '99 Conference, Zürich, 99 pag.
- Watermark Computing (1994)** Model Independent Parameter Estimation (PEST); Manuals door J. Doherty, L. Brebber, L. Brebber en P. Whyte.