

Moderne data-assimilatie in operationele hoogwaterverwachtingssystemen

EOIN BURKE, GERT VAN DEN HOUTEN, ALBRECHT WEERTS EN BART VAN OSNABRUGGE.

Waterschap Rijn en IJssel heeft voor de Berkel een hoogwaterverwachtingssysteem ontwikkeld. Dit wordt gebruikt om bij (dreigend) hoogwater te waarschuwen en om maatregelen effectiever in te kunnen zetten om daarmee eventuele wateroverlast te voorkomen of verminderen. De belangrijkste componenten van het systeem zijn de neerslagafvoermodellen gemaakt met WALRUS en de stromingsmodellen gemaakt met Sobek, beide geconfigureerd in een Delft-FEWS systeem. Om de modelverwachtingen goed aan te laten sluiten op de actuele afvoer- en waterstandsmetingen is daarnaast gebruik gemaakt van data-assimilatie met behulp van OpenDA. In deze data-assimilatie worden de interne toestanden van de WALRUS-modellen aangepast met behulp van het zogenaamde Deterministic Ensemble Kalmanfilter (DEnKF). In dit artikel leggen we de opzet en de prestaties van dit systeem uit en laten we zien dat moderne data-assimilatiemethoden nuttig zijn voor het operationeel waterbeheer in Nederland.

Artikel

Inleiding

Steeds meer waterbeheerders in Nederland gebruiken een hoogwaterverwachtingssysteem om bij hoogwatersituaties wateroverlast en schade door overstroming te kunnen beperken. Een dergelijk systeem wordt ook wel een BOS (beslissing ondersteunend systeem) genoemd. In de praktijk verschaft een BOS de waterbeheerders inzicht in de duur en omvang van het te verwachten hoogwater zodat stuwen, pompen, retentiegebieden en eventueel noodmaatregelen zoals zandzakken optimaal kunnen worden ingezet. Bovendien spelen de hoogwaterverwachtingen een belangrijke rol bij het tijdig en accuraat informeren van burgers en in extreme gevallen bij het uitvoeren van evacuatiestrategieën.

Een hoogwaterverwachtingssysteem bestaat op hoofdlijnen uit:

1. Inwinning van hydrologische en meteorologische meetgegevens over de toestand van het watersysteem en de actuele weersverwachtingen; ruimtelijke interpolatie van neerslag, temperatuur en potentiële verdamping.
2. Simulatie van het neerslagafvoerproces en stroming door de waterlopen op basis van de invoer uit stap 1.
3. Assimilatie van de meest actuele beschikbare metingen. Dit is het aanpassen van de modeluitvoer op basis van veldmetingen om deze beter overeen te laten komen met de werkelijkheid.
4. Het genereren, presenteren en beschikbaar stellen van hoogwaterverwachtingen.

In Nederland wordt als basis voor een BOS voornamelijk Delft-FEWS (Werner e.a. 2013) gebruikt. FEWS staat hierbij voor Flood Early Warning System en stuurt

alle dataprocessen en modelsimulaties aan. Wat betreft de neerslagafvoermogelijkheden (NA-modellen) in een BOS worden in Nederland verschillende modellen gebruikt, waaronder HBV, Sacramento, SOBEK-RR en WALRUS. Welk neerslagafvoermodel wordt gebruikt hangt af van het doel én van de kenmerken van het stroomgebied. Als stromingsmodel (hydraulisch model) wordt veelal Sobek gebruikt.

De betrouwbaarheid van de verwachtingen die het BOS produceert is van groot belang, aangezien deze de basis vormt voor de besluitvorming omtrent maatregelen om wateroverlast te beperken. Zowel over- als onderschatting van de piekwaterstand en duur van de hoogwatergolf heeft gevolgen vanwege achteraf vermijdbare schade of juist onnodig ingezette maatregelen. Ook kunnen 'slechte' modelverwachtingen van de waterstand het vertrouwen van de gebruiker in het hoogwaterverwachtingssysteem aantasten. De betrouwbaarheid van de afvoerverwachting wordt in belangrijke mate bepaald door de kwaliteit van de neerslagverwachting, de kwaliteit van het neerslagafvoer model en de schatting van de initiële condities van dat model - bijvoorbeeld met behulp van data-assimilatie -, waarover later meer.

De neerslagafvoermogelijkheden die gebruikt worden in een BOS zijn veelal gekalibreerd op basis van historische afvoergegevens. Hoewel deze modellen gedurende langere perioden bevredigende resultaten kunnen opleveren bij operationeel gebruik in een BOS, kunnen er toch afwijkingen optreden tussen de modeluitvoer en de waargenomen afvoer. Deze afwijkingen kunnen optreden omdat 1) het NA-model niet alle fysische processen in een stroomgebied weergeeft, 2) er fouten zitten in de meteorologische gegevens die als input voor het model zijn gebruikt of 3) het model begint met afwijkende initiële condities, al dan niet door eerdere fouten genoemd onder 1 en 2. Afwijkingen tussen de gemeten en de gemodelleerde afvoer zijn in een BOS niet wenselijk, aangezien ze de afvoerprognose blijvend beïnvloeden.

Om afwijkingen tussen de metingen en het model te verkleinen kan toestand-updating (een vorm van data-assimilatie) worden toegepast. Data-assimilatie is dus de stap in de modellentrein binnen een BOS die zorgt voor een correctie op de fouten die een model in de praktijk maakt. Er wordt ook wel gesproken van een goede aansluiting van de verwachtingen op de metingen. De potentie van toestand-updating wordt al langer herkend (Liu e.a. 2012), maar toch is operationele toepassing nog schaars. Data-assimilatie kan op vele manieren worden ingericht.

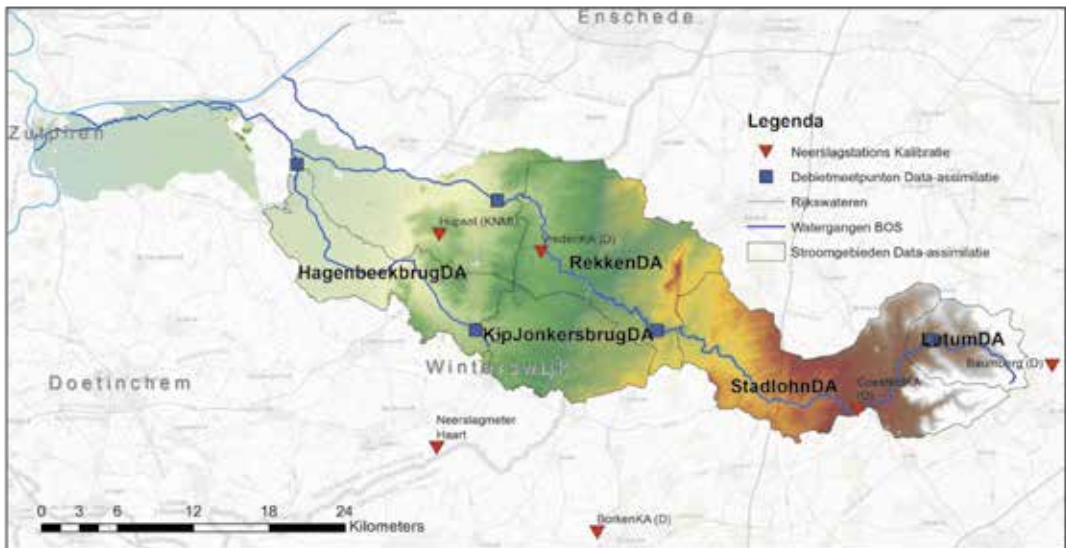
In dit artikel wordt beschreven hoe toestand-updating is toegepast voor het BOS van de Berkel, een rivier in het beheergebied van Waterschap Rijn en IJssel. Er wordt ingegaan op het gebruikte neerslagafvoermodel, het open-source data-assimilatie platform OpenDA, de toegepaste data-assimilatiemethoden en verschillende mogelijkheden om hoogwaterverwachtingen verder te verbeteren.

Het stroomgebied van de Berkel

In Afbeelding 1 is het stroomgebied van de Berkel te zien. De Berkel ontspringt nabij Lutum in Duitsland, stroomt bij Rekken de grens over en mondt bij Zutp-

hen uit in de IJssel en het Twentekanaal. De rivier heeft een lengte van ongeveer 110 kilometer en overbrugt een hoogteverschil van 160 m: van 167 m+NAP naar 7 m+NAP. Het oostelijke of Duitse deel van het stroomgebied is heuvelachtig en daar heeft de rivier een natuurlijk meanderend karakter. Dit gebied kenmerkt zich door een relatief snelle neerslagafvoerreactie. Het westelijke deel van het stroomgebied is relatief vlak en reageert trager op neerslag.

Van oudsher traden met name in de benedenloop van de Berkel regelmatig grootschalige overstromingen op. Dit is sinds de jaren 1970 verleden tijd. Toen is de Berkel gekanaliseerd en zijn maatregelen getroffen om de kans op overstromingen te verkleinen, zoals het aanleggen van omleidingskanalen, kaden, stuwen en een retentiegebied nabij de grens. De laatste keer dat sprake was van wateroverlast was in augustus 2010 toen in Lochem huizen dreigden onder te lopen. Om in dit soort situaties beter zicht te hebben op de mogelijke wateroverlast en om maatregelen effectiever in te kunnen zetten is het BOS-Berkel ontwikkeld.



Afbeelding 1 Het Berkel stroomgebied in het oosten van Nederland. De hoogte van het gebied varieert van oost naar west. De 5 sub-stroomgebieden zijn ook weergegeven. De NA processen voor deze sub-stroomgebieden worden gesimuleerd in WALRUS en data-assimilatie wordt toegepast op de bijhorende debietmeetpunten

Kalibratie neerslagafvoermodellen

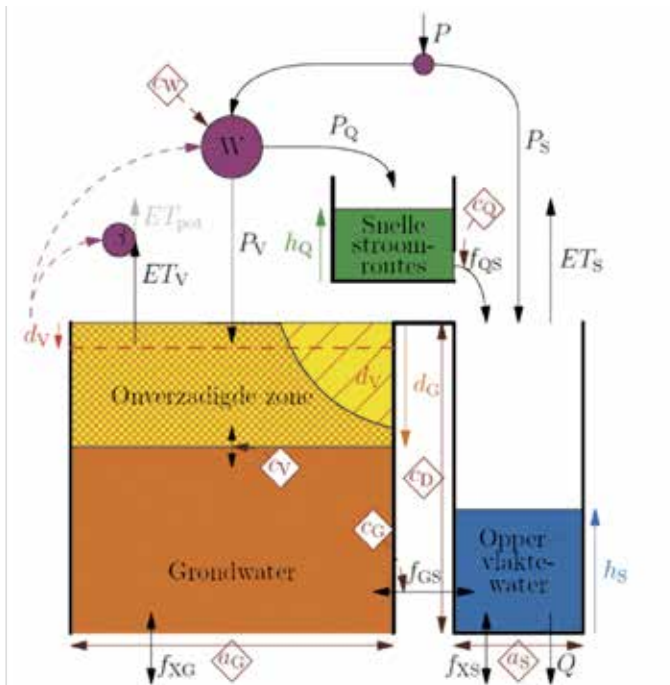
Beschikbare meetdata

Voor de kalibratie van de neerslagafvoermodellen en de configuratie van de data-assimilatiemethode binnen dit project, is gebruik gemaakt van vijf afvoermeeetstations en van diverse neerslagstations in het stroomgebied (Afbeelding 1). Aangezien het stroomgebied zowel in Nederland als in Duitsland ligt zijn meetgegevens gebruikt van Waterschap Rijn en IJssel, KNMI, LANUV (Duitse natuur en milieuorganisatie) en DWD (Deutsche Wetterdienst). Voor de deelstroomgebieden zijn neerslagstations geselecteerd met behulp van Thiessens polygonen en hiaten in de neerslagmeetreeksen zijn opgevuld met naburige

meetstations. Voor temperatuur en evapotranspiratie is KNMI-station Hupsel gebruikt. Duitse meetstations gebruiken in het veld geijkte afvoerkrommes (Q-h relaties) voor de afvoermetingen. Deze Q-h-relaties worden beïnvloed door begroeiing en sedimentatieprocessen en zijn daarom doorgaans onnauwkeuriger dan de afvoermetingen in Nederland, die bestaan uit meetstuwen en afvoermetingen op basis van stroomsnelheidsmeters.

Het WALRUS neerslagafvoermodel

Er zijn talloze modellen beschikbaar voor de simulatie van neerslag-afvoerprocessen, variërend van complexe, gedistribueerde hydrologische modellen tot eenvoudige black-box modellen. Voor een hoogwaterverwachtingssysteem is een neerslagafvoermodel nodig dat betrouwbaar informatie geeft bij hoogwatersituaties. Daarnaast is het namelijk van belang dat er minimaal dagelijks een nieuwe verwachting wordt gegenereerd op basis van de meest actuele metingen en weersverwachtingen. Dit vereist dus snel rekenende neerslagafvoermodellen. Dit is des te meer van belang omdat bij de gekozen data-assimilatietechniek modellen veelvuldig gedraaid moeten worden in zogenaamde ensembles.



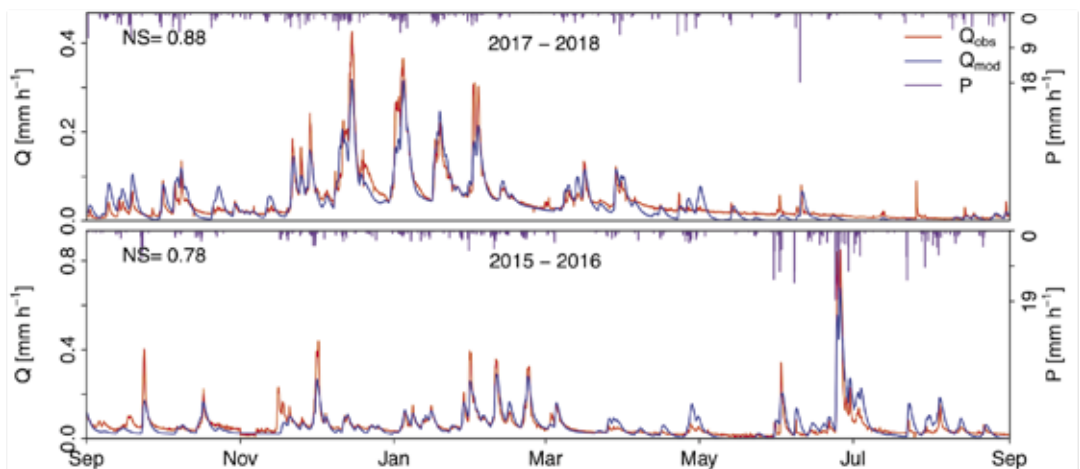
Afbeelding 2 Walrus modelschematisatie (Brauer e.a., 2014a). De interne modeltoestanden van dit model zijn: 1) bergingsdeficiet (dv), 2) grondwaterdiepte (dG), 3) oppervlaktewaterpeil (hs) en 4) snelle stroomreservoirpeil (hq).

Voor het BOS-Berkel is gekozen voor het WALRUS-model. Anders dan vergelijkbare NA-modellen die zijn ontworpen voor hellende stroomgebieden, is WALRUS zo opgezet dat het de hydrologische processen weergeeft die specifiek zijn voor laaglandstroomgebieden. Dit conceptueel NA-model is uitgerust met 3 reservoirs (zie Afbeelding 2) die met elkaar in verbinding staan: 1) het grondre-

servoïr (onderverdeeld in de onverzadigde zone en de grondwaterzone), 2) het snelle stroomreservoir en 3) het oppervlaktewaterreservoir. Het waterniveau in deze reservoirs wordt de interne modeltoestand genoemd. Voor een volledige beschrijving van de modelstructuur zie Brauer e.a. (2014a).

Een semi-gedistribueerde opzet

Om de afvoeren van de Berkel overall juist te kunnen simuleren moet rekening gehouden worden met de volgende aspecten: ten eerste reageren deelstroomgebieden verschillend door variatie in helling en bodemopbouw. Ten tweede is de neerslag altijd in zekere mate (en soms heel erg) heterogeen en als derde treedt er vertraging en demping op van de afvoergolf door de stroming door watergangen zelf. Om met deze drie aspecten rekening te houden is voor BOS-Berkel gekozen voor een semi-gedistribueerd modelopzet. Dit houdt in dat het stroomgebied wordt opgedeeld in kleinere deelstroomgebieden met ieder een eigen WALRUS-neerslagafvoermodel dat hoort bij dat specifieke deelstroomgebied met eigen meteorologische invoer. In totaal zijn er voor BOS-Berkel vijf stroomgebieden gekozen waarvoor unieke WALRUS-modellen zijn gekalibreerd en gevalideerd. Deze wateren vervolgens af op het hydraulische model van de Berkel dat de stroming door de rivier simuleert. Het geheel is gemodelleerd in Sobek 2.16.



Afbeelding 3 Walrus model kalibratie (2017-2018) en validatie (2015-2016) voor het Stadthohn deelstroomgebied. Rood: gemeten afvoer, blauw: gemodelleerde afvoer en paars: gemeten neerslag (rechter y-as).

Neerslag-afvoerkalibratie.

Voor elk van de stroomgebieden in het BOS-Berkel is een stapsgewijze, handmatige kalibratie uitgevoerd. Tijdens de kalibratie lag de focus op het goed modelleren van de piekafvoeren, waarbij met name de tophoogte, de golfvorm en het moment van de piek goed gesimuleerd moesten worden. Afbeelding 3 toont de modelresultaten van zowel de kalibratie- als de validatieperiode voor het Stadthohn deelstroomgebied. Dit voorbeeld is vergelijkbaar met de vier andere WALRUS-modellen van de deelstroomgebieden met NS-waarden (Nash-Sutcliffe Efficiency) voor de kalibratieperiode tussen 0.79 - 0.88 en de validatieperiode tussen 0.68 - 0.80. Opvallend was dat de afwijking in de piekhoogte veroorzaakt werd door het feit dat het WALRUS-model de afvoerpieken consequent

onderschatte. Toekomstig onderzoek kan wellicht uitsluitel bieden of dit een tekortkoming is van het model, de gekalibreerde parameters of dat invoerfouten in het model de oorzaak zijn.

Data-assimilatie

Een goed gekalibreerd neerslagafvoermodel is de basis voor de op te stellen hoogwaterverwachtingen. De modelsimulatie zal echter altijd afwijken van de werkelijkheid. Dit komt doordat de NA-modellen de werkelijkheid versimpelen tot een overzichtelijk conceptueel model met enkele parameters. Daarnaast zijn er onzekerheden in bijvoorbeeld de neerslagmetingen die kunnen leiden tot een afwijking in de gemodelleerde afvoer. In situaties waarin de gemeten afvoeren gaan afwijken van de gemodelleerde afvoer wil je dus eigenlijk het model 'bijsturen' op basis van de metingen. Dit proces heet data-assimilatie en toepassing hiervan zorgt voor een kleinere afwijking van de modeltoestand op moment 'nu' waardoor ook de modelverwachtingen voor de komende dagen betrouwbaarder wordt. In dit artikel wordt de Engelse term 'updating' gebruikt in plaats van 'bijsturen'.

Data-assimilatie kan worden onderverdeeld in drie hoofdcategorieën. Ten eerste is er bias-correctie (eng. Error correction). Deze kwantificeert de afwijking tussen de waargenomen en de gemodelleerde afvoer en past op basis hiervan direct de modeluitvoer aan, bijvoorbeeld met een factor of een vaste ophoging/verlaging. Deze assimilatiemethode wordt op grote schaal gebruikt in regionale hoogwaterverwachtings-systemen door toepassing van Auto Regressive-Moving Average (ARMA) algoritmes, maar de doeltreffendheid ervan kan aanzienlijk variëren. Bij de tweede methode, parameter-updating, worden de modelparameters aangepast om het model aan te laten sluiten bij de waarnemingen. Ook deze methode heeft beperkingen, aangezien sommige bijstellingen kunnen leiden tot onrealistische parameters. Bij de derde methode, toestand-updating worden de interne modeltoestanden aangepast zodat ze aansluiten bij de waarnemingen. Deze methode houdt zowel rekening met onzekerheden in het modeldomein als met onzekerheden in de input. In dit onderzoek wordt gekozen om toestand-updating te gebruiken.

Ensemble Kalman filter

De uitgesproken niet-lineaire aard van hydrologische processen maakt het bijsturen van NA-modellen bijzonder uitdagend. Ensemble Kalman Filtering (EnKF) en variaties hierop blijken hierbij erg bruikbaar (Liu e.a. 2012). Een EnKF past een model aan door een schatting te maken van de relatie tussen de modeltoestanden en de waargenomen afvoer. Bij operationele hoogwaterverwachtingen wordt deze relatie bepaald met behulp van een neerslagafvoer-modelensemble. Binnen dit ensemble zijn alle modellen (leden) identiek, maar wordt ruis geïntroduceerd in de modeltoestanden of in de modelinvoer (neerslag of evapotranspiratie). Elk lid van het ensemble zal daarna een unieke modeltoestand hebben die is gerelateerd aan een bepaalde modelafvoer. Daarna wordt een covariantiematrix berekend op basis van de correlaties tussen de afwijking van de gemeten afvoer ten opzichte van de berekende afvoer en de waarden van de modeltoestand in de verschillende ensemble leden. Hiermee worden de afwijkingen tussen model en meting vertaald naar de gehele model-

toestand. De geoptimaliseerde modeltoestand wordt terug ingebracht in het model, wat een verbetering oplevert in de simulatie ten opzichte van de observatie. Oftewel: op een slimme manier wordt bepaald welke modeltoestanden het beste horen bij de waargenomen afvoer.

OpenDA open source software

Net als veel andere data-assimilatiemethoden vormt de hierboven beschreven EnKF data-assimilatiemethode een generiek proces dat kan worden toegepast op een scala van modelconfiguraties. Het uitwisselen van bestanden, het genereren van matrices, het werken met formules en het zorgen voor een robuust instrument dat periodiek wordt ingezet, is echter een uitdagende en tijdrovende bezigheid. Dit is met name relevant bij het optimaliseren van, en experimenteren met, verschillende assimilatie-opties voor een bepaald model en in een bepaalde situatie. De OpenDA software maakt het mogelijk om om te gaan met de vele complexiteiten van data-assimilatie. Enkele opties zijn een bibliotheek van filteropties, variabele ensemble groottes, verschillende toestand-updating opties en regelbare onzekerheidswaarden. Verder kan OpenDA gekoppeld worden aan de Delft-FEWS applicatie. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van OpenDA. Deze software is daarna toegepast in het operationele BOS-Berkel.

Data-assimilatie in BOS-Berkel

De implementatie van een EnKF op basis van het OpenDA-pakket in het BOS-Berkel is gebaseerd op de resultaten van Sun e.a. (2020) waarin het WALRUS model werd gebruikt in een stand-alone configuratie (zonder rivierstromingscomponent). Net als Sun e.a. (2020) brengt het BOS-Berkel ruis in op het modelensemble via de invoergegevens, namelijk neerslag. Verder is de meetonzekerheid van de afvoer in het assimilatieproces opgenomen door ruis in te brengen op de afvoermetingen. De data-assimilatie in het BOS-Berkel is getest en geconfigureerd door verwachtingen te maken van historische afvoer, met als doel de data-assimilatie te configureren om de hoogwaterverwachtingen te optimaliseren. De aanpassingen van de configuratie worden hieronder beschreven.

Configuratie van de toestand-updating

Het BOS-Berkel bestaat uit vijf NA-modellen met de bijbehorende meetlocatie. De 5 NA-modellen worden tegelijk geassimileerd binnen een modelensemble en leveren modeltoestanden op om een hoogwaterverwachting mee te kunnen genereren. In dit project bestaat het ensemble uit 16 leden, maar om lange reken tijden te voorkomen worden niet alle 16 leden gebruikt als startconditie voor de hoogwaterverwachting. In plaats daarvan wordt alleen het ensemble-gemiddelde gebruikt als startconditie voor de hoogwaterverwachting. Om toch een onzekerheid in de modelverwachtingen te tonen wordt een zogenaamde 'pluim' berekend op basis van onzekerheid in de neerslagverwachting. De 'pluim' is bepaald op basis van de mediaan, het 80^e percentiel en het 20^e percentiel van de 7-daagse neerslagverwachting als modelinput.

De data-assimilatie kan alleen goed werken als er actuele waarnemingen beschikbaar zijn. Bij operationeel waterbeheer kan deze beschikbaarheid echter om praktische redenen worden verstoord, bijvoorbeeld vanwege problemen

met de telemetrische communicatie, een ernstige storing in een databank of het niet goed functioneren van een meetlocatie. Om te voorkomen dat het data-assimilatie- en verwachtingsmodel in dergelijke situaties vastloopt, is een terugvaloptie ingebouwd. Een dergelijke terugvaloptie zorgt ervoor dat wanneer een bepaald waarnemingspunt niet beschikbaar is, de data-assimilatie doorgaat zonder data-assimilatie, oftewel met alleen het WALRUS-model. Zodra de veld-waarnemingen weer beschikbaar komen, wordt de data-assimilatie automatisch weer opgepakt. Een dergelijke terugvaloptie is een functionaliteit binnen het OpenDA-pakket.

Filteropties

Voor het BOS moeten uurlijks hoogwaterverwachtingen worden gegeneerd. Om dit te kunnen doen moet de ensemblegrootte in de EnKF tot een minimum worden beperkt, terwijl de modeltoestanden optimaal moeten zijn bijgewerkt. Daarom is gekozen voor toepassing van het Deterministic Ensemble Kalmanfilter (DEnKF). Dit is een alternatief voor het standaard EnKF wanneer men te maken heeft met kleine ensemble-groottes (Sakov & Oke, 2008). Het belangrijkste verschil tussen de EnKF en de DEnKF is dat de onzekerheid in de afvoermetingen niet expliciet wordt meegenomen waardoor de ruis in het assimilatieproces wordt verkleind. Voor meer informatie zie Sokov & Oke (2008). In dit project is er getest met verschillende varianten van de EnKF, maar DEnKF leidde tot de beste en stabielste resultaten voor BOS-Berkel.

Een overweging bij het gebruik van toestand-updating voor het assimileren van het WALRUS-model is de keuze tussen het actualiseren van enkele of van meerdere interne modeltoestanden. Uit eerder vooronderzoek door Valk (2019) bleek dat de grootste nauwkeurigheid werd bereikt wanneer minimaal drie interne modeltoestanden werden geüpdatet. Naar aanleiding van deze bevinding is ervoor gekozen om alle vier interne modeltoestanden (bergingsdeficiet, grondwaterdiepte, oppervlaktewaterpeil en snelle stroomreservoirpeil, zie Afbeelding 2) aan te laten passen in de data-assimilatie.

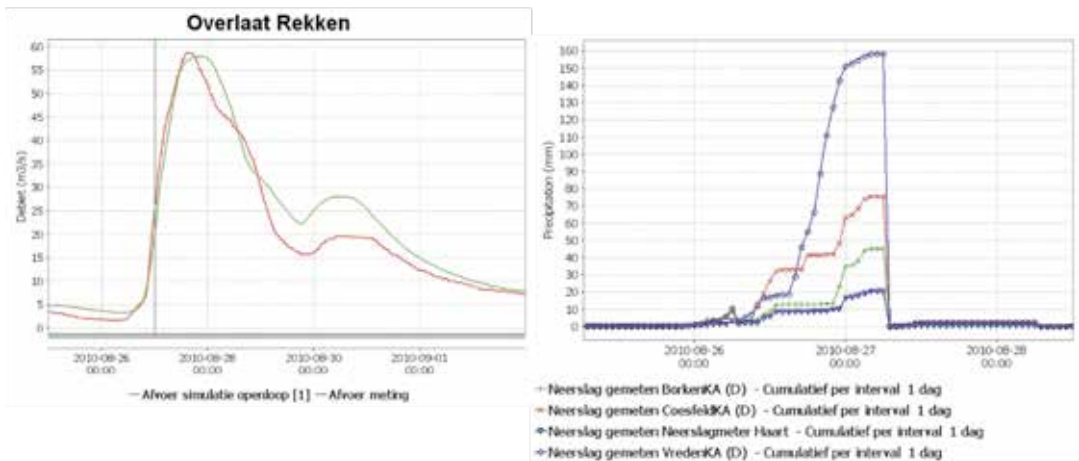
Praktijkvoorbeeld data-assimilatie

Om te laten zien hoe DEnKF werkt is een voorbeeld gegeven van de piekafvoer van 27 augustus 2010.

De gebeurtenis

Tussen 00:00 uur op 26 augustus 2010 en 12:00 uur op 27 augustus 2010 leidde een reeks van convectieve neerslaggebeurtenissen tot aanzienlijke regenval in het stroomgebied van de Berkel. Voor de Berkel resulteerde dit in een afvoer met een hogere herhalingstijd dan 80 jaar. De hoeveelheid neerslag tijdens deze gebeurtenis varieerde aanzienlijk over het gebied: het bovenste deel van het stroomgebied van de Berkel ontving een daghoeveelheid van ongeveer 50 mm, het midden ontving meer dan 150 mm en het westen ontving ongeveer 100 mm, terwijl ongeveer 20 kilometer ten zuiden van het stroomgebied in dezelfde periode slechts minder dan 15 mm viel. Afbeelding 4 toont links de waargenomen afvoer en de resultaten van het semi-gedistribueerde WALRUS model bij Rekken. Hoewel er enkele fouten in het model zitten, met

name in de basisafvoer vóór de gebeurtenis en in de recessiecurve na het piekmoment, worden het tijdstip, de omvang en het volume van de piekafvoer accuraat weergegeven. Om de werking van de data-assimilatie tijdens deze gebeurtenis te verduidelijken, zijn de neerslagstations vervangen door naburige weerstations waar tijdens de piek van de gebeurtenis minder neerslag viel. Voor de sub-stroomgebieden van Stadtlohn en Rekken zijn Coesveld en VredenKA vervangen door BorkenKA en Neerslagmeter Haart. De cumulatief gemeten neerslag voor deze vier neerslag stations is te zien in Afbeelding 4. Hierdoor ontvangt WALRUS dus te weinig water om de afvoerpiek goed te kunnen simuleren en wordt de data-assimilatie gedwongen water aan het model toe te voegen. In dit voorbeeld wordt nagegaan of toestand-updating het model zodanig kan bijstellen dat de afvoerverwachting betrouwbaar blijft.

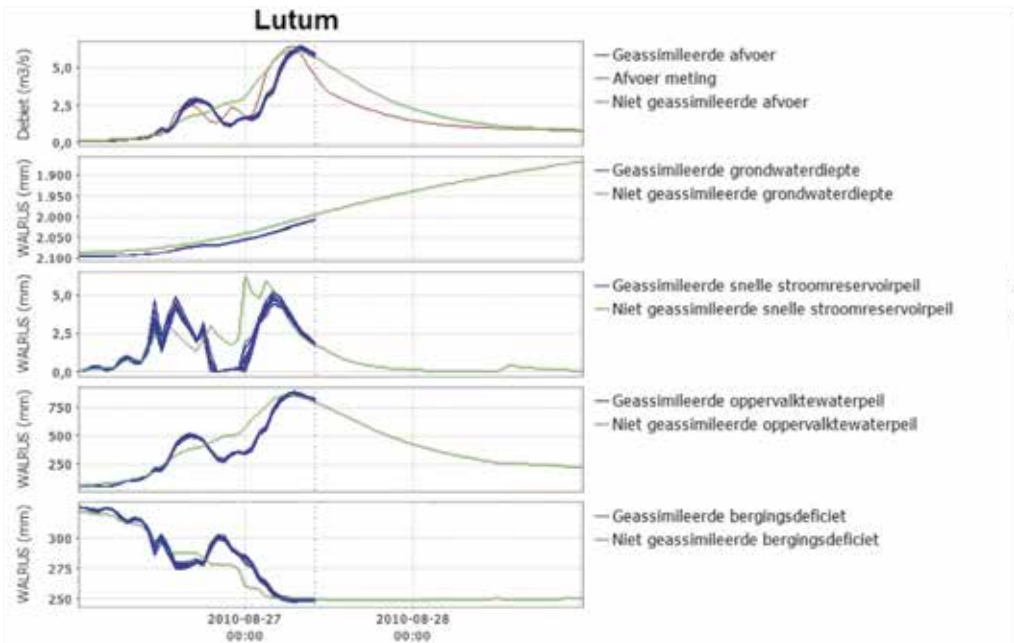


Afbeelding 4 Links: Afvoermetingen en resultaten van het semi-gedistribueerde Berkel model bij meetlocatie Rekken. Deze resultaten zijn gegenereerd met de best passende neerslag input (Coesfeld en VredenKA) voor de bovenstreams liggende WALRUS-deelstroomgebieden. Dit model is gesimuleerd zonder data-assimilatie. Rechts: Cumulatieve neerslag op 26 en 27 augustus 2010 voor neerslag stations Coesveld, VredenKA, BorkenKA en Neerslagmeter Haart.

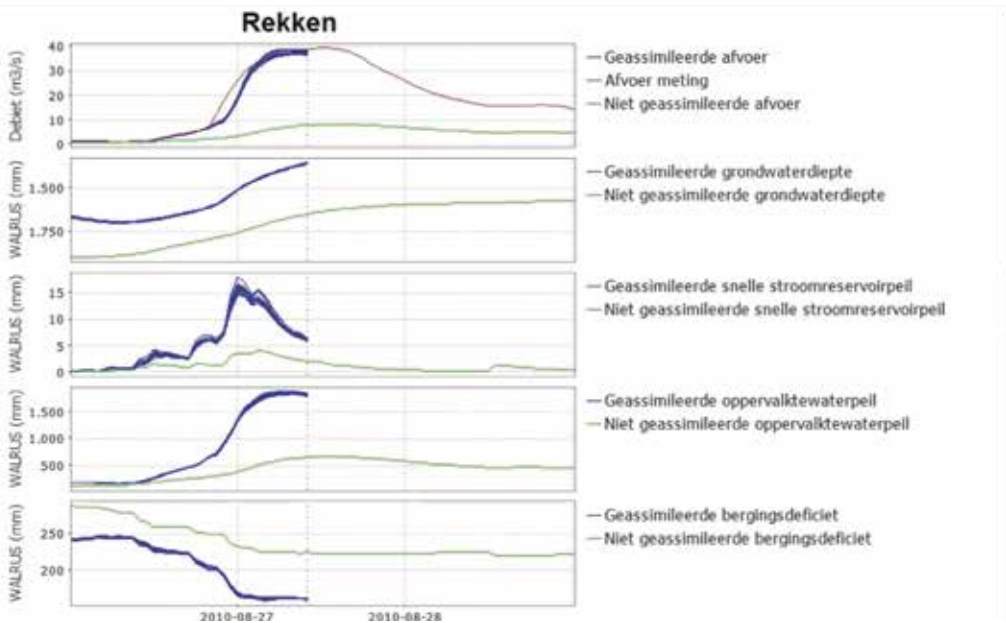
Resultaten

De hier gepresenteerde uitkomsten beperken zich tot het stroomgebied van de Boven-Berkel en omvatten de deelstroomgebieden Lutum, Stadtlohn en Rekken. Afbeelding 5 en Afbeelding 6 tonen de uitkomsten van de Lutum- en Rekken-deelstroomgebieden. Deze afbeeldingen laten het verschil zien tussen het niet-geassimileerde en het geassimileerde model. Het niet-geassimileerde model simuleerde de afvoer voor het deelstroomgebied Lutum (Afbeelding 5) met weinig afwijking. Deze goede prestatie resulteerde in kleine aanpassingen van de interne modeltoestanden. Dit was te verwachten, aangezien het model nauwelijks hoeft te worden aangepast wanneer sprake is van kleine afwijkingen.

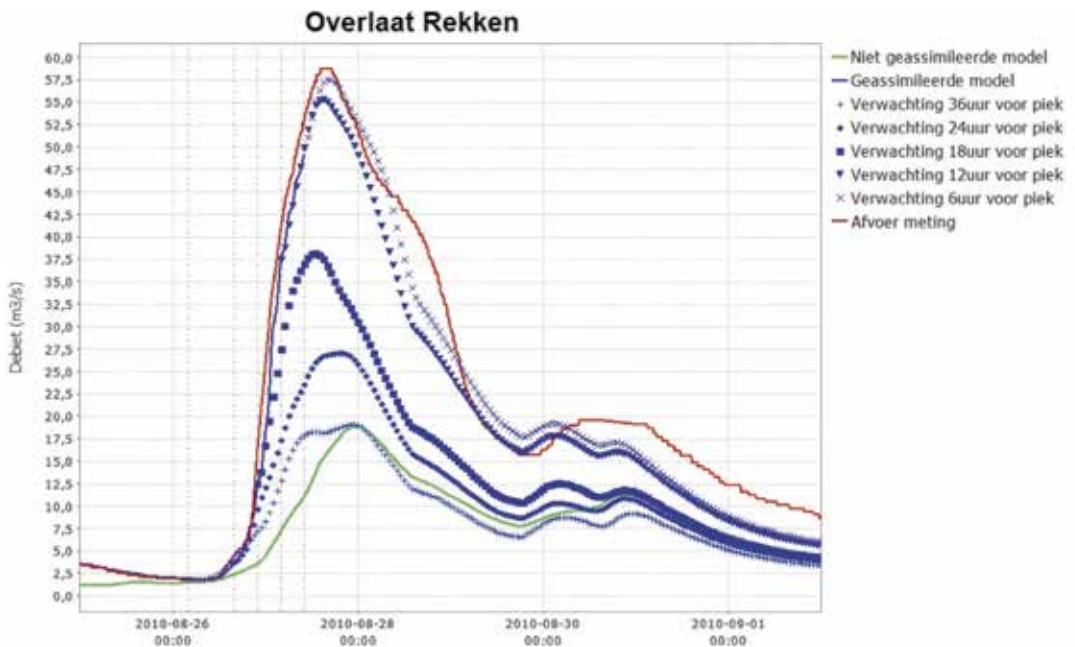
Het deelstroomgebied Rekken vertoont aanzienlijk meer fouten tussen het niet-geassimileerde model en de metingen: 32 m³/s verschil op de piekafvoer (Afbeelding 6). Afbeelding 6 laat zien dat DEnKF water heeft toegevoegd aan alle vier de modeltoestanden tijdens de aanloop van de golf.



Afbeelding 5 Afvoermetingen van Lutum en modelresultaten van Lutum WALRUS-model. Rood: gemeten afvoer bij Lutum. Groen: Niet geassimileerde modelresultaten voor zowel de modelafvoer als de interne modeltoestanden. Blauw: Modelresultaten van geassimileerde model ensemble voor zowel de modelafvoer als de interne modeltoestanden.



Afbeelding 6 Afvoermeting van deelstroomgebied Rekken en modelresultaten van Rekken WALRUS-model. Rood: gemeten afvoer voor Rekken. Groen: Niet geassimileerde modelresultaten (Openloop) voor zowel de modelafvoer als de interne modeltoestanden. Blauw: Modelresultaten van geassimileerde model ensemble voor zowel de afvoer als de interne modeltoestanden.



Afbeelding 7 Semi-gedistribueerde modelresultaten op de Rekken afvoer-meetlocatie. Neerslag invoerdata voor deze simulatie maken gebruik van nabijgelegen stations waarin aanzienlijk minder neerslag is gemeten. Deze afbeelding laat zien hoe DEnKF extra water toevoegt aan de modelmodeltoestanden zodat de fout tussen het model en de metingen wordt gecorrigeerd. Deze correctie leidt tot betere modelverwachting.

Afbeelding 7 toont de afvoerwaarnemingen bij Rekken samen met de modelresultaten op dezelfde locatie. De modelresultaten omvatten de niet-geassimileerde simulatie en de geassimileerde modelresultaten. Met de geassimileerde modeltoestanden als startconditie werd een reeks van vijf (historische) verwachtingen gegenereerd. Vanaf het moment dat een verwachting werd gemaakt is geen updating toegepast. De verwachtingsintervallen zijn 36, 24, 18, 12 en 6 uur voor de piek.

Zoals verwacht verbeteren de modelverwachtingen sterk door toepassingen DEnKF. De oorspronkelijke verwachting voor 36 uur voor de piek vertoont een verbetering van het geschatte piekmoment maar de piekhoogte is nog veel te laag. Dit is te verwachten omdat de modelinvoer (neerslag) veel kleiner is dan de werkelijke gevallen neerslag, wat een onderdeel was van deze test. Naarmate de tijd tot de piek afneemt komt de verwachting qua golfvorm, de timing en de piekhoogte steeds dichterbij de uiteindelijke meting te liggen doordat DEnKF water toevoegt in de verschillende modelonderdelen. DEnKF bepaalt hierbij zelf hoeveel water er toegevoegd wordt in de vier modelonderdelen om een optimale overeenkomst te krijgen met de afvoermetingen. Dit voorbeeld laat zien dat toestand-updating goed werkt. Merk op dat in dit voorbeeld de toekomstige neerslag als bekend wordt verondersteld, maar dat dat in werkelijkheid niet het geval is en de modelverwachtingen dan meer afwijken van de metingen.

Discussie

Onzekerheid in input verwachtingen

De resultaten in deze en vergelijkbare projecten (bijvoorbeeld Sun e.a. (2020), Van Osnabrugge (2020) en Valk (2019)) laten de voordelen zien van EnKF's en toestand-updating bij het genereren van hoogwaterverwachtingen. Het is belangrijk om te erkennen dat onzekerheid in modelinvoer en dan met name de weersverwachtingen een beperkende factor blijft in deze verwachtingssystemen. De onzekerheid in de weersverwachtingen is echter redelijk goed bekend via modelensembles uit de weermodellen en kan dus worden vertaald naar onzekerheden in de waterafvoer- en waterstandsverwachtingen zoals is gedaan in BOS-Berkeel.

Toevoegen van ruis in DA

In de gebruikte data-assimilatiemethode is onzekerheid (ruis) opgelegd aan de neerslagwaarnemingen. De gebruikte toestand-updating is vervolgens een doeltreffende manier gebleken om de startcondities voor een hoogwaterverwachting te genereren. Deze aanpak kan echter beperkend werken in droge perioden omdat het model dan geen neerslag en dus ook geen ruis bevat om de interne modeltoestanden te assimileren. Dit kan ook gebeuren in perioden waarin wel regen valt, maar deze niet wordt geregistreerd door storingen in het meetsysteem. Deze beperkingen kunnen enigszins worden ondervangen door ruis toe te voegen aan de modeltoestanden, of extra ruis aan de evapotranspiratie. Het is aan te bevelen om een systematiek/configuratie hiervoor te bedenken zodat data-assimilatie ook in droge perioden de modelsimulaties blijft corrigeren.

DA versus kwaliteit NA-modellen

Het doel van de in dit project toegepaste data-assimilatie is het bijstellen van de modeltoestanden om het verschil tussen de modelsimulaties en de waarnemingen te verkleinen. Zodoende komen metingen en modelverwachtingen beter overeen. Er zijn echter beperkingen in wat data-assimilatie nog kan corrigeren. De basis is dan ook een goed gekalibreerd neerslagafvoermodel, waarbij data-assimilatie slechts de relatief kleine modelafwijkingen corrigeert. In dit project bleek WALRUS goed in staat het hydrologische proces in laaglandgebieden conceptueel na te bootsen.

Conclusies

Dit artikel en het uitgevoerde onderzoek laten zien dat het WALRUS NA-model geschikt is voor de simulatie van het neerslagafvoerproces van laaglandbeken zoals bij Waterschap Rijn en IJssel. WALRUS is daarnaast snel genoeg voor operationele toepassingen in een hoogwaterverwachtingssysteem. Daarnaast blijkt de grote meerwaarde van de DEnKF data-assimilatie. Zelf bij grote afwijkingen van de neerslaghoeveelheden worden de modelverwachtingen op een realistische manier gecorrigeerd. Er is geen vergelijking gemaakt met de ARMA-data-assimilatie methode maar conceptueel lijkt DEnKF duidelijk in staat tot een betere updating van de modelverwachtingen. We bevelen dan ook van harte aan om DEnKF vaker te gaan toepassen in de waterschapswereld. Gebruik van DEnKF wordt hierbij vergemakkelijkt via het OpenDA platform dat is ontwikkeld door universiteiten en onderzoeksinstituten.

Software beschikbaarheid en overige informatie:

- OpenDA software is gratis beschikbaar via <https://github.com/OpenDA-Association/OpenDA> (GNU Lesser General Public License v.3.0).
- Informatie over Delft-FEWS is beschikbaar op <https://publicwiki.deltares.nl/> en <https://oss.deltares.nl/web/delft-fews>
- Walrus software is gratis beschikbaar via <https://github.com/ClaudiaBrauer/WALRUS> (GNU General Public License v.3.0).

Literatuur

- Brauer, C.C., A.J. Teuling, P.J.J.F. Torfs en R. Uijlenhoet** (2014a) The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater; in: *Geoscientific Model Development*, vol 7, pag 2313-2332.
- Brauer, C.C., P.J.J.F. Torfs, A.J. Teuling en R. Uijlenhoet** (2014b) The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): application to the Hupsel Brook catchment and Cabauw polder; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 18, pag 4007-4028.
- Liu, Y., A.H. Weerts, M. Clark, H.J. Hendricks Franssen, S. Kumar, H. Moradkhani, D.J. Seo, D. Schwanenberg, P. Smith, A.I.J.M. Van Dijk en N.V. Velzen** (2012) Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: Progresses, challenges, and emerging opportunities; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 16, pag 3863-3887.
- Nash, J. E. en J. V. Sutcliffe** (1970) River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles; in: *Journal of hydrology*, vol 10, pag 282-290.
- Rakovec, O., A.H. Weerts, P. Hazenberg, P.J.J.F. Torfs en R. Uijlenhoet** (2012) State updating of a distributed hydrological model with Ensemble Kalman Filtering: effects of updating frequency and observation network density on forecast accuracy; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 16, pag 3435-3449.
- Sakov, P. en P.R. Oke** (2008) A deterministic formulation of the ensemble Kalman filter: an alternative to ensemble square root filters; in: *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol 60, pag 361-371.
- Sun, Y., W. Bao, K. Valk, C. C. Brauer, J. Sumihar, en A.H. Weerts** (2020) Improving forecast skill of lowland hydrological models using ensemble Kalman filter and unscented Kalman filter; in: *Water Resources Research*, vol 56, pag e2020WR027468.
- Valk, K.** (2019) State updating for improving flood forecast accuracy in lowland catchments with WALRUS (Niet gepubliceerd master's thesis). Wageningen University, Wageningen, Nederland.
- Van Osnabrugge, B** (2020) Assimilation of streamflow in a distributed hydrological model for Rhine tributaries: comparison of forecast skill between state updating and post- processing; in: *Interpolate, Simulate, Assimilate: operational aspects of improving hydrological forecasts in the Rhine basin*, pag 125.
- Werner, M., J. Schellekens, P. Gijssbers, M. van Dijk, O. van den Akker en K. Heynert** (2013) The Delft-FEWS flow forecasting system; in: *Environmental Modelling & Software*, vol 40, pag 65-77.

Summary Modern data-assimilation in operation flood forecasting systems

Flood early warning systems (FEWS) are utilized throughout the Netherlands to minimise the effects of peak water levels in river systems. For many of these systems, this is achieved by forecasting water movement in hydrologic and hydraulic models using short- and medium-term meteorological projections. These systems can be configured in a variety of ways. In essence they must provide accurate water level forecasts under any environmental condition. A long history of river flooding in the Berkel catchment in the east of the Netherlands and western Germany has resulted in the need for an accurate and reliable FEWS. To achieve this, the lowland rainfall-runoff model WALRUS was applied to generate discharge forecasts. The semi- distributed model set-up was designed and calibrated to ensure the spatial and temporal elements of peak discharges are captured. Additionally, recent advancements in data assimilation were implemented in the Berkel FEWS to strengthen the accuracy of flood forecasts. The data assimilation method uses state updating to account for errors in the model domain and in the model forcings. In this article, a description of the rainfall-runoff model set-up and its performance is given, as well as a summary of the data-assimilation configuration in the Berkel FEWS. Finally, a practical example is presented to illustrate how data-assimilation can improve forecast performance during extreme discharge events. This project demonstrates the potential of modern data assimilation methods in operational flood management in the Netherlands.

Auteurs

EOIN BURKE

Fluid hydrology

Eoin.Burke@fluidhydrology.com

GERT VAN DEN HOUTEN

Waterschap Rijn en IJssel

G.vandenhouten@wrij.nl

ALBRECHT WEERTS

Deltares / Wageningen University

Albrecht.Weerts@deltares.nl

BART VAN OSNABRUGGE

Deltares

Bart.vanOsnabrugge@deltares.nl