

3Di: Hollands glorie in watermodellering

Wytze Schuurmans¹ en Elgard van Leeuwen²

Simulatiemodellen worden in het waterbeheer al jaar en dag gebruikt voor een groot scala aan toepassingen. Tegenwoordig staat in het kader van klimaatadaptatie en stresstesten, de interactie van het water en rioolsysteem met de buitenruimte volop in de belangstelling. Hoewel er al veel modelsystemen bestaan is nog niet zo lang geleden een volledig nieuw rekenhart ontwikkeld. Dit rekenhart is gebaseerd op de 2D subgrid-techniek, die volledig is geïntegreerd met 1D stroming. Met dit rekenhart en de software daaromheen, samen tot 3Di gedoopt, kan de gebruiker de stroming in oppervlaktewater, rioolsystemen en in de buitenruimte op hoge ruimtelijke resolutie beschrijven. Het 3Di instrumentarium kan op traditionele wijze worden ingezet bij normering en ontwerp, maar ook in stresstesten en in workshops rond ruimtelijke adaptatie zoals klimaatateliers. Door de innovatieve visualisatie kunnen ook niet-specialisten de modelresultaten interpreteren. Sinds drie jaar is de software operationeel en vanaf dit jaar kunnen adviesbureaus, waterschappen en gemeenten volledig zelfstandig met 3Di aan de slag. In dit artikel wordt een aantal kenmerken en achtergronden van 3Di toegelicht.

3Di, what's in a name?

Om de impact van extreme klimaatbuien, overstromingen of rivieringrepen te bepalen worden sinds jaar en dag simulatiemodellen gebruikt. Deze modellen zijn er in alle soorten en maten. Toch zijn we zeven jaar geleden gestart met de ontwikkeling van een nieuw instrumentarium onder de naam 3Di. '3D' vanwege de 3D stereo visualisatie en de 3 model componenten 0D, 1D en 2D, en 'i' staat voor integraal en interactief.

Nederlands product

De nieuwe rekenkern werd ontwikkeld in de periode 2010 tot 2014 door een consortium bestaande uit Stelling Hydraulics, TU Delft, Deltares en Nelen & Schuurmans. De miljoenen kostende ontwikkeling werd mogelijk gemaakt met Nederlandse subsidie vanuit Kennis voor Klimaat (Kennis voor Klimaat, 2014), STOWA, Nederlandse waterschappen en Nederlandse gemeenten. In de afgelopen jaren is de software doorontwikkeld tot een volwaardig modeleerpakket waarmee inmiddels een groot aantal steden, stroomgebieden en rivieren zijn doorgerekend. 3Di staat met de interactieve

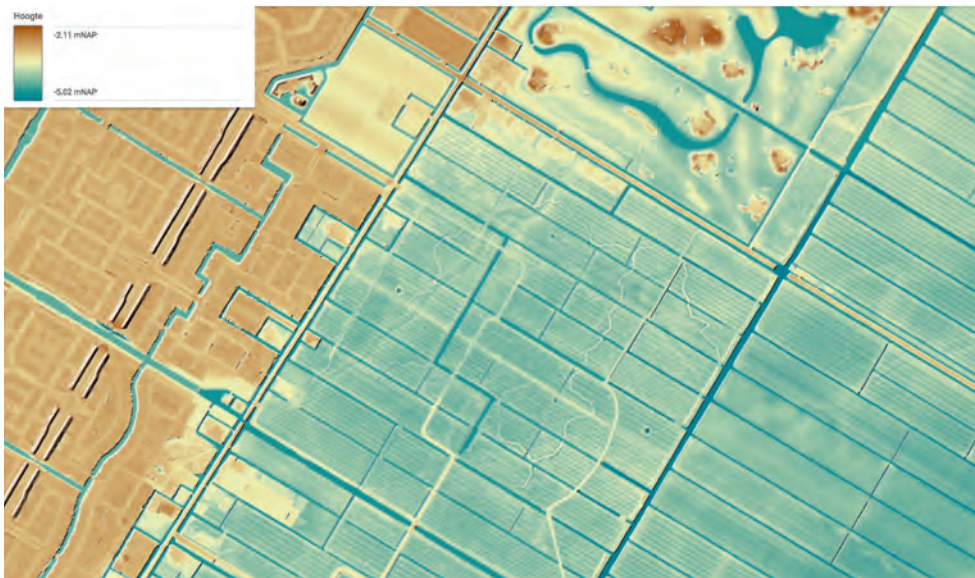
¹ Nelen & Schuurmans, Utrecht (Wytze.schuurmans@nelen-schuurmans.nl)

² Deltares, Delft, (Elgard.vanLeeuwen@deltares.nl)

mogelijkheden in de Nederlandse waterbeheertraditie van integraal waterbeheer, ruimte voor water en multi-stakeholder processen. Een Hollandse traditie die de kern vormt van onze succesvolle Dutch Approach in het buitenland (Brugge et al., 2005).

De subgridtechniek

Het rekenhart van 3Di werkt met de subgridtechniek (Stelling 2012). De subgridtechniek is een nieuwe numerieke rekentechniek voor het tijd-efficiënt beschrijven van 2D stroming op hoge ruimtelijke resolutie. De techniek maakt het bijvoorbeeld mogelijk om een heel stroomgebied, polder of stad op een ruimtelijke resolutie van 0,25 m² (= de resolutie van het Actueel Hoogte Bestand Nederland) door te rekenen (Afbbeelding 1) in een periode van minuten tot uren.



Afbeelding 1: Een hoge-resolutie subgridhoogteraster van een 2D model

Casulli en Stelling, een bijzondere samenwerking

De subgrid techniek is in eerste instantie ontwikkeld door Casulli (Casulli, 2011) met als doel het berekenen van droogval in estuaria. In 3Di wordt de volledige Saint-Venant stromingsvergelijking opgelost (Chow, 1959). De gebruiker kan door instellingen van parameters de trade-off tussen snelheid en nauwkeurigheid naar wens instellen, maar altijd wordt met strikt momentum- en volumebehoud gerekend. Buiten 3Di maakt het hydrologisch model van de US Army Corps of Engineers HEC-Ras 5.0 ook gebruik van de subgridtechniek. Stelling heeft de subgridtechniek uitgebreid voor snel variërende stroming in tijd en ruimte, zoals bij overstromingen (Stelling, 2012). Vervolgens heeft hij in de afgelopen jaren windeffecten, de stroming van dunne waterlagen, interflow en grondwater toegevoegd aan de subgrid-rekentechniek. Volp (2016) heeft de subgrid-rekentechniek uitgebreid met morfologie voor rivieren en estuaria.

2D Rekenrooster

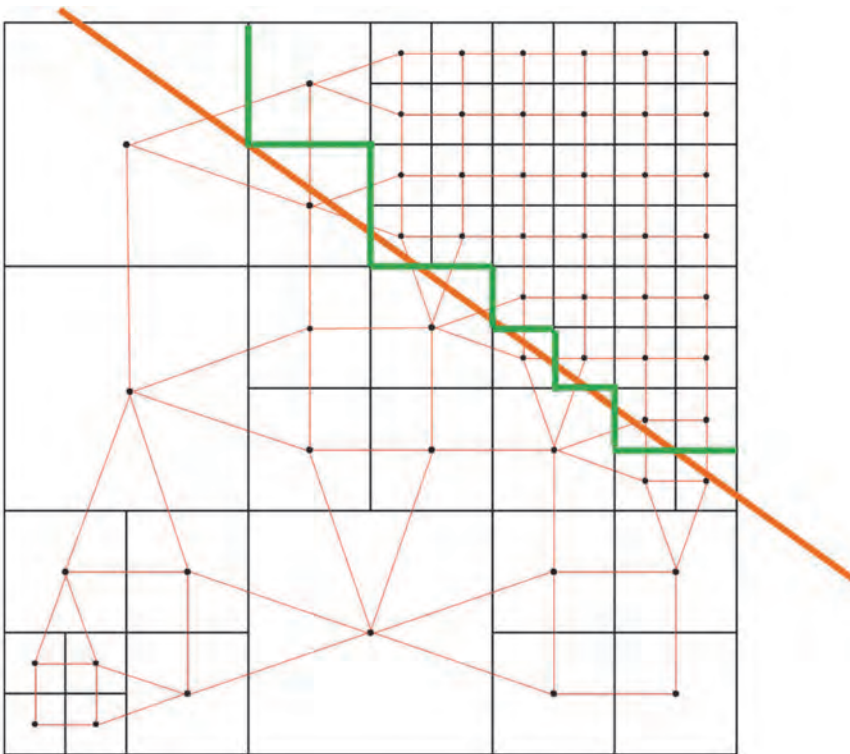
In de subgridtechniek wordt met twee type roosters gewerkt: hoge-resolutie subgrid-roosters met gebiedsinformatie, zoals maaiveldhoogte, infiltratiecapaciteit en de hydraulische weerstand. Over de subgridroosters ligt een grover rekenrooster. Dit rekenrooster heeft een 'quadtree structuur', een orthogonale structuur die lokaal kan worden verfijnd om bijvoorbeeld dijken of peilgrenzen nauwkeurig te volgen (Esse, 2017). Er is gekozen voor de quadtree-roostertechniek, omdat deze techniek numeriek het meest nauwkeurig is voor complexe stromingen, waarbij alle termen van de Saint-Venant vergelijking van belang kunnen zijn. Complexe stroming zal voorkomen op steile hellingen, bij overstromingen of rivierstroming langs kribben.



Afbeelding 2: Quadtree roosterverfijning bij een weg in combinatie met obstacles (rode lijn)

Een belangrijk uitgangspunt van de subgridmethodiek is dat de waterstand ruimtelijk veel minder varieert dan de waterdiepte. Dat maakt het mogelijk om per rekencel 1 waterstand te berekenen, maar per subgrid de lokale waterdiepte en de lokale stroomsnelheid. Een typisch 3Di model bestaat uit honderd miljoen subgrids en honderd-duizend rekencellen. De rekencode herkent, via analyse van de maaiveldhoogte die is vastgelegd in de subgrids, of er binnen een rekencel sprake is van een 'waterscheiding'. Een waterscheiding is bijvoorbeeld een hoger gelegen weg, een spoorbaan of een huizenrij. In dat geval wordt de rand van rekencel dichtgezet op de gedetecteerde maaiveldhoogte. Om een waterscheiding nauwkeurig te volgen is het mogelijk om het rekenrooster rond de waterscheidingen lokaal te verfijnen. Het nadeel is wel dat door de toename van rekencellen de rekentijden oplopen. Daarom is er nog een tweede

oplossing ingebouwd: om waterscheidingen mee te nemen zonder het aantal reken-cellen te laten toenemen kunnen in 3Di ook 'obstacles-lijnen' aan het rekenrooster worden toegevoegd. Op peilscheidingen zorgen deze obstacle-lijnen voor een waterdichte scheiding tot op het niveau van de opgegeven hoogte (Afbeelding 2). Bij dijken is dit concept nog verder verfijnd en wordt de obstacle-subcategorie 'levees' gebruikt om de linker- en rechteroever eenduidig te definiëren (Afbeelding 3). Bij levees is het mogelijk om zowel overtopping als de dynamische bresgroei bij een dijkdoorbraak te simuleren. Deze optie wordt veel toegepast in boezemcalamiteitenmodellen.



Afbeelding 3: Een 2D rekenrooster met een levee (bruine lijn) en dichtgezette randen (groen)

1D Stroming

De stroming in kanalen, riolen en persleiding zijn typisch 1D stromingspatronen. In 3Di is daarom naast de 2D component een nieuw 1D stromingsmodel ontwikkeld. Het bijzondere aan dit 1D model is dat riolering en open water integraal worden berekend (Afbeelding 4). Zo kan de uitstroom van overstortwater op het open water nauwkeurig worden gesimuleerd, evenals de mogelijke terugstroom als het open water stijgt. Alle bekende kunstwerken, zoals stuwen, duikers, bruggen en gemalen kunnen in het 1D model worden opgenomen, inclusief real time control. Naast de standaard kunstwerken, kan de gebruiker zelf nieuwe kunstwerken definiëren met een vrij te kiezen profiel. De rekencode detecteert of er sprake is van vrije en verdronken stroming bij de kunstwerken. Het 1D model rekent bijzonder snel doordat het knijpen van de tijd-

stap niet nodig is. Voor onvoorwaardelijke convergentie van complexe volumes, zoals putten en buizen, wordt gebruik gemaakt van de Nested Newton iteratiemethode. Voor de modelleur betekent dit volledig massabehoud en momentumbehoud onder alle omstandigheden, zonder numerieke slingeringen.

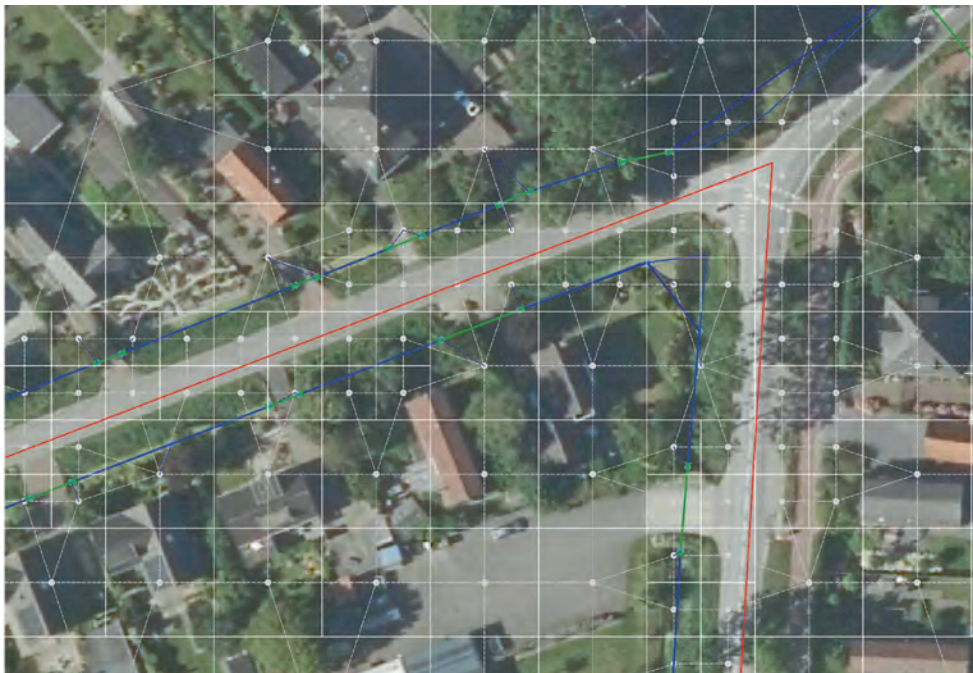


Afbeelding 4: 1D model met oppervlaktewater (donkerblauw), gemeente (geel), dwa (rood) en regenwater (lichtblauw) riolering. De rode driehoeken representeren de stuwen

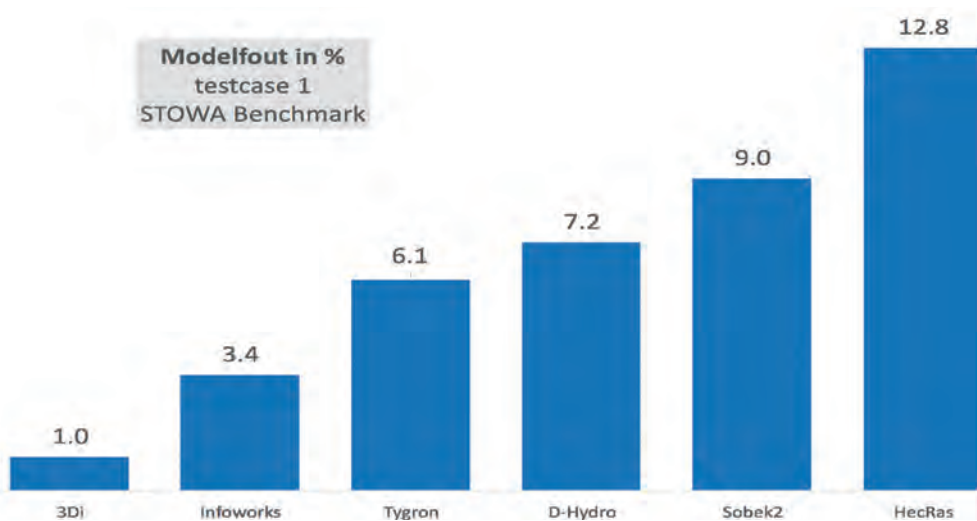
1D/2D integratie

Bij overstromingen als gevolg van het bezwijken van een dijk (fluvial flooding) of extreme neerslag (pluvial flooding) geeft een hoge resolutie 2D model een bruikbaar eerste beeld. Maar in zo'n model wordt de 1D stroming in kanalen en riolen niet goed meegenomen. De riolering kan per definitie niet worden meegenomen in 2D maaiveldmodel en de waterlopen kunnen beter worden beschreven met de nauwkeurig ingemeten dwarsprofielen in een 1D model (Luijtelaar et al., 2014). In 3Di is het daarom mogelijk gemaakt om met een gecombineerd 1D/2D model te rekenen (Afbeelding 5). De interactie tussen maaiveld en waterlopen is in werkelijkheid complex. In 3Di zijn daarom 3 typen koppelingen (1D/2D links) beschikbaar: isolated, embedded, en connected. Bij het type 'isolated' is er geen interactie tussen 1D en 2D op de betreffende link. Bij 'embedded' wordt het 1D profiel in het 2D subgrid raster opgenomen. Bij connected wordt een relatie opgegeven tussen het 2D waterstandspunt en het 1D rekenpunt. De drie type koppelingen gelden voor 1D open water en 1D riolering. In 3Di zijn de 1D en 2D berekeningen volledig geïntegreerd. Dat wil zeggen dat alle stromingsvergelijkingen in één matrix zijn ondergebracht. Die matrix wordt impliciet opgelost,

wat betekent dat er nauwkeurig maar met grote tijdstappen kan worden gerekend, zonder numerieke slingeringen. De nauwkeurigheid van het nieuwe rekenhart is onder meer onderzocht in de Benchmark studie (STOWA, 2017). Daaruit komt 3Di als meest compleet en meest nauwkeurig naar voren (Afbeelding 6).



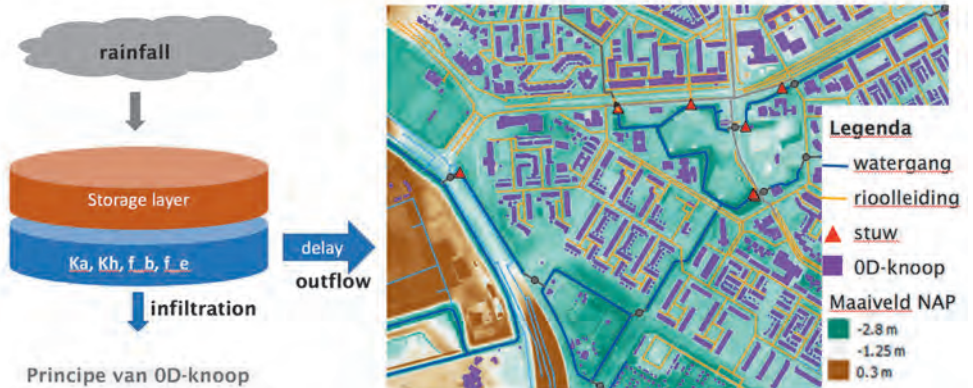
Afbeelding 5: Een 2D rekenrooster (wit), gekoppeld via 1D/2D-links (zwart) met 1D (open water (blauw), duikers (groen) en riolering (rood))



Afbeelding 6: Nauwkeurigheid van diverse modelcodes ten opzichte van de exacte analytische oplossing uit de STOWA Benchmark studie, Bron (STOWA, 2017)

OD-knopen

Voor neerslag afvoer modellering wordt vaak gebruik gemaakt van OD-knopen of bakjes. Bekende voorbeelden zijn de Rainfall Runoff (RR) knopen van Sobek en de Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS, 2014). In 3Di zijn OD knopen strikt genomen niet noodzakelijk, omdat de neerslagafvoer in 2D wordt berekend. Toch is de mogelijkheid van OD toegevoegd. Het rekent sneller, sluit aan op bestaande schematiseringen en leidt soms tot een meer natuurgetrouwe beschrijving. In een model kunnen honderdduizend OD-knopen worden gebruikt, vrijwel zonder verlies aan reken-tijd. De gebruiker kan per OD-knoop zes neerslagafvoerparameters instellen (Afbeelding 7). Dit biedt de mogelijkheid de neerslagafvoerprocessen heel precies te tunen. Wanneer de regenradar wordt gebruikt, wordt rekening gehouden met de geografische ligging van de OD-knopen. In hybride modellen wordt OD in combinatie met 2D gebruikt, waarbij het gebied van de OD-knoop als 'no data' uit het 2D subgridraster wordt gehaald. In stedelijk gebied wordt bijvoorbeeld het dak van ieder gebouw als OD-knoop geschematiseerd. De neerslag-afvoer van tuinen en straten wordt dan in 2D gemodelleerd. In boezemcalamiteitenmodellen kan de afvoer van polders en boezemland met OD knopen worden geschematiseerd om de rekenperformance te optimaliseren. In gedetailleerde gebiedsmodellen kunnen kasdaken als OD-knoop worden geschematiseerd.

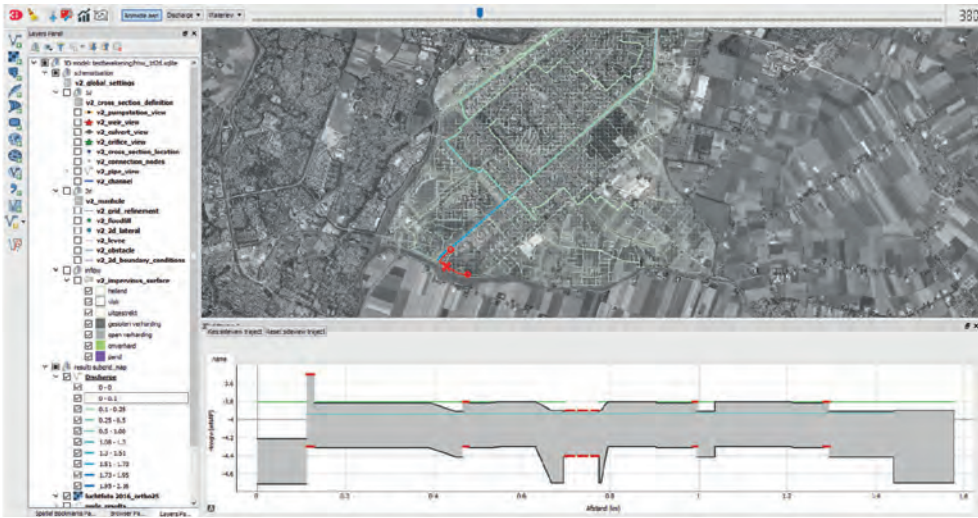


Afbeelding 7: Links, principe van OD-knoop met instelbare parameters per knoop. Rechts, detail van een 0D/1D/2D modelschematisatie van Rotterdam

Cloud computing

Een heel ander type innovatie van 3Di is dat het rekent 'in de cloud', dat wil zeggen op speciaal daarvoor ingerichte rekenservers, die zijn gehost in twee gespiegelde datacentra in Amsterdam en Schiphol. De gebruiker kan op een laptop zijn modelschematisatie aanmaken en stuurt deze dan naar de cloud voor het uitvoeren van de berekening. De resultaten van de berekening kan de gebruiker zien op de website of downloaden naar de laptop voor detailanalyse (Afbeelding 8). Gekozen is voor cloud computing, om installatie-, geheugen- en schrijfruimteperikelen te voorkomen. Een ander voordeel is dat direct met de regenradar kan worden gewerkt, door simpel een

begin en einddatum te selecteren. Tenslotte kunnen updates van het rekenhart eenvoudig worden doorgevoerd. Oudere modelschematisaties blijven gegarandeerd na elke update draaien.



Afbeelding 8: 3Di interface voor de detail analyses door de modelleur

Ook het licentiemodel is afgestemd op cloudcomputing. De gebruiker koopt een rekenbundel vergelijkbaar met een belbundel voor mobiel bellen. Iemand die weinig rekent kan volstaan met een kleine rekenbundel en grootverbruiker koopt een grotere rekenbundel.

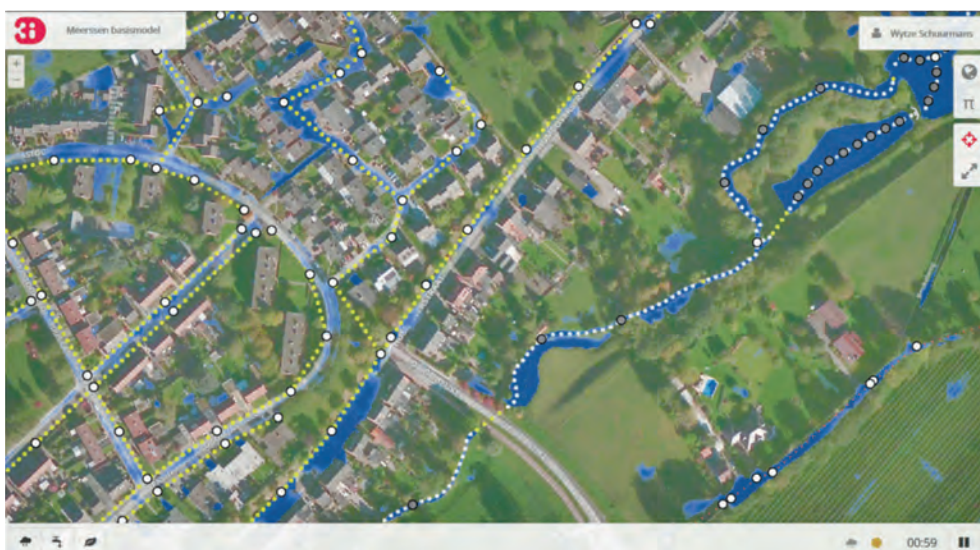
Communicatie en interactie

Misschien wel de grootste uitdaging bij de ontwikkeling van 3Di was om niet alleen een rekenmodel te ontwikkelen maar tevens een communicatietool. In de praktijk blijkt namelijk dat modelanalyses weliswaar het fundament vormen van veel besluiten, maar dat de besluitvormers doorgaans maar weinig inzicht krijgen in de nuances van de berekening (Afbeelding 9). Het resultaat van de modelstudies wordt vaak samengevat in een enkele grafiek, tabel of kaart en daar blijft het vaak bij. Een model biedt echter veel meer dynamische informatie die relevant is voor het nemen van weloverwogen besluiten (Leskens, 2014). Bovendien is juist het kritisch oog van de gebiedskenners van belang bij het verbeteren van modellen. Als er geen inzicht is in de werking van het model, blijft die kennis onbenut.

Voor het model als communicatietool is een aparte userinterface ontwikkeld, naast de interface voor de modelleur. Om voor een breed publiek de resultaten informatief te maken wordt de stroming bijvoorbeeld met bewegende bolletjes gevisualiseerd en als een gemaal aanslaat, begint deze visueel te draaien. Plassen op land en straat verschijnen ook als zodanig op de kaart (Afbeelding 10).



Afbeelding 9: 3D visualisatie van de gevolgen van een kadebreuk



Afbeelding 10: Analyse van rekenresultaten op de interactieve interface. Bewegende bolletjes geven de stroming weer (wit = open water, geel = gemengde riolering, blauw = water op straat)

De visualisatie gebeurt niet achteraf, na afloop van de berekening, maar live tijdens de berekening. Het vereist een specifieke techniek om zo snel en gedetailleerd te visualiseren. Daarbij wordt gebruik gemaakt van verschillende zoomniveau's, waarbij de resolutie van de visualisatie wordt aangepast aan de resolutie van het scherm of Touch Table. De gebruiker kan tijdens het rekenen een kade laten doorbreken, een noodgemaal plaatsen, een extra waterberging graven of een regenbui laten vallen. Deze mogelijkheden maken het model tot een 'serious game', waarmee men kan zien wat het effect is van een maatregel. Het aanpassen gedurende de berekening is infor-

maticatechnisch een uitdaging, omdat de modelaanpassingen direct in het werkgeheugen van de computer moeten worden doorgevoerd. Het aanpassen van de invoerfiles werkt namelijk niet, want deze zouden dan eerst weer opnieuw moeten worden ingelezen. Het model zou dan niet meer interactief zijn.

Doorontwikkeling

Een modelinstrumentarium is nooit af. Ontwikkelingen vinden plaats op het gebied van regelgeving, data en informatietechnologie. Een team van 5 ontwikkelaars werkt daarom continue aan de doorontwikkeling van 3Di, waaronder het verbeteren van de documentatie en het uitbreiden van testen. Recente wapenfeiten zijn de vernieuwde grondwatermodule, de 'dunnelagenstroming' voor neerslag-afvoer in hellend gebied en de ontwikkeling van de interflow-laag.

Naast de ontwikkelingen aan de rekenkern, wordt in samenwerking met RH DHV ontwikkeld aan de toepassing van 3Di in real time voorspelsystemen. In samenwerking met RWS en Deltares wordt gewerkt aan de toepassing van 3Di voor rivierstudies en klimaat impact analyses van snelwegen. Deltares heeft een nieuwe stresstest methode voor wateroverlast ontwikkeld gebaseerd op de detailmodellen die thans mogelijk zijn (Deltares, 2017). De innovatieve praktijktoepassingen leveren waardevolle feedback aan de ontwikkelaars.



Afbeelding 11: Analyse van rekenresultaten met gebiedsbeheerders op een Touch Table en iPad

Conclusies

Er bestaan talrijke water simulatiemodellen en in dat licht bezien is het verwonderlijk dat er weer een nieuw simulatiemodel in Nederland is ontwikkeld. 3Di onderscheidt zich op twee belangrijke aspecten van bestaande modelsystemen wereldwijd: het maakt gebruik van een nieuwe numerieke rekentechniek; en het is speciaal met het oog op communicatie tussen specialist en eindgebruiker ontwikkeld (afbeelding 10). De nieuwe rekentechniek maakt het mogelijk om op hoge resolutie snel en nauwkeurig in 1D, 2D en 1D/2D te rekenen. Als communicatietool beschikt 3Di over een interface die goed inzetbaar is in workshops en klimaatateliers. Na zeven jaar ontwikkeling is 3Di een volwassen product geworden, waarmee modelleurs in binnen en buitenland zelfstandig kunnen werken aan het klimaatbestendig maken van het stedelijk en landelijk gebied.

Beschikbaarheid en overige informatie:

- Voor meer informatie zie www.3di.nu.
Contactpersoon: Joep.Grispen@nelen-schuurmans.nl.
- Besturingssysteem: 3Di draait onder elk besturingssysteem en de gangbare webbrowsers zoals Chrome, Firefox, Microsoft Edge en Safari.
- Licentie: Een gebruikerslicentie wordt afgesloten vanaf € 5000,- per jaar en is verkrijgbaar bij Nelen & Schuurmans, Utrecht.

Literatuur

Brugge R. van der, Rotmans J., Loorbach R. (2005) The transition in Dutch water management; in: *Regional Environmental Change*, vol 5, pag164-176.

Bosch, S. en Hoekstra, J. (2017) HECRAS 5.0 aan de tand gevoeld; in: *Stromingen* vol 1

Casulli V., Stelling G.S. (2011) Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows; in: *Numerical methods in fluids*, vol 67, Issue 4,, pag 441-449

Chow, V. T. (1959), Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, OCLC 4010975, §18-1 & §18-2.

Deltares, (2017) Brede Methodiek Wateroverlast, Naar een heldere klimaatambitie, Delft.

Esse, W., Volp. N.D. (2017) Handleiding 3Di, <https://docs.3di.lizard.net>

Kennis voor Klimaat (2014) Eindrapport 3Di rapportnummer: 104/2013, ISBN:9789490070748

Kennisportaal Ruimtelijke Adaptatie (2014) website <https://ruimtelijkeadaptatie.nl/>

Leskens, J.G., M. Brugnach, et al. (2014) Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models?; in: *Environmental Modelling & Software* vol 53(0), pag 53-61

Luijtelaar H. van, et al. (2014) Ervaringen met de aanpak van regen wateroverlast in bebouwd gebied; Stichting Rioned, Rionedreeks 18, ISBN/EAN: 9789073645004

Stelling, G.S. (2012) Quadtree flood simulations with sub-grid DEMs; in: *Water Management* vol 165, pag 1-14

Stowa (2017) Stowa benchmark rapport 2017-34, ISBN 978.90.5773.759.6

Brauer, C.C., Teuling, A.J., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R. (2014) WALRUS The Wageningen Lowland Runoff Simulator: a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater; in: *Geoscience Model Development*. vol 7, pag 2313-2332

Volp N.D., van Prooijen, B.C. and Pietrzak J.D. and Stelling, G.S. (2016) A sub-grid based approach for morphodynamic modelling; in: *Advances in Water Resources* vol 93, Part A, pag 105-117.

3Di: A new Dutch hydrological model

There are already numerous water simulation models and in this light, it is surprising that a new simulation model has been developed in the Netherlands. 3Di integrates 0D, 1D and 2D model components into one single computation core. 3Di distinguishes itself on two aspects: it uses a new numerical computing technique and it is not only a computing tool, but also a communication tool. The new subgrid numerical technology allows for high-resolution, fast and accurate computations. As a communication tool, 3Di has a separate interface that works well in interactive workshops. After seven years of development, 3Di has become an mature product, which allows professionals to work on the challenge of designing climate-resistant urban and rural areas.
