



Claudia Brauer, Wageningen Universiteit

Ryan Teuling, Wageningen Universiteit

Aart Overeem, Wageningen Universiteit, thans KNMI

Remko Uijlenhoet, Wageningen Universiteit

# Extreme regenval en overstromingen in het stroomgebied van de Hupselse Beek

**Op 26 en 27 augustus 2010 werd het stroomgebied van de Hupselse Beek getroffen door extreme neerslag: 160 mm in 24 uur (herhalingstijd: meer dan 1.000 jaar). Hierdoor steeg de afvoer in 22 uur van vier naar 5.000 liter per seconde. Door deze stortvloed in detail te onderzoeken, is meer inzicht ontstaan in de werking van stroomgebieden tijdens extreme situaties. Deze informatie kan gebruikt worden om modellen en hoogwatervoorspellingen te verbeteren.**

Een serie zware buien zorgde op 26 en 27 augustus 2010 in het oosten van Nederland en het aangrenzende deel van Duitsland voor veel regen en overstromingen. De kern van de neerslag trok precies over het stroomgebied van de Hupselse Beek, een gebied dat wetenschappers van de universiteit van Wageningen sinds de jaren '60 gebruiken voor experimenteel onderzoek. Dit was een unieke mogelijkheid om de werking van het stroomgebied tijdens een extreme situatie te onderzoeken. Met een uitgebreide verzameling meteorologische en hydrologische gegevens zijn alle onderdelen van het neerslag-afvoerproces ontleed. Het doel van het onderzoek was te begrijpen hoe zulke overstromingen ontstaan en of er processen zijn die tijdens normale omstandigheden geen rol spelen maar in extreme condities wel. Met deze kennis kunnen neerslag-afvoermodellen, monitoringsnetwerken en hoogwatervoorspellingen verbeterd worden.

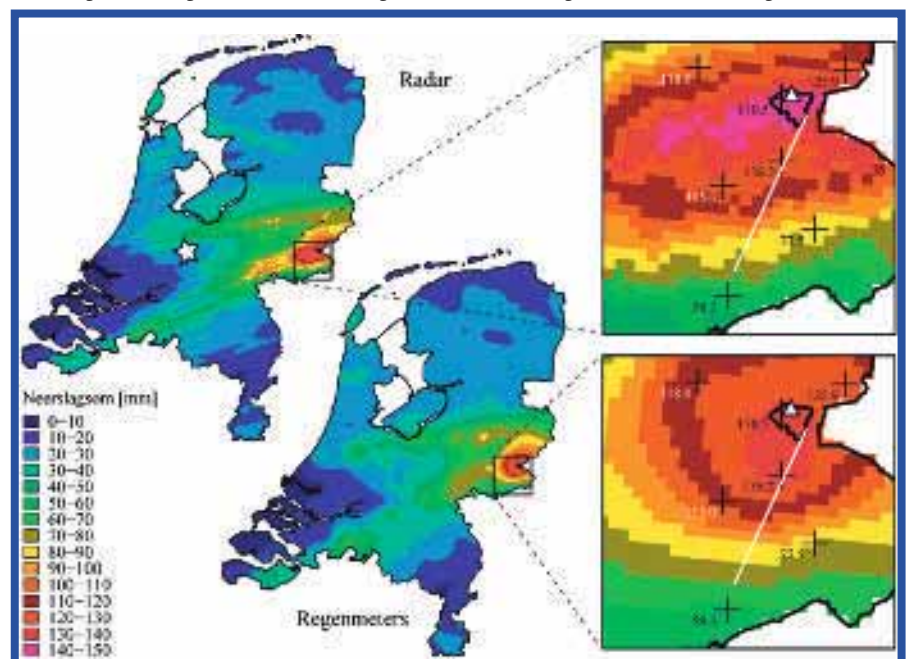
Het stroomgebied van de Hupselse Beek ligt in de Achterhoek, tussen Eibergen en Groenlo. De oppervlakte van het stroomgebied bedraagt 6,5 km<sup>2</sup>, de hoogte varieert van 22 tot 35 m +NAP en het gemiddelde hellingspercentage is 0,8. De bodem bestaat uit 0,2 tot tien meter lemig zand op een afsluitende kleilaag. Het landgebruik is voornamelijk gras. In de helft van de percelen zijn drainagebuizen geplaatst. De beek is volledig gekanaliseerd, maar delen zijn weer meanderend gemaakt. Op verschillende plaatsen stroomt de beek door duikers.

Het KNMI heeft de neerslag gemeten met een automatische regenmeter in het stroomgebied (10-minutenwaarden), handregenmeters in de omgeving (dagwaarden) en de weerradars van De Bilt en Den Helder (5-minutenwaarden). De twee in dit artikel gepresenteerde grondwaterreeksen zijn gemeten met drukopnemers in twee peilbuizen in een intensief bemeten veld (15-minutenwaarden). Eén peilbuis staat op een lokale verhoging in het veld en de andere

in een kuil (ongeveer 50 cm hoogteverschil). Ook is in dit veld bodemvocht gemeten op 40 cm diepte (15-minutenwaarden).

Waterschap Rijn en IJssel beheert een overlaat waarmee de afvoer uit het stroomgebied is gemeten. Een uitgebreide analyse toonde aan dat de afvoer relatief nauwkeurig is gemeten, met een maximale overschatting van tien procent<sup>1)</sup>. Vijf veldbezoeken verschaften kwalitatieve informatie over

Afb. 1: Regensommen gemeten met radar en regenmeters tussen 26 augustus 10:00 uur en 27 augustus 10:00 uur.



oppervlakte-afvoer, plasvorming, overstromingen en de toestand van stuwen en duikers.

### Regen

Op 26 augustus 2010 regende het in De Bilt 18 uur lang bijna continu. Doordat de buien zich langs een lijn verplaatsten, werden lokaal hoge neerslagsommen bereikt. De regen bestond uit langdurige stratiforme neerslag van lage intensiteit in combinatie

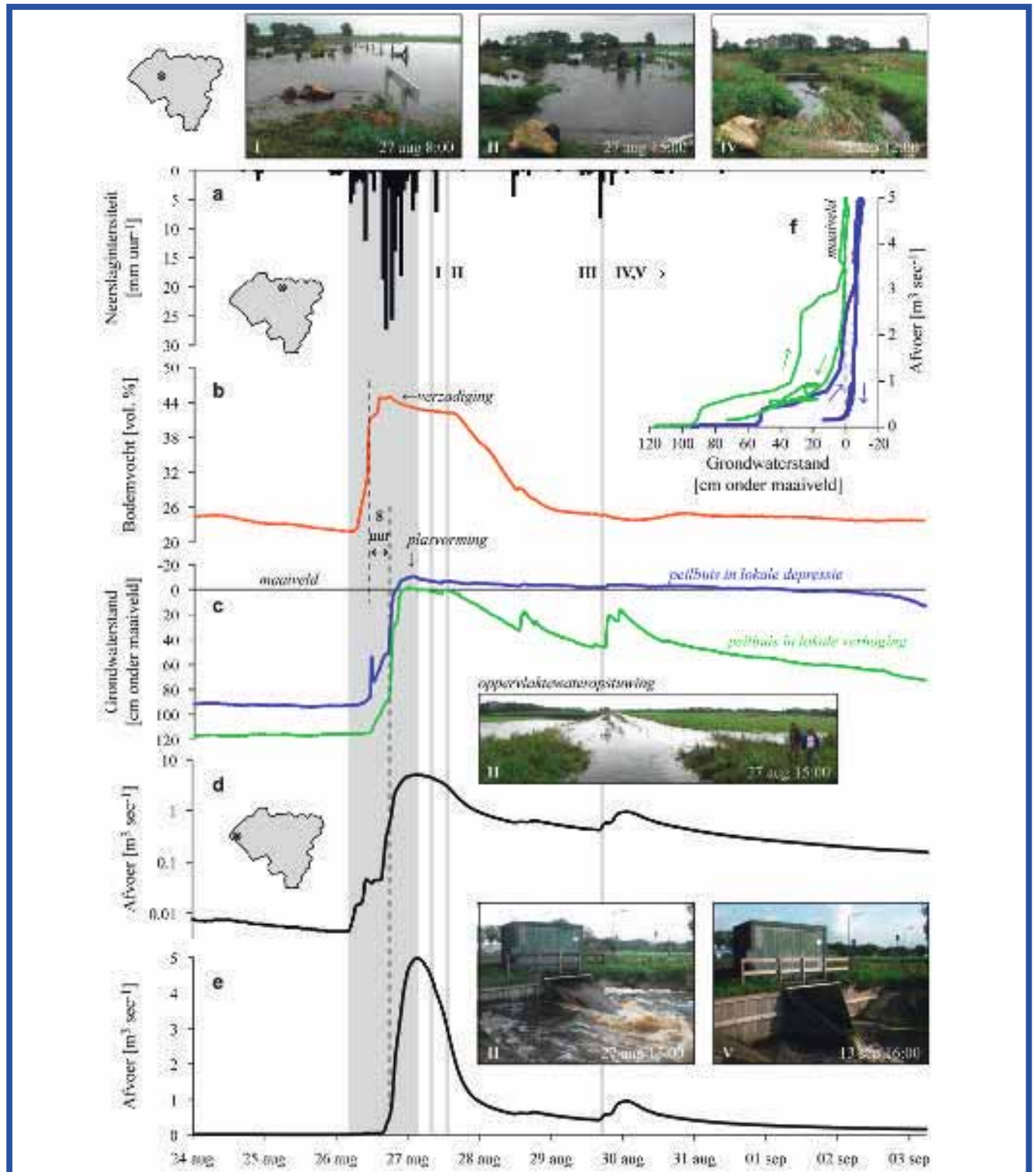
met convectieve buien met een hogere intensiteit.

Afbeelding 1 geeft de neerslagsommen weer van 26 augustus 10:00 uur tot 27 augustus 10:00 uur (lokale tijd), gemeten met radar en handregometers. Locaties en meetwaarden van de handregometers rondom de Hupselse Beek zijn ook weergegeven. De grootste neerslagsom gemeten met een handregometer was in Lieveelde (138 mm), vier kilometer ten zuiden van de Hupselse

Beek. Deze extreem hoge hoeveelheid regen behoort tot de hoogste gemeten in Nederland sinds 1951. De twee grootste neerslagsommen zijn respectievelijk 148 en 146 mm. De derde, vijfde en zevende plaats worden ingenomen door waarnemingen op 26/27 augustus 2010: Lieveelde (138 mm), Hupsel (131 mm) en Rekken (126 mm).

Op de locatie van de automatische regenmeter heeft de radar (aangepast met

**Afb. 2: Hydrologische respons van het stroomgebied van de Hupselse Beek. (a) Neerslag (uursommen) gemeten met de automatische regenmeter (aangevuld met radar), (b) bodemvochtgehalte op 40 cm diepte, (c) grondwaterstand in twee peilbuizen, (d + e) afvoer op logaritmische en lineaire as. De grijze band duidt de periode met neerslag aan. De Romeinse cijfers en grijze strepen geven momenten van veldbezoeken aan. De plattegrondjes tonen achtereenvolgens de locatie van de drie foto's tenaast, de locatie van de neerslag-, bodemvocht- en grondwatermetingen én de locatie van de afvoermetingen (zie ook de onderste drie foto's).**



handregenmeters) een dagsom van 146 mm gemeten (10-10 uur). De maximale 24-uursom gemeten met de regenmeter (aangevuld met de radar) bedraagt 160 mm (6-6 uur). De totale regenval duurde van 26 augustus 4:00 uur tot 27 augustus 6:00 uur en zorgde voor 163 mm.

Radarbeelden verschaffen ook informatie over de uitgestrektheid van de neerslag. De 24-uursom overschreed 100 mm in een gebied van ongeveer 2100 km<sup>2</sup>, 120 mm in 740 km<sup>2</sup> en 140 mm in 170 km<sup>2</sup>. De schaal van deze gebeurtenis is met stip de grootste in de afgelopen elf jaar: in de op één na grootste bui werd in een gebied van 450 km<sup>2</sup> meer dan 100 mm gemeten<sup>2)</sup>.

### Hydrologische respons

In veel stroomgebieden bestaat een duidelijke relatie tussen de afvoer bij het uitstroompunt en de totale hoeveelheid water die is opgeslagen in het stroomgebied. Water kan in een stroomgebied op verschillende plaatsen worden opgeslagen: als bodemvocht in de onverzadigde zone, als grondwater in de verzadigde zone, als plassen op het maaiveld of als oppervlaktewater. De opeenvolgende vulling van deze 'reservoirs' en de interactie ertussen bepaalt de reactie van het stroomgebied op de verandering in berging en, daarmee samenhangend, op neerslag.

De reactie van het stroomgebied op deze regenbui kan worden verdeeld in vier fases, die gekoppeld zijn aan de genoemde bergingsvormen. Door ruimtelijke variatie in regenval, bodemeigenschappen en topografie liepen deze fases op verschillende plaatsen niet synchroon.

#### Fase I: Bodemvochtaanvulling

Aan het begin van de bui was de bovenlaag van de grond relatief droog en werd alle neerslag opgenomen in de onverzadigde zone. Vóór de bui was het bodemvochtgehalte 23 procent (zie afbeelding 2). Pas tien uur na het begin van de regenbui, na meer dan 30 mm neerslag, raakte de bodem verzadigd (45 procent). Een gebrek aan doorlatendheid heeft ervoor gezorgd dat de grondwaterstanden niet direct met het bodemvochtgehalte mee stegen. Hierdoor reageerde de afvoer aanvankelijk nauwelijks op veranderingen in berging.

#### Fase II: Grondwaterstijging

De diepte en dynamiek van grondwaterstanden worden bepaald door de afstand tot open water, drains en microtopografie. Voor de bui waren de grondwaterstanden in de twee peilbuizen 90 (lokale depressie) en 115 cm (lokale verhoging) beneden maaiveld (zie afbeelding 2). Het grondwater begon te stijgen om 13:30 uur; 7,5 uur na het begin van de bui en 4,5 uur na het begin van de stijging van het bodemvochtgehalte. Om 19:30 uur, toen het grondwater 48 en 88 cm diep stond, versnelde de stijging doordat de onverzadigde zone verzadigd raakte. Extra regen zorgde voor een versnelde verzadiging van de bodem. Onder deze omstandigheden was de specifieke berging klein: 0,06 (0,06 meter waterberging per meter grondwater-

stijging). Doordat grondwaterstanden de grondwaterstroming naar beek en greppels bepalen, was de afvoer in deze fase gevoelig voor veranderingen in berging: de afvoer steeg snel bij een geringe toename in berging.

#### Fase III: Plasvorming en oppervlakte-afvoer

Rond 22:15 uur was de bodem bij de peilbuis in de lokale depressie verzadigd en ontstond een plas. Door de grotere hoeveelheid beschikbare berging duurde het tot 00:45 uur voordat ook de bodem bij de lokale verhoging verzadigd was. Op de lokale verhoging zijn geen plassen ontstaan, doordat het water naar de lokale depressies stroomde. Hierdoor vertoonde de grondwaterstand in de lokale verhoging meer dynamiek, terwijl het peil in de lokale depressie meer dan zes dagen boven maaiveld bleef, met een maximale plasdiepte van elf cm.

Uit veel van de plassen is oppervlakte-afvoer ontstaan. Tijdens ons veldbezoek op 27 augustus rond 15 uur stroomde nog op veel plaatsen water over het maaiveld naar de sloten. Toen plasvorming optrad, traden twee mechanismen in werking met tegengesteld effect op de afvoertoe name. Ten eerste nam de specifieke berging toe: een millimeter neerslag zorgde voor een millimeter stijging van de 'grond'waterstand. Ten tweede werd, toen de plassen met elkaar in verbinding kwamen, oppervlakte-afvoer een belangrijk afvoermecanisme. Hierdoor steeg de afvoer

zeer snel bij een toename in de berging. Het tijdstip waarop deze oppervlakte-afvoer begon, bepaalde voor een groot deel de afvoerpiek.

#### Fase IV: Oppervlaktewateropstuwing

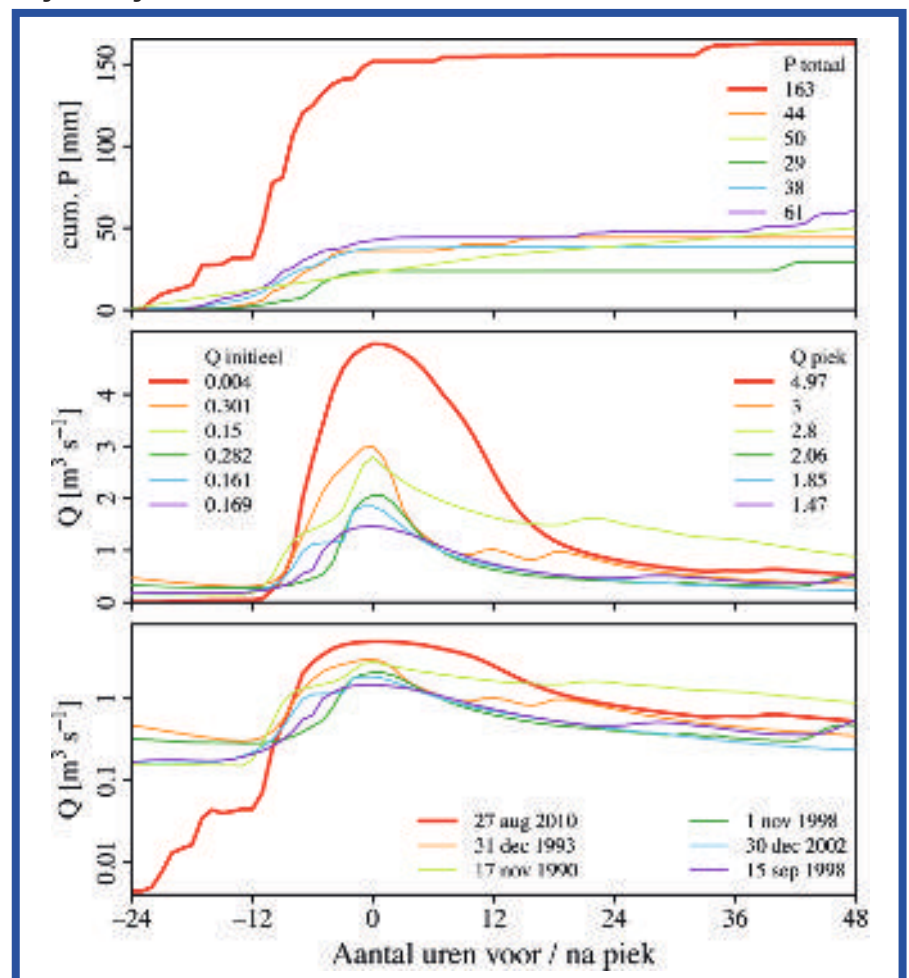
Op verschillende plaatsen, voornamelijk in de lager gelegen gebieden, heeft de afvoer de ontwerpafvoer van de duikers overschreden, waardoor bovenstrooms van de duikers opstuwing en overstromingen ontstonden (zie foto's in afbeelding 2). Door oppervlaktewateropstuwing werd het hoogteverschil tussen de grondwaterstand en het oppervlaktewaterpeil kleiner. Doordat de grondwaterstroming gedreven werd door deze peilgradiënt, nam de drainagesnelheid af. Bovendien zorgde de oppervlaktewateropstuwing voor een afvlakking van de afvoerpiek, doordat de afvoer door duikers slechts langzaam toenam bij toenemende waterhoogte. In deze fase was de afvoer dus nauwelijks meer gevoelig voor veranderingen in de berging.

#### Afvoer

Deze processen hebben samen voor een relatief langzame afvoerrespons gezorgd. De afvoer begon zeven uur na het begin van de bui te stijgen. Binnen 23 uur was de afvoer van 4 l/s gestegen tot 5.000 l/s, binnen zeven uur van 50 tot 4.500 l/s en binnen 5 uur van 420 naar 4.000 l/s.

Tussen 26 augustus en 7 september is 184

Afb. 3: Cumulatieve regenval (boven) en afvoer op lineaire (midden) en logaritmische schaal (onder) van de zes hoogste afvoergolven sinds 1969.



mm regen gevallen, waarvan 92 mm is afgevoerd. De andere helft is opgeslagen in de bodem (~70 mm) of verdampst (~20 tot 25 mm).

### Analyse extreme waarden

Uit de beschrijving hiervoor blijkt dat deze neerslag en afvoer extreem zijn. De kans dat zo'n regenbui voorkomt op een bepaalde plaats in Nederland is onderzocht met een statistiek van extreme waarden (GEV-verdeling) van de reeksen van twaalf automatische regenmeters (samen 514 jaar data<sup>3)</sup>. Een grove schatting van de herhalingsperiode van de maximale 24-uursom van 160 mm is ongeveer 6.000 jaar. De onzekerheid in deze berekening is groot: voor een herhalingsperiode van 6000 jaar ligt het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de 24-uursom tussen 130 en 200 mm. Ondanks deze grote onzekerheid is de herhalingsperiode van deze bui in elk geval groter dan 1.000 jaar. Natuurlijk is de kans dat deze gebeurtenis ergens in Nederland plaatsvindt, veel groter dan voor een bepaalde (vaste) plaats.

We hebben ook een analyse van extreme waarden toegepast op de afvoerpiek (Gumbelverdeling). In de periode 1969-2009 was de hoogste afvoer 21 mm/d, corresponderend met een herhalingsperiode van 98 jaar. Voor een herhalingsperiode van 98 jaar is het 95%-betrouwbaarheidsinterval groot: 18 tot 25 mm/d. Hieruit blijkt dat het, zelfs in dit goed bemeten stroomgebied, onmogelijk is om de herhalingsperiode van de piekafvoer van 42 mm/d (bijna twee keer zo veel) nauwkeurig te schatten.

### Vergelijking met afvoerpieken in het verleden

Laten we deze afvoerpiek en de initiële condities eens in een historisch perspectief

zetten. Uit de totale afvoerreeks (1969-2010) is een gemiddelde afvoerberekend van 60 l/s. Eind augustus (20-31 aug.) bedraagt de gemiddelde afvoer 16 l/s. Gedurende een procent van de tijd wordt een afvoer van 170 l/s overschreden (eind augustus: 43 l/s). Soms is er nauwelijks afvoer: eind augustus is de afvoer gedurende tien procent van de tijd lager dan 1,1 l/s. Op 25 augustus 2010 was de afvoer 4,4 l/s, een afvoer die 81 procent (45 procent in eind augustus) van de tijd wordt overschreden. Een afvoer van 4,4 l/s is dus laag, maar niet uitzonderlijk.

Sinds 1969 is de afvoer zes keer boven de 1000 l/s gekomen (zie afbeelding 3). Vergeleken met deze eerdere hoogwaters was in 2010 de initiële afvoer 50 keer lager. Deze lage initiële afvoer (en dito berging) heeft ervoor gezorgd dat 3,6 keer meer neerslag (dan deze eerdere gebeurtenissen) tot slechts een 2,2 keer hogere afvoerpiek heeft geleid. Het verschil in initiële afvoer is goed zichtbaar in de onderste grafiek van afbeelding 3. Deze laat ook zien dat de eerste 78 mm van de bui nodig waren om de afvoer te laten stijgen tot het initiële niveau van de andere piekafvoeren.

### Slotopmerkingen

Twee bevindingen zijn in het bijzonder van belang voor het waterbeheer en voor de ontwikkeling van neerslag-afvoermodellen:

- Door de relatief droge initiële condities (in vergelijking met eerdere afvoerpieken) kon veel water geborgen worden in de bodem en zijn de overstromingen beperkt gebleven. Als deze bui tijdens nattere omstandigheden had plaatsgevonden of in gebieden waar de berging sowieso kleiner is (zoals de Randstad), waren de overstromingen en schade veel groter

geweest. Deze resultaten laten zien dat informatie over de hydrologische staat van een stroomgebied (bodemvocht-, grondwater- en afvoergegevens) even belangrijk kunnen zijn voor overstromingsvoorspellingen als neerslagverwachtingen;

- Duikers beïnvloeden het neerslag-afvoerproces nauwelijks tijdens normale situaties, maar kunnen een belangrijke rol spelen bij zeer hoge afvoeren in laaglandstroomgebieden zoals dat van de Hupselse Beek. Hierdoor kunnen grondwatergradiënten en afvoerpieken gereduceerd worden. Vaak worden neerslag-afvoermodellen gemaakt en gekalibreerd met minder extreme neerslag- en afvoergegevens en vervolgens gebruikt om piekafvoeren te voorspellen. In dergelijke modellen wordt deze oppervlaktewateropstuwung niet meegenomen en als gevolg daarvan kunnen piekafvoeren overschat worden. Implementatie van zulke grondwater-oppervlaktewaterinteracties in hydrologische modellen is onderwerp van vervolgonderzoek.

*Voor meer details van dit onderzoek verwijzen wij naar ons artikel in het open access tijdschrift HESS<sup>1)</sup> (voor iedereen gratis toegankelijk).*

### LITERATUUR

- 1) Brauer C., A. Teuling, A. Overeem, Y. van der Velde, P. Hazenberg, P. Warmerdam en R. Uijlenhoet (2011). Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment, *Hydrology and Earth System Science* 15, pag. 1991-2005.
- 2) Overeem A., A. Buishand, I. Holleman en R. Uijlenhoet (2010). Extreme value modeling of areal rainfall from weather radar. *Water Resources Research* 46, W09514.
- 3) Overeem A., A. Buishand en I. Holleman (2008). Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties. *Journal of Hydrology* 348, pag. 124-134.