



Marijn Kuijper, Deltares

Dimmie Hendriks, Deltares

Siebe Bosch, Hydroconsult

Jos Moorman, Waterschap Aa en Maas

LGSI: een nieuw neerslagafvoerconcept voor de Leijgraaf

Door de complexiteit van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater is het nog steeds een uitdaging om een neerslag-afvoermodel te ontwikkelen dat zowel in natte als in droge perioden de afvoer uit een stroomgebied goed kan voorspellen. Voor het stroomgebied van de Leijgraaf is het recent ontwikkelde concept voor neerslagafvoermodellering 'LGSI' getoetst en vergeleken met een reeds bestaand neerslagafvoermodel. LGSI toont veelbelovende resultaten, met name voor simulatie van afvoeren op de overgang van droge en natte condities, waarbij de berging in het grondwater een belangrijke rol speelt. In dit artikel beschrijven we de uitgevoerde toets en geven we een vooruitblik richting verdere toepassing.

Afvoer van grondwater naar oppervlaktewater speelt een belangrijke rol in de afvoer vanuit stroomgebieden. Het gaat daarbij niet alleen om de basisafvoer in droge perioden of de hoeveelheid grondwater die relatief snel wordt afgevoerd door sloten en beken, minstens zo belangrijk is de bergingsruimte die het grondwatersysteem biedt voor de tijdelijke berging van neerslag. Een goed voorbeeld is het droge jaar 1976. In dat jaar, dat als recordjaar te boek staat, was het neerslagtekort zo groot dat grondwaterstanden historisch laag stonden. Zo laag zelfs dat het enkele jaren duurde voor de grondwaterstand weer tot normale waarden waren gestegen en ook (piek)afvoeren weer normale waarden bereikten. In het najaar van 1998 gebeurde het tegenovergestelde: grondwaterstanden waren toen zo hoog dat de ondergrond geen extra water meer kon bergen. De meeste neerslag werd daardoor vrijwel direct afgevoerd.

Wanneer rekentijd van doorslaggevend belang is, zoals in operationele voorspel-systemen, wordt voor afvoermodellering vaak gebruik gemaakt van vereenvoudigde concepten. Hierin is het grondwatersysteem versimpeld tot een statische flux of vaste grondwaterstand. In andere toepassingen wordt gebruik gemaakt van gekoppelde

grondwater- en oppervlaktewatermodellen. Dergelijke berekeningen kunnen het inzicht in de stromingsprocessen zeker vergroten, maar worden door de lange rekentijden niet gebruikt in operationele toepassingen zoals beslissingondersteunende systemen. In 2011 is Ype van der Velde bij Deltares en op de universiteit van Wageningen gepromoveerd op het dynamisch modelleren van de interactie tussen grond- en oppervlaktewater. Hij heeft hiervoor onder meer het modelconcept LGSI ontwikkeld. LGSI staat voor *Lowland Groundwater Surface water Interaction*.

Resultaten in het stroomgebied van de Hupselse Beek¹⁾ toonden aan dat met dit concept de afvoer naar drainagebuizen, sloten en greppels goed kon worden voorspeld, met zeer korte rekentijden. Sindsdien heeft Deltares dit modelconcept doorontwikkeld en geschikt gemaakt voor toepassing in de praktijk, waarbij het is getest en aangepast voor grotere stroomgebieden met complexere geohydrologische kenmerken. Een recent uitgevoerde studie in het stroomgebied van de Drentsche Aa²⁾ toont veelbelovende resultaten, met name voor simulatie van afvoeren in extreem droge condities, waarbij grondwaterberging een belangrijke rol speelt. Om meer inzicht te krijgen in de inzetbaarheid van LGSI voerde

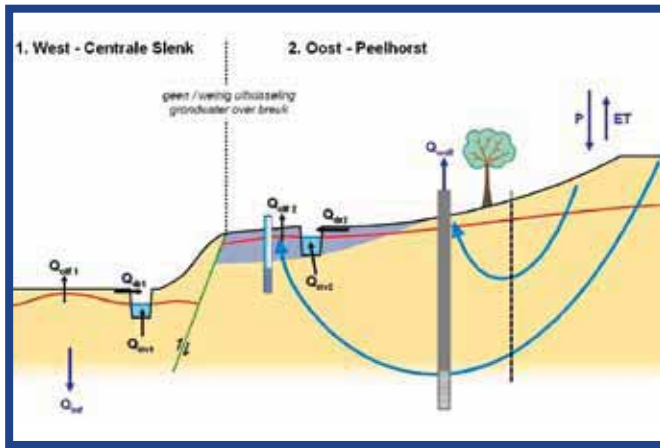
Waterschap Aa en Maas samen met Deltares en Hydroconsult een toets uit in het stroomgebied van de Leijgraaf.

De Leijgraaf

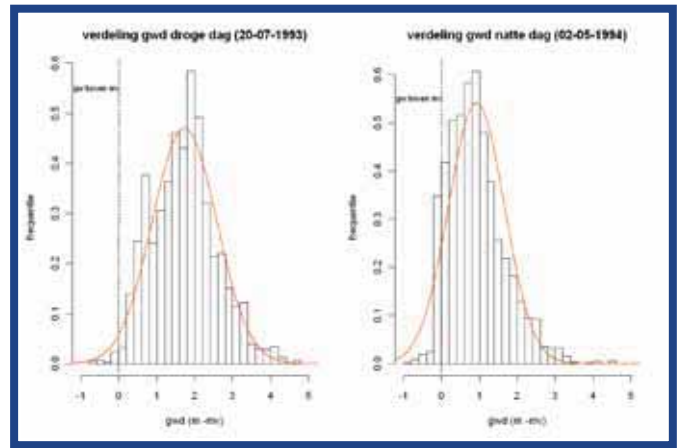
Het stroomgebied van de Leijgraaf ligt in Noord-Brabant tussen Veghel en Uden en heeft een oppervlak van circa 180 km². Een belangrijk kenmerk van het gebied is de aanwezigheid van de Peelrandbreuk. De slecht doorlatende geologische breuk vormt een belangrijke barrière in het grondwatersysteem (zie afbeelding 1). Aan de oostzijde komt de grondwaterstand dicht aan maaiveld, waardoor een natte kwelzone langs de breukzone ontstaat: de zogeheten wijstgronden (zie foto). Aan de westzijde is het aanzienlijk droger door een dikker watervoerend pakket en diepere grondwaterstand. De Leijgraaf stroomt in het westelijke deel in noordwestelijke richting langs de breuk en buigt daarna af naar het westen³⁾.

LGSI

LGSI is een modelconcept dat veranderingen in waterberging beschrijft via ruimtelijke verdelingen van de grondwaterstandsdiepte en de veranderingen hierin door de tijd. Het maakt dus gebruik van ruimtelijke grondwaterinformatie. In Nederland is deze informatie in de meeste gevallen goed te verkrijgen uit ruimtelijk gedifferentieerde



Afb. 1: Dwarsdoorsnede van het stroomgebied van de Leijgraaf.



Afb. 2: Voorbeeld van ruimtelijke verdeling van grondwaterdiepte op een droge en een natte dag.

grondwaterstromingsmodellen. In het geval van de Leijgraaf is gebruik gemaakt van de informatie uit een Triwaco-model van het waterschap⁴⁾, doorgerekend voor de periode 2000 tot en met 2006. Als modelinvoer zijn tijdreeksen over deze periode van de neerslag en verdamping toegepast. Voor kalibratie is gebruik gemaakt van de gemeten afvoer bij het uitstroompunt van de Leijgraaf over dezelfde periode.

Gezien de ruimtelijke heterogeniteit in het stroomgebied is het LGSI-model opgedeeld in twee gebieden, gescheiden door de Peelrandbreuk. Per tijdstap is de ruimtelijke verdeling van grondwaterdiepten uit het grondwatermodel in deze twee gebieden uitgezet in een histogram. Deze frequentieverdeling vertoont voor iedere dag een ander gemiddelde en een andere standaarddeviatie, maar blijkt wel iedere dag een normaalverdeling op te leveren. Het deel van de normaalverdeling met waarden kleiner dan nul beslaat het gebied waar grondwater boven de drainagebasis komt en wordt afgevoerd naar de Leijgraaf (zie afbeelding 2).

De variatie van de normaalverdelingen in de tijd kan beschreven worden door één functie per deelgebied. Deze functies zijn vervolgens gebruikt om per tijdstap de waterberging boven het drainageniveau te berekenen, aan de hand van gemeten neerslag en verdamping en de bodemkarakteristieken van het gebied. Gebruik van de frequentieverdelingen maakt dat LGSI expliciet rekening houdt met het niet-lineaire gedrag van hydrologische systemen, waarbij de bijdrage van verschillende drainageniveaus (eerste, tweede en derde orde waterlopen) afhangt van de diepte van de grondwaterstand. Het water boven het drainageniveau komt in LGSI niet direct tot afvoer, maar ondervindt vertraging als gevolg van afvoer- en drainageweerstanden en een karakteristieke afvoertraging van het stroomgebied. Ook zijn de afvoerpieken tijdens buien, als gevolg van directe afvoer van neerslag op open water en afvoer als gevolg van dichtslaan van de bodem, berekend met het LGSI-model (zie afbeelding 1).

Het model is automatisch gekalibreerd met een GLUE-analyse⁵⁾. Tijdens zo'n analyse wordt het LGSI-model met zoveel mogelijk verschillende parametercombinaties doorgerekend,



Links: Peelrandbreuk vormt een duidelijke overgang in het landschap. Rechts: ijzerrijke kwel bovenstrooms van de breukzone.



waarbij de waarde van alle parameters willekeurig varieert binnen een vooraf ingestelde marge rondom de initiële parameterwaarde. Deze waarden zijn gebaseerd op relaties uit het grondwatermodel en gebiedskennis van bodem, landgebruik, weerstanden en afvoertraging. Tijdens de analyse wordt voor iedere parametercombinatie een waterbalanstest uitgevoerd op de metingen en modeluitkomsten en een Nash-Sutcliffe efficiëntiecoëfficiënt (NSEff) berekend. Deze coëfficiënt wordt veel gebruikt om de voorspellende waarde van hydrologische modellen te bepalen. Hoe dichter de waarde van NSEff bij 1 ligt, des te beter het model. Modellen met een NSEff kleiner of gelijk aan nul hebben geen toegevoegde voorspellende waarde ten opzichte het gemiddelde van de meetreeks. Vervolgens worden parametercombinaties geselecteerd die zowel een goede waterbalanssluiting als een hoge NSEff geven.

Doordat LGSI-modellen een korte rekentijd hebben van tien tot 20 seconden op dagbasis, is het mogelijk om 100.000 tot 1.000.000 parametercombinaties door te rekenen. De kans dat één of meerdere van deze modelvarianten de optimale parametercombinatie bevat, is daardoor zeer groot. De modelvariant met de hoogste

NSEff wordt beschouwd als het beste model voor het gebied. Daarnaast kan een onzekerheidsband worden weergegeven op basis van de modelvarianten met een NSEff die boven een gekozen grenswaarde ligt. Deze modelvarianten presteren veelal beter gedurende bepaalde perioden, bijvoorbeeld onder extreem natte of droge omstandigheden, dan het model dat over de hele modelperiode genomen het beste is.

Resultaat

Afbeelding 3 toont de op dagbasis gesimuleerde afvoer van de Leijgraaf. Voor de kalibratieperiode geeft het LGSI-model een gemiddelde NSEff van 0,78 tot 0,89. Tijdens de modelsimulatie bleek dat de het afvoermeeptpunt van de Leijgraaf achter een automatische stuw ligt. Deze stuw veroorzaakt een variërende vertraging in de afvoergolf, waardoor het lastig is de gemeten afvoer op uur- of dagbasis te vergelijken met het LGSI-model. Wanneer in de berekeningen rekening wordt gehouden met een vertraging van de afvoergolf van maximaal drie dagen, levert dit een betere voorspellende waarde van het LGSI-model op: NSEff = 0,89.

Na kalibratie is het LGSI-model ook gedraaid voor het jaar 1998, om te zien hoe het model

buiten de ijkperiode presteert. De voorspelende waarde van het LGSI-model is voor 1998 nagenoeg gelijk aan die van de kalibratieperiode: $N_{\text{Seff}} = 0,78$ en N_{Seff} met drie dagen vrijheidsgraad = 0,89. Het model presteert daarmee ook buiten de ijkperiode goed.

Naast de afvoer berekent het LGSI-model voor ieder deelgebied per tijdstap ook de ruimtelijke verdeling van de grondwaterdiepte (zie afbeelding 3). Aan de hand hiervan kunnen we voor het gebied een duidelijke relatie leggen tussen de actuele waterberging in de ondergrond en de afvoerrespons na een bui. Deze informatie kan van groot nut zijn bij het tijdig nemen van maatregelen om wateroverlast én droogteproblemen te voorkomen of te beperken.

Het LGSI-model kan ook op kleinere tijdstappen worden doorgerekend. Door het overheersende effect van het variabele automatische stuwbeheer op deze tijdschaal is dit voor deze toets echter niet zinvol. Voor een goed modelresultaat is dan eigenlijk een koppeling van het LGSI-model met een hydraulisch model nodig, dat rekening houdt met op- en neergaan van de stuw. Omdat een dergelijk model in deze studie niet voorzien was, zijn geen berekeningen op uurbasis gemaakt. Voor toekomstige modellering van de Leijgraaf is het raadzaam het LGSI-model te gebruiken als voeding voor een hydraulisch stromingsmodel waarin vervolgens het stuwbeheer wordt gesimuleerd.

Vergelijking met Wageningenmodel

Omdat LGSI een nieuw concept is, is ter vergelijking ook een simulatie uitgevoerd met een conventioneel neerslagafvoermodel. Hiervoor is het concept van het Wageningenmodel toegepast en gekalibreerd voor dezelfde periode als het LGSI-model.

Het Wageningenmodel is een zogeheten conceptueel model van het type *lumped*. Conceptueel wil zeggen dat de fysische processen die zich in de bodem afspelen slechts in beperkte mate als zodanig in de modelcode zijn ondergebracht. Het Wageningenmodel gaat uit van twee compartimenten: één voor de opslag van grondwater en één voor de onverzadigde zone. De onverzadigde zone wisselt volumes uit met het grondwater. Vanuit het grondwater treedt drainage op via twee routes: een snelle en een trage flux. De verdeling tussen beide fluxen is onder meer een functie van de mate waarin het grondwatercompartiment gevuld is.

Met *lumped* bedoelen we dat binnen een modelobject wordt gerekend met gemiddelde waarden voor het gehele gebied, waardoor geen sprake is van ruimtelijke variabiliteit in de modeluitvoer. Dit modeltype is dan ook een tegenpool van volledig fysisch gebaseerde, gedistribueerde modellen zoals Modflow, Triwaco of Simgro. Ook LGSI is dus ook een *lumped* model, maar houdt in tegenstelling tot conventionele neerslagafvoerconcepten wel expliciet rekening met ruimtelijke variabiliteit in de modelinvoer.

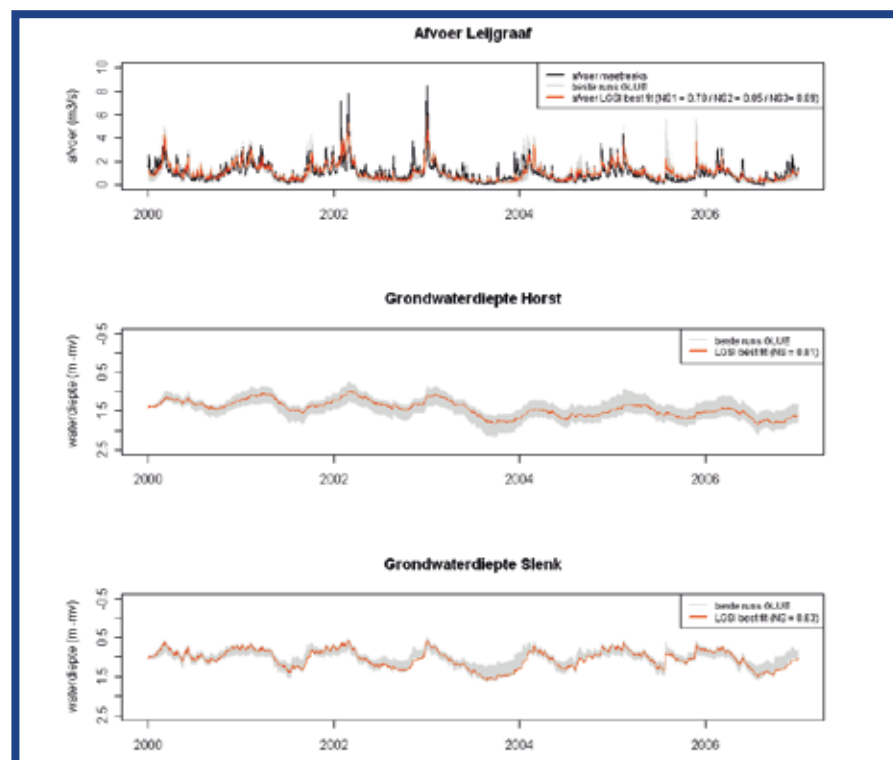
De Leijgraaf is in het Wageningenmodel geschematiseerd in één modelgebied. Het kalibratieproces is grotendeels geautomatiseerd uitgevoerd. Om de vindkans van een modelvariant met een optimale parametercombinatie zo groot mogelijk te maken, hebben we de kalibratie in twee fasen opgedeeld: kalibratie op de gefilterde basisafvoer en kalibratie op de totale afvoer. In beide fasen is gekalibreerd door achtereenvolgens Monte-Carlo-sampling, een algoritme en een gevoeligheidsanalyse uit

te voeren. In de eerste fase van de kalibratie hebben we uit de totale afvoer de 'trage component' gefilterd volgens de methode van de Universiteit Leuven⁶⁾. De *sampling* was nodig om de gehele bandbreedte van mogelijke parameterwaarden te onderzoeken. De gevoeligheidsanalyse in de laatste fase was vooral van belang om de gevoeligheid van de basisafvoer voor de parameters te onderzoeken. Door de parameterwaarden waarvoor de basisafvoer gevoelig blijkt te zijn, 'vast te zetten', kan in fase 2 de kalibratie op de totaalafvoer worden uitgevoerd met minder parameters⁷⁾. De kalibratie van het Wageningenmodel resulteerde in een Nash-Suthcliffe-coëfficiënt van 0.85 voor de afvoeren op dagbasis.

Conclusies

Voor het stroomgebied van de Leijgraaf is het modelconcept voor neerslagafvoermodellering LGSI getoetst en vergeleken met een conventioneel concept voor neerslagafvoermodellering: het Wageningenmodel. Hieruit blijkt dat kalibratie van LGSI tot vergelijkbare voorspellende waarden leidt als het Wageningenmodel. Een voordeel van LGSI is dat het expliciet rekening houdt met ruimtelijke variatie in grondwaterstanden en het niet-lineaire gedrag van drainage-systemen. Juist hierdoor toont LGSI veelbelovende resultaten voor simulatie van afvoeren op de overgang van droge en natte condities, waarbij tijdelijke berging van neerslagwater in het grondwater een belangrijke rol speelt. Doordat LGSI naast afvoeren ook de verdeling van de grondwaterdiepte berekent, biedt het de mogelijkheid om actuele modelvoorspellingen te doen over afvoeren én grondwaterberging. In beslissingsondersteunende systemen biedt deze informatie waterbeheerders extra houvast om tijdig te anticiperen en maatregelen te nemen om zowel wateroverlast als droogteproblemen te voorkomen of te beperken.

Afb. 3: Resultaten LGSI. Berekende versus gemeten afvoer en berekende grondwaterdiepte op de Peelhorst en in de Centrale Slenk.



LITERATUUR

- 1) Van der Velde Y., G. de Rooij en P. Torfs (2009). Catchment-scale non-linear groundwater-surface water interactions in densely drained lowland catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* nr. 13, pag. 1867-1885.
- 2) Wanders N., D. Hendriks en Y. van der Velde (2011). Combined groundwater - surface water modeling with a lumped hydrological model. *Deltareis*. Rapport 1203833-000-BGS-0001.
- 3) Stuurman R., G. van Beusekom en J. Reckman (2000). Watersystemen in beeld. Een beschrijving van de grond- en oppervlaktewatersystemen van Noord-Brabant. TNO. Rapport NITG 00-10-A.
- 4) Van der Wal B., A. Krikken en J. Jansen (2008). Hydrologische modellering GGOR Groote Peel en De Bult. Waterschap Aa en Maas.
- 5) Beven K. en A. Binley (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* nr. 6, pag. 279-298.
- 6) Willems P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling & Software* nr. 3, pag. 311-321.
- 7) Fenicia F. (2008). Understanding catchment behaviour through model concept improvement. Proefschrift TU Delft.