
De Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): een snel neerslag-afvoermodel speciaal voor laaglandstroomgebieden¹

Claudia Brauer, Paul Torfs, Ryan Teuling en Remko Uijlenhoet¹

De Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS) is een nieuw neerslag-afvoermodel dat het gat moet vullen tussen complexe, ruimtelijk gedistribueerde modellen die vaak gebruikt worden in laaglandstroomgebieden en simpele, ruimtelijk geïntegreerde, parametrische modellen die voornamelijk zijn ontwikkeld voor hellende stroomgebieden. WALRUS houdt expliciet rekening met hydrologische processen die belangrijk zijn in laaglandgebieden, in het bijzonder (1) de koppeling tussen grondwater en onverzadigde zone, (2) vochttoestandafhankelijke stroomroutes, (3) grondwater-oppervlaktewater-terugkoppeling en (4) kwel, wegzijging en het inlaten of wegpompen van oppervlaktewater. WALRUS bestaat uit een gekoppeld reservoir voor grondwater en onverzadigde zone, een reservoir voor snelle stroomroutes en een oppervlaktewaterreservoir. Het is geschikt voor operationele toepassingen omdat het efficiënt rekent en numeriek stabiel is. In de vrij toegankelijke modelcode zijn standaardrelaties geïmplementeerd, zodat er slechts vier parameters overblijven die gekalibreerd hoeven te worden. Het model is geschikt voor het operationeel simuleren van hoogwater en droogte ten behoeve van risico-analyses en scenario-analyses, voor het ontwerpen van infrastructuur en voor het aanvullen van ontbrekende gegevens in afvoermeetreeksen.

Inleiding

Voor het modelleren van afvoer uit een stroomgebied zijn veel verschillende hydrologische modellen, met verschillende mate van complexiteit beschikbaar. De geschikte mate van complexiteit hangt af van het doel van de studie en het stroomgebied waarop het model wordt toegepast. Tussen gedetailleerde, ruimtelijk gedistribueerde modellen (zoals SHE) en black-box-modellen (zoals de unit hydrograph of neurale netwerken) ligt de klasse van parametrische neerslag-afvoermodellen. In deze modellen worden hydrologische systemen gesimplificeerd tot een verzameling reservoirs en stroomroutes, waarmee de essentie van de hydrologische processen wordt gevangen, terwijl het aantal parameters beperkt blijft. Veelgebruikte parametrische modellen zijn PDM, HBV, het Sacramento Model, ARNO, SWAT en GR4J. Deze modellen zijn echter allemaal ontwikkeld voor hellende stroomgebieden en kunnen verkeerde resulta-

¹ Dit artikel is deels gebaseerd op de Engelstalige publicaties van Brauer e.a. (2014a,b)

² Wageningen Universiteit, Wageningen (claudia.brauer@wur.nl)

ten geven voor laaglandstroomgebieden, omdat essentiële processen, zoals capillaire opstijging en grondwater-oppevlaktewaterinteracties, niet worden meegenomen. Een parametrisch model dat wél voor (vrij-afwaterende) laaglandstroomgebieden is ontwikkeld, is het Wageningen Model (Stricker en Warmerdam, 1982), dat door meerdere waterschappen gebruikt wordt vanwege de eenvoud en korte rekentijd. Dit parametrische model neemt enkele laaglandspecifieke hydrologische processen mee, zoals capillaire opstijging en een dynamische verdeling tussen snelle en langzame stroomroutes als functie van de vochttoestand van het stroomgebied (Van Walsum, 1981). Aan de andere kant zijn andere laaglandspecifieke hydrologische processen niet meegenomen in het Wageningen Model: de onverzadigde zone is losgekoppeld van het grondwater en er is geen oppervlaktewatercomponent, waardoor er geen interactie mogelijk is tussen grondwater en oppervlaktewater. Bovendien gaven gebruikers een aantal serieuze tekortkomingen aan, van zowel numerieke als conceptuele aard. In reactie op deze vraag hebben wij de Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS) ontwikkeld: een compleet nieuw parametrisch model om de afvoer uit laaglandstroomgebieden te simuleren, met dezelfde mate van complexiteit als het Wageningen Model, maar zonder de genoemde tekortkomingen. In dit artikel beschrijven wij hoe wij op basis van literatuur over modeltypes enerzijds en veldmetingen anderzijds zijn gekomen tot de uiteindelijke modelstructuur, welke resultaten daarmee behaald zijn en wat de toegevoegde waarde van WALRUS kan zijn voor het Nederlandse waterbeheer. Voor meer details (referenties, modelvergelijkingen, validatiestudies, gevoeligheidsanalyses, etc.) verwijzen wij naar Brauer e.a. (2014a,b).

Waarom opnieuw een parametrisch neerslag-afvoermodel?

Waterbeheerders in laaglandgebieden gebruiken vaak relatief complexe hydrologische modellen, bijvoorbeeld omdat er ruimtelijk gedistribueerde resultaten nodig zijn of omdat er gedetailleerde informatie nodig is over één of meerdere hydrologische variabelen. MIKE-SHE, HEC-RAS en SOBEK hebben gedetailleerde schematisaties van oppervlaktewaternetwerken om de complexe stroomroutes in intensief gedraineerde gebieden te kunnen simuleren. HYDRUS en SWAP hebben gedetailleerde verticale schematisaties om de koppeling tussen grondwater en onverzadigde zone te kunnen simuleren. Regionale grondwatermodellen zoals MODFLOW en GSFLOW nemen kwel, wegzijging en laterale grondwaterstroming mee. Tot slot zijn er modellen die verschillende van de bovenstaande modelconcepten combineren, zoals SHE, HydroGeoSphere, ParFlow, SIMGRO en NHI, en dus gebruikt kunnen worden voor grondwater-oppevlaktewaterinteracties.

Voor het voorspellen van de afvoerespons van een stroomgebied, gaat de voorkeur echter regelmatig uit naar een simpeler model. De vier belangrijkste aspecten die ons hebben gemotiveerd om een zo eenvoudig mogelijk neerslag-afvoermodel te ontwikkelen, worden in de volgende paragrafen behandeld.

Overparameterisatie

Verschillen in responstijden en recessievormen tussen stroomgebieden met dezelfde dominante processen (gerepresenteerd door de modelstructuur) worden uitgedrukt in de modelparameters, die worden geschat door kalibratie op afvoermetingen. Met

te veel parameters kan een ongeschikte modelstructuur worden gecamoufleerd. Een overgeparameteriseerd model kan goed presteren tijdens de kalibratie maar onvoldoende tijdens de validatie of in andere (toekomstige) klimaatregimes of landgebruikscenario's.

Parameteridentificatie

Het risico op parameterafhankelijkheid en equifinaliteit (waarbij verschillende combinaties van parameterwaarden leiden tot vergelijkbare resultaten) neemt toe met het aantal parameters. Met één doelfunctie kunnen typisch drie tot vijf parameters geïdentificeerd worden. Kalibratie op meerdere doelfuncties (zogenaamde multi-objective calibration) staat meer parameters toe, maar voor veel stroomgebieden zijn alleen afvoerdata beschikbaar. Het is daarom van belang om het effect van elke parameter te kunnen identificeren in de gemodelleerde afvoertijdreeks.

Fysische representatie

Een simpele, parametrische modelstructuur maakt het voor gebruikers mogelijk om snel te begrijpen welke processen een modelement omvat. Waarden van effectieve modelparameters in parametrische modellen kunnen over het algemeen niet worden bepaald met puntmetingen, maar modelparameters van de betere parametrische modellen hebben wel fysische connotaties en kunnen kwalitatief worden uitgelegd op basis van stroomgebiedseigenschappen en veldervaring. Het effect van heterogeniteit van processen op kleine schaal wordt impliciet meegenomen in de modelparameters.

Praktische toepasbaarheid

Rekentechische efficiëntie maakt operationele (ensemble) voorspelling en data-assimilatie mogelijk. Met parametrische modellen kunnen ensembles worden gegenereerd voor verschillende invoerreeksen of parametersets om de voorspelonzekerheid aan te geven. Bovendien kunnen meer complexe en tijdrovende algoritmes worden gebruikt voor kalibratie of de schatting van parameteronzekerheid (DREAM, GLUE). Het omzeilen van de noodzaak om een model op te zetten met dwarsdoorsnedes van waterlopen en individuele bodemlagen voor elk stroomgebied bespaart ook tijd.

Welke hydrologische processen willen we kunnen modelleren?

In deze paragraaf beschrijven we enkele karakteristieken die de hydrologische processen in laaglandgebieden kenmerken en hoe die kunnen worden weergegeven in parametrische modellen. Deze processen vormen de basis voor het nieuw ontwikkelde model.

Koppeling tussen grondwater en onverzadigde zone

In de meeste parametrische neerslag-afvoermodellen wordt aangenomen dat percolatie naar het grondwater alleen bepaald wordt door gravitatie, terwijl in laaglandgebieden het bodemvochtprofiel sterk beïnvloed wordt door ondiep grondwater. Percolatie is trager en verdamping blijft hoog in droge periodes doordat vochttekorten worden aangevuld door capillaire opstijging. Daardoor zijn de onverzadigde zone en de grondwaterzone een sterk gekoppeld systeem en moeten terugkoppelingsmechanismen worden meegenomen in hydrologische modellen voor laaglandstroomgebieden.

Bovendien krimpen onverzadigde zone en bergingscapaciteit wanneer het grondwater stijgt. Het is daarom belangrijk om een dynamische onverzadigde zone te gebruiken in dergelijke modellen, die zowel wordt beïnvloed door de fluxen aan het maaiveld (neerslag en verdamping) als door het grondwater.

Vochttoestandsafhankelijke stroomroutes

Wanneer het vochtgehalte in de bodem toeneemt, worden verschillende stroomroutes geactiveerd: eerst grondwaterstroming, dan macroporiën en drainagebuizen en uiteindelijk oppervlakte-afvoer. De bijdrage van preferentiële stroming zoals macroporiestroming kan aanzienlijk zijn en moet in de modelstructuur worden meegenomen. Drainagebuizen, die kunnen worden gezien als kunstmatige macroporiën, kunnen tot 80% van de drainage voor hun rekening nemen (Van der Velde e.a., 2011). Wanneer lokaal bergingsdrempels worden overschreden en snelle stroomroutes worden geactiveerd, ontstaat een abrupte stijging in lokale afvoer. Op stroomgebiedsschaal worden zulke abrupte veranderingen in afvoer echter bijna nooit waargenomen, omdat ruimtelijke variatie in grondwaterdiepte, in drainage diepte en in microtopografie ervoor zorgen dat deze drempels op verschillende momenten worden bereikt. Dit hebben wij bijvoorbeeld geconstateerd bij de overstrooming van de Hupselse Beek in augustus 2010 (Brauer e.a., 2011).

Grondwater-oppervlaktewaterterugkoppeling

Oppervlaktewater is een belangrijk kenmerk van laaglandlandschappen en beïnvloedt grondwaterpeilen, vooral in polders, waar het doel is om grondwaterstanden te optimaliseren door oppervlaktewaterpeilen te beheersen. In vrij-afwaterende gebieden komen grondwater-oppervlaktewaterterugkoppelingen vooral voor tijdens afvoerpieken, als hoge oppervlaktewaterpeilen drainage kunnen beperken of zelfs infiltratie kunnen veroorzaken.

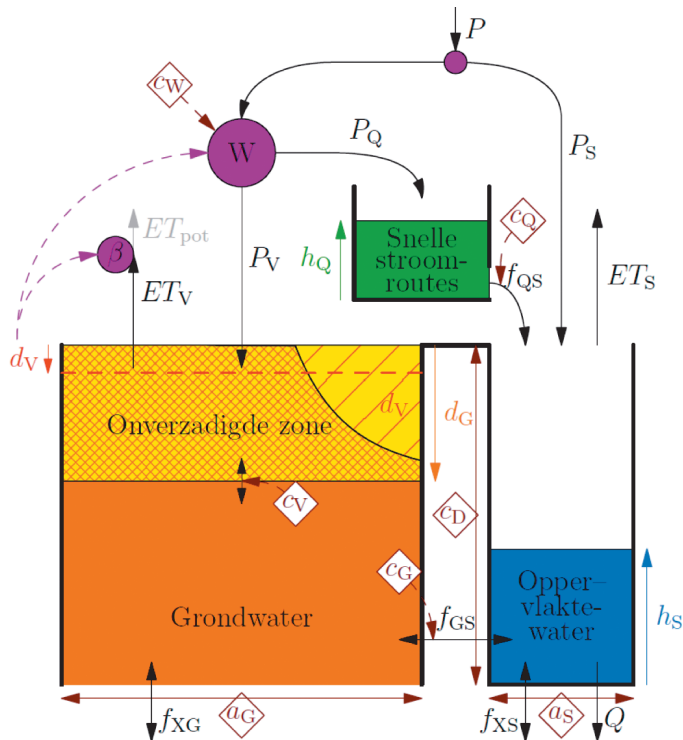
Kwel, wegzijging en het inlaten of wegpompen van oppervlaktewater

Stroomgebieden in laaglandgebieden zijn vaak niet hermetisch afgesloten. Regionale grondwaterstroming komt veel voor en kwel en wegzijging kunnen aanzienlijke termen in de waterbalans zijn. Oppervlaktewaterpeilen worden gehandhaafd met stuwen en door het inlaten en wegpompen van water. Deze kunstmatige waterstromen hebben een dermate grote invloed op het hydrologische systeem dat het noodzakelijk is deze in de modelstructuur van parametrische modellen voor laaglandstroomgebieden op te nemen.

Modelstructuur van WALRUS

Het bovenstaande indachtig en rekening houdend met het doel (afvoeren simuleren) en de stroomgebieden waarop het toegepast zou gaan worden (laaglandgebieden, zowel polders als vrij-afwaterend), hebben wij WALRUS (Wageningen Lowland Runoff Simulator) ontwikkeld. WALRUS bestaat uit drie reservoirs (afbeelding 1): een gekoppeld reservoir voor grondwater en onverzadigde zone, een reservoir voor snelle stroomroutes en een oppervlaktewaterreservoir (dat voornamelijk de secundaire waterlopen vertegenwoordigt).

Regenwater (P) wordt verdeeld over de verschillende reservoirs: een vaste fractie gaat naar het oppervlaktereservoir (P_s) en de natheidsindex (W) bepaalt welke fractie van



Afbeelding 1: Schematische weergave van de modelstructuur van WALRUS met de vijf domeinen (naar Brauer e.a., 2014a): op/boven maaiveld (paars), onverzadigde zone (geel/rood), grondwaterreservoir (oranje), reservoir voor snelle stroomroutes (groen) en oppervlaktewaterreservoir (blauw). De fluxen zijn weergegeven in zwart, modelparameters in bruin en de toestandsvariabelen in de kleur van het betreffende reservoir (voor een complete beschrijving van alle modelvariabelen, zie Brauer, 2014a). De namen van de fluxen zijn afgeleid van de reservoirs (bijvoorbeeld f_{XS} : f staat voor stroming, de X voor extern en de S voor oppervlaktewater, kortom: water dat van buiten het stroomgebied het oppervlaktewaterennetwerk in stroomt).

de overige neerslag langzaam door de bodemmatrix percoleert (P_V) en welke fractie naar het oppervlaktewater stroomt via snelle stroomroutes (P_Q). Water verdwijnt door verdamping vanuit de onverzadigde zone (ET_V) en het oppervlaktewaterreservoir (ET_S). De onverzadigde zone is het bovenste deel van het bodemreservoir en strekt zich uit van het maaiveld tot aan de dynamische grondwaterspiegel (d_G). De vochttoestand (eigenlijk droogtegraad) van de onverzadigde zone wordt gekarakteriseerd door één toestandsvariabele: het bergingsdeficiet (d_V), die de effectieve dikte van lege poriën weergeeft (of de hoeveelheid water die nodig is om het profiel te verzadigen). Het bergingsdeficiet bepaalt de verdampingsreductie (β) en de natheidsindex (W).

Het freatische grondwater strekt zich uit van de grondwaterdiepte (d_G) omlaag, waarbij wordt aangenomen dat er geen ondiepe ondoorlatende laag is en het mogelijk is dat de grondwaterspiegel in droge periodes tot onder de beek- of slootbodem (c_D) zakt. De grondwaterspiegel reageert op veranderingen in het bergingsdeficiet en bepaalt samen met het oppervlaktewaterpeil de drainage van grondwater of de infiltratie van oppervlaktewater (f_{GS}). WALRUS is het eerste parametrische model dat de

koppeling tussen grondwater en oppervlaktewater expliciet meeneemt. Grondwaterdrainage wordt berekend uit het verschil tussen het grondwater- en oppervlaktewaterpeil, het contactoppervlak en een reservoircoëfficiënt. De berekening van oppervlaktewaterinfiltratie is identiek. Al het water dat niet door de bodemmatrix stroomt, gaat door het reservoir voor snelle stroomroutes naar het oppervlaktewater (f_{QS}). Dit reservoir vertegenwoordigt macroporiestroming door drainagebuizen, gangen van dieren en scheuren in de bodem, maar ook lokale plasvorming en oppervlakte-afvoer.

Het oppervlaktewaterreservoir heeft een ondergrens (de beekbodem; c_D), maar geen bovengrens. Afvoer (Q) wordt met een Q - h -relatie berekend uit het oppervlaktewaterpeil (h_s). Water kan worden toegevoegd aan of verwijderd uit de bodem door kwel/wegzijging (f_{xc}) en aan/van het oppervlaktewaterreservoir door inlaten of gemalen (f_{xs}). Voor een gedetailleerdere beschrijving, inclusief alle modelvergelijkingen, verwijzen wij naar ons (publiek toegankelijke) artikel (Brauer e.a., 2014a).

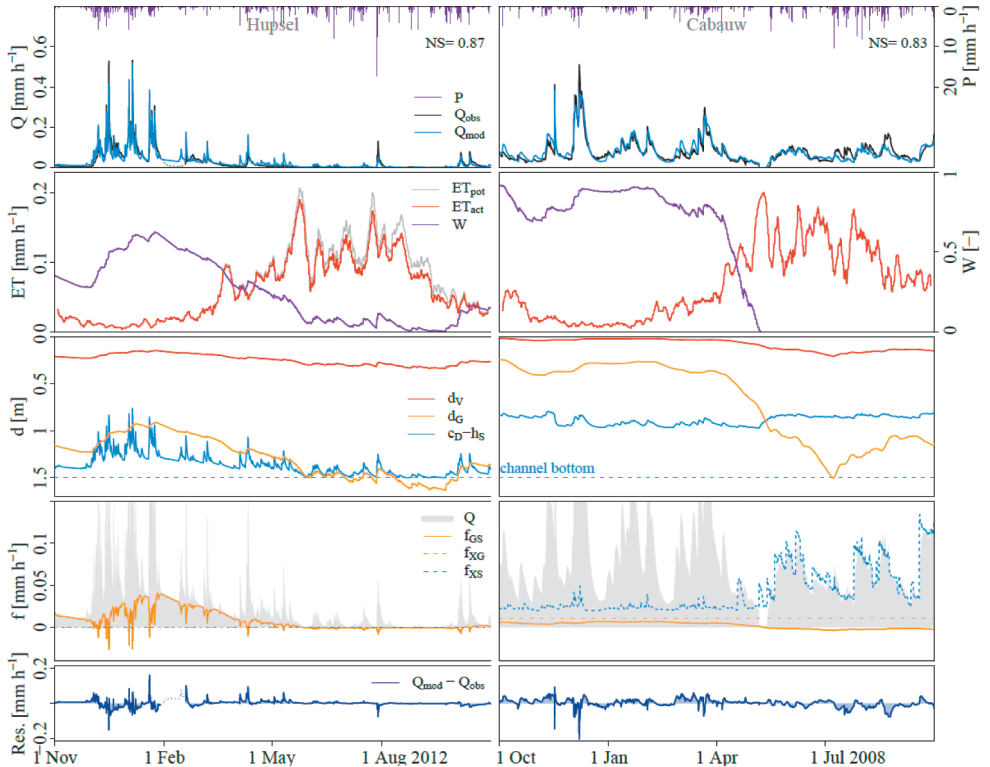
In de vrij toegankelijke modelcode zijn standaardrelaties geïmplementeerd, zodat er slechts vier parameters gekalibreerd hoeven te worden. Voor onderzoeksdoeleinden kunnen deze standaardrelaties gemakkelijk worden aangepast aan de lokale omstandigheden. Als input heeft WALRUS tijdseries nodig van neerslag, potentiële verdamping en, indien van toepassing, kwel of wegzijging en oppervlaktewateraanvoer.

Toepassing van WALRUS in experimentele stroomgebieden

In eerste instantie is WALRUS toegepast op twee contrasterende Nederlandse stroomgebieden: dat van de Hupselse Beek (6,5 km²) en de polder Cabauw (0,5 km²). In beide stroomgebieden presteert WALRUS goed, met Nash-Sutcliffe-efficiënties (NS) van 0.87 (Hupsel) en 0.83 (Cabauw) voor de kalibratieperiodes en 0.74 (Hupsel) en 0.76 (Cabauw) voor de validatieperiodes (alle periodes zijn een compleet jaar). De beperkte afname in prestatie geeft aan dat het model niet overgeparameteriseerd is.

Het model is ook in staat om afvoeren te simuleren in extreem natte (overstroming in 2010; NS=0.64) en droge (zomer 1976; NS=0.84) periodes in het stroomgebied van de Hupselse Beek. De gesimuleerde dynamiek van grondwater, bergingsdeficiet en snelle afvoerprocessen is realistisch. Door de dynamische verdeling tussen snelle en langzame stroomroutes die bepaald wordt door een natheidsindex, kunnen temporele en ruimtelijke variatie in grondwaterdieptes worden meegenomen, wat resulteert in een adequate simulatie van zowel hoge als lage afvoeren.

Als voorbeeld is de modeluitvoer van de kalibraties van het stroomgebied van de Hupselse Beek en polder Cabauw weergegeven in afbeelding 2. Het bovenste paneel toont de neerslag (P) en gemeten (Q_{obs}) en gemodelleerde afvoer (Q_{mod}). Het verschil in afvoerdynamiek tussen de twee gebieden is duidelijk zichtbaar. In februari 2011 was de bovenloop van de Hupselse Beek bevroren, wat de daling in gemeten afvoer veroorzaakte. Doordat WALRUS geen bevroren condities meeneemt (de huidige versie kan wel sneeuwsmelt simuleren; zie Wendt, 2015) neemt de gesimuleerde afvoer minder sterk af dan de gemeten.



Afbeelding 2: Modelresultaten voor het stroomgebied van de Hupselse Beek (linkerpanelen) en polder Cabauw (rechterpanelen) gedurende de kalibratieperiodes (naar Brauer e.a., 2014). Het gestippelde deel van de gemeten afvoer (Q_{obs}) in februari 2012 geeft een periode met vorst aan. De verdamping is voor de figuur gemiddeld over 5-dagen om te focussen op langetermijnverschillen tussen potentiële (ET_{pot}) en werkelijke verdamping (ET_{act}). Het oppervlaktewaterniveau (h_s) is gemeten ten opzichte van de beekbodem, terwijl de grondwaterdiepte (d_g) is gemeten ten opzichte van het maaiveld. De beekdiepte (c_p) relateert de twee aan elkaar. Het bergingsdeficiet (d_v) is niet een meetbare diepte, maar een effectieve dikte

In het tweede paneel staat de natheidsindex (W), die aangeeft welke fractie van de neerslag naar het reservoir voor snelle stroomroutes wordt geleid en een duidelijke seizoensgang vertoont. De werkelijke verdamping (ET_{act}) ligt in beide gebieden dicht bij de potentiële verdamping (ET_{pot}), wat overeenkomt met metingen in de Hupselse Beek (Stricker en Brutsaert, 1978) en de polder Cabauw (Brauer e.a., 2014b).

Het derde paneel toont het verloop van bergingsdeficiet (d_v), grondwaterdiepte (d_g) en oppervlaktewaterpeil (h_s) en hun afstand tot de beekbodem (c_p) en maaiveld. Hoewel de grondwaterstand beneden de beekbodem zakt (wat in werkelijkheid ook gebeurt), valt de Hupselse Beek niet helemaal droog doordat zowel afvoer als infiltratie van oppervlaktewater sterk afnemen bij lage waterpeilen. Gedurende veldbezoeken in de zomer hebben wij vaak gezien dat, terwijl het oppervlaktewater netwerk grotendeels droog is, er altijd nog wat water afgevoerd wordt bij het lozingspunt. De oppervlaktewaterstanden in de polder Cabauw zijn veel constanter dan die in de Hupselse Beek. Het inlaten van oppervlaktewaterinlaat voorkomt dat sloten droogvallen in de zomer. Bovendien is een vijf keer grotere fractie van het stroomgebiedsoppervlak bedekt met

oppervlaktewater in de polder Cabauw dan in het stroomgebied van de Hupselse Beek. Dat werkt als een buffer en absorbeert instroompieken veroorzaakt door regenbuien.

De gemodelleerde grondwaterdiepte vertoont seizoensvariatie, maar reageert niet sterk op regenbuien. In het model wordt het percolerende water sterk vertraagd in de onverzadigde zone en de dynamische respons op regen wordt gemodelleerd door het reservoir voor snelle stroomroutes. Vergelijking met waarnemingen van grondwater en bodemvocht is dus niet triviaal³. De grondwaterdiepte beïnvloedt wel de snelle reactie op regenbuien van het stroomgebied doordat, wanneer het grondwater ondiep zit, percolatie traag is en het bergingsdeficiet klein, resulterend in een hoge natheidsindex en een grote fractie van de neerslag die geleid wordt door het reservoir voor snelle stroomroutes.

Grondwaterdrainage (f_{GS} ; paneel 4) toont zowel snelle als langzame dynamiek. De seizoensvariatie in f_{GS} wordt veroorzaakt door de seizoensvariatie van de grondwaterstanden, die hoger zijn in de winter door een neerslagoverschot. De snelle afnames worden veroorzaakt door fluctuaties in oppervlaktewaterpeil, die snel stijgen en dalen na neerslaggebeurtenissen. Dit toont aan dat de grondwater-oppervlaktewater-terugkoppeling goed is geïmplementeerd: gedurende afvoerpieken wordt drainage beperkt door hoge oppervlaktewaterstanden.

Het voordeel van gedetailleerde grafische modeluitvoer, zoals in afbeelding 2, is dat de gebruiker inzicht kan krijgen in de totstandkoming van een bepaalde gesimuleerde afvoer en dus ook of dat plausibel is of dat de parameterwaarden moeten worden aangepast.

WALRUS in het waterbeheer

Na deze eerste toepassingen is WALRUS gebruiksvriendelijk gemaakt en is de functionaliteit uitgebreid om het model geschikt te maken voor operationeel gebruik binnen het Nederlandse (en eventueel buitenlandse) waterbeheer. Inmiddels is het neerslag-afvoermodel toegepast op 25 stroomgebieden (afbeelding 3) en wordt het bij vijf waterschappen gebruikt. Waterschap Rijn en IJssel was de eerste, door afvoeren berekend met WALRUS te gebruiken als invoer voor SOBEK (Ten Broek, 2014). Bij Waterschap Aa en Maas is WALRUS getest als onderdeel van een voorwaarschuwingssysteem voor hydrologische extremen, uitgevoerd door Slenters (2014), Hydroconsult en Hydro-lifeessentials. Waterschap De Dommel is een project gestart met Royal HaskoningDHV en HKV om voor alle deelstroomgebieden binnen het beheersgebied een WALRUS-model op te zetten. Loos (2015) kalibreerde alle deelstroomgebieden van Waterschap Vechtstromen voor toepassing in FEWS. Samen met Deltares wordt een zogenaamde adapter ontwikkeld waarmee WALRUS binnen FEWS gebruikt kan worden. Tenslotte heeft Bol (2015) WALRUS toegepast in een stroomgebied van Waterschap Noorderzijlvest, als onderdeel van een stage bij Witteveen+Bos. WALRUS wordt ook opgepakt in het buitenland en is toegepast in België, Turkije en China.

³ Grondwater-, bodemvocht- en oppervlaktewatergegevens van Cabauw kunnen worden gedownload uit de CESAR database: www.cesar-observatory.nl.



Afbeelding 3: Stroomgebieden waarop WALRUS is toegepast in en rond Nederland, met in het bijzonder het stroomgebied van de Hupselse Beek en de polder Cabauw. Een actueel overzicht staat op de GitHub-website (Brauer, 2016).

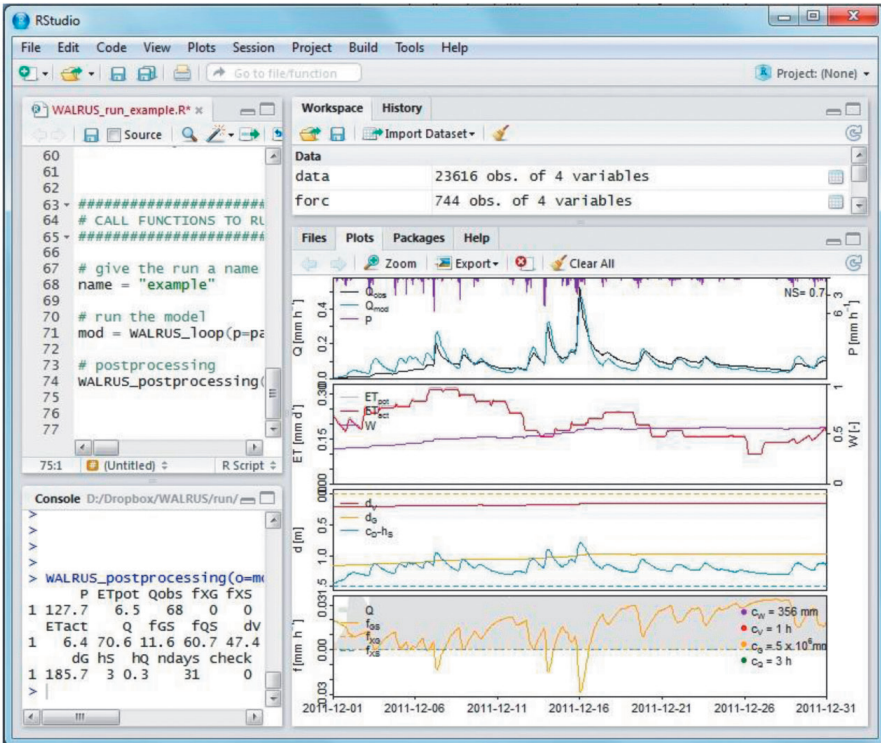
Zelf aan de slag

WALRUS is nu geprogrammeerd in de freeware programmeeromgeving R (zie ook onze R-introductie; Torfs en Brauer, 2014), maar de (beperkte hoeveelheid) modelvergelijkingen die samen WALRUS vormen, kunnen in elke andere taal worden geprogrammeerd. Om verspreiding en gebruik van WALRUS te vereenvoudigen, is de code gecompileerd tot een zogenaamde R-package. Bij het gebruiken van WALRUS en de package moet op een aantal zaken worden gelet. We hebben een handleiding geschreven waarin de belangrijkste onderwerpen uit de wetenschappelijke artikelen (Brauer e.a., 2014a; 2014b) worden aangehaald en waar het opzetten van een WALRUS-model voor een specifiek stroomgebied stap voor stap wordt beschreven (Brauer e.a., 2016) met voorbeelden (zoals afbeelding 4). De R-package, handleiding, voorbeelden en aanvullende documentatie is voor iedereen beschikbaar gemaakt op internet (Brauer, 2016). Wij moedigen iedereen aan om WALRUS uit te proberen, zijn altijd geïnteresseerd in toepassingen en krijgen graag feedback.

WALRUS is volledig open source (onder de GNU General Public Licence v3). Dat betekent dat iedereen alle modelcode kan bekijken en aanpassen. Wel is het belangrijk dat, wanneer modelvergelijkingen aangepast worden, duidelijk vermeld wordt wat er veranderd is ten opzichte van de originele code (om verwarring te voorkomen). Ook willen wij graag op de hoogte gehouden worden van ontwikkelingen, zodat wij veran-

deringen of uitbreidingen die voor een breder publiek nuttig zijn, kunnen implementeren in de code. Op de GitHub-website staat altijd de meest recente officiële versie.

Op 3 februari 2015 hebben wij een cursus gegeven, waarin 16 waterschappers, 18 adviseurs en 4 onderzoekers kennis hebben gemaakt met WALRUS en ermee hebben leren werken. Wij willen hier een jaarlijks terugkerende gebeurtenis van maken. De laatste WALRUS-gebruikersmiddag vond plaats op 10 maart 2016.



Afbeelding 4: Screenshot van WALRUS in RStudio (interface voor R), met linksboven het script waarin WALRUS wordt aangeroepen, linksonder de resulterende waterbalans, rechtsboven het werkgeheugen en rechtsonder de (standaard) grafische output.

Conclusie

WALRUS bevat de belangrijkste hydrologische processen die de neerslag-afvoerrelatie in laaglandstroomgebieden bepalen, terwijl de modelstructuur simpel blijft. WALRUS is een ruimtelijk geïntegreerd model dat bedoeld is voor gebruik op stroomgebiedsschaal en dus geen ruimtelijk verdeelde informatie geeft, maar heeft ook een aantal voordelen. WALRUS:

- is geschikt voor zowel vrij-afwaterende stroomgebieden als polders met kunstwerken, inlaten en pompen;
- kan zowel piekafvoeren als droogvallende beken simuleren met dezelfde parameters;
- rekent snel;

- heeft weinig parameters (4 moeten er gekalibreerd worden);
- heeft een duidelijke (kwalitatieve) relatie tussen modelonderdelen en meetbare grootheden;
- heeft standaardopties voor initiële condities en parameterisaties (die gemakkelijk kunnen worden aangepast voor onderzoekstoepassingen);
- is open source en freeware (geprogrammeerd in R).

Deze voordelen maken WALRUS geschikt voor het operationeel voorspellen van hoogwater en droogte, risico-analyses, scenario-analyses, ontwerpen van infrastructuur en het opvullen van gaten in afvoermeeetreeksen. De schematisatie van WALRUS leent zich ook goed voor (laterale) koppeling met naburige WALRUS-elementen tot een (semi-)gedistribueerd model (wij werken op dit moment aan zo'n gedistribueerde versie op basis van eindige volumes). Wij denken dat WALRUS door deze mogelijkheden een waardevolle aanvulling is op de bestaande hydrologische modellen voor de waterbeheerspraktijk en de wetenschap in laaglandstroomgebieden wereldwijd.

Dankbetuiging

Wij bedanken Piet Warmerdam en Han Stricker voor het delen van hun ervaringen met het Wageningen Model en Roel Velner, Frank Weerts, Esther Vermue, Jos Moorman, Jan Gooijer, Gert van den Houten, Marian Koskamp, Siebe Bosch en Ralph Pieters Kwiers voor hun suggesties voor de ontwikkeling en toepassing van WALRUS. De doorontwikkeling van WALRUS, de R-package, de handleiding en case studies zijn mede mogelijk gemaakt door financiële steun van de waterschappen De Dommel, Aa en Maas, Noorderzijlvest en Rijn en IJssel.

Literatuur

Bol, D.C.C. WALRUS hydrologische analyse van het Dwarsdiep, Groningen. Stagerapport (bij Witteveen + Bos), Wageningen Universiteit.

Brauer, C.C. (2016) Home page voor WALRUS; www.github.com/ClaudiaBrauer/WALRUS.

Brauer, C.C., A.J. Teuling, A. Overeem, Y. van der Velde, P. Hazenberg, P.M.M. Warmerdam en R. Uijlenhoet (2011) Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 15, pag 1991-2005, <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1991/2011/hess-15-1991-2011.pdf>.

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, www.geosci-model-dev.net/7/2313/2014/gmd-7-2313-2014.pdf.

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, www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/4007/2014/hess-18-4007-2014.pdf.

Brauer, C.C., P.J.J.F. Torfs, A.J. Teuling en R. Uijlenhoet (2016) The WALRUS User manual; Wageningen Universiteit, Version 1.05.

Ten Broek, J.M. (2014) Coupling WALRUS to SOBEK: Version 1.09 Wageningen Lowland Runoff Simulator to 1D open water model; Stagerapport (bij Waterschap Rijn en IJssel), Wageningen Universiteit.

Loos, R.E. (2015) Ontwikkeling van WALRUS-modellen voor FEWS Vecht; Tech. rep., Waterschap Vechtstromen.

Stricker, J.N.M. en P.M.M. Warmerdam (1982) Estimation of the water balance in the Hupselse Beek basin over a period of three years and a first effort to simulate the rainfall-runoff process for a complete year; in: *Proceedings of the International symposium on hydrological research basins and their use in water resources planning*, 21-23 September 1982, Bern, Switzerland, pag 379-388.

Torfs, P.J.J.F. en C.C. Brauer (2014) A (very) short introduction to R; Contributed document to R-project. cran.r-project.org/doc/contrib/Torfs+Brauer-Short-R-Intro.pdf

Slenters, V. (2014) WALRUS en WINFO: het simuleren van afvoeren voor een nieuw voorwaarschuwingssysteem; Stagerapport (bij Waterschap Aa en Maas), Wageningen Universiteit.

Stricker, J.N.M en W. Brutsaert (1978) Actual Evapotranspiration over a summer in the Hupsel Catchment; in: *Journal of Hydrology*, vol 39, pag 139-157.

Van der Velde, Y., J.C. Rozemeijer, G.H. de Rooij, F.C. van Geer, P.J.J.F. Torfs en P.G.B. de Louw (2011) Improving catchment discharge predictions by inferring flow route contributions from a nested-scale monitoring and model setup; in: *Hydrology and Earth Systems Sciences*, vol 15, pag 913-930.

Van Walsum, P.E.V. (1981) A simple model for the Hupselse Beek drainage-basin; MSc thesis, Wageningen Universiteit.

Wendt, D.E. (2015) Snow hydrology in the Netherlands: Developing snowmelt algorithms for Dutch regional water management modules; Stagerapport (bij HKV), Wageningen Universiteit.