

Gedistribueerde hydrologie o.b.v. Wflow in combinatie met D-HYDRO t.b.v. watersys- teemtoetsing

Pilot binnen TKI-III

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden



HydroLogic BV
Postbus 2177
3800 CD Amersfoort
033 4753535
hydrologic.nl

P1126
December 2021

HydroLogic

Inhoud

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 1 | Aanleiding en doelen..... | 1 |
| 1.1 | Aanleiding TKI-III | 1 |
| 1.2 | Doelen TKI-III | 1 |
| 1.3 | Doel van de pilot | 2 |
| 1.4 | Modelgebied | 3 |
| 2 | Modellen..... | 4 |
| 2.1 | Wflow modellen | 4 |
| 2.1.1 | Testen van de software | 4 |
| 2.1.2 | Kalibratie en validatie | 5 |
| 2.2 | D-HYDRO | 8 |
| 2.3 | Koppelingen Wflow - D-HYDRO | 9 |
| 2.3.1 | Laterals | 10 |
| 2.3.2 | Grondwater | 11 |
| 2.3.3 | Runoff | 12 |
| 3 | Resultaten..... | 13 |
| 3.1 | Maximale waterdiepten | 14 |
| 3.2 | Waterstanden bij gemaal De Tol | 15 |
| 3.3 | Rekentijden | 16 |
| 4 | Conclusies en aanbevelingen..... | 18 |
| 4.1 | Eisen van het hoogheemraadschap | 18 |
| 4.2 | Vervolgstappen & Aanbevelingen | 19 |
| 5 | Referenties..... | 21 |

Foto voorblad: Gemaal De Tol door Sam de Roover

© 2021, HydroLogic BV. Het auteursrecht op dit document berust bij HydroLogic BV. Het is niet toegestaan dit document aan derden ter beschikking te stellen of delen van de tekst te gebruiken zonder schriftelijke toestemming van HydroLogic BV.

1 Aanleiding en doelen

1.1 Aanleiding TKI-III

Waterschappen dragen met hun zorgtaak voor het regionale waterbeheer in grote mate bij aan een veilige en leefbare omgeving in Nederland. Hun taak voor het regionale waterbeheer moet worden afgestemd op de diverse maatschappelijke en economische functies binnen het gebied. Door klimaatverandering, bodemdaling en ontwikkelingen in de ruimtelijke ordening is deze zorgtaak continu aan veranderingen en uitdagingen onderhevig. Ter ondersteuning van het waterbeheer wordt door alle waterschappen gebruik gemaakt van simulatiesoftware. Deze simulatiesoftware moet voldoen aan de huidige wensen en eisen die aan deze software worden gesteld. Dit betekent onder andere: omgang met groter hoeveelheden gegevens in hoog detail niveau (big data), snelle en krachtige rekenalgoritmes (high performance computing), het nauwkeurig kunnen meenemen van alle relevante processen (integrale aanpak), schaalbaar in ruimte en tijd (multi-resolution) en het eenvoudig kunnen vertalen van modeluitkomsten naar begrijpelijke informatie voor stakeholders (visualisatie).

De huidige simulatiesoftware van veel waterschappen is de SOBEK-suite. De SOBEK-suite voldoet niet meer aan de huidige wensen en eisen die aan de software worden gesteld ter ondersteuning van het waterbeheer. Waterschappen en hun adviesbureaus hebben daarom de wens om over te stappen naar de beoogde opvolger van SOBEK, namelijk het 'state of the art' simulatiepakket D-HYDRO, omdat deze suite wel de mogelijkheden biedt van de huidige wensen en eisen. De D-HYDRO Suite is een open source modelleer platform voor watervraagstukken. De kern van de D-HYDRO Suite is het geheel vernieuwd hydrodynamisch rekenhart (D-Flow FM), dat in de afgelopen jaren is ontwikkeld met name voor Rijkswaterstaat toepassingen (rivieren en kust). Voor het regionale waterbeheer moeten er nog specifieke functionaliteiten en componenten toegevoegd en ontsloten worden om integrale gebiedsstudies mogelijk te maken. Regionale watersystemen onderscheiden zich namelijk door een sterk vermaasd waterloppennetwerk met vele kunstwerken (stuwten, duikers, gemalen, inlaten et cetera) en bovendien spelen er ander soort vraagstukken dan bij Rijkswaterstaat toepassingen.

In het TKI-III project nemen adviesbureaus en waterschappen het voortouw om de benodigde innovatieve modeltechnieken binnen de D-HYDRO Suite ook toepasbaar te maken voor het regionale waterbeheer.

1.2 Doelen TKI-III

Het overkoepelende doel is om integrale hydrologische modelanalyses te kunnen uitvoeren voor het regionale waterbeheer die aansluiten bij de eisen en wensen van deze tijd. Hiervoor is ontsluiting en ontwikkeling nodig van specifieke in het regionale waterbeheer toegepaste modeltechnieken binnen de D-HYDRO Suite.

Dit overkoepelende doel is terug te brengen tot de volgende subdoelen die we in dit project willen oppakken:

- Het uitbreiden van de ruimtelijk gedistribueerde neerslagafvoer concepten in of gekoppeld aan D-HYDRO;
- Het toevoegen van ontbrekende 1D functionaliteiten binnen het hydrodynamische rekenhart van D-Flow FM voor toepassingen binnen het regionale waterbeheer;
- Het automatische genereren van modellen uit basisdata, inclusief consistentiechecks en validatie, waarmee wordt aangesloten op bestaande methoden, datamodellen en standaarden zoals (HY)DAMO;
- Het uitbreiden van de analysemogelijkheden met D-HYDRO;
- Deze rekenkern functies en interfacing scripts via de grafische userinterface (GUI) van D-HYDRO voor de eindgebruiker toegankelijk maken;
- Ervaring opdoen met de nieuwe modeltechnieken aan de hand van een aantal pilots voor en met de drie deelnemende waterschappen.

1.3 Doel van de pilot

Het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden wil graag haar watersysteemanalyses (WSAs) innoveren door het gebruik van nieuw beschikbare software. Een belangrijk onderdeel bij het doen van WSAs is de bepaling van afstroom van neerslag. In de bestaande WSA-methodiek wordt hiervoor gebruik gemaakt van de SOBEK Rainfall-Runoff module (SOBEK RR).

In de nieuwe methodiek voor WSAs, waarbij Delft3D FM 1D2D (hierna: D-HYDRO) zal worden gebruikt, wilt het hoogheemraadschap op passende wijze de hydrologie van een gebied kunnen modelleren. Een kandidaat hiervoor (naast b.v. een 1-laags MetaSWAP-MODFLOW model) is de Deltares open source software Wflow (Deltares, 2021a, en Deltares, 2021b). Wflow is geen modelconcept op zich, maar een modelraamwerk, waarbinnen verschillende modelconcepten kunnen worden gebruikt naar gelang de wens van de modelleur. Voorbeelden van geïntegreerde modelconcepten zijn Topo-Flex (Savenije, 2010), SBM (Köhler, 2006) en HBV (Lindström et al, 1997), die de modellering van volledig gedistribueerde hydrologie mogelijk maken.

Het doel van de pilot is om de geschiktheid van Wflow (of een aangepaste versie ervan), gecombineerd met D-HYDRO 1D/2D en de stochastenmethode, te toetsen aan de normen voor wateroverlast op nauwkeurige en reken-efficiënte wijze. Hiervoor stelde het hoogheemraadschap een aantal eisen op, die kunnen worden samengevat als ruimtelijk gedifferentieerd, snel (met name vanwege het aantal door te rekenen stochasten bij de volgende toetsingsronde) en zo fysisch mogelijk gebaseerd rekenen aan de normen van wateroverlast, uitgaande van de stochastenmethode om te komen tot waterstandstatistiek. Idealiter zijn de modelresultaten van een zodanig formaat dat naast puntmonitoringdata ook vlakdekkende, op observaties gebaseerde informatie (zoals satelliet gebaseerde bodemvochtdata en Gt-kaarten) kunnen worden ingezet voor validatie, kalibratie, en -uiteindelijk- ook data-assimilatie. Data-assimilatie wordt bedoeld in een operationele of re-analyse context. Het volledige overzicht van de eisen en hoe Wflow/D-HYDRO hieraan voldoet, is gegeven in hoofdstuk 4.

Meerdere combinaties van Wflow/D-HYDRO zijn doorgerekend en vervolgens is bekeken welke combinaties van concepten en koppelmechanismen het beste past met de eisen van HDSR.

1.4 Modelgebied

Het modelgebied, waarop is gefocust tijdens deze pilot, is polder De Tol (Fig. 1). Dit vooral veenachtige gebied wordt begrensd aan de noordwestelijke kant door de Grote Heicop, de zuidwestelijke kant door de Bijleveld, de zuidoostelijke kant door het spoor en de Haarrijn en de noordoostelijke kant door het Amsterdam-Rijnkanaal. In de polder bevinden zich het dorp Kockengen en een deel van het tracé van de A2 en het spoor Woerden-Breukelen. De polder watert ruwweg af naar het noorden, richting gemeaal De Tol. Voor een uitgebreide beschrijving van de polder verwijzen we naar het peilbesluit ervoor uit 2019 (Van Bergen, Mulder & Bronkhorst, 2019).

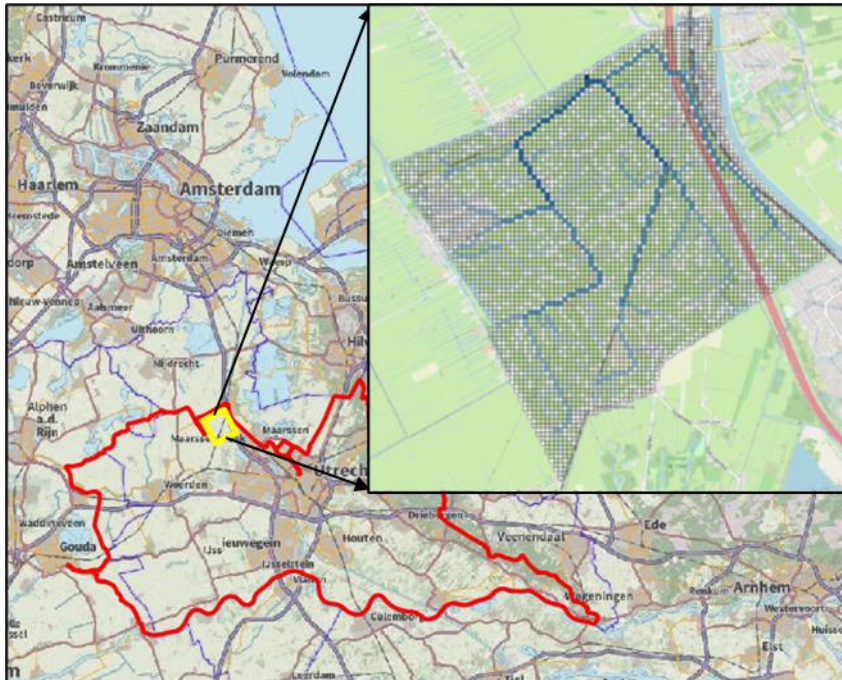


Fig. 1. Ligging modelgebied polder De Tol en verrastering in Wflow

2 Modellen

Voor het beproeven van verschillende combinaties van Wflow/D-HYDRO koppelingen, zijn eerst basismodellen gebouwd en vervolgens zijn daar varianten van afgeleid. Het Wflow-basismodel en de verschillende afleidingen worden besproken in paragraaf 2.1. In paragraaf 2.2 wordt het D-HYDRO-basismodel besproken. Ten slotte worden in paragraaf 2.3 de verschillende Wflow/D-HYDRO koppelingen besproken.

2.1 Wflow modellen

In de Wflow-modellen is het gebied geschematiseerd naar een raster met cellen van 50 bij 50 meter, waarbij ook onderscheid wordt gemaakt tussen 'landcellen' en 'riviercellen' (primaire watergangen). Deze verastering en de modelgrenzen zijn gevisualiseerd in Fig. 1. Voordat de pilot plaatsvond, is een Wflow testcase uitgevoerd door D2Hydro, om de software te beproeven. Hierbij is basisdata voor het gebied (dat op sommige vlakken is generaliseerd) omgezet naar input (.map bestanden) voor een python Wflow_sbm model. Het sbm-concept wordt al veel ingezet voor stroomgebiedmodellering en gebruikt vooral de kinematische golf om afstroom van water over het oppervlak te berekenen. Voor een uitgebreide beschrijving van het sbm-concept in de python versie van Wflow verwijzen we naar het hoofdstuk hierover in de digitale documentatie (Deltares, 2021a).

Doordat het sbm-concept vooral gebruik maakt van de kinematische golf, maakt dat het model niet direct bruikbaar is voor zeer vlakke gebieden, zoals polders. In dit soort gebieden speelt infiltratie met erna grondwaterstroming een dominantere rol dan afstroming over het maaiveld. Hiervoor heeft Deltares de grondwatermodule toegevoegd aan het Wflow_sbm-concept, waarnaar hierna wordt verwezen met Wflow_sbm_gw. In de python versie is dit niet beschikbaar, aangezien Deltares op het moment van schrijven inzet op Wflow-ontwikkeling in Julia. Wflow_sbm_gw staat stroming toe door een open aquifer. Een uitgebreide beschrijving van het modelconcept staat beschreven in de digitale documentatie voor de Julia versie van Wflow (Deltares, 2021b).

2.1.1 Testen van de software

In de verschillende Wflow modellen is de schematisatie van het gebied (hoogteligging, modelgrenzen, resolutie, afstroompatroon) niet aangepast. Wel zijn grondwaterparameterwaarden (middels een gevoeligheidsanalyse) en grenscondities aangepast.

Gevoeligheidsanalyse

Verschiedende combinaties van de volgende parameters zijn getest:

- verticale doorlatendheid in de gesatureerde zone (k_{SatVer});
- laterale doorlatendheid (k);
- in- en exfiltratiecoëfficiënt;
- specific yield (S_y);
- M (beschrijft afname van doorlatendheid in de gesatureerde zone naarmate de diepte toeneemt).

Grenscondities

In Wflow_sbm_gw kunnen verschillende grenscondities worden opgelegd. Verticaal zijn dat drainage of grondwateraanvulling (*recharge*). Horizontaal is dat (de oplegging van) grondwater op de modelranden.

Ten eerste is de mogelijkheid getest om vaste grondwaterstanden op de randen op te leggen. Deze waarde kan tijdens de simulatie niet worden aangepast. Dit is een probleem bij bijvoorbeeld een simulatie die een enkel seizoen overstijgt en waarvoor dus geen seizoensgebonden grondwaterstandsdynamiek op de rand kan worden toegepast. Een gevolg is dat dan bijvoorbeeld blijkt dat een te hoge grondwaterstand is gekozen, wat leidt tot een netto flux van grondwater het gebied in. Het kalibreren van de grondwaterstand op de randen waarbij de netto flux nul nadert, paste niet in de scope van deze pilot. Daarom is uiteindelijk besloten om gesloten grondwatergrenzen te gebruiken.

Ten tweede is getest in hoeverre een constante waterstand kon worden opgelegd in riviercellen. Op die manier zou een vast polderpeil te schematiseren zijn in de Wflow_sbm_gw, met als uiteindelijk doel om een constantere grondwaterstand te simuleren. Hiervoor werd de code van Wflow.jl in een paar regels aangepast, waardoor de waterstand in een riviercel niet werd geüpdatet aan de hand van een instroom, maar bij elke tijdstap werd gelijkgesteld aan de opgegeven waterhoogte. Dit had echter een marginaal effect op de grondwaterstand, naast dat een fictieve extra influx van water in het model werd gesimuleerd. Bij het gebruikte basismodel zijn geen opgelegde peilen gebruikt.

2.1.2 Kalibratie en validatie

In Wflow_sbm modelstudies kunnen gecreëerde modellen gekalibreerd en gevalideerd worden op basis van debietmetingen bij het uitstroompunt van het geschematiseerde bassin. Deze aanpak werkt niet bij een vlak, gereguleerd systeem als een polder, aangezien vrije afstroom hier gering in aanwezig is. Een voor de hand liggende doelvariabele voor kalibratie zijn dan grondwaterstanden.

In polder De Tol is géén grondwaterpeilbuis aanwezig, vandaar dat gebruik is gemaakt van een actuele Gt-kaart voor de kalibratie van het Wflow model.

Voor het maken van een vergelijking tussen berekeningen en deze GxG-waarden is een langdurige periode doorgerekend met het Wflow_sbm_gw-model, namelijk van 1 januari 2010 tot en met 31 december 2018 (oftewel acht hydrologische jaren). De gebruikte forcing bestond uit neerslag en verdamping in deze periode (verkregen via HydroNET). De berekende grondwaterstanden zijn vervolgens samengevat naar een GLG en een GHG door jaarlijks de drie laagste resp. hoogste grondwaterstanden gemiddeld over de periode van 1 april tot en met 31 maart (hydrologisch jaar) te bepalen en daarna het gemiddelde te nemen van de berekende jaarlijkse gemiddelden.

De berekende waarden voor het GLG zijn enkele centimeters hoger dan de bovengrens van de gekarteerde GLG, tot tientallen centimeters in uitzonderingsgebieden (Fig. 2).

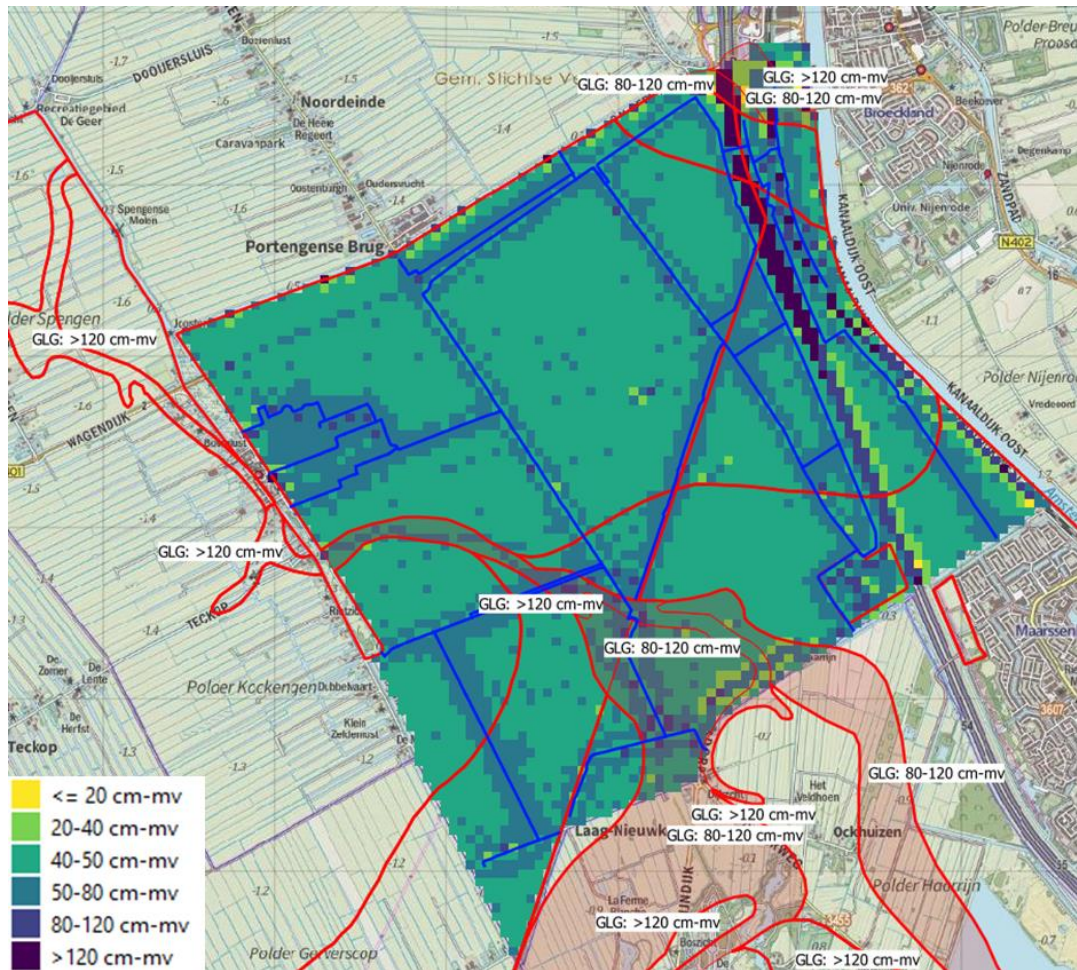


Fig. 2. GLG uit grondwatertrappen (rode lijnen en labels) en GLG berekend met Wflow_sbm_gw (raster gekleurd volgens legenda). Het GLG ligt tussen 50 en 80 centimeter onder het maaiveld volgens de gekarteerde grondwatertrappen. Gebieden met een afwijkend GLG hebben een label met corresponderende waarde en zijn rood geaccentueerd.

De berekende waarden voor het GHG liggen wel binnen de grenzen van de gekarteerde GHG. Ter hoogte van een oude stroomrug halverwege het modelgebied en een deelgebied in het noorden is de berekende GHG echter 20 centimeter of meer hoger dan de bovengrens van de GHG in de grondwatertrappen.

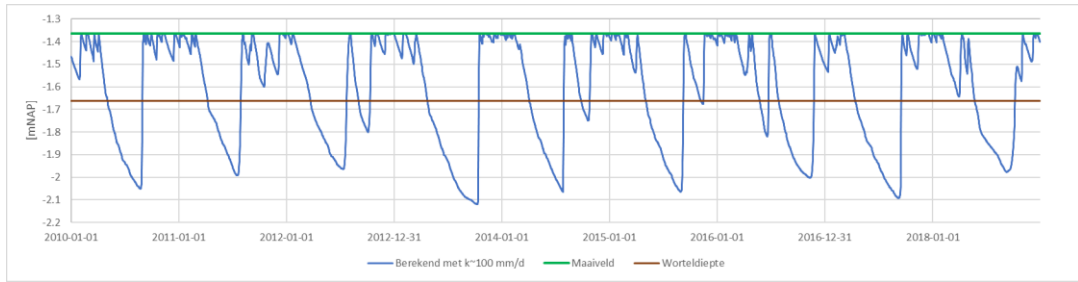


Fig. 4. Berekende grondwaterstanden op een punt. In het groen is het maaiveld weergegeven, in het bruin de ondergrens van de wortelzone en in het blauw de berekende grondwaterstanden. De dynamiek is conform de GLG en GHG figuren, met een GHG vlak onder maaiveld, en een GLG orde 70 cm onder maaiveld.

2.2 D-HYDRO

Van polder De Tol is een eenvoudige schematisatie in D-HYDRO gemaakt. Deze schematisatie is opgebouwd met behulp van de GIS-gegevens uit de database van het hoogheemraadschap en het Delft3D Flexible Mesh Python (delft3dfmpy) package (HKV, 2021). Primaire watergangen in de polder en de kunstwerken in die watergangen, zoals duikers, stuwten en gemaal De Tol, zijn geïmplementeerd. Daarnaast zijn doorgaande wegen en de spoorweg in het model als hoge 1D lijnelementen (fixed weirs) opgenomen. De boezem en inlaten vanuit de boezem of aangelegen gebieden zijn niet verwerkt in de schematisatie. Fig. 5 weergeeft het model zoals dat wordt gevisualiseerd in D-HYDRO Suite 1D2D. Berekeningen zijn niet uitgevoerd in deze GUI, maar direct met het rekenhart met behulp van de Command Line Interface voor D-HYDRO. De reden hiervoor is dat de (GUI van de) gebruikte versie van D-HYDRO Suite 1D2D (1.0.0.53506) enerzijds nog niet beschikbaar was tijdens een deel van TKI-III en anderzijds dat de GUI niet om kan gaan met ruimtelijk gedistribueerde neerslag (wat wel kan met berekeningen direct in het rekenhart).

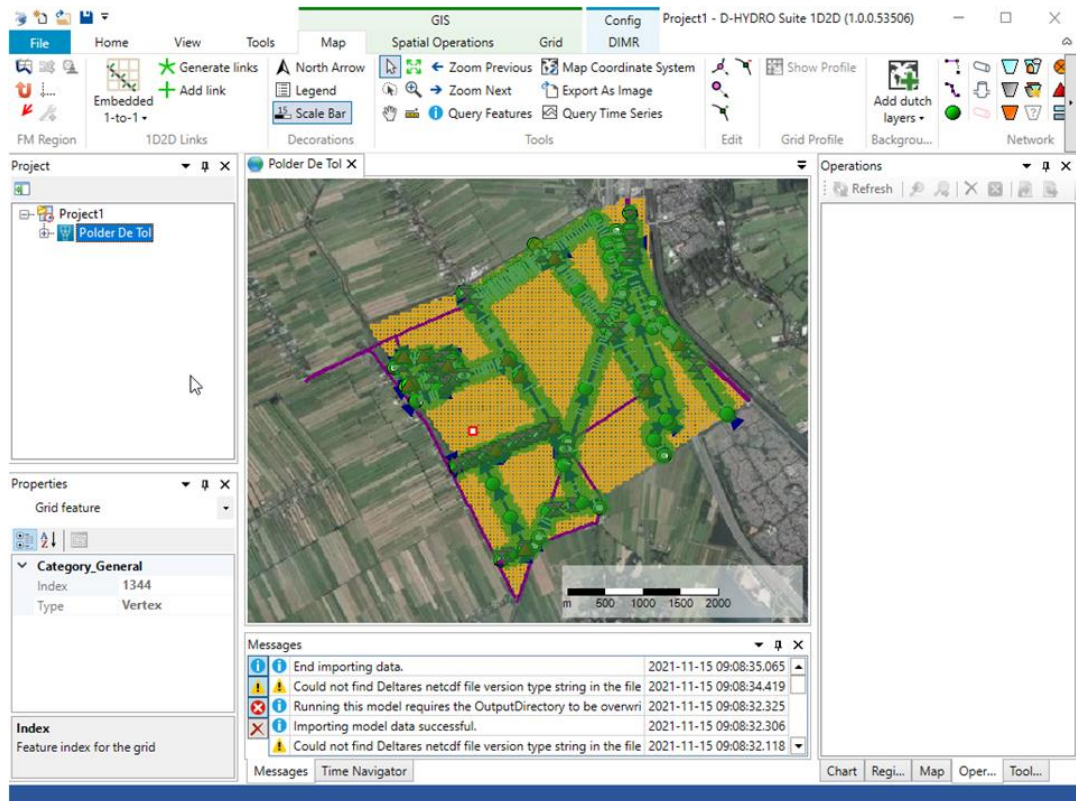


Fig. 5. Model polder De Tol in D-HYDRO Suite 1D2D

De resolutie die is gebruikt in de schematisatie is 50 bij 50 meter, met lokale verfijningen. Rekentijden met deze resolutie zijn vergeleken met rekentijden met een grid van 100 bij 100 meter (wederom met lokale verfijningen). Bij het doorrekenen van een jaar was de rektijd bij een resolutie van 100 bij 100 meter minstens een factor 1,5 kleiner dan bij een resolutie van 50 bij 50 meter (resp. 6 en 10 uur), terwijl het grovere grid een factor 2,8 minder cellen had (resp. 7850 en 21767 cellen). De numerieke instellingen waren in beide gevallen niet geoptimaliseerd.

2.3 Koppelingen Wflow - D-HYDRO

Binnen de pilot zijn drie varianten van een koppeling tussen Wflow en D-HYDRO geprobeerd en vergeleken met een referentie, zijnde het D-HYDRO-model van polder De Tol zonder interactie met Wflow. Alle koppelingen zijn varianten van een offline koppeling tussen de modelsoftware. De 'interactie' hierbij tussen Wflow en D-HYDRO is als volgt te beschrijven:

- 1 in Wflow wordt de hydrologische berekening uitgevoerd;
- 2 resultaten van Wflow worden nabewerkt en omgevormd tot input voor het D-HYDRO model;
- 3 de berekening in D-HYDRO wordt uitgevoerd met als input de nabewerkte Wflow output.

2.3.1 Laterals

Deze koppeling is vergelijkbaar met de manier waarop in SOBEK neerslag naar watergangen stroomt via SOBEK-RR.

In Wflow kunnen binnen het modelgebied substroomgebieden worden gedefinieerd. Bij het uitstroompunt van een dergelijk gebied is een meetpunt (*gauge*) gedefinieerd, waarin onder andere het debiet door het uitstroompunt kan worden beschreven als output van het model. In het Wflow_sbm_gw-model zijn deze substroomgebieden gebaseerd op door het hoogheemraadschap gedefinieerde afwateringseenheden.

De uitstroom bij de gauge van elke afwateringseenheid is weggeschreven als output tijdens een Wflow berekening. Omdat van de gauges de coördinaten bekend zijn en ook het debiet per tijdstap dat via het punt wordt afgevoerd, kunnen de berekende debieten op deze uitstroompunten als laterale instroompunten (*laterals*) worden opgelegd aan het D-HYDRO-model van polder De Tol. Fig. 6 visualiseert dit.

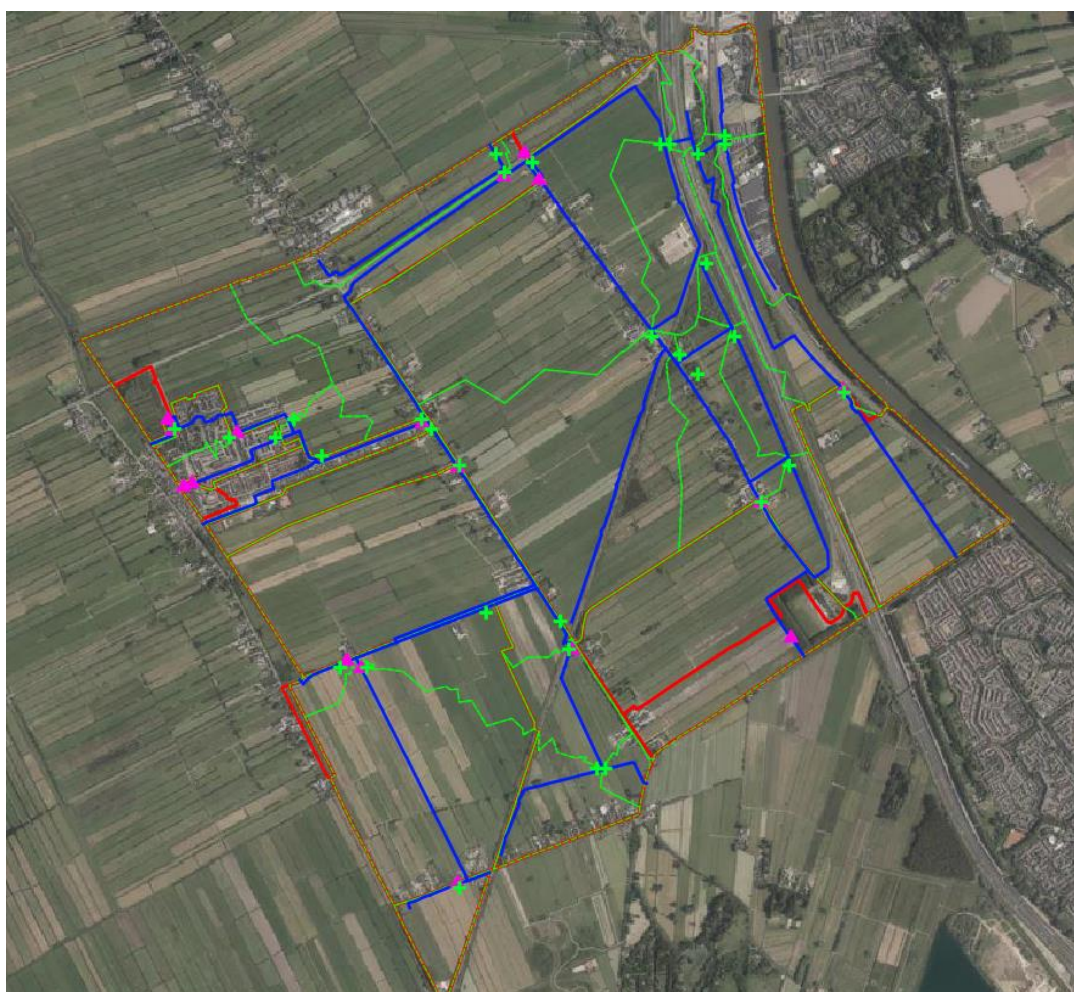


Fig. 6. D-HYDRO model voor polder De Tol met de offline Wflow laterals-koppeling. Met groene lijnen zijn de grenzen van de afwateringsgebieden weergegeven. Deze komen voor een deel overeen met de peilgebiedsgrenzen in de polder (rode lijnen). Met de groene kruizen zijn de locaties van gauges aangegeven, waar laterale instroom plaatsvindt naar de watergangen (blauwe lijnen).

2.3.2 Grondwater

Deze koppeling is vergelijkbaar met Laterals-koppeling, maar verschilt door de diffuse op-legging van laterale instroom en door de focus op de flux tussen oppervlakte- en grondwater.

De grondwatermodule in wflow_sbm_gw zorgt onder andere voor de interactie bij Wflow-riviercellen tussen grondwater en het oppervlaktewater. Een uit/intredende flux wordt hier bepaald. Deze flux kan per tijdstap per riviercel worden weggeschreven als output bij een berekening. De coördinaten van de riviercellen kunnen worden gebruikt als coördinaten voor laterale instroompunten in D-HYDRO, waar de nabewerkte Wflow flux wordt opgelegd als debiet in D-HYDRO (Fig. 7). Het resultaat is een veel diffuser netwerk van laterale instroompunten dan bij de laterals-koppeling het geval is. Om plasvorming op het maaiveld mee te nemen in D-HYDRO, is nog wel ruimtelijk gedistribueerde neerslag opgelegd aan het model.

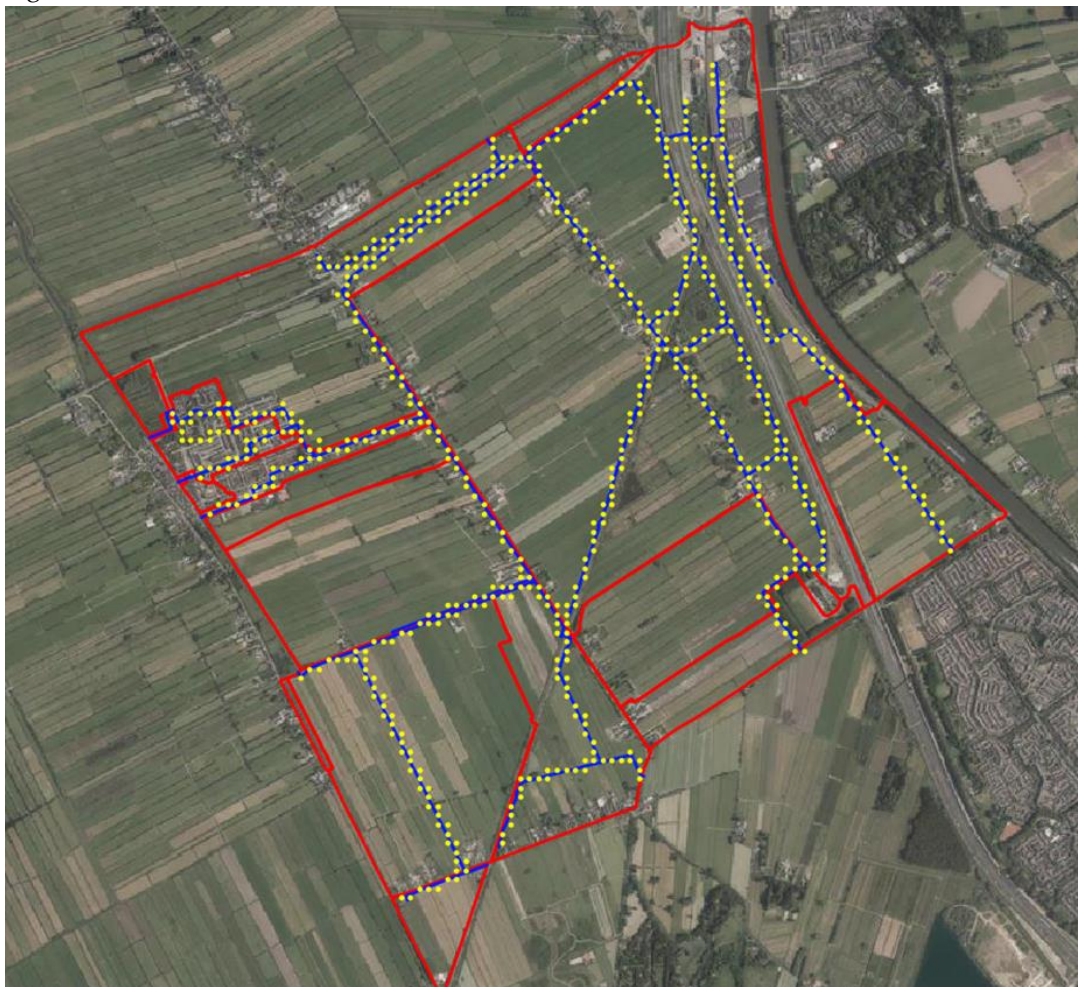


Fig. 7. D-HYDRO model voor polder De Tol met de offline Wflow grondwater-koppeling. De gele stippen zijn de locaties van laterale instroom, gebaseerd op de coördinaten van Wflow-riviercellen. Op deze locaties vindt afstroom plaats naar watergangen (blauwe lijnen).

2.3.3 Runoff

Deze koppeling is vergelijkbaar met de manier waarop ruimtelijk neerslag (en verdamping) kan worden opgelegd aan een D-HYDRO model. In deze koppeling wordt het overschot van het water wat niet kan infiltreren opgelegd aan D-HYDRO.

Cellen in een wflow_sbm(_gw)-model kunnen worden geschematiseerd als verticale kolommen, of simpeler, emmers. Wanneer neerslag valt wordt allereerst bepaald of het water kan worden opgeslagen in de verticale kolom. Al het water wat niet in deze verticale kolom past, zal horizontaal worden verplaatst: de afstroom (runoff). Deze variabele kan per cel en tijdstap worden weggeschreven als output van een wflow_sbm(_gw)-model. Deze output kan vervolgens worden nabewerkt tot een .netCDF bestand, dat vervolgens kan worden gebruikt als een ruimtelijk en temporeel verdeelde forcing in D-HYDRO; in plaats van dat neerslag ruimtelijk wordt opgelegd, wordt nu de runoff als een soort gecorrigeerde neerslag opgelegd aan D-HYDRO. Deze koppeling kan worden gebruikt in combinatie met de grondwater-koppeling.

3 Resultaten

De verschillende Wflow/D-HYDRO-koppelingen zijn beproefd door met deze varianten en de referentie de gevolgen van een neerslaggebeurtenis door te rekenen. Het gaat om de neerslaggebeurtenis van 28 juli 2014, toen binnen enkele uren ongeveer 150 mm regen viel op het studiegebied. Dit leidde tot veel overlast in Kockengen. Deze gebeurtenis is eerst doorgerekend met het wflow_sbm_gw-model om de relevante input voor de D-HYDRO-modellen te kunnen produceren. Hiervoor is het wflow_sbm_gw-model warmgedraaid met meteorologische data met een dagelijks interval van 1 januari 2010 tot met 1 juni 2014 en vervolgens gedraaid met uurlijkse meteorologische data van 1 juni 2014 tot en met 31 augustus 2014.

Belangrijk is om te noemen dat het wflow_sbm(_gw)-concept nog onder intensieve ontwikkeling was. Pas na de presentatie van de resultaten werd duidelijk dat het wflow_sbm_gw-model op een plausibele manier grondwaterdynamiek simuleerde bij het gebruik van dagen als tijdstappen, maar een te 'langzame' grondwaterdynamiek werd gesimuleerd bij het gebruik van uren als tijdstappen. Binnen de pilot was geen tijd meer voor een herberekening met de opgeloste bug. De resultaten in de paragrafen 3.1 (maximale waterstanden) en 3.2 (waterstanden bij gemaal De Tol) zullen waarschijnlijk een ander maar vergelijkbaar beeld weergeven bij een herberekening. De rekestijden (paragraaf 3.3) zullen naar verwachting nagenoeg hetzelfde zijn.

3.1 Maximale waterdiepten

In een D-HYDRO-berekening kunnen onder andere per gridcel waarden worden weggeschreven. Dit zijn onder andere maxima per variabele, zoals waterdiepten. In het referentiemodel, oftewel het D-HYDRO-model voor de polder zonder wflow_sbm_gw-koppeling, zijn de maximale waterdiepten bepaald tijdens de gesimuleerde periode en vervolgens weergegeven in Fig. 8.

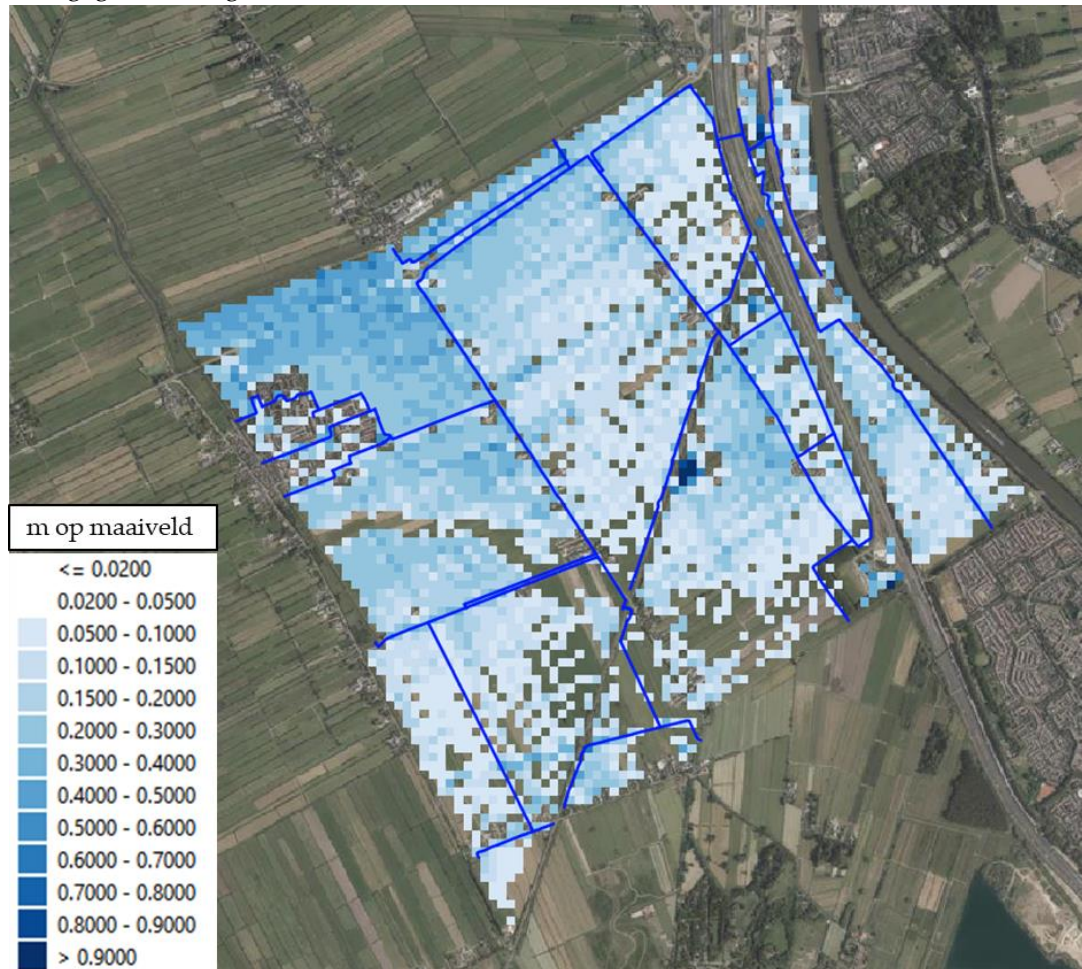


Fig. 8. Maximale waterdiepten tijdens de simulatie tussen 1 juni 2014 en 31 augustus 2014, met enkel ruimtelijk gedistribueerd neerslag.

Vervolgens is dezelfde berekening uitgevoerd met het D-HYDRO-model dat op verschillende manieren is gevoed met Wflow_sbm_gw-resultaten. Hieruit zijn opnieuw de maximale waterdiepten bepaald. Deze zijn vergeleken met de maximale waterdiepten bij de referentie. Deze vergelijking is weergegeven in Fig. 9a) t/m c). Een rode kleur geeft aan dat de lokale maximale waterdiepte groter is bij het referentiemodel dan bij betreffende Wflow-D-HYDRO-model en vice versa bij een grijze kleur. Wit geeft aan dat er (bijna) geen verschil is in maximale waterdiepten.

Bij de grondwater-koppeling zijn de maximale waterdiepten bijna gelijk aan die in het referentiemodel. Bij de laterals-koppeling zijn de waterdiepten (onrealistisch) veel kleiner. Met de runoff-koppeling zijn de maximaal berekende waterdiepten over het algemeen 10 centimeter kleiner dan bij de referentie.



Fig. 9. Relatief verschil in maximale diepte per gridcel, vergeleken met het referentiemodel. Rood geeft aan dat waterdieptes in de referentieberekening groter waren, grijs dat deze bij de referentieberekening kleiner waren en wit geeft (bijna) geen verschil aan.

3.2 Waterstanden bij gemaal De Tol

Bij gemaal De Tol zijn waterstanden gemeten ten tijde van de neerslaggebeurtenis (Fig. 10). Deze zijn op te vragen via onder andere HydroNET. Voor debiet- of pompreeksen was dit helaas niet het geval. De waterstandsreeksen zijn weergegeven in Fig. 11 (in het zwart), samen met de waterstanden bij gemaal De Tol die zijn berekend door de D-HYDRO-modellen. In bijna alle waterstandsreeksen zijn zaagtandpatronen te observeren, duidend op het aan- en afslaan van het gemaal, en de reactie op neerslag met waterstandsverhogingen. De waterstandsreeks zoals berekend met de laterals-koppeling vertoont weinig reactie op de neerslag.

De berekende waterstandsreeks bij het referentiemodel en de grondwater-koppeling zijn nagenoeg gelijk, maar vertonen een heftigere reactie dan de metingen. Bij de runoff-koppeling is dat minder, maar de maximale berekende waterstand is nog steeds 30 centimeter hoger dan bij de metingen. Daarnaast reageert deze variant van het D-HYDRO-model op een vergelijkbaardere manier op de neerslaggebeurtenissen van 22 juli en 28 augustus, namelijk zonder waterstandsverhogingen.

In alle gevallen worden de metingen niet op eenzelfde manier gereproduceerd door de modellen. Dit is in het eenvoudige D-HYDRO-model lastig, omdat in de gesimuleerde

periode noodmaatregelen zijn geïmplementeerd en gebruik is gemaakt van tijdelijke peilverlagingen. Beide zaken zijn niet in het model geïmplementeerd.

3.3 Rekentijden

Bij alle berekeningen zijn de rekestijden bijgehouden. Deze staan vermeld in Tabel 1. Belangrijk om te vermelden bij de D-HYDRO-modellen is dat de numerieke instellingen niet zijn geoptimaliseerd.

Tabel 1. Overzicht rekestijden

| Software | Variant | Rekestijd [minuten] |
|--------------|--|---------------------|
| Wflow_sbm_gw | GHG/GLG berekeningen; 9 jaar met tijdstappen van 1 dag | 10 |
| | bui Kockengen; 2 maanden met tijdstappen van 1 uur | 2 |
| | | |
| D-HYDRO | Referentie (bui Kockengen: 2 maanden) | 40 |
| | Laterals (bui Kockengen: 2 maanden) | 38 |
| | Grondwater (bui Kockengen: 2 maanden) | 46 |
| | Runoff (bui Kockengen: 2 maanden) | 46 |

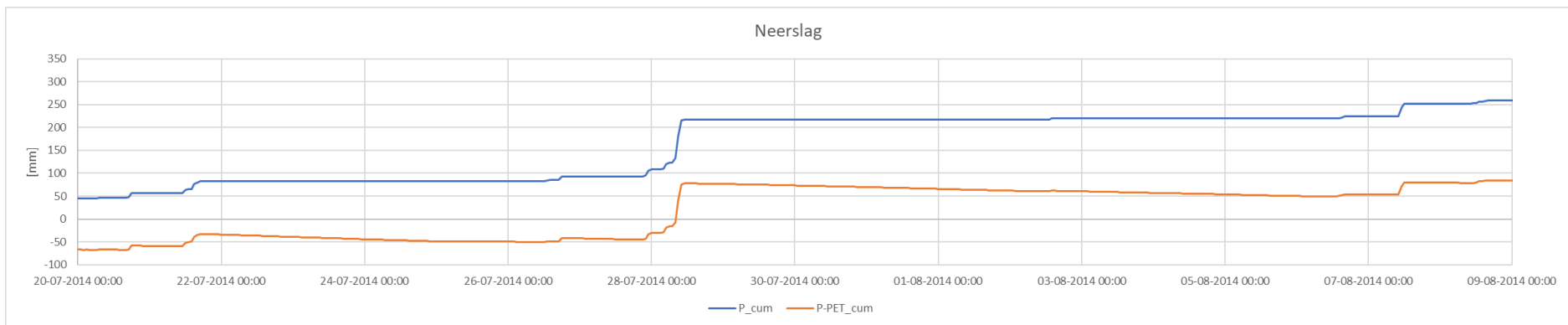


Fig. 10. Gecumuleerde neerslag (blauw) en netto neerslag (oranje) gedurende de simulatieperiode.

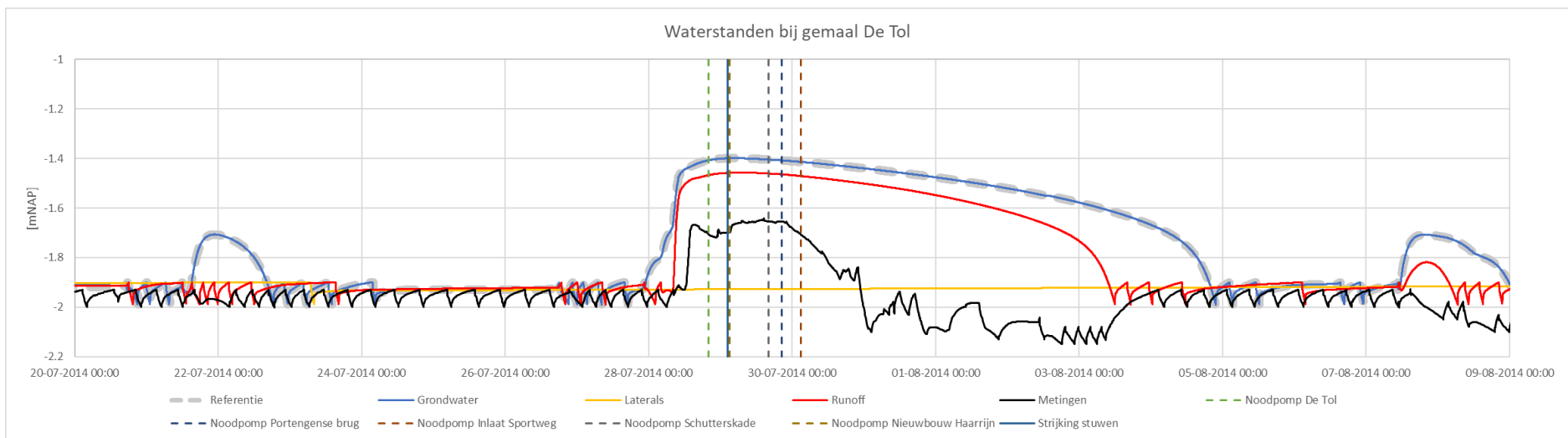


Fig. 11. Waterstanden bij gemaal De Tol, zoals deze zijn gemeten (zwart) of berekend (referentie: grijs-gestreept, geel: laterals, blauw: grondwater, rood: runoff). Verticale lijnen geven het moment aan van implementatie van noodmaatregelen.

4 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de pilot teruggekoppeld aan de eisen aan de software die het hoogheemraadschap heeft opgesteld voor het begin van de pilot (paragraaf 4.1). Na de terugkoppeling worden andere conclusies naar aanleiding van deze pilot besproken, samen eventuele vervolgstappen voor het beproeven van de modelsoftware (paragraaf 4.2).

4.1 Eisen van het hoogheemraadschap

In het vervolg zijn de eisen van het hoogheemraadschap aan Wflow, D-HYDRO en de Wflow-D-HYDRO-koppelingen weergegeven, samen met de manier waarop aan elke eis kan worden voldaan:

- 1 Ruimtelijke gedistribueerd RR GRID dat aansluit op 2D GRID D-HYDRO hydraulisch
Zie hiervoor paragraaf 2.3.
- 2 Ruimtelijke gedistribueerde neerslag
Dit kan in zowel Wflow als D-HYDRO worden toegepast. Bij D-HYDRO kan dit echter alleen worden toegepast direct bij berekeningen in het rekenhart of interactor, nog niet via de GUI van D-HYDRO Suite 1D2D 1.0.0.53506.
- 3 Dunne & Horton Overland Flow
Overland flow wordt berekend in D-HYDRO. Hierin is geen sprake van infiltratie, dus is sprake van Horton Overland Flow.
- 4 Uit III volgt: er moet kunnen worden gerekend aan freatische grondwaterstand en bodemvocht. Dat laatste kan eenvoudig (b.v. dus zonder capillaire opstijging), dus zonder de Richards equation op te lossen;
Dit kan met het wflow_sbm_gw (Deltares, 2021b).
- 5 Dynamisch infiltratie-concept (b.v. Green Ampt of Philip concept)
Dit is onderdeel van wflow_sbm_gw.
- 6 Interflow (laterale stroming door onverzadigde zone)
Dit is geen onderdeel van het Wflow_sbm-modelconcept. De laterale stroming door gesatureerde zone is dat wel.
- 7 Darcian Drainage Flow
Dit is onderdeel van wflow_sbm_gw.
- 8 Kwel/Wegzijging als onderrandvoorwaarde
In wflow_sbm_gw is een recharge aquifer boundary condition op te leggen, waarmee ook een flux van onder het model op te leggen is.
- 9 Eenvoudig ET concept (b.v. Makkink * gewasfactor)
Dit is onderdeel van wflow_sbm_gw.
- 10 RR-Grid Node moet hydrologisch-logisch & geautomatiseerd kunnen aansluiten op 1D waterloop
Dit is mogelijk, zie uitleg over de lateral- en grondwater-koppeling in resp. paragrafen 2.3.1 en 2.3.2

- 11 Mogelijkheid om GRID-cel specifiek een initiële grondwaterstand en bodemvochtconditie op te leggen
Dit is mogelijk in `wflow_sbm_gw`.
- 12 Het concept moet aansluiten bij de “rekenwensen” van de stochasten methode, met name qua rekensnelheid
Zie voor de reketijden paragraaf 3.3
- 13 Wflow op de een of andere manier combineren met VanderSat bodemvocht-, inundatie- en ET data, b.v. t.b.v. kalibratie of validatie.
In Wflow wordt gebruik gemaakt van vele variabelen, die ook weggeschreven kunnen worden naar de output (mits aangegeven in het modelconfiguratiebestand).
Voor bodemvocht kan worden gebruik gemaakt van de Volumetric Water Content. Hiervoor geeft de documentatie vier smaken:
Hierin zijn 4 smaken:
- `vw_c` - Volumetric water content [-] per soil layer (including θ_r and saturated zone)
 - `vw_c_perc` - Volumetric water content [%] per soil layer (including θ_r and saturated zone)
 - `vw_c_root` - Volumetric water content [-] in root zone (including θ_r and saturated zone)
 - `vw_c_percroot` - Volumetric water content [%] in root zone (including θ_r and saturated zone)
- Op eenzelfde manier zijn ook verschillende variabelen die evapotranspiratie beschrijven beschikbaar om weg te schrijven naar de output bij een berekend. Voor inundaties kan gebruik worden gemaakt van de waterdiepten, zoals deze zijn bepaald in paragraaf 3.1.

4.2 Vervolgstappen & Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze pilot, zijn de volgende vervolgstappen voorgesteld in samenspraak met Deltares en het hoogheemraadschap:

- `Wflow_sbm_gw` simuleert op een snelle manier een plausibele grondwaterdynamiek. In vervolgonderzoek kan deze module verder worden beproefd;
- In deze pilot is een eerste aanzet gedaan voor het koppelen van Wflow en D-HYDRO (Delft3D flow 1D/2D). Hiervoor zijn drie offline varianten onderzocht, waarbij de grondwater-koppeling, de runoff-koppeling en een combinatie van beiden het best worden beoordeeld. Een interessante vervolgstap is onderzoek naar online koppelingen;
- In D-HYDRO kan stroming over het maaiveld inzichtelijk worden gemaakt. Hierdoor vervaagt echter de reden van water op maaiveld; komt dit door een inundatie uit de watergang of door plasvorming? Het verduidelijken van de reden van water op maaiveld is belangrijk. Hierbij moet wel in het achterhoofd worden gehouden dat nu een grijs gebied aanwezig is tussen de twee varianten van water op maaiveld, namelijk inundatie ‘vanaf’ maaiveld, omdat dat water niet een watergang in kan stromen door een te hoge waterstand;
- Deze pilot is een van de eerste cases dat Wflow is toegepast in Nederland. Tot nu toe is Wflow vooral toegepast bij bassinstudies in het buitenland. Deltares heeft de intentie

om Wflow ook verder te ontwikkelen voor Nederlandse cases. Een concrete volgende case ter beproeving van Wflow is de toepassing van het modelraamwerk in een Nederlands hellend gebied, zoals het Amerongerwetering afvoergebied;

- Ook is het doorrekenen van een Wflow model, het kalibreren en valideren o.b.v. de monitoringdata op en rond het Cabauw Peilgebied een aanbeveling. Dit gebied is zeer goed hydrologisch en meteorologisch bemeten en daardoor geschikt voor zaken als modelbenchmarking. Het waterschap heeft recent alle monitoringdata in een database laten onderbrengen, waardoor data makkelijk voor handen is bij het maken van een Wflow model voor het Cabauw Peilgebied;
- Bodeminfiltratie is nu enkel toegepast in Wflow, maar de mogelijkheid hiervoor bestaat ook in D-HYDRO, wat kan worden beproefd. Infiltratie wordt wel meegenomen in de waterbalans, maar is als aparte balansterm niet zichtbaar in D-HYDRO Infiltratie is echter van minder belang bij de simulatie van situaties met korte, hevige buien;
- Interessant is om te beproeven wat de totale rekentijd is van Wflow en/of D-HYDRO in een stochastanalyse;
- Validatie van het ontwikkelde Wflow model aan de hand satelliet gebaseerde informatie (ET, bodemvocht, inundaties en op termijn bergingsverandering) ligt voor de hand en is vrij eenvoudig uit te voeren gegeven de beschikbare data en tools;
- Ontwikkeling van (Python) tooling t.b.v. automatisch modelaanmaak, validatie en kalibratie is een aanbeveling, mocht Wflow verder gebruikt gaan worden binnen HDSR en/of Nederland. Het HydroBase platform zou daarvoor een uitstekend basis kunnen vormen.

5 Referenties

Van Bergen, M., Mulder, A., en Bronkhorst, J. W. (2019). *Peilbesluit De Tol (2019) - Toelichting*. Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR). Benaderd via: https://www.hdsr.nl/publish/pages/90993/toelichting_peilbesluit_de_tol_2019.pdf

Deltares (2021a). *Wflow*. Benaderd via: <https://wflow.readthedocs.io/en/latest/#>

Deltares (2021b). *Wflow.jl*. Benaderd via: <https://deltares.github.io/Wflow.jl/dev/quick-start/>

HKV (2021). *Delft3D Flexible Mesh Python*. Benaderd via: <https://github.com/openearth/delft3dfmpy#readme>

Köhler, L., Mulligan, M., Schellekens, J., Schmid, S. en Tobón, C. (2006). *Hydrological impacts of converting tropical montane cloud forest to pasture, with initial reference to northern Costa Rica*. Final Technical Report DFID-FRP Project No. R799.

Lindström, Göran & Johansson, Barbro & Persson, Magnus & Gardelin, Marie & Bergström (1997). *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model*. Journal of Hydrology. 201. 272-288. 10.1016/S0022-1694(97)00041-3.

Savenije, H. H. G. (2010). *HESS Opinions "Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 2681-2692, doi:10.5194/hess-14-2681-2010, 2010.