

# Methodologie voor modellering van hydrologische extremen

■ **Patrick Willems**

K.U.Leuven, Afdeling hydraulica en Onderzoekscentrum Duurzame Aarde  
(Patrick.Willems@bwk.kuleuven.be)

---

De methodologie die hier wordt voorgesteld, beoogt neerslaginvoer te produceren die kan om hydrologische extremen te analyseren in hydrodynamische riviermodellen. Met hydrologische extremen worden extreem hoge of lage rivierafvoeren bedoeld, die aan de basis liggen van overstromingen en laagwaterproblemen, of aan extreme waterkwaliteitssituaties langs de waterloop zoals overschrijding van waterkwaliteitsnormen. De methode combineert hydrologische modellering met statistisch tijdreeksenrekenen.

---

### **Statistiek voor of na de modelsimulatie?**

Om de kans op het voorkomen van extreme waterlooptoestanden te schatten, moet primair de intrinsieke variatie van de waterlooptoestand worden gemodelleerd. Extreme waterstanden worden in hoofdzaak veroorzaakt door de neerslag. Ze kan op twee manieren berekend worden: via een 'tijdreeks-gebaseerde' of 'gebeurtenis-gebaseerde' aanpak. Bij de tijdreeks-gebaseerde methode wordt de volledig beschikbare tijdreeks van neerslag in het model gesimuleerd en wordt de statistische verwerking doorgevoerd op de modelresultaten (tijdreeksen van neerslagafstromingsdebieten, hoogwaterstanden, uitgestrektheid van overstromingsgebieden, overstromingsdiepten, enz). Bij de gebeurtenis-gebaseerde methode wordt eerst de modelinvoer, bijvoorbeeld de neerslagreeks, statistisch verwerkt en worden 'maatgevende gebeurtenissen' gesimuleerd. In eenvoudige bewoordingen refereert men vaak naar beide methoden als toepassing van 'statistiek vooraf' en 'statistiek achteraf'. Ook een methode die gedeeltelijk tijdreeks-gebaseerd en gedeeltelijk gebeurtenis-gebaseerd is, is mogelijk. Zo kan bijvoorbeeld de volledig beschikbare tijdreeks van neerslag gesimuleerd worden in het hydrologisch rivierbekkenmodel, de tijdreeks van gesimuleerde neerslagafstromingsdebieten statistisch worden verwerkt en vervolgens 'maatgevende hydrogrammen' worden afgeleid om als invoer te dienen voor het hydrodynamisch riviermodel. De modellering van de hydrologie gebeurt dan tijdreeks-gebaseerd en de hydrodynamische modellering gebeurtenis-gebaseerd. Deze methode wordt hier aanbevolen, om redenen die hierna verder worden toegelicht.

Het gebruik van maatgevende invoer (toepassing van 'statistiek vooraf') heeft als belangrijk onderdeel dat ze niet in alle situaties toepasbaar is. Hydrologische en hydraulische systemen hebben immers meestal geen eenduidig verband: een piekdebiet in een waterloop heeft niet noodzakelijk dezelfde terugkeerperiode als de regenbui die er aan de basis van ligt. Bij hydrologische modellen doet dit probleem zich sterker voor dan bij hydrodynamische modellen. De neerslagafstromingsdebieten worden immers niet uitsluitend bepaald door de regenbui die aan de basis ligt

van het debiet, maar ook door andere dominante invloeden zoals het verzadigingsgehalte van de ondergrond (de situatie voor de bui). Voor de hydrologische modelcomponent is het gebruik van maatgevende invoer daarom uit den boze. Bovendien stelt dit geen probleem, aangezien neerslagafstromingsdebieten met goede nauwkeurigheid kunnen worden gemodelleerd met conceptuele hydrologische modellen. Onderzoek heeft aangetoond dat zulke conceptuele modellen niet noodzakelijk minder nauwkeurig zijn dan zeer complexe ruimtelijk verdeelde hydrologische modellen, integendeel (Breuer et al., 2009; Savenije, 2001). Langdurige neerslagreeksen kunnen in deze modellen zeer snel doorgerekend worden, waardoor er geen noodzaak is om voorafgaandelijk de voornaamste statistische informatie uit de neerslagreeksen te halen en te fixeren in maatgevende buien, ontwerpstormen of kansverdelingen voor buiparameters.

Voor de hydrodynamische riviermodellering is dit anders. Een waterloop gedraagt zich meestal redelijk eenduidig. Op elke locatie langs de waterloop worden de piekdebieten (en dus ook de waterhoogten) bepaald door de gemiddelde stroomopwaartse neerslagafstromingsdebieten gedurende de concentratietijd van de waterloop op die locatie. Ook wanneer regelsystemen zoals stuw- en wachtbekkens aanwezig zijn, blijft dit geldig aangezien de regelsystemen alleen de piekdebieten aftoppen. Zij zullen maar zelden een hoger neerslagafstromingsdebiet omkeren naar een lager waterloopdebiet of lagere waterhoogte. Maatgevende hydrogrammen zijn dus meestal goed bruikbaar. Dit is ook interessant voor de overstromingsmodellering, zoals hierna wordt toegelicht. Verder is het werken met vereenvoudigde riviermodellen voor dit soort toepassingen weinig interessant aangezien de modeluitvoer gekend dient te zijn op verschillende locaties in de langsrichting van de rivier. Bovendien hebben onze rivieren vaak belangrijke kunstmatige invloeden zoals stuwsluizen en dijken, die de extreme-waarden-analyse hypothekeren. Extrapolatie naar meer uitzonderlijke gebeurtenissen gebeurt dus best op basis van de modelinvoer (de neerslagafstromingsdebieten) en niet op basis van de rivierdebieten of -waterhoogten. Ook hieraan kan men eenvoudig tegemoet komen op basis van maatgevende hydrogrammen.

### **“Downward approach” bij de conceptuele hydrologische modellering**

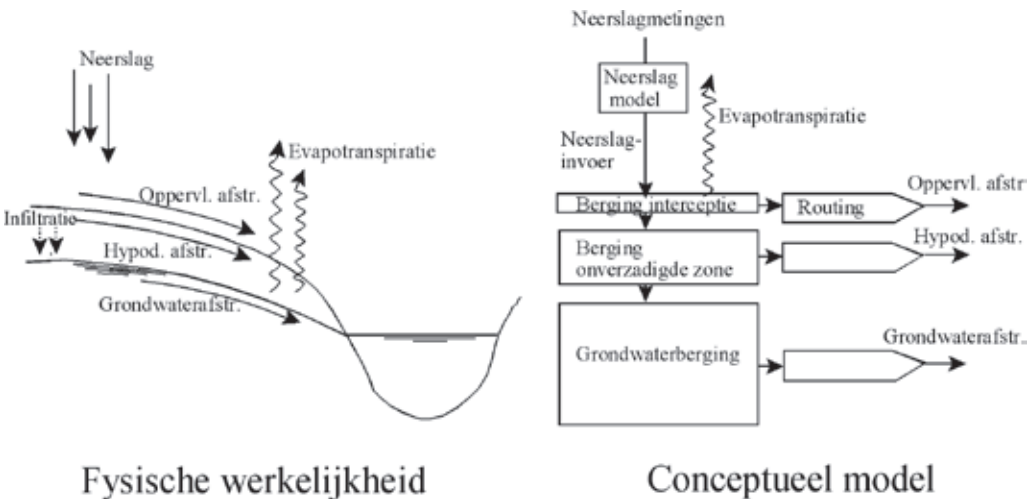
Klassiek vertrekken hydrologische modelleerders van een bepaalde software die idealiter op basis van een aantal inhoudelijke criteria werd gekozen. Zulke modellen zijn bij toepassing op een specifieke gevalstudie – met een beperkte hoeveelheid aan beschikbare meetgegevens – vaak overgeparameteriseerd. Het is immers moeilijk om bij een beperkte gegevensset en een groot aantal modelparameters al deze parameters voldoende nauwkeurig te kalibreren. Dit probleem staat in de internationale literatuur bekend onder de benamingen 'equifinality', 'non-uniqueness', 'ambiguity', 'non-identifiability', enz. (Gupta en Sorooshian, 1983; Beck en Halfon, 1991; Beven, 1993). Vaak komt de modelleur tot de vaststelling dat zij/hij bijkomende datanoden heeft om op basis van de beschikbare software een accuraat en robuust model met unieke en fysisch nauwkeurige parameterwaarden te kunnen opbouwen.

In de hier beschreven methodiek wordt de aanpak omgekeerd: in plaats van de datanoden, en dus bijkomende meetcampagnes, te laten afhangen van de softwarekeuze, wordt de modelstructuur bepaald op basis van de beschikbare data. Hierbij wordt de hoeveelheid informatie die men uit de data haalt gemaximaliseerd. Er zal blijken dat er vaak veel meer informatie uit beschikbare meetreeksen gehaald kan worden dan momenteel gangbaar is. De informatie kan worden

gebruikt zowel ter kalibratie van de modelparameters, als ook om de modelstructuur te identificeren. Enkel die processen waarvan de parameterwaarden geïdentificeerd kunnen worden op basis van de beschikbare data worden meegenomen. Dit leidt tot een model met een beperkt aantal parameters en voorkomt overparameterisatie.

## Stapsgewijze modelopbouw

Voortbouwend op voorgaande concepten wordt een stapsgewijze methode gevolgd voor modelstructuurophbouw en -kalibratie. Er wordt uitgegaan van een veralgemeniseerde conceptuele hydrologische modelstructuur, zoals in **Figuur 1** weergegeven.



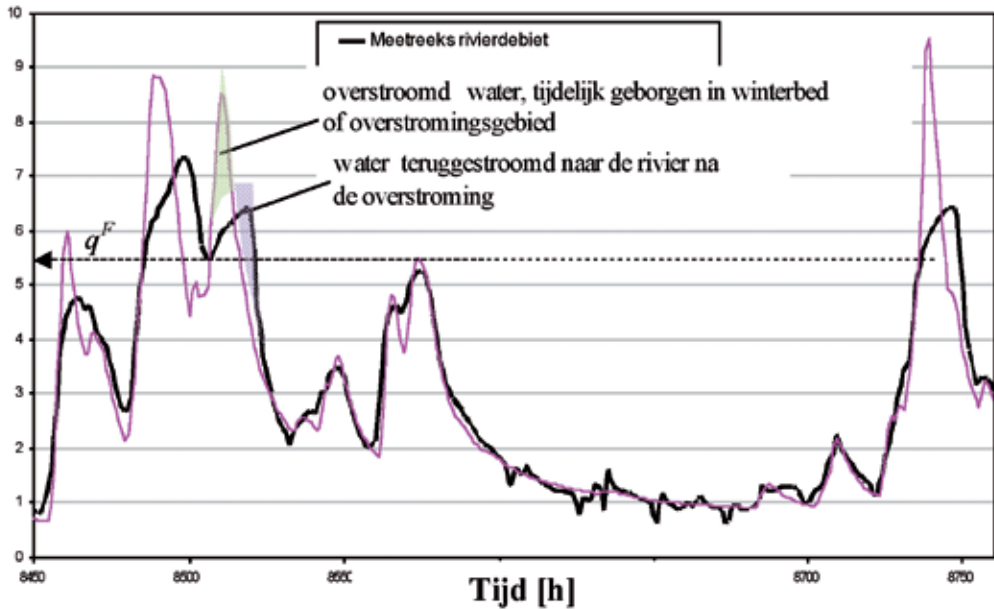
■ **Figuur 1:** Schematische weergave van een typisch gebiedsgemiddeld conceptueel neerslagafstromingsmodel.

De meer gedetailleerde modelstructuur wordt opgebouwd op basis van een systematische aanpak waarbij de verschillende modelcomponenten of deelmodellen zoveel mogelijk afzonderlijk worden afgeleid. Dit gebeurt door het kalibreren aan fysieke informatie die stapsgewijs uit de debietmeetreeks gehaald wordt op basis van een aantal technieken van hydrologische en statistische tijdreeksanalyse. Meer concreet worden de volgende stappen doorlopen.

- **Stap 1: Initiële verwerking van de debietmeetreeksen.**

Kalibratie van het hydrologisch model gebeurt in hoofdzaak op basis van een debietmeetreeks die beschikbaar is in of stroomafwaarts van het gemodelleerde stroomgebied. Er wordt dan meestal verondersteld dat deze rivierdebieten overeen komen met de gemiddelde neerslagafstromingsdebieten. Dit is voor de debietextremen (hoogste en laagste afvoeren) vaak niet het geval. De laagste afvoeren worden vaak sterk beïnvloed door externe (niet bekkenhydrologische) debiettoevoeren aan de waterloop, zoals industriële en huishoudelijke lozingsdebieten en effluentdebieten van rioolwaterzuiveringsinstallaties. Deze dient men in mindering te brengen van de debietmeting. De

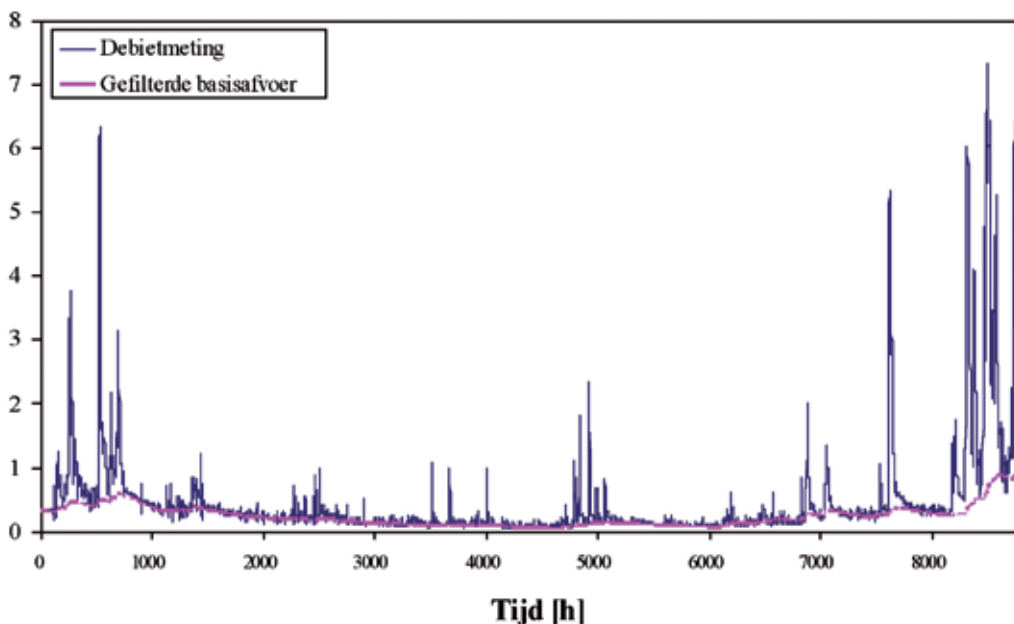
hoogste debietafvoeren worden daarentegen afgetopt ten gevolge van overstromingsinvloeden. **Figuur 2** geeft een voorbeeld van deze overstromingsinvloed voor de Molenbeek ter hoogte van de gemeente Erpe-Mere in België. De overstromingsinvloed werd hier ingeschat op basis van een hydrodynamisch model van de rivier. In stap 1 worden deze 'rivierinvloeden' geschat en, indien haalbaar, uitgeschakeld door de debietmeetreeks om te zetten naar een tijdreeks van equivalente opwaartse neerslagafstromingsdebieten.



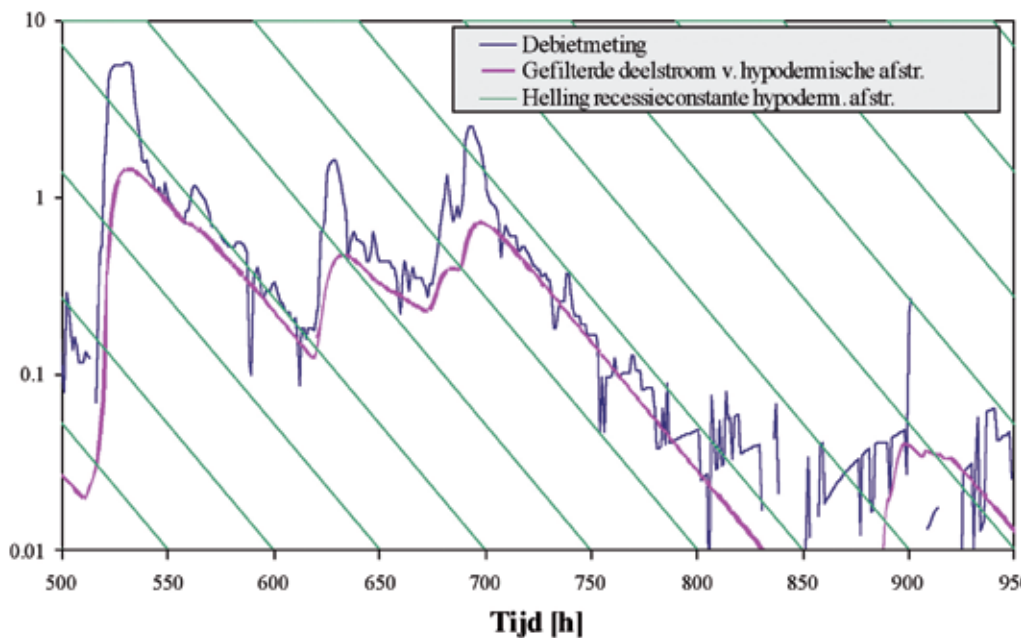
■ **Figuur 2** Invloed van overstromingen op de tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten (Molenbeek te Erpe-Mere, december 1993).

• **Stap 2: Splitsing in deelstromen.**

De tijdreeks van totale neerslagafstromingsdebieten (afgeleid van de debietmeetreeks) wordt opgedeeld in deelstromen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in concentratietijd tussen de snelle en trage deelstromen. Indien het debiet op een logaritmische schaal wordt geplotted versus de tijd kunnen tijdens lange droge perioden bij benadering lineaire debietdalingen worden opgemerkt. De helling wordt hierbij bepaald door de recessieconstante. Hydrologische deelstromen vertonen immers typisch een exponentieel recessief gedrag (Nathan en McMahon, 1990). **Figuur 3** en **Figuur 4** geven aan hoe in het voorbeeld van de Molenbeek drie deelstromen kunnen gesplitst worden. De splitsing is doorgevoerd op basis van een numerieke filtertechniek, zoals beschreven in Willems (2009).



■ Figuur 3: Filterresultaat voor de basisafvoer; debietmeetreeks Molenbeek te Erpe-Mere.



■ Figuur 4: Filterresultaat voor de 'interflow'; debietmeetreeks Molenbeek te Erpe-Mere.

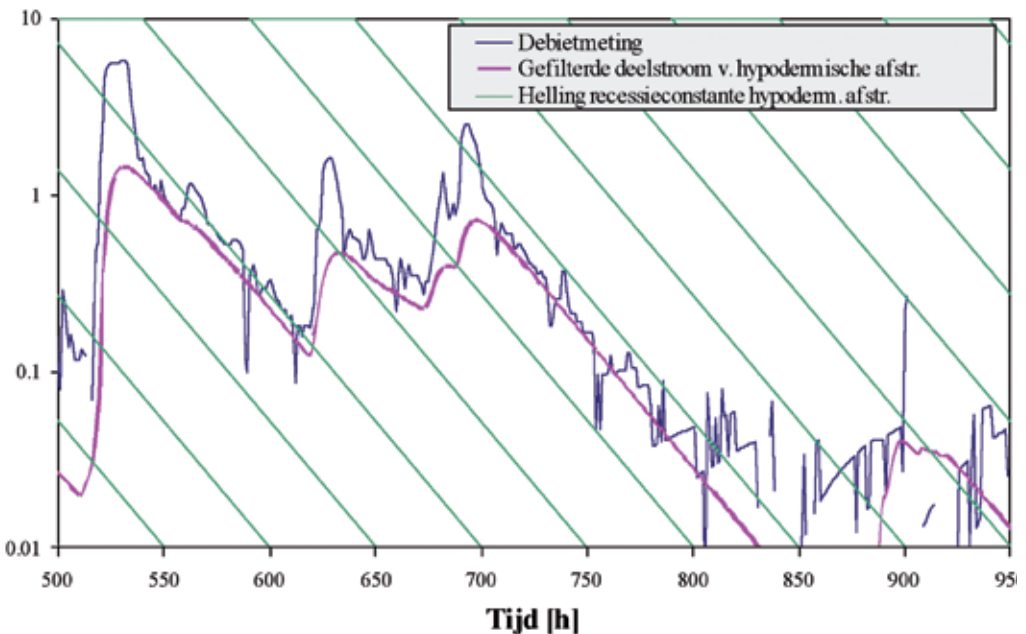
Meestal zullen 2 of 3 deelstromen worden geïdentificeerd: de snelste deelstroom kan meestal worden geassocieerd met oppervlakte-afstroming, de trage deelstroom wordt meestal bepaald door de grondwaterafstroming en soms ook een 'interflow' bepaald door de hypodermische afstroming. Aan de basis van de deelstreamsplitsing ligt het bepalen van de recessieconstante van elke deelstroom. Figuur 4 illustreert de recessieconstante op basis van de helling van de debietdaling tijdens de dalende flank van hydrogrammen. Identificatie van de recessieconstanten van de deelstromen laat tevens toe om de parameters van de routingmodellen in Figuur 1 vast te leggen. Indien de routingmodellen worden beschreven door lineaire reservoirmodellen, is hierbij meteen de enige parameter van het reservoirmodel vastgelegd.

• **Stap 3: Opdeling van de tijdreeks in hydrogramgebeurtenissen en extractie van hoog- en laagwaterextremen.**

Op basis van hydrologische onafhankelijkheidscriteria wordt de tijdreeks opgedeeld in nagenoeg onafhankelijke hydrogrammen. Na deze opdeling kan per gebeurtenis heel wat kwantitatieve informatie worden bekomen die van nut is voor de verdere analyse en modelopbouw, zoals:

- De piekafvoer per snelle deelstroomgebeurtenis;
- Het laagste debiet per trage deelstroomgebeurtenis;
- Het volume neerslag per snelle en trage deelstroomgebeurtenis;
- Het deelvolume neerslag dat per gebeurtenis bijdraagt tot elk van de deelstromen.

**Figuur 5** toont een voorbeeld van de opdeling in trage en snelle deelstroomgebeurtenissen, alsook de geëxtraheerde piek- en laagwaterdebieten. De methode waarmee de opdeling in gebeurtenissen en de extractie van hoog- en laagwaterextremen gebeurt staat beschreven in Willems (2009).

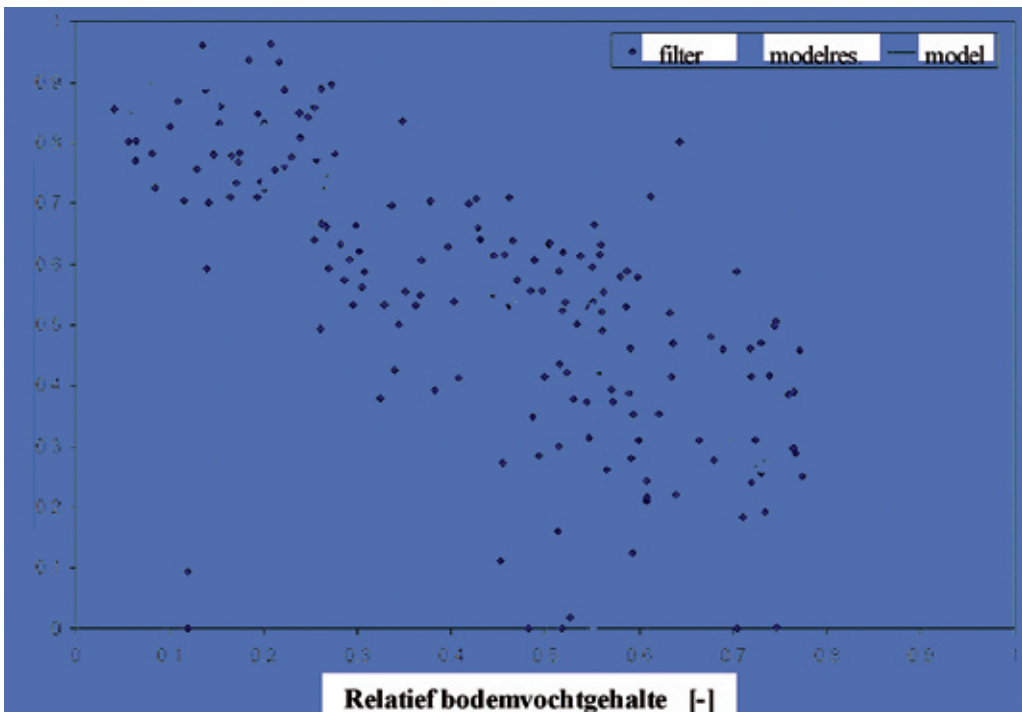


■ Figuur 5: Scheiding van de tijdreeks in nagenoeg onafhankelijke hydrogramperioden voor de snelle deelstroom, samen met de bijhorende piekafvoeren; debietmeetreeks Molenbeek te Erpe-Mere.

• **Stap 4: Identificatie van hydrologische responses.**

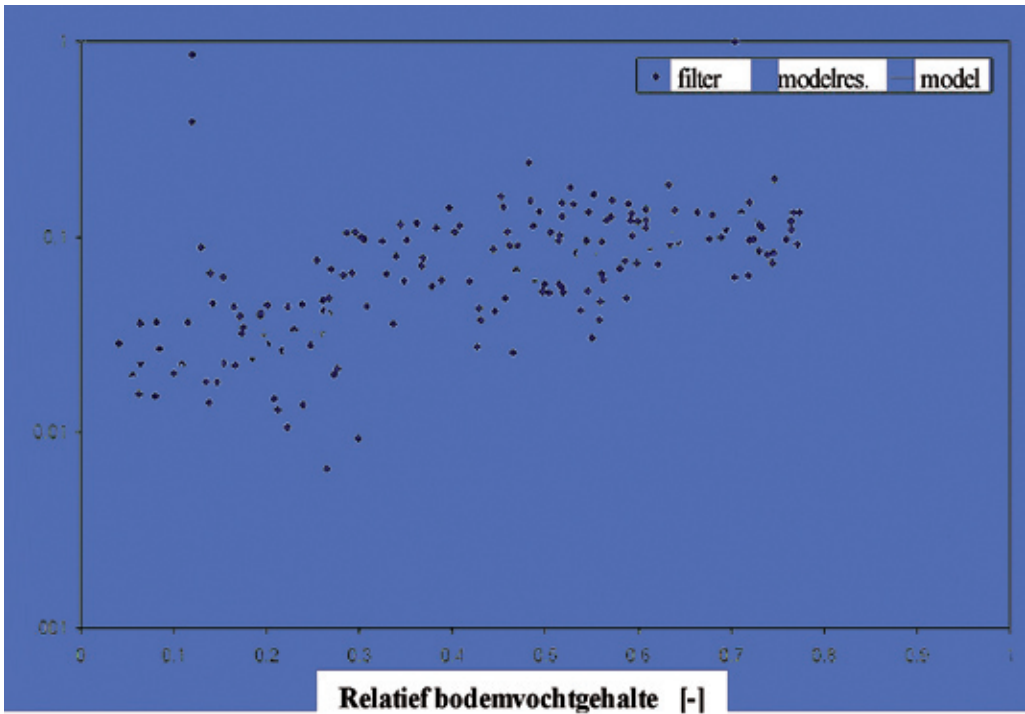
Op basis van de opdeling in gebeurtenissen en de afgeleide neerslagvolumes per gebeurtenis kunnen de voornaamste hydrologische responses geïdentificeerd worden. Per gebeurtenis is immers bepaald welke neerslagfractie bijdraagt tot elk van de deelstromen. De restfractie moet hemelwater zijn dat geborgen wordt in de ondergrond en eventueel later via evapotranspiratie uit het systeem verdwijnt of de restfractie wordt veroorzaakt door fouten in bijvoorbeeld de neerslaginvoer of de debietmeting. Indien al de restfracties worden geaccumuleerd en verminderd met de veronderstelde evapotranspiratie, dan wordt een beeld bekomen van de tijdsvariatie van het bodemvochtgehalte. De voornaamste hydrologische responses zijn in elk conceptueel hydrologisch model afhankelijk van dit bodemvochtgehalte. Door de neerslagfracties die bijdragen tot elk van de deelstromen of die bijdragen tot het bodemvocht voor alle gebeurtenissen te plotten versus het geaccumuleerd bodemvochtgehalte, wordt een beeld bekomen van deze responses. Zowel de modelvergelijkingen als de modelparameters kunnen op basis daarvan afgeleid worden.

**Figuur 6** en **Figuur 7** geven enkele voorbeelden hiervan. In **Figuur 6** wordt de neerslagfractie die bijdraagt tot de berging in de ondergrond geplot versus het bodemvochtgehalte. Er wordt een lineaire modelvergelijking geïdentificeerd. **Figuur 7** geeft een ander voorbeeld, waarbij per snelle deelstroomgebeurtenis de neerslagfractie die bijdraagt tot de snelste deelstroom is geplot versus het bodemvochtgehalte. In dit geval wordt een exponentiële modelvergelijking gevonden.



■ **Figuur 6:** Neerslagfractie die bijdraagt tot berging in de ondergrond voor alle snelle deelstroomgebeurtenissen; debietmeetreeks Molenbeek te Erpe-Mere.



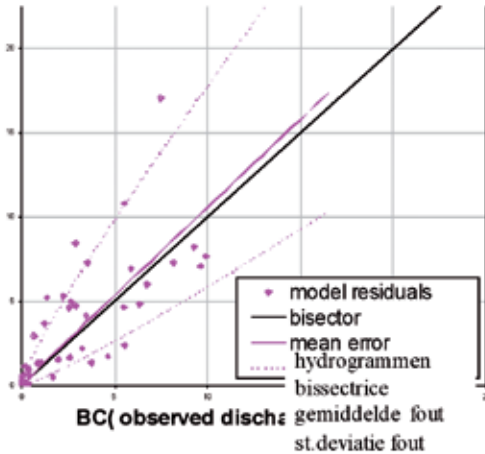


■ Figuur 7: Neerslagfractie die bijdraagt tot de snelste deelstroom voor alle snelle deelstroomgebeurtenissen; debietmeetreeks Molenbeek te Erpe-Mere.

## Modelvalidatie

Na opbouw van de modelstructuur, oftewel de identificatie van de modelvergelijkingen, kunnen de modelparameters worden geoptimaliseerd en het model gevalideerd. Dit laatste verloopt bij voorkeur op basis van een deelreeks die niet werd gebruikt tijdens de modelopbouw en de kalibratie. De optimalisatie en validatie gebeuren op basis van de volgende evaluatieplots en statistieken: 1) evaluatie van de hoogste debieten gedurende de snelle deelstroomperioden, waaronder scatterplot en statistiek van gemodelleerde versus waargenomen piekafvoeren en de extreme-waarden-verdeling van piekafvoeren, 2) Evaluatie van de laagste debieten gedurende de trage deelstroomperioden, waaronder scatterplot en statistiek van gemodelleerde versus waargenomen laagwaterdebieten en de extreme-waarden-verdeling van laagwaterdebieten en 3) Evaluatie van de cumulatieve neerslagafstromingsvolumes versus tijd voor zowel het totale debiet als voor elk van de deelstromen.

Bij de vergelijking van gemodelleerde versus waargenomen piek- en laagwaterdebieten worden de debieten getransformeerd volgens de Box-Cox transformatie (Willems, 2007 en 2009). Deze heeft als bedoeling om homoscedastische modelresiduen te bekomen, waardoor in de vergelijking eenzelfde gewicht wordt gegeven aan de hoge en de lage debietwaarden. Na transformatie is de standaarddeviatie van de modelfout nagenoeg onafhankelijk van de debietgrootte: zie **Figuur 8** voor de scatterplot van piekafvoeren voor en na Box-Cox transformatie.



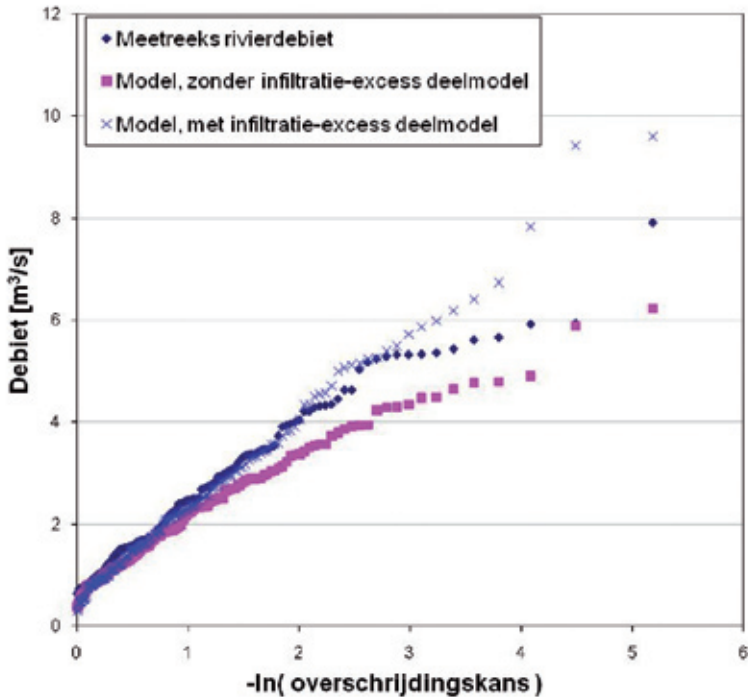
hydrogrammen  
 bissectrice  
 gemiddelde fout  
 st.deviatie fout

Opgemeten debiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

BC(Opgemeten debiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ])

■ Figuur 8: Scatterplot van gemodelleerde versus waargenomen piekafvoeren, links voor en rechts na Box-Cox transformatie; Molenbeek te Erpe-Mere.

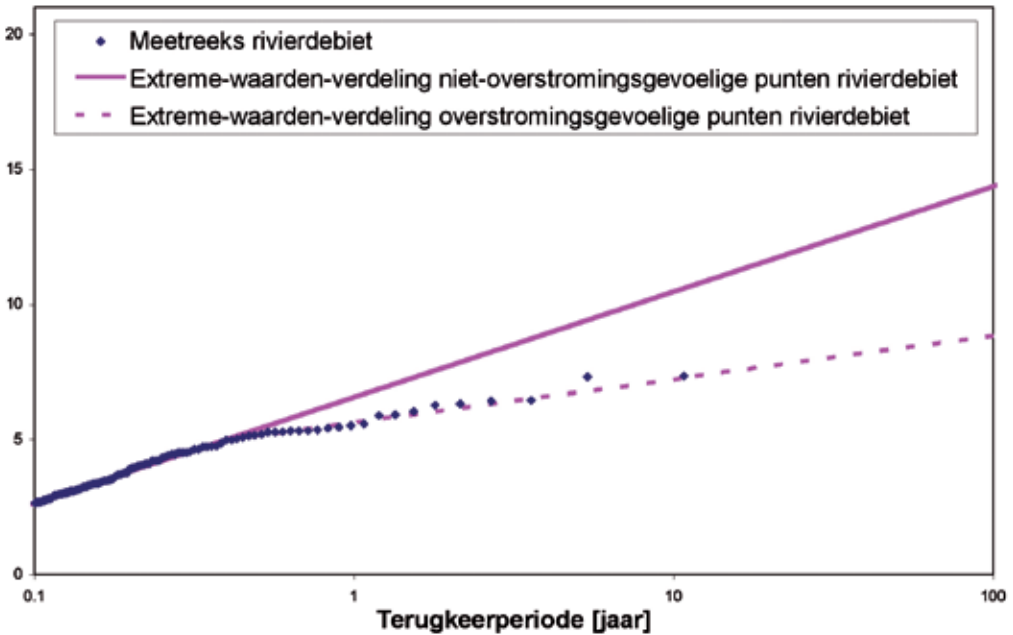
De evaluatie van de extreme-waarden-verdelingen heeft als bedoeling het extrapolerend karakter van het model na te gaan. De nauwkeurigheid van het model bij simulatie van gebeurtenissen die groter zijn dan deze die gebruikt werden bij de modelkalibratie kan zo worden beoordeeld. Dit gebeurt door het staartgedrag van de empirische extreme-waarden-verdeling te vergelijken in de exponentiële of Pareto QQ-plot. Een voorbeeld is weergegeven in **Figuur 9**. Volgens de extreme-waarden-theorie verloopt de staart van de extreme-waarden-verdeling in deze QQ-plot lineair. In geval van rivieroverstromingen wordt de staart van de verdeling boven de overstromingsdrempel afgevlakt. De debieten volgen boven de overstromingsdrempel in de QQ-plot een kleinere helling, zoals te zien is in de waargenomen debieten boven  $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$  in Figuur 9. Deze afvlakking dient niet gevolgd te worden door de resultaten van het hydrologisch model, aangezien overstromingsinvloeden worden ingerekend in het hydrodynamisch riviermodel en niet in het hydrologisch model. In het voorbeeld van Figuur 9 blijkt het hydrologisch model zonder deelmodel voor het beschrijven van infiltratie-excess de staart van de extreme-waarden-verdeling in sterke mate te onderschatten. Na toevoeging van dit deelmodel volgen de modelresultaten nagenoeg dezelfde helling als de debietwaarnemingen onder de overstromingsdrempel. Dit geeft aan dat het model een goede prestatie heeft in het modelleren van extreme gebeurtenissen.



■ Figuur 9: Extreme-waarden-verdeling van piekdebieten: vergelijking van de verdeling van de debietwaarnemingen met de modelresultaten voor en na toevoeging van een infiltratie-excess-deelmodel.

Aan de debietwaarnemingen beneden de overstromingsdrempel werd een exponentiële extreme-waarden-verdeling geïjkt (Figuur 9). **Figuur 10** toont dit kalibratieresultaat. Het toont ook het verschil in de helling van de staart van de verdeling onder en boven de overstromingsdrempel en dus het verschil tussen de extreme-waarden-verdeling van de neerslagafstromingsdebieten en deze van de extreme rivierdebieten.

Men kan de extreme-waarden-verdeling ook gebruiken om maatgevende afvoeren bij welbepaalde grote terugkeerperioden af te leiden. Voor bemeten deelbekkens kan ze bepaald worden op basis van de debietwaarnemingen; voor onbemeten deelbekkens dient ze afgeleid te worden van de hydrologische modelresultaten na simulatie van een lange-termijn neerslagreeks. Eventueel kan men naar verbanden zoeken tussen de parameters van de extreme-waarden-verdeling voor de bemeten locaties en gebiedseigenschappen, om een bijkomende of alternatieve inschatting te maken van de verdeling voor de onbemeten locaties.



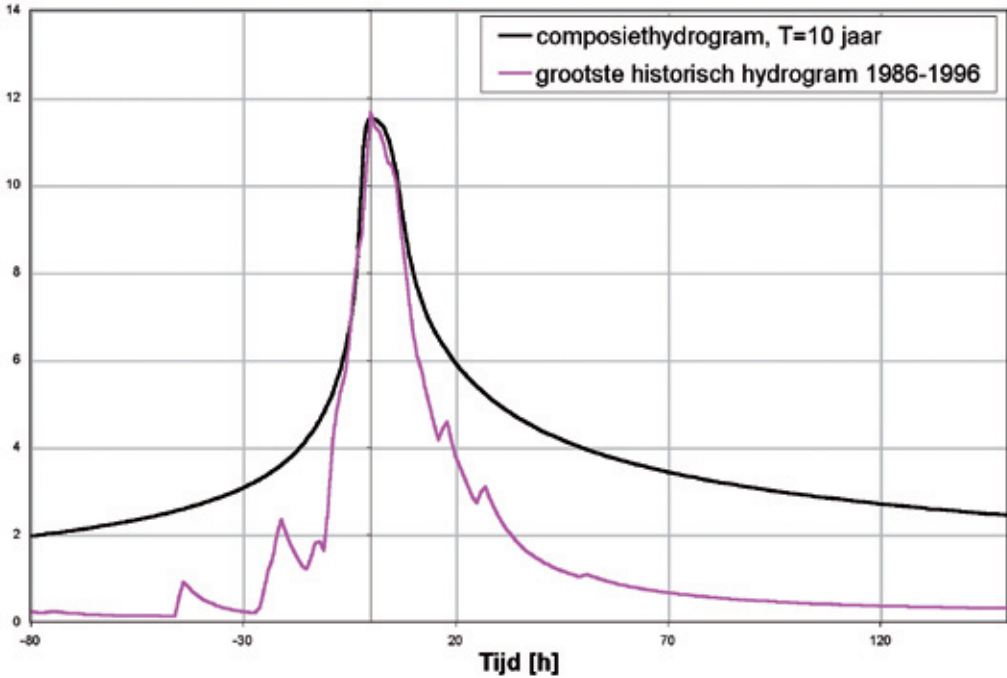
■ Figuur 10: Extreme-waarden-verdeling van piekdebieten: vergelijking van de exponentiële verdeling gekalibreerd aan de debietwaarnemingen onder en boven de overstromingsdrempel.

## Maatgevende hydrogrammen

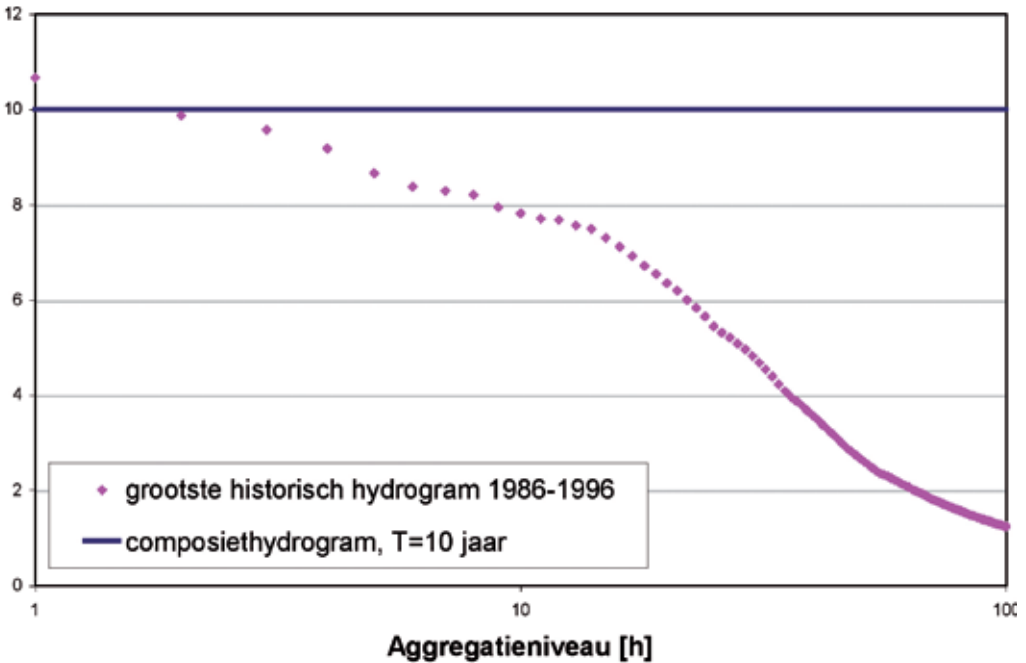
Op basis van de extreme-waarden-debietstatistieken kunnen maatgevende hydrogrammen afgeleid worden. Dit zijn afvoergolven (neerslagafstromingshydrogrammen) die kunnen gebruikt worden als invoer in het hydrodynamisch riviermodel om voor welbepaalde terugkeerperioden overeenkomstige impacts (rivierdebieten, waterhoogten, overstromingsdiepten, overstromingsvolumen, enz.) te berekenen. De invloeden van de rivierrouting, overstromingen, hydraulische regelstructuren, enz. wordt hierbij gesimuleerd in het riviermodel. Deze zorgen voor een tijdsverschuiving en afvlakking van de afvoerhydrogrammen naar stroomafwaarts toe (volgens de concentratietijd langs de bestudeerde riviertak). De concentratietijd neemt toe met de afstand langs de waterloop. Dit betekent dat de grootste korte-duur (uurlijkse) neerslagafstromingsdebieten enkel stroomopwaarts noodzakelijk tot de grootste (uurlijkse) rivierdebieten leiden. Naarmate men zich meer naar stroomafwaarts verplaatst zijn het de grootste gemiddelde neerslagafstromingsdebieten over grotere tijdsduren die aanleiding geven tot de grootste rivierdebieten. In België en Nederland kan bij grote hydrografische bekkens de concentratietijd oplopen tot één of twee dagen. Indien de terugkeerperioden van de maatgevende hydrogrammen enkel gelden voor het gemiddeld debiet gedurende een welbepaalde tijdsduur (het uurlijks piekdebiet) of een beperkte reeks van tijdsduren (van 1 uur tot enkele uren), kunnen deze hydrogrammen enkel gebruikt worden voor het schatten van de terugkeerperiode van de impact op welbepaalde plaatsen langs de rivier (enkel de meest stroomopwaartse plaatsen). De terugkeerperiode kan immers zeer sterk variëren binnen één hydrogramgebeurtenis.

**Figuur 11** geeft hiervan een voorbeeld en toont het grootste historische hydrogram van neerslagafstromingsdebieten in een periode van ongeveer 10 jaar langs de Molenbeek opwaarts van Erpe-Mere. In **Figuur 12** is voor elke duur (aggregatieniveau) in het hydrogram de terugkeerperiode van de afvoer weergegeven. Het is duidelijk dat dit verloop zeer variabel is. Hierdoor zullen verschillende historische maatgevende hydrogrammen nodig zijn voor verschillende plaatsen langs de waterloop.

Ook kunnen de hydrogrammen verschillen in functie van de specifieke impact (piekafvoer of volume) die men wenst te bestuderen. Dit maakt de procedure van afleiding van historische maatgevende hydrogrammen vrij complex.



- **Figuur 11:** Meest extreem hydrogram in een gesimuleerde tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten voor een periode van 10 jaar (hydrografisch deelbekken van de Molenbeek te Erpe-Mere), en vergelijking met het overeenkomstig composiethydrogram.



■ Figuur 12: Variatie van de terugkeerperiode in functie van het aggregatieniveau voor de extreme hydrogramgebeurtenis van Figuur 12 en vergelijking met de empirische terugkeerperiode van 10 jaar voor het uurlijks piekdebiet.

## Composiethydrogrammen

Composiethydrogrammen zijn synthetische maatgevende hydrogrammen die niet gebonden zijn aan de vorm van de historische hydrogrammen. Bij toepassing van deze synthetische hydrogrammen is men niet langer gebonden aan het feit dat de terugkeerperioden van historische hydrogrammen voor verschillende tijdsduren vaak niet dezelfde zijn. Men gaat op zoek naar een synthetische vorm waarvoor de terugkeerperiode voor elke tijdsduur wel identiek is aan de terugkeerperiode van het maatgevend hydrogram. Men spreekt in dit geval over een synthetisch samengesteld hydrogram of 'composiethydrogram'. Door het composiethydrogram te simuleren in het hydrodynamisch riviermodel wordt op elke plaats langs de rivier een rivierstoestand met eenzelfde terugkeerperiode bekomen. Uiteraard kan zulke rivierstoestand zich in werkelijkheid voor verschillende plaatsen langs de rivier op andere ogenblikken voordoen. Het composiethydrogram laat dus niet toe om een 'werkelijk voorkomende' situatie te simuleren. Het is enkel een hulpmiddel om het schatten van de terugkeerperiode van een rivierstoestand te vereenvoudigen. Aangezien de terugkeerperiode van een composiethydrogram geldt voor alle tijdsduren, dus ook voor het cumulatieve hydrogramvolume, kan men zelfs dezelfde maatgevende hydrogrammen gebruiken voor het gezamenlijk analyseren van hoogwaterstanden en afvoer- of overstromingsvolumes. Per terugkeerperiode is er dus slechts 1 hydrogram nodig die toelaat meerdere soorten impacts op meerdere plaatsen langs de rivier gezamenlijk (via eenzelfde simulatie van het riviermodel) te bestuderen. Hierdoor wordt een hoge graad van eenvoud bekomen voor bijvoorbeeld de aanmaak van overstromingskaarten bij verschillende terugkeerperioden.

**Figuur 11** toont een voorbeeld van een compositiehydrogram voor een terugkeerperiode van 10 jaar. Ze wordt in de figuur vergeleken met het overeenkomstige historische hydrogram: het meest extreme hydrogram (in dit geval voor het uurlijkse piekdebiet) in een tijdreeks van gesimuleerde neerslagafstromingsdebieten voor een totale periode van ongeveer 10 jaar. Het compositiehydrogram heeft, in tegenstelling met het historische hydrogram, voor alle tijdsduren dezelfde terugkeerperiode.

Naast dit grote voordeel heeft de compositiehydrogrammethode ook twee nadelen. Een eerste probleem ontstaat wanneer opwaartse overstromingen stroomafwaartse rivierdebieten (en dus afwaartse overstromingen) beïnvloeden, terwijl beide soorten overstromingen zich in werkelijkheid niet samen kunnen voordoen, doch in het compositieconcept wel samen gesimuleerd worden. Een tweede mogelijk probleem ontstaat ter hoogte van de samenvloeiingen en wordt in volgende paragraaf verder besproken. Voor rivieren in het Vlaamse binnenland bleek dat beide soorten problemen vooral een theoretische discussie vormen, maar met weinig invloed op de nauwkeurigheid van de resultaten (zie Vaes en Willems, 2002). Bij toepassing van de methode voor andere streken of andere watersysteemkarakteristieken moet men evenwel voldoende voorzichtig zijn, en eerst de nodige tests uitvoeren.

## Samenvloeiingen

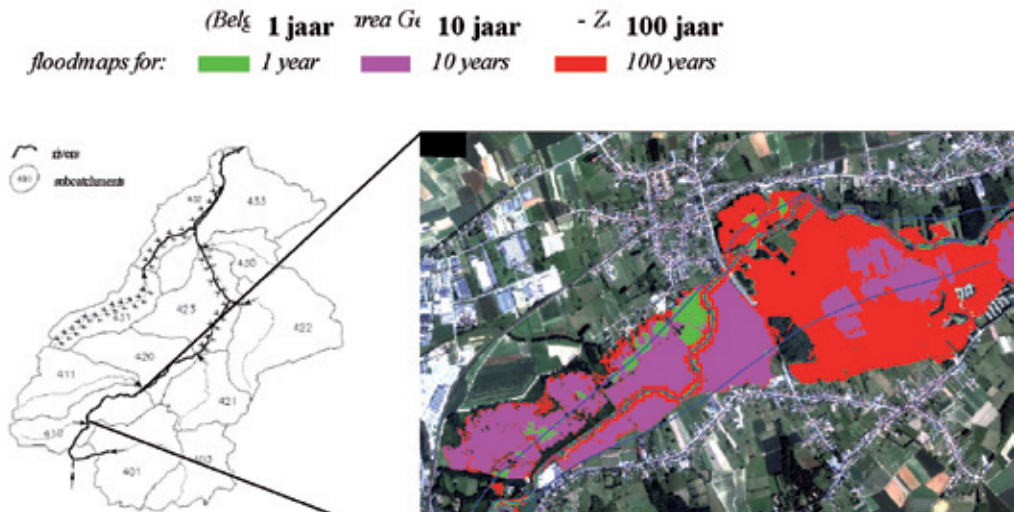
De basis voor de opmaak van de compositiehydrogrammen is de extreme-waarden-analyse van de tijdreeks van neerslagafstromingsdebieten bij een reeks van uitmiddelingduren (van 1 uur tot 15 dagen). De resultaten van deze analyse worden samengevat in debiet-duur-frequentie (QDF)-verbanden, waaruit de compositiehydrogrammen worden afgeleid (Willems, 2007). Voor elk deelbekken in het rivierbekken (met andere hydrologische modelresultaten) worden afzonderlijk compositiehydrogrammen opgesteld. Ter plaatse van samenvloeiingen van twee riviertakken of deelbekkens moet men de compositiehydrogrammen met de nodige omzichtigheid gebruiken. Door de samenvloeiing wordt het riviersysteem immers multimodaal. Enerzijds kunnen de twee riviertakken een verschillende concentratietijd hebben waardoor het debiet na de samenvloeiing wordt bepaald door de afstromingsdebieten bij verschillende aggregatieniveaus. De neerslagafstromingsdebieten langs de twee riviertakken hebben verder niet noodzakelijk een zelfde terugkeerperiode. Dit betekent dat aan de samenvloeiing bijdragende debieten met een zelfde terugkeerperiode in de twee riviertakken niet steeds volmaakt gecorreleerd zijn. Zelfs bij een zelfde concentratietijd is de correlatie tussen de debieten van beide riviertakken niet volmaakt door de ruimtelijke variabiliteit van de neerslag. In kleine bekkens blijkt dit probleem evenwel beperkt (zie Vaes en Willems, 2002). Zo is de ruimtelijke correlatie van de buivolumes over de verschillende deelbekkens van een stroomgebied meestal groot, zeker tijdens overstromingsgevoelige winterperioden. Ook zijn de concentratietijden langs waterlooptakken beperkt (meestal slechts enkele uren over de afstand van deelbekkens) in vergelijking met de concentratietijden van de hydrologische deelstromen.

Voor de grotere rivierbekkens kan dit probleem zich wel stellen, en dient men in ieder geval de nauwkeurigheid van de compositiehydrogrammethode te controleren. Meestal is de niet volmaakte correlatie van de neerslag boven de verschillende deelbekkens de oorzaak van multimodaliteit bij samenvloeiingen. Hierdoor treden neerslagafstromingsdebieten met dezelfde terugkeerperiode niet steeds gezamenlijk op boven de verschillende deelbekkens. Indien de afwijkingen beperkt zijn, kunnen correcties doorgevoerd worden om een betere overeenkomst van de debietstatistieken te bewerkstelligen.

De correctie kan meest eenvoudig gebeuren via een bijkomende tijdsverschuiving. Door de hydrogrampieken te verschuiven kan men afwaarts van de samenvloeiing lagere debietpieken bekomen. Bij de praktische toetsing van de compositiehydrogrammethode voor de Dender en de Demer (zie Vaes en Willems, 2002; Campling et al., 2003) bleek de nodige tijdsverschuiving per samenvloeiing zich te beperken tot slechts 1 uur.

## Resultaat

Door simulatie van de compositiehydrogrammen in het hydrodynamisch riviermodel en na kartering van de simulatieresultaten langs de overstromingsgebieden in GIS, kunnen overstromingskaarten worden afgeleid, zoals afgebeeld in **Figuur 13**. Deze dienen als basis voor overstromingsrisico-analyses door waterbeheerders en verzekeringsmaatschappijen. De hydrologische en hydrodynamische modellen kunnen ook ingeschakeld worden in scenario-analyses om de invloed van waterbeheersmaatregelen of exogene invloedsfactoren zoals klimaatverandering en landgebruikstrends door te rekenen. De ganse procedure wordt dan opnieuw doorlopen, van lange-termijn tijdreeks simulatie met het hydrologische model en het afleiden van compositiehydrogrammen tot simulatie van de compositiehydrogrammen in het hydrodynamisch riviermodel.



■ Figuur 13: Overstromingskaarten bij verschillende terugkeerperioden; Dender, gebied Geraardsbergen-Zandbergen.



## Referenties

- **Beck, M.B., en E. Halfon, (1991)**  
Uncertainty, identifiability and the propagation of prediction errors: a case study of Lake Ontario; *J. Forecasting*, vol 10, pag 135-162.
- **Beven, K.J. (1993)**  
Prophesy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling; *Advances in Water Resources*, vol 16, pag 41-51.
- **Breuer, L., J.A.Huisman, P. Willems, H. Bormann, A. Bronstert, B.F.W. Croke, H. Frede, T. Gräff, L. Hubrechts, A.J. Jakeman, G.W. Kite, J. Lanini, G. Leavesley, D.P. Lettenmaier, G. Lindström, J. Seibert, M. Sivapalan, en N.R. Viney (2009)**  
Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) I: Model intercomparison with current land use; *Advances in Water Resources*, vol 32(2), pag 129-146.
- **Campling, P., P. Willems, L. Timbe, S. Thompson, M. Barbieri, L. Torriano, en W. Vanneuville (2003)**  
Flood risk and damage Assessment using Modelling and Earth observation techniques (FAME) - Case-study reports September 2002 (Dender) & March 2003 (Demer & Entella); studie gefinancierd door het Data User Programme (DUP-2) van het European Space Agency (ESA), uitgevoerd door K.U.Leuven (SADL & Afdeling Hydraulica), SARMAP en d'Appolonia.
- **Gupta, V.K., en S. Sorooshian (1983)**  
Uniqueness and observability of conceptual rainfall-runoff model parameters: the percolation process examined; *Water Resources Research*, vol 19(1), pag 269-276.
- **Nathan, R.J., en T.A. McMahon (1990)**  
Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses; *Water Resources Research*, vol 26(7), pag 1465-1473.
- **Savenije, H.H.G. (2001)**  
Equifinality, a blessing in disguise?, *HP Today Invited commentary; Hydrological Processes*, vol 15, pag 2835-2838.
- **Vaes, G., en P. Willems (2002)**  
Onderzoek naar het effect van compositiehydrogrammen voor de berekening van overstromingsvlaktes met eendimensionale hydraulische modellen; studie gefinancierd door het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid, uitgevoerd door K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica.
- **Willems, P. (2007)**  
Waterloopmodellering. Aangepaste versie 2007 van de “Algemene methodologie voor de Administratie Waterwegen en Zeewezen - Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek”; K.U.Leuven – Afdeling Hydraulica, 263 p.
- **Willems, P. (2009)**  
A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models; *Environmental Modelling & Software*, vol 24(3), pag 311-321.

