



Roel Velner, Royal Haskoning
 Jos Moorman, Waterschap Aa en Maas
 Piet Warmerdam, Wageningen Universiteit
 Jacques Kole, Wageningen Universiteit

Neerslagafvoerrelaties solide basis voor keuzen in het hoogwaterbeheer

Voor deelstroomgebieden van de rivieren de Dommel en de Aa zijn neerslag-afvoerrelaties bepaald. Dit is gedaan met een neerslagafvoermodel dat het toenemen en afnemen van afvoer uit de deelstroomgebieden in de tijd beschrijft. Dit artikel behandelt de modelkeuze, -kalibratie en -validatie en de constructie van een langjarige afvoerreeks voor één van de deelstroomgebieden. De berekende afvoeren worden in een hydrodynamisch model in SOBEK-1D2D¹⁾ gebruikt om stroming in open waterlopen en de daarbij optredende waterstanden en inundaties te analyseren²⁾. De bouw van het model is geheel geautomatiseerd vanuit GIS-bestanden.

De stroomgebieden van de Dommel en de Aa beslaan een groot deel van de provincie Noord-Brabant en delen van België en Limburg. De twee rivieren vloeien bij 's-Hertogenbosch samen. Het water uit beide rivieren stroomt naar de Maas via de spuilsuis Crèvecoeur of via de Bovenlandsche Sluis in het afwateringskanaal 's-Hertogenbosch

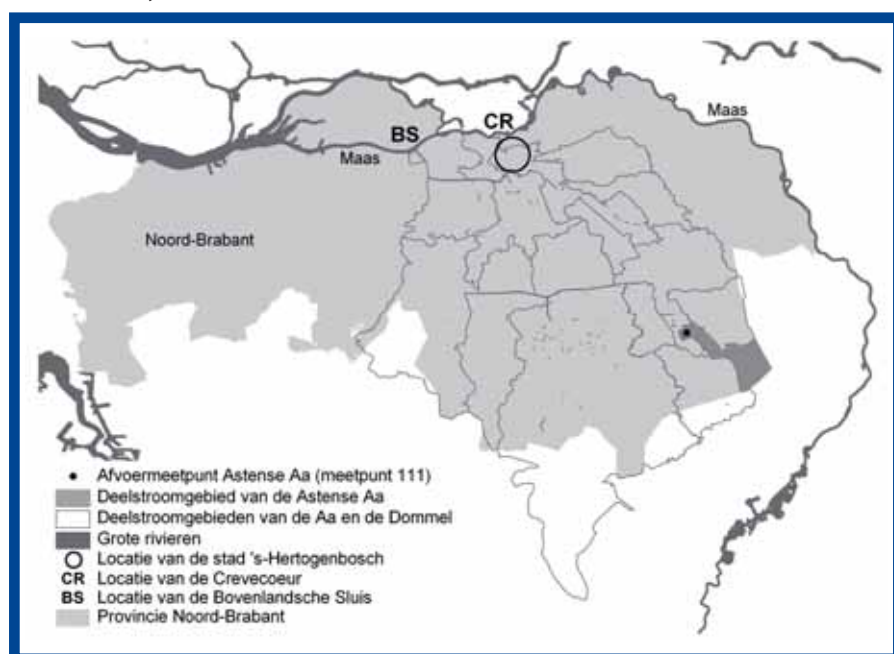
- Drongelen (zie afbeelding 1). Bij hoge Maaswaterstanden is de afvoercapaciteit van Crèvecoeur en het afwateringskanaal beperkt. Dit gaf in 1995 wateroverlast in de benedenstroomde delen van deze stroomgebieden⁵⁾. In 1998 waren de grote hoeveelheden neerslag in de stroomgebieden zelf verantwoordelijk voor extreem hoge waterstanden⁶⁾.

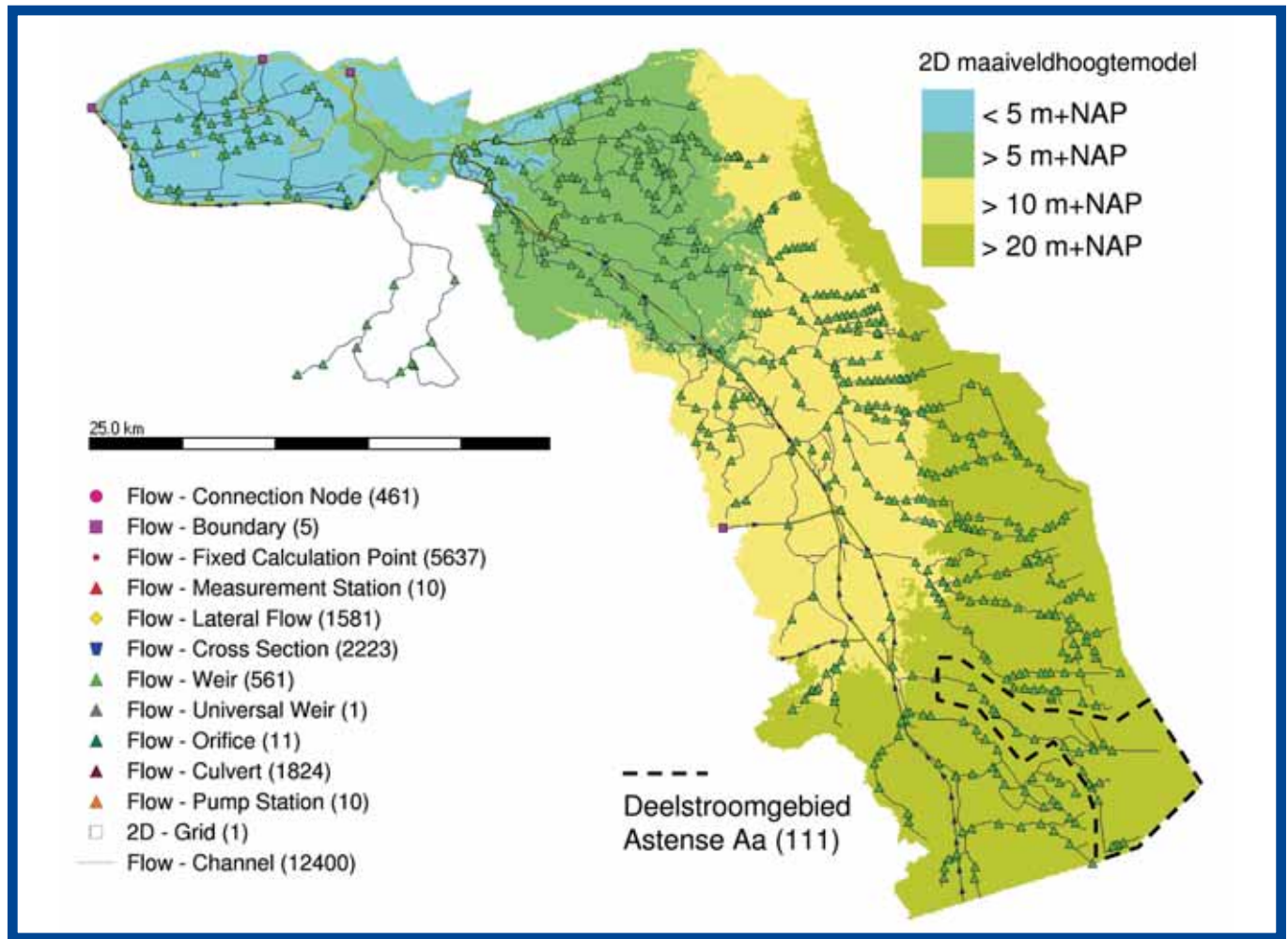
Waterschap Aa en Maas wil het inzicht vergroten in het optreden van hoge waterstanden in haar watergangen. Op basis hiervan zullen maatregelen worden opgesteld om een inrichting van het watersysteem te creëren waarbij extreme gebeurtenissen zo min mogelijk wateroverlast veroorzaken.

Het waterschap gebruikt een gebiedsdekkend hydrodynamisch rekenmodel om het watersysteem te onderzoeken. Het betreft een model in het rekenprogramma SOBEK-1D2D. Het wordt gegenereerd vanuit GIS-bestanden met de informatie over de ligging en afmetingen van waterlopen en kunstwerken en de maaiveldhoogten (AHN en kaden). Dit gebeurt met de gebruikers-interface TriSHELL. Royal Haskoning ontwikkelde dit om geautomatiseerd hydrologische rekenmodellen te bouwen. Het grootste voordeel ervan is de flexibiliteit in modelkeuzen. GIS-bestanden met alle informatie over het watersysteem van het waterschap zijn in één centraal databestand geplaatst. Afhankelijk van de toepassing wordt het model gegenereerd. Dit betekent dat voor een gebiedsdekkend model enkel het hoofdsysteem wordt geselecteerd; voor een detailstudie kunnen in een kleiner interessegebied alle leggerwatergangen worden geselecteerd³⁾.

Afbeelding 2 toont het gebiedsdekkende SOBEK-1D2D-model. Hiermee worden berekeningen van afvoergolven voor het huidige watersysteem uitgevoerd. Door varianten door te rekenen, kunnen

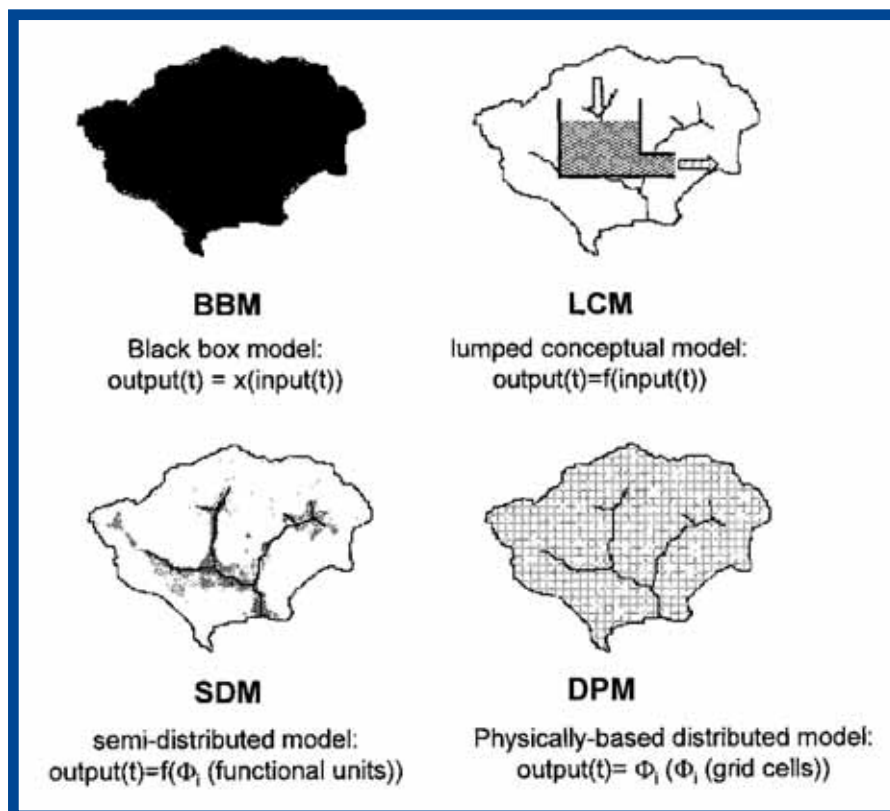
Afb. 1: Het watersysteem van de Aa en de Dommel.





Afb. 2: Het hydrodynamische model van het stroomgebied van de Aa in SOBEK-1D2D.

Afb. 3: De voornaamste typen hydrologische modellen. Het Wageningen-model is een niet-ruimtelijk verdeeld conceptueel model.



Afbeelding 3 toont vier hydrologische modeltypen⁷: black boxmodellen (BBM), niet-ruimtelijk verdeelde conceptuele modellen (LCM), beperkt ruimtelijk verdeelde modellen (SDM) en ruimtelijk verdeelde modellen (DPM). Black boxmodellen leggen relaties tussen hydrologische fluxen zonder gebruik te maken van een bepaald modelconcept dat de in werkelijkheid optredende hydrologische processen tracht te beschrijven. Met hydrologische fluxen worden bijvoorbeeld neerslag, verdamping, stroming van water in de onverzadigde zone, ondergrondse afvoer en oppervlaktewaterafvoer bedoeld. Een voorbeeld van een black boxmodel is een neurale netwerk¹⁴. Niet-ruimtelijk verdeelde conceptuele modellen, zoals SOBEK-RR¹⁵, RAM¹⁶ of het Wageningen-model⁹, leggen relaties tussen hydrologische fluxen in een stroomgebied zonder ruimtelijk onderscheid te maken in eigenschappen van het stroomgebied. Beperkt ruimtelijk verdeelde modellen, zoals het TOP-model⁸, maken bij het beschrijven van hydrologische processen voor een deel gebruik van informatie over de ruimtelijk verdeelde eigenschappen van een stroomgebied. Bij deze informatie moet gedacht worden aan een digitaal hoogtemodel of een ruimtelijke interpretatie van het doorlaatvermogen van de ondergrond. Ruimtelijk verdeelde hydrologische modellen, zoals SIMGRO¹⁷, beschrijven hydrologische processen door zoveel mogelijk op fysica gebaseerde relaties tussen hydrologische fluxen te gebruiken.

effecten van afzonderlijke maatregelen worden beoordeeld. Deze kunnen bijvoorbeeld gericht zijn op de vermindering van wateroverlast. Daarnaast kan het model worden gebruikt om de samenhang tussen maatregelen te analyseren. Het hydrodynamische model vereist berekende afvoeren uit deelstroomgebieden als invoer. Dit artikel is gewijd aan de berekening van deze invoer met een hydrologisch model. Resultaten van de berekeningen zijn nog niet opgenomen. Deze data zullen binnenkort worden vastgelegd in de rapportage van de studie²⁾.

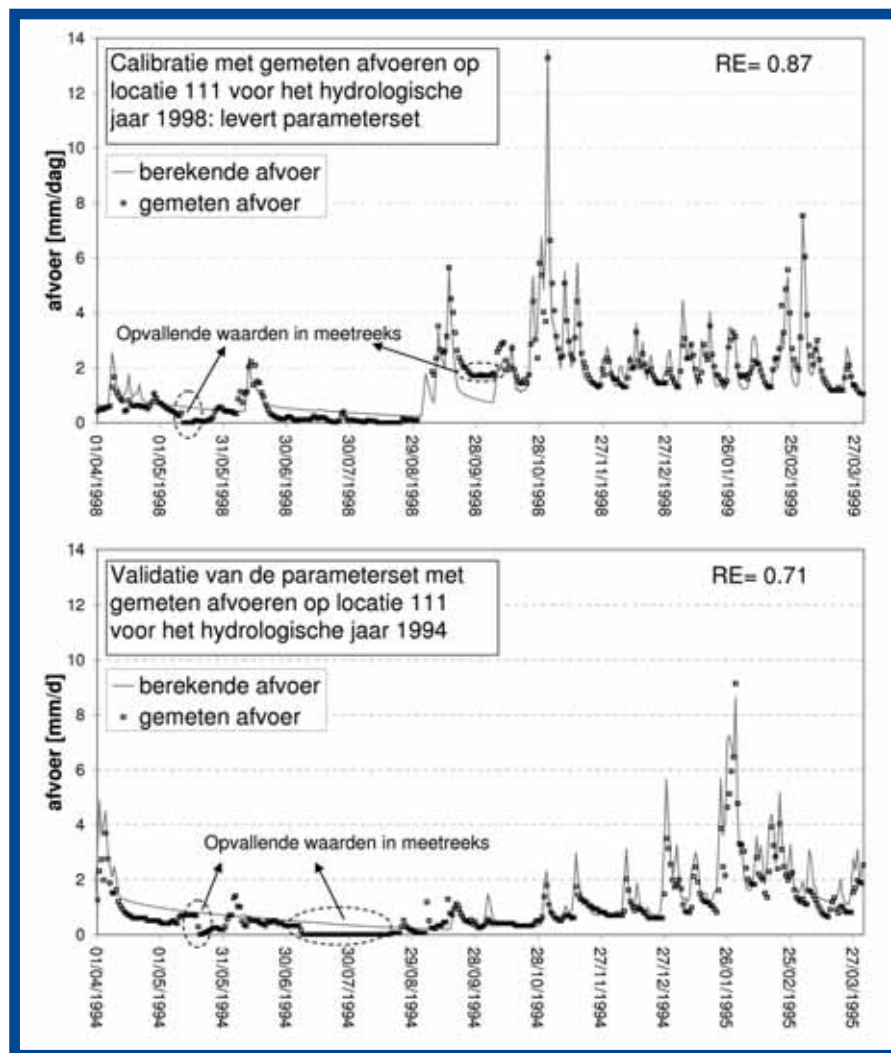
Het belang van neerslagafvoerrelaties

Om uitspraken te kunnen doen over de frequentie van hoge waterstanden is het van belang om de dynamiek van afvoeren uit de deelstroomgebieden goed te kennen. De hoogte van afvoerpieken met grote herhalingstijden is niet op basis van meetreeksen af te leiden. Meetreeksen zijn hiervoor simpelweg niet lang genoeg. Wanneer een waterbeheerder een schatting wil maken van piekafvoeren met grote herhalingstijden (in de orde van 100 jaren), kunnen hydrologische rekenmodellen worden gebruikt. Berekeningen van afvoeren met een gekalibreerd model voor een langjarige rekenperiode zullen inzicht geven in het gedrag van het watersysteem. Dergelijk inzicht is onmisbaar bij het maken van keuzen bij het inrichten van waterbergingsgebieden, het oplossen van knelpunten in het stedelijke waterbeheer, het herstellen of herdimensioneren van beeklopen of technische ingrepen aan gemalen en kanalen. Voor alle deelstroomgebieden van Waterschap Aa en Maas zijn hydrologische modellen ontwikkeld om afvoeren te berekenen. Dit artikel behandelt de hydrologische modellering van het stroomgebied van de Astense Aa (zie afbeeldingen 1 en 2).

Keuze van het hydrologische model

Hydrologen die met een computermodel hydrologische processen willen simuleren, hebben de keuze uit een breed scala aan hydrologische modeltypen⁷⁾ (zie afbeelding 3). Vier typen worden kort beschreven in het kader. Waar de grenzen liggen tussen de modeltypen is trouwens niet altijd eenduidig⁸⁾. Dit artikel is geschreven om een voorbeeld te tonen van de toepassing van een hydrologisch model voor de bepaling van herhalingstijden van piekafvoeren. De keuze is daarbij gevallen op het conceptuele Wageningen-model⁹⁾. Redenen daarvoor zijn de doeltreffende beschrijving van het niet-lineaire gedrag van het watersysteem, korte rekentijden en de mogelijkheid tot automatische kalibratie.

Met 'doeltreffende beschrijving' wordt het in het model gebruikte concept van toenemend versnelde afvoer als gevolg van een natte voorgeschiedenis bedoeld. Het Wageningen-model bevat een variabele verdeling van de afvoerbare neerslag over een snel en langzaam modelreservoir¹⁰⁾. Deze verdeling is afhankelijk van de verzadigingsgraad van het stroomgebied. Hoe natter het stroomgebied, des te meer afvoerbare neerslag via het snelle reservoir tot afstroming komt. Dit biedt voordelen bij de beschrijving van



Af. 4: Kalibratie- en validatieresultaten van het Wageningen-model van de Astense Aa.

de neerslagafvoerrelatie ten opzichte van modellen als SOBEK-RR (waarbij getrapd één, twee of drie lineaire afvoerreservoirs actief zijn) of RAM (waarbij een vaste verdeling¹¹⁾ van afvoerbare neerslag over een snel en een langzaam reservoir wordt toegepast).

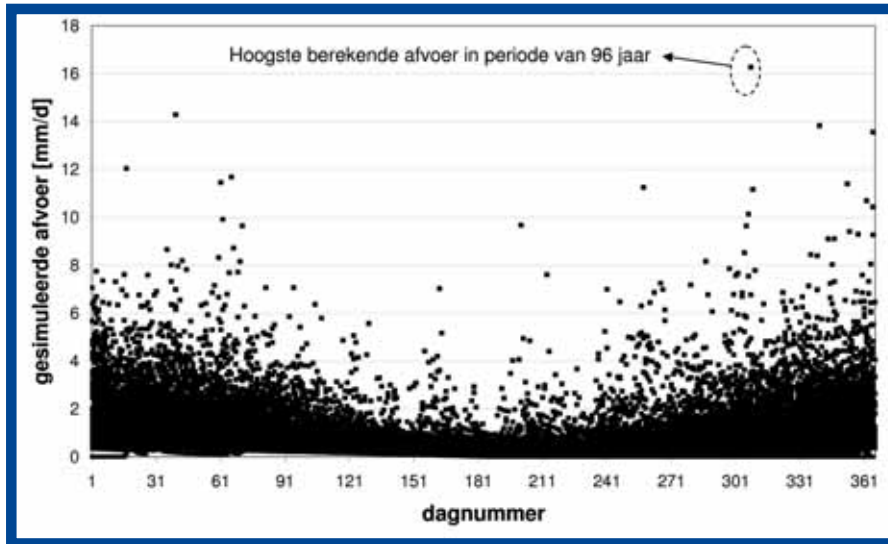
Afvoerdynamiek Astense Aa

In de Astense Aa worden afvoeren gemeten op meetlocatie 111. Een meetreeks is beschikbaar van 1988 tot heden. De modelparameters van het Wageningen-model zijn zodanig aangepast dat het model afvoeren berekent die zo goed mogelijk overeenkomen met metingen. Deze kalibratieberekeningen werden voor het hydrologische jaar 1998 uitgevoerd: 1 april 1998 tot en met 31 maart 1999. De overeenkomst tussen berekende en gemeten afvoeren is visueel geïnspecteerd (zie afbeelding 4). Daarnaast is de mate waarin het model een goede beschrijving van afvoeren geeft, uitgedrukt in de coëfficiënt voor 'modefficiëntie' van Nash en Sutcliffe¹²⁾. Voor een modelberekening met een perfecte overeenkomst tussen metingen en berekeningen heeft de coëfficiënt een waarde van 1. Modellen met coëfficiënten groter dan 0.70 á 0.75 worden doorgaans als acceptabel beschouwd. De kalibratie leverde een parameterset op met een modefficiëntie van 0.87. Om het gekalibreerde neerslagafvoermodel te testen op een andere periode is een validatie

uitgevoerd voor het hydrologische jaar 1994. De modelberekening voor de validatieperiode heeft een modefficiëntie van 0.71. De modefficiëntie van zowel de kalibratieberekening als de validatieberekening wordt waarschijnlijk wat verlaagd door opvallende, onrealistische meetwaarden. In de meetreeks komen perioden voor waarin afvoeren plotseling sterk lager zijn of gedurende een aantal dagen exact gelijke waarden hebben (zie afbeelding 4). Vanwege de acceptabele modefficiëntie en het correct beschrijven van piekafvoeren in 1998 en 1995 is het gekalibreerde Wageningen-model voor stroomgebied 111 als bruikbaar gekwalificeerd. Met het model kunnen betrouwbare berekeningen van afvoeren worden uitgevoerd.

Constructie afvoereeks voor 96 jaren

Het gekalibreerde model beschrijft de relatie tussen neerslag en verdamping en de afvoer uit het stroomgebied van de Astense Aa. Door met het model een lange reeks van neerslag en verdamping door te rekenen, kan een lange reeks van afvoeren worden geconstrueerd. Op basis hiervan kunnen afvoergolven en bijbehorende herhalingstijden worden bepaald. Dit is een toepassing van de tijdreeksmethode⁴⁾. Voor het stroomgebied van de Astense Aa is geen langjarige neerslagreeks beschikbaar. Besloten is om de 96-jarige neerslagreeks van



Afb. 5: Berekende afvoeren voor de Astense Aa na het doorrekenen van 96-jarige neerslagreeks.

het KNMI-station De Bilt door te rekenen¹³⁾. Daarbij wordt de aanname gedaan dat deze neerslagreeks ook representatief is voor het stroomgebied van de Astense Aa. De berekende afvoeren zijn per dagnummer in een grafiek (zie afbeelding 5) geplaatst om zo een compact overzicht te verkrijgen van alle berekende afvoeren (dagnummer 1 betreft 1 januari). Uit de grafiek blijkt dat viermaal een afvoer groter dan 13 millimeter per dag wordt berekend (in een periode van 96 jaren). Dit betekent dat piekafvoeren van 13 á 14 millimeter per dag een herhalingsperiode hebben van 25 á 35 jaar. De in werkelijkheid opgetreden piekafvoer van 1998 in het stroomgebied van de Astense Aa (13.5 millimeter op één dag) heeft daarmee een herhalingsperiode van ongeveer 30 jaren.

De berekening van herhalingsperiodes wordt beïnvloed door de keuze van het kalibratiejaar. Het verdient aanbeveling om deze gevoeligheid te onderzoeken. Dit kan worden gedaan door voor meerdere jaren een model te kalibreren, valideren en vervolgens de constructie van de langjarige afvoerrekeningen uit te voeren. Het vergelijken van berekende afvoergolven en herhalingsperiodes geeft dan inzicht in deze gevoeligheid.

Conclusies en aanbevelingen

De kwaliteit van afvoerberekeningen voor het stroomgebied van de Astense Aa met het Wageningen-model zijn - in termen van model efficiëntie - acceptabel. De dynamiek van piekafvoeren wordt uitstekend beschreven. Berekende afvoeren kunnen daarom gebruikt worden voor de kalibratie van het gebiedsdekkende hydrodynamische model. Afvoergolven en herhalingsperiodes zijn bepaald door langjarige reeksen van neerslag en verdamping door te rekenen. Het verdient aanbeveling om de gevoeligheid van de bepaling van herhalingsperiodes voor de keuze van het kalibratiejaar te onderzoeken. Het gebruik van het Wageningen-model en de tijdreeksmethode geeft het waterschap een solide basis voor het maken van keuzen in het hoogwaterbeheer.

LITERATUUR

- 1) Crebas J. en T. Segeren (2002). Een snellere en betere methode voor de simulatie van overstromingen. H₂O nr. 23, pag. 31-33.
- 2) Royal Haskoning (2008). Ontwikkeling van het gebiedsdekkende hoogwatermodel van waterschap Aa en Maas. Projectnummer 9s4944. In voorbereiding.
- 3) Moorman J. (2007). Hydrologische gereedschapstijl Aa en Maas. H₂O nr. 17, pag. 29.
- 4) De Graaff B. en R. Versteeg (2000). Wateroverlast, zo goed als zeker. H₂O nr. 21, pag. 28-30.
- 5) Waterschap Aa en Maas (1995). Verslag hoogwaterperiode januari-februari 1995.
- 6) Waterschap Aa en Maas (1998). Hoogwater 1998.
- 7) Durand P., C. Gascuel-Oudoux en M. Cordier (2002). Parameterisation of hydrological models: a review and lessons learned from studies of an agricultural catchment (Naizin, France). Agronomie nr. 22, pag. 217-228.
- 8) Beven K. (2001). Rainfall-runoff modelling. The primer. ISBN0-470-86671-3. John Wiley & Sons.
- 9) Warmerdam P., J. Kole en J. Chormanski (1996). Modelling rainfall-runoff processes in the Hupselse Beek research basin. Proceedings Strasbourg Conference on Ecohydrological processes in small basins. Technical Documents in Hydrology nr. 14. UNESCO Paris.
- 10) Aalders P. (2003). Optimalisatie en vergelijking van het Wageningen- en NAM-model voor het stroomgebied van de Beerze (Noord-Brabant). Afstudeerverslag Wageningen Universiteit vakgroep Waterhuishouding.
- 11) Velner R. (2002). Neerslagafvoermmodellering van de bemalinggebieden Streukelerzijl en Galgenrak met DUFLOW-RAM en het Wageningen-model. Een studie ten behoeve van de ontwikkeling van een gekoppeld grond- en oppervlaktewatermodel. Afstudeerverslag Wageningen Universiteit.
- 12) Nash J. en J. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models, part 1 - a discussion of principles. Journal of Hydrology nr. 10, pag. 282-290.
- 13) STOWA en KNMI (2004). Nieuwe neerslagstatistiek voor waterbeheerders. Brochure 26a.
- 14) Xiaohua Dong (2005). Appropriate flow forecasting for reservoir operation. Proefschrift Universiteit van Twente.
- 15) WL|Delft (2008). www.sobek.nl.

16) Salverda A., J. Noort en L. Wentholt (1996).

Ontwikkeling neerslagafvoermodule RAM.

H₂O pag 129-132.

17) Van Walsum P., A. Veldhuizen, P. van Bakel, F. van der

Bolt, P. Dik, P. Groenendijk, E. Querner en

M. Smit (2005). SIMGRO 5.0.2 Theory and model

implementation. Alterra. Rapport 913.1.