

Overstromingsstudie 3Di - Dijkkring 49

Waterschap Rijn en IJssel

18 april 2023

Contactpersoon

THIJS LIEVERSE
Adviseur en projectleider

T +31 6 1546 2709
E thijs.lieverse@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 56825
1040 AV Amsterdam
Nederland

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Onderzoeksdoel en scope	5
2	Modelbouw en studieopzet	6
2.1	Uitgangspunten	6
2.2	Schematisatiekeuzes	7
2.2.1	Rekenrooster	7
2.2.2	Verhoogde lijnelementen	8
2.2.3	Bressen en doorsnijdingen	8
2.3	Best practices en aandachtspunten	9
2.4	Scenario's	10
3	Resultaten	11
3.1	Algemeen	11
3.1.1	Overstromingspatroon en aankomsttijden	11
3.1.2	Bresdebieten en waterstanden	12
3.1.3	Waterbalans en rekestijd	14
3.2	Scenario 1: Bresdebiet als randvoorwaarde	15
3.3	Buitenwaterstanden D-HYDRO	15
3.4	Scenario 3: 1D2D vs. 2D	17
3.4.1	Schematisatie	17
3.4.2	Resultaten	19
3.5	Scenario 4: Gridresolutie	21
3.5.1	Resultaten	21
4	Verdieping	23
4.1	Gebruiksgemak en leercurve	23
4.2	Beheer en onderhoud	23
4.3	Resultaatverschillen 3Di, Tygron en D-HYDRO	24
4.3.1	Tygron	24

4.3.2	D-HYDRO	24
4.4	Kosten	25
4.5	Overige bevindingen en aandachtspunten	25
5	Conclusies, discussie en aanbevelingen	26
5.1	Conclusies	26
5.2	Discussie	27
5.2.1	Tygron	27
5.2.2	D-HYDRO	27
5.2.3	3Di	27
5.3	Aanbevelingen	27
6	Referenties	29
	Bijlage I: Narekening van het piekbresdebiet	30
	Colofon	32

1 Inleiding

Waterschap Rijn en IJssel zoekt het optimale middel om een calamiteitenmodel op te stellen. Hiermee kan in een crisissituatie snel een overstromingssimulatie worden uitgevoerd om bruikbare inzichten te verschaffen. Recent heeft Arcadis voor verschillende dijkringen een D-HYDRO overstromingsmodel (beleidsmodel voor scenarioberekeningen) opgesteld en daaropvolgend een kort onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van Tygron als ad-hoc calamiteitenmodel.

In overleg met Nelen & Schuurmans werd ook 3Di genoemd als optie voor een calamiteitenmodel. Daarom is besloten om ook voor deze modelleringstool een kort onderzoek uit te voeren om te verkennen of deze geschikt is als ad-hoc calamiteitenmodel (ook gerelateerd aan Tygron en D-HYDRO).

1.1 Onderzoeksdoel en scope

De hoofdvraag van deze studie is:

“Hoe verhoudt 3Di zich als ad-hoc calamiteitenmodel voor een overstroming bij Dijkkring 49 ten opzichte van Tygron en D-HYDRO?”

Het resultaat, gepresenteerd in deze memo, betreft de belangrijkste resultaten en conclusies van de studie. Dit betreft onder andere:

- Een toelichting op de afweging van detail en rekensnelheid in 3Di.
- Duiding van verschillen tussen 3Di, Tygron en D-HYDRO.
- Vergelijking tussen 1D2D en 2D.
- Kosten van 3Di.
- Gebruiksgemak.
- Beheer- en onderhoud van 3Di modellen.
- Doorkijk toepassing 3Di als beleidsmodel (niet ad-hoc).
- Overige relevante voor- en nadelen en aandachtspunten.

Voor informatie m.b.t. D-HYDRO en Tygron zijn inzichten uit de voorgaande projecten gebruikt. Voor 3Di is een (basis)referentiemodel opgesteld, waarmee vervolgens met varianten op dit model is gerekend om inzicht te krijgen in schematisatiekeuzes. Verder gaf Nelen & Schuurmans expertondersteuning gedurende het project.

2 Modelbouw en studieopzet

In dit hoofdstuk benoemen wij de belangrijkste uitgangspunten voor de modelopbouw en bresschematisatie.

2.1 Uitgangspunten

Voor de opbouw van het 3Di-referentiemodel is eerst een basismodel opgesteld door N&S (met data van SOBEK en het eerdere D-HYDRO project). Deze is vervolgens verder uitgewerkt door Arcadis tot een referentiemodel. Het doel was het opstellen van een geschikt model om de verkenningen uit te voeren in de context van deze studie. Concreter: een model dat met maximaal 1 uur locatie-specifiek geschematiseerd wordt (bres intekenen) en resultaten levert, en vervolgens een accuraat beeld geeft van het effect van de dijkdoorbraak. Daarmee is het geen nauwkeurig beleidsmodel, maar eerder een efficiënt opgesteld model met de belangrijkste eigenschappen. Tabel 1 geeft de belangrijkste modeleigenschappen, waarna in paragraaf 2.2 en 2.3 toelichting wordt gegeven op de gemaakte modelkeuzes.

Tabel 1 Uitgangspunten referentiemodel.

Modelkeuzes	Toelichting
1. Variant: 2D model	Het 2D model heeft uitgegraven watergangen en 1D kunstwerken om obstakels in de hoogtekaart te doorsnijden.
2. Variant: Integraal 1D2D model	Dit model is een uitbreiding van het 'alleen 2D model'. Deze bevat 1D watergangen en kunstwerken behorend aan deze watergang. Deze keuze is vooral gemaakt ter vergelijking met het 2D model.
3. Resolutie: rekengrid 40x40m in stedelijk gebied en rondom kunstwerken, daarbuiten 80x80m. Subgrid 0,5x0,5m	Een 80 meter rooster inclusief verfijning zorgt voor een redelijk aantal rekenpunten (19.961.), zonder veel kwaliteit te verliezen. Het subgrid heeft een resolutie van 0,5 m; deze resolutie wordt tijdens de berekening gebruikt bij o.a. het vertalen van volumes naar waterstanden, frictie en doorstroomoppervlak.
4. Schematisatie bres en buitenwater	Het buitenwater (de IJssel) is zo geschematiseerd dat de waterstand enkel door de waterstandsrandvoorwaarde wordt bepaald. Dit wordt bereikt door het 'bakje' waarmee het buitenwater is geschematiseerd voldoende groot te maken. De bak is 1000 meter breed. 12 meter diep en 55 meter lang, met aan het bovenstroomse uiteinde een waterstandsrandvoorwaarde (tijdreks). De bres bevindt zich in de buurt van Bronckhorst. De parameters voor bresgroei (materiaal van de kering, maximale bresdiepte, duur tot het bereiken van de maximale bresdiepte) zijn gelijk of vergelijkbaar gekozen aan de D-HYDRO instellingen.
5. Buitenwaterstanden uit D-HYDRO voor Bronckhorst met bres.	Op het 'buitenwaterbakje' wordt een buitenwaterstandsverloop opgedrukt. Dit verloop is geëxporteerd uit de resultaten van de D-HYDRO simulatie met bres. Dit zorgt ervoor dat waterstandsverlaging ten gevolge van de bres (zoals gesimuleerd door D-Hydro) ook is meegenomen. Dit is belangrijk omdat het Rijntakken niet in dit 3Di model is meegenomen (dit is wel mogelijk).
6. Frictie en infiltratie	Frictie (Manning, ruimtelijk variërend op basis van landgebruik, 0.058 in stedelijk gebied, 0.03 in landelijk gebied) en infiltratie zijn ook meegenomen. Er wordt hier gerekend met een hoge grondwaterstand. Het water kan 10 cm infiltreren.
7. Initiële waterstand	Op basis van winterwaterstand, zelfde rasterdataset als gebruikt voor D-HYDRO.

2.2 Schematisatiekeuzes

In deze paragraaf motiveren wij relevante schematisatiekeuzes.

2.2.1 Rekenrooster

Het rekenrooster bestaat uit rekencellen van 80x80 als basis. In stedelijk gebied, bij onderdoorgangen en rondom kunstwerken worden deze verfijnd naar 40 meter. Hoewel de verfijning voor het algehele overstromingspatroon beperkt effect heeft, leidt het wel tot nauwkeurigere simulaties in het stedelijk gebied. Droogval in stedelijk gebied wordt daarmee realistischer geschematiseerd. De subgrid resolutie is 0,5 meter.

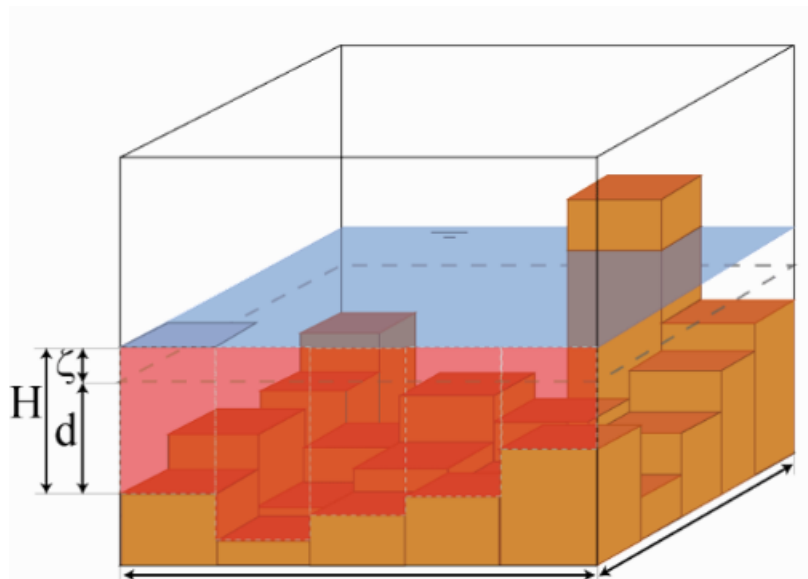
Wat is subgrid en hoe werkt het?

Subgrid is een methode om tijdens de berekening zoveel mogelijk invoergegevens op de oorspronkelijke, hoge resolutie te gebruiken, terwijl het aantal rekencellen - en daarmee de rekentijd - gelijk blijft. Dit maakt de berekening van onder meer waterstanden, doorstroomoppervlak en frictie (en daarmee ook het overstromingsbeeld) nauwkeuriger, terwijl de berekening wel snel klaar is. Zo worden de subgrids onder andere gebruikt voor het genereren van hoogte/berging, hoogte/infiltratie en hoogte/afvoer relaties per cel.

Waterstanden variëren op een kleine afstand (bijvoorbeeld 80 meter) bijna niet, terwijl de maaiveld- of bodemhoogte op deze schaal wel sterk kan variëren. Subgrid maakt hiervan gebruik door de waterstanden te berekenen op een grove resolutie (het 'rekengrid', met grote rekencellen) en de variatie in maaiveld- of bodemhoogte op een fijne resolutie (het 'subgrid', met kleine pixels). In plaats van 'nat' of 'droog' kan een rekencel nu gedeeltelijk nat zijn. Per rekentijdstap wordt voor elke rekencel het volume in die cel berekend vertaald naar een waterstand op basis van het hoogteverloop in de cel. Zolang een gebied niet volledig geïnundeerd is, is de relatie tussen volume en waterstand non-lineair. Subgrid stelt het rekenmodel in staat om deze non-lineaire relaties goed te beschrijven, terwijl modellen zonder subgrid aannemen dat waterstand altijd recht evenredig toeneemt met het volume.

Het doorstroomprofiel tussen de ene en de volgende rekencel wordt beschreven door alle subgridcellen die op de rand tussen deze twee rekencellen liggen. Hierdoor kan stroming door bijvoorbeeld slotjes van 2 meter breed, die veel smaller zijn dan rekencel van 80 meter, op de rand van de cel nauwkeurig berekend worden zonder de noodzaak om de rekencelgrootte te verlagen naar 2 meter of minder. Zonder subgrid zouden de hoogtes over 80 meter uitgemiddeld worden, waarmee het slotje 'dichtgesmeerd' zou worden en er geen water meer doorheen kan stromen.

Ook bij de berekening van de frictie wordt het subgrid gebruikt. Elke pixel heeft zijn eigen waterdiepte, en daarmee een eigen frictie. Omdat de relatie tussen waterdiepte en frictie non-lineair is, geeft het middelen van deze fricties een accuratere frictiewaarde dan wanneer, zoals gebruikelijk in modellen zonder subgrid, frictie wordt berekend op basis van de gemiddelde waterdiepte. Zie ook (Volp, van Prooijen en Stelling, 2013).



Figuur 1 Voorbeeld van een rekencel met de bathymetrie gedefinieerd door het subgrid. Zie ook https://docs.3di.live/h_grid.html

2.2.2 Verhoogde lijnelementen

In 3Di kunnen landschappelijke lijnelementen die smaller zijn dan de rekencel worden geschematiseerd als 'obstacle'. Dit is vergelijkbaar met wat in D-HYDRO 'fixed weirs' heet. Water stroomt hier alleen overheen als de waterstand hoger is dan de opgegeven kruinhoogte ('crest level').

In het referentiemodel is de identieke set lijnelementen overgenomen van D-HYDRO. Qua rekentijd is de verwachting dat de invloed beperkt is. Net als bij D-HYDRO leiden de obstacles tot een realistischer overstromingspatroon (bij een grover grid) door de in werkelijkheid optredende compartimentering beter te benaderen in het model. Waar de hoogte van het rooster in D-HYDRO een gemiddelde is van het hoogtemodel, wordt de hoogte/waterstand in 3Di bepaald door het subgrid. Het doorstroomoppervlak in D-HYDRO naar de volgende rekencel is daarom een gemiddelde, verhogingen in het landschap in het midden van een cel worden daardoor maar beperkt meegenomen door de gemiddelde hoogte.

Het doorstroomoppervlak in 3Di wordt bepaald door de pixels op de rand van de rekencellen. Hierdoor worden verhogingen in het landschap die op de randen van de cellen vallen goed meegenomen. Als verhogingen (of verlagingen) in het midden van een cel liggen hebben die geen invloed op het doorstroomoppervlak (op de rekencelranden) en wordt de stroming niet juist gesimuleerd. Daarom zijn 3Di obstacles en lokale roosterverfijningen van belang.

2.2.3 Bressen en doorsnijdingen

Nieuwe rekenmethode:

Een bres in 3Di is een 1D-2D verbinding, via welke water vanuit een 1D watergang ('channel') naar 2D stroomt. Als de bres gesloten is, kan er alleen water vanuit de watergang het maaiveld opstroomen als de waterstand boven de uitwisselingshoogte ('exchange level') uitkomt. In de meeste gevallen is deze uitwisselingshoogte de kruinhoogte van de kering. Dit wordt in de 3Di Modeller Interface geschematiseerd door een *potential breach* te tekenen; dit is een lijntje die begint op het channel en loopt naar een punt op het maaiveld aan de andere kant van de kering. De *exchange level* is een attribuut van deze *potential breach*, en wordt opgegeven na het intekenen.

Als de bres geopend wordt, zal de bres gaan groeien volgens de formule van Verheij & Van der Knaap. Deze bresgroei bestaat uit twee fasen. De bres begint met een initiële breedte ('initial width') en zal eerst alleen dieper worden, totdat de maximale bresdiepte ('maximum breach depth') is bereikt. De initiële bresbreedte, de maximale bresdiepte (ten opzichte van de uitwisselingshoogte), en hoelang het duurt voordat de maximale bresdiepte is bereikt ('duration'), wordt door de gebruiker opgegeven.

Vervolgens begint de tweede fase, waarin de bres in de breedte groeit. De snelheid van deze groei in de breedte is afhankelijk van het materiaal van de kering en het waterstandsverschil tussen het buitenwater en het achterland. De benodigde bresgroeiparameters kunnen worden opgegeven op het moment tijdens de simulatie waarop de bres wordt geopend. Indien gewenst kunnen er alvast defaultwaarden worden opgegeven bij het maken van de schematisatie; om deze reden zijn deze parameters ook attributen van de *potential breach*. De tijd naar maximale bresdiepte is ingesteld op 10 minuten en de initiële bresbreedte op 20 meter. Dit is overeenkomstig met de D-HYDRO simulaties.

Het debiet door de bres wordt berekend met een lange overlaatformulering, waarbij als lengte van de overlaat door 3Di een vaste waarde van 30 m wordt gehanteerd (deze is wel instelbaar).

De rivieren zijn (nog) geen onderdeel zijn van dit 3Di model, maar er is wel een 1D watergang nodig om de bres te kunnen laten beginnen. Daartoe is er een kort stukje rivier geschematiseerd, op zo'n manier dat de waterstand enkel door de opgegeven waterstandsrandvoorwaarde wordt bepaald. Dit wordt bereikt door dit stukje rivier voldoende volume en diepte te geven. De 'bak' is 1000 meter breed en 12 meter diep, met aan het bovenstroomse uiteinde een waterstandsrandvoorwaarde. De waterstandsreeks van D-HYDRO wordt opgelegd als 'boundary condition' aan het begin van de watergang. Als initiële waterstand in de 'bak' wordt de eerste waterstand in de opgelegde waterstandsreeks van D-HYDRO gebruikt.

2.3 Best practices en aandachtspunten

De belangrijkste data voor een 2D overstromingsmodel in 3Di zijn een hoogtemodel, frictie, verhoogde lijnelementen en doorsnijdingen. Een hoogtemodel (DEM) bepaalt waar het water stroomt. Frictie bepaalt (naast de variatie in je hoogtemodel) hoe snel het stroomt. In het hoogtemodel is het belangrijk om de DEM ter plaatse van watergangen dieper te maken, zodat je watergangen de juiste berging en doorstroomoppervlak hebben. Voor watergangen in gebieden met een gereguleerd peil is de DEM ter plaatse van BGT-watervlakken verlaagd tot 1 meter onder streefpeil, waarna de initiële waterstand op die plek op streefpeil is gezet. Voor vrij afwaterende gebieden is de DEM ter plaatse van BGT-watervlakken verlaagd met 1 meter. In het model van DR49 is de bodemhoogte van de watergangen overgenomen uit de leggergegevens van het waterschap. Diepe plassen zijn hieraan handmatig toegevoegd.

Het toekennen van initiële waterstanden aan vrij afwaterende watergangen is alleen zinvol als er ook een debiet door deze watergangen op gang wordt gebracht (bijvoorbeeld met een debietrand), wat voor overstromingsmodellen meestal niet relevant is. Dat is voor dit model daarom niet gedaan.

De verhoogde lijnelementen moeten worden toegevoegd als *obstacle*, en de hoogte krijgen die het betreffende lijnelement in werkelijkheid heeft (af te leiden uit de DEM). Anders dan de *fixed weirs* in D-HYDRO, waar je voor één object een verloop van hoogtes kan opgeven, moet dit in 3Di per *obstacle*. Om deze reden is het belangrijk de hoge lijnelementen op te knippen als er veel variatie is. Het heeft echter geen nut om het lijnelement korter te maken dan de rekencelgrootte, gezien elke rekencel maar één waarde pakt.

Als watergangen worden gekruist door wegen, zal de AHN de weghoogte bevatten. De watergang wordt daardoor dus geblokkeerd, terwijl er waarschijnlijk in werkelijkheid een brug of duiker aanwezig is. Omdat het rekenrooster veel groter is dan de wegbreedte, zullen deze blokkades door het rekengrid meestal worden overgeslagen, en hoeft er niets aan de schematisatie aangepast te worden om de doorstroming te garanderen. Als deze blokkades echter precies op de grens tussen twee rekencellen liggen, zal de doorstroming wel worden gehinderd. Het verbeteren van de schematisatie op deze locaties verbetert de afvoer van overstromingswater naar het achterland; ook kan het relevant zijn als er overstroming vanuit de watergang wordt verwacht. Dit kan worden opgelost door de DEM op die plek 'uit te gutsen' (relatief weinig werk), of door de brug of duiker als 1D kunstwerk te schematiseren (veel werk).

Op locaties waar de watergang niet (alleen) door een verhoging in de DEM, maar (ook) door een *obstacle* wordt doorsneden, is het schematiseren van kunstwerken in 1D vaak de beste oplossing. Het kunstwerk moet een verbinding vormen tussen de twee rekencellen aan weerszijden van het *obstacle*. Door het rekengrid op deze locaties te verfijnen, zal dit sneller het geval zijn. Genereer om hier zeker van te zijn eerst het rekenrooster, dan kun je zien op welke rekencellen de obstacles daadwerkelijk effect hebben. Vervolgens leg je het 1D element over deze rekencelranden. Het rekentype van het 1D element moet 'connected' zijn, zodat er uitwisseling tussen 1D en 2D mogelijk is.

2.4 Scenario's

In deze verkenningstudie zijn de volgende scenario's verkend, met bijgevoegd de verwachte meerwaarde. Bij de scenario's vergelijken wij met het "**Referentiemodel**": *Basisreferentie zoals toegelicht in paragraaf 2.1 en 2.2. Betreft een 3Di model (1D2D) met een rekengrid van 80x80, lokale verfijningen met obstacles (verhoogde elementen) en 1D kunstwerken en onderdoorgangen.*

Tabel 2 Scenario's 3Di verkenning.

Scenario	Onderzoeksvragen
1. Bresdebieten uit D-HYDRO als randvoorwaarde.	Wat zijn de verschillen tussen de 3Di- en D-Hydro simulaties als exact hetzelfde bresdebiet wordt opgelegd. De verschillen kunnen dan alleen veroorzaakt worden door een verschil in verspreiding/stroming in het achterland.
2. "Resultaat" buitenwaterstanden uit D-HYDRO.	Wat zijn de verschillen tussen de 3Di- en D-Hydro simulaties voor wat betreft de bresbreedte en het bresdebiet als de rivierwaterstand hard wordt opgelegd.
3. 2D schematisatie (i.p.v. 1D2D)	Heeft het meerwaarde om de watergangen in 3Di te schematiseren in 1D voor overstromingssimulatie? De hypothese is dat watergangen in 3Di goed in 2D gemodelleerd kunnen worden door de subgrid techniek.
4. Rekengrid 2x zo fijn (40x40)	Wat is de nauwkeurigheidswinst bij een 2x zo fijn rekengrid? En welke extra rekentijd geeft dit?

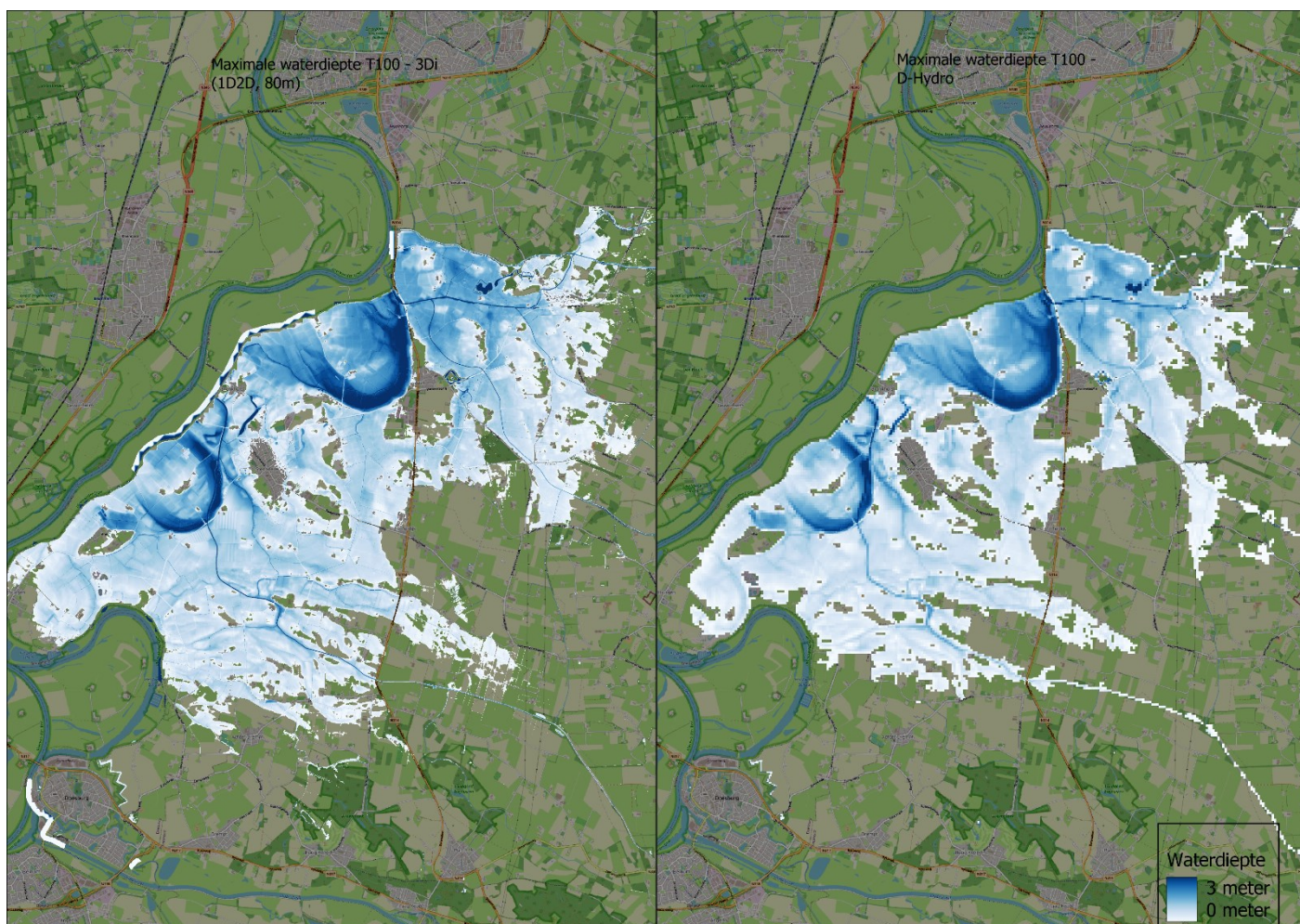
3 Resultaten

Dit hoofdstuk bespreekt de resultaten en licht deze voor zover mogelijk toe. Eerst gaan wij in op algemene observaties op het referentiemodel. Daarna volgen de resterende scenario's.

3.1 Algemeen

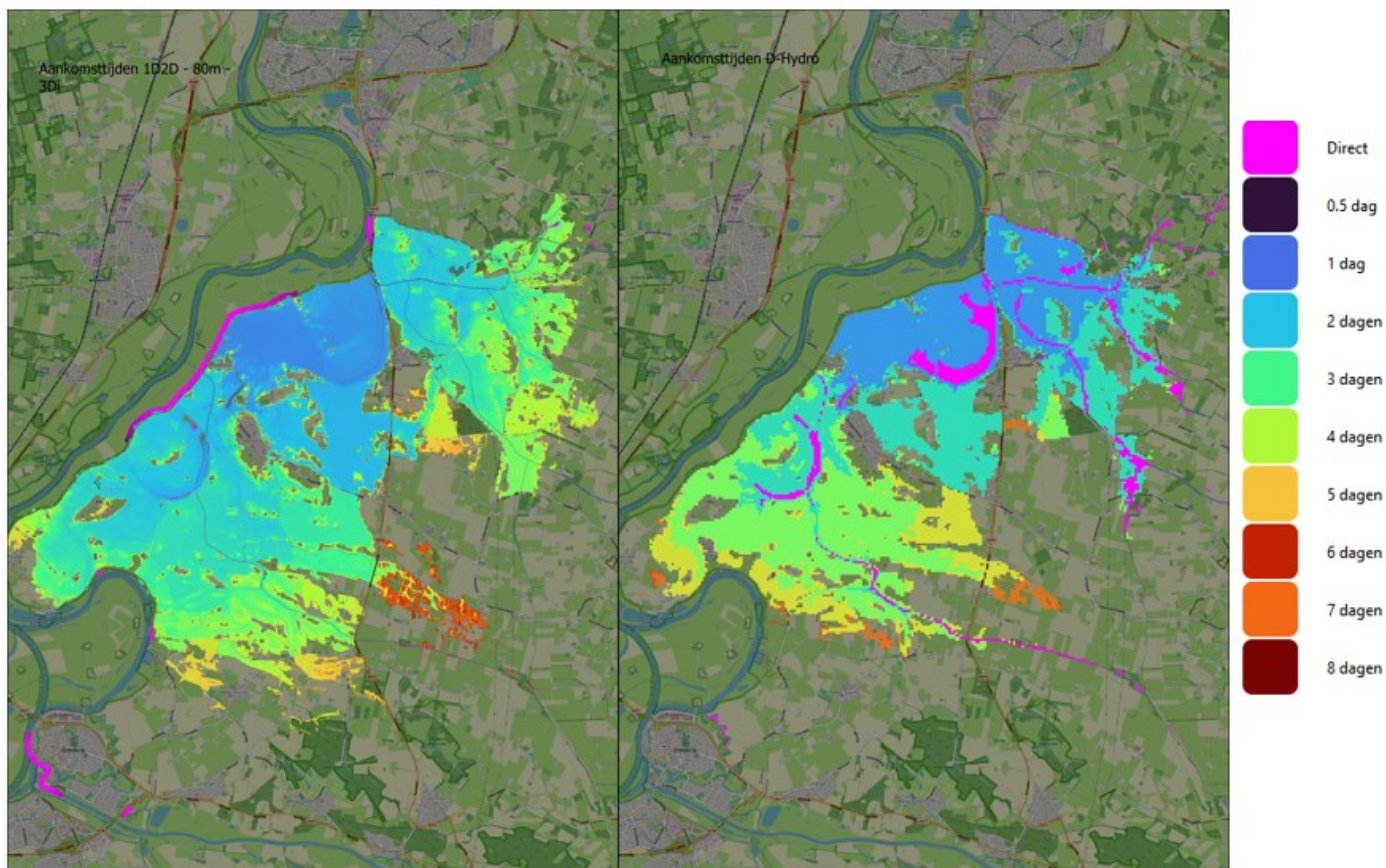
Deze paragraaf bespreekt de simulatieresultaten van het referentiemodel en vergelijkt deze met D-HYDRO. Omdat de Tygron debieten in de studie een onderschatting bleken door het binnendijkse waterstandsmmeetpunt zijn deze niet opgenomen in het rapport. De vergelijking van 3Di met Tygron volgt in Paragraaf 4.3. Het referentie model is het 1D2D model met een resolutie van 80 meter.

3.1.1 Overstromingspatroon en aankomsttijden



Figuur 2 Maximale waterdieptes voor het 3Di referentiemodel (links) en D-HYDRO T100 (rechts). Om met een vergelijkbare legenda te werken zijn waterdieptes begrenst op 3m. Bij D-HYDRO zijn de maximale waterdieptes rondom de bres hoger.

Om het overstromingspatroon te vergelijken wordt er gekeken naar twee kaarten: de aankomsttijd en de maximale waterdiepte. Met een verschil van ongeveer 7% in het cumulatief debiet is de instroom in beide modelinstrumentaria nagenoeg gelijk. D-Hydro valt daarin dus 7% hoger uit dan 3Di. De waterdiepte geeft een beeld van het totale overstroomde gebied. De aankomsttijden geven een beeld van de snelheid waarin bepaalde gebieden overstromen.



Figuur 3 Aankomsttijden voor 3Di (links) en D-Hydro (rechts) van de T100.

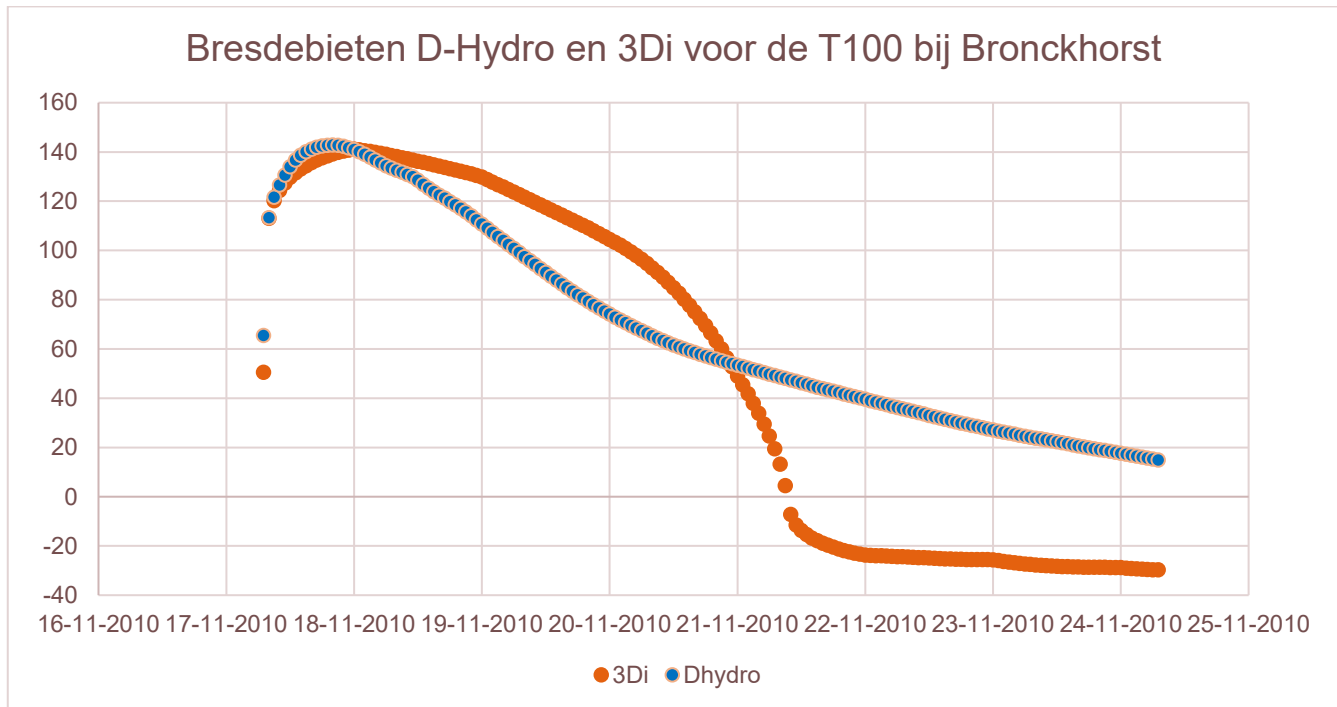
In grote lijnen zijn de overstromingspatronen vergelijkbaar. Toch zien wij de volgende twee verschillen:

In 3Di is een groter oppervlak geïnundeerd en lijken de maximale waterstanden (iets) hoger. Dit is ondanks het hogere cumulatieve bresdebiet (7%).

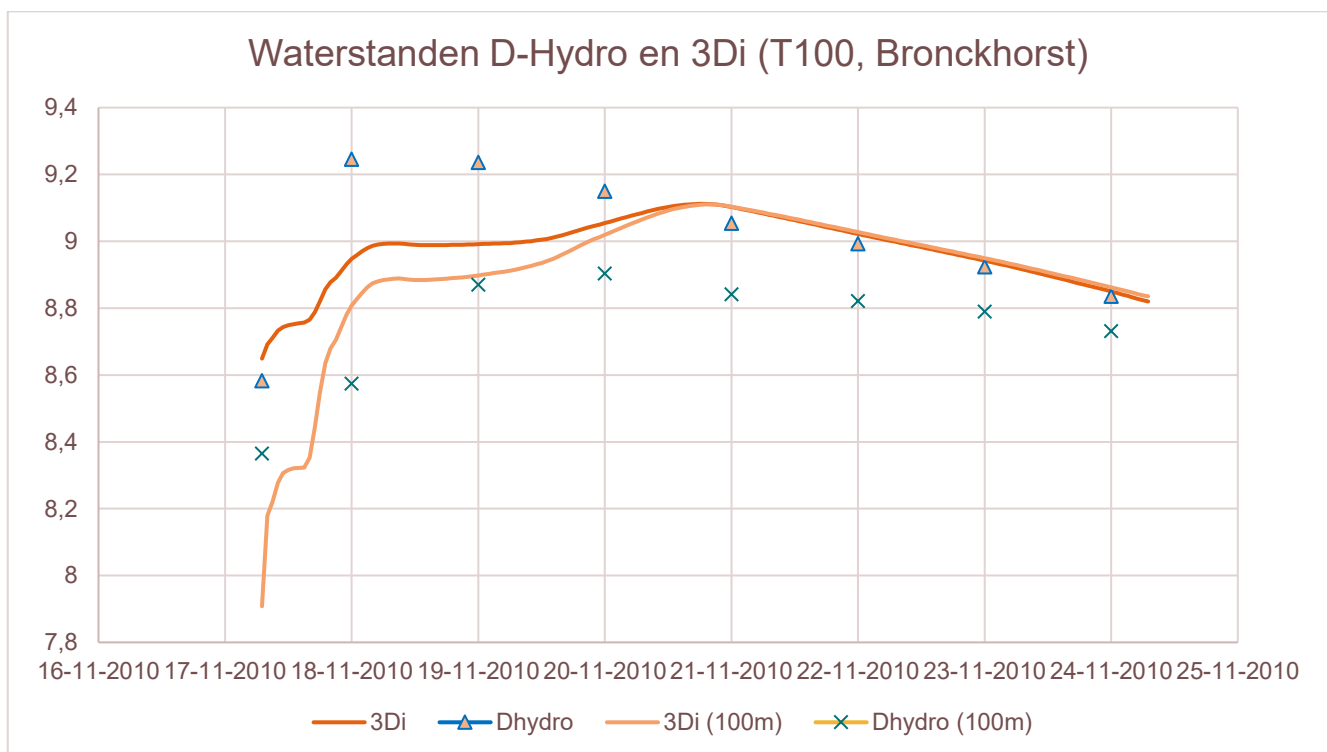
- Een verklaring hiervoor is de afvoer via de spuikokers bij het gemaal. Deze is in D-Hydro opgenomen, maar niet in 3Di. Via deze constructie wordt al vroeg in de simulatie water afgevoerd (ca. 10 m³/s). Ten opzichte van het piekdebiet (140 m³/s) is dit flink, waardoor de maximale waterstanden lager uitvallen.
- Een andere verklaring voor de ruimtelijke verplaatsing is het effect van het subgrid in 3Di. De subgridmethode maakt het mogelijk dat water door watergangen kan stromen die smaller zijn dan de rekencelgrootte, met de juiste stromingsdiepte en dus frictie. Hierdoor is de afvoercapaciteit naar het achterland groter. Zie paragraaf 2.2.1 voor een uitgebreidere toelichting. In de aankomsttijden is goed te zien dat in het zuiden D-Hydro geel is, waar 3Di blauw is. In principe is dit realistisch (watergang als "snelweg").
- Wel wordt lokaal de afvoercapaciteit overschat, doordat watergangen dubbel zijn meegenomen (in 1D, én in 2D). Door de beperkte hoeveelheid 1D watergangen is dit waarschijnlijk beperkt. Door deze watergangen uit het grid te verwijderen of op te vullen kan dit voorkomen worden.
- De infiltratiesnelheid is verschillend gedefinieerd, maar is in beide modellen ongeveer 10 cm.

3.1.2 Bresdebieten en waterstanden

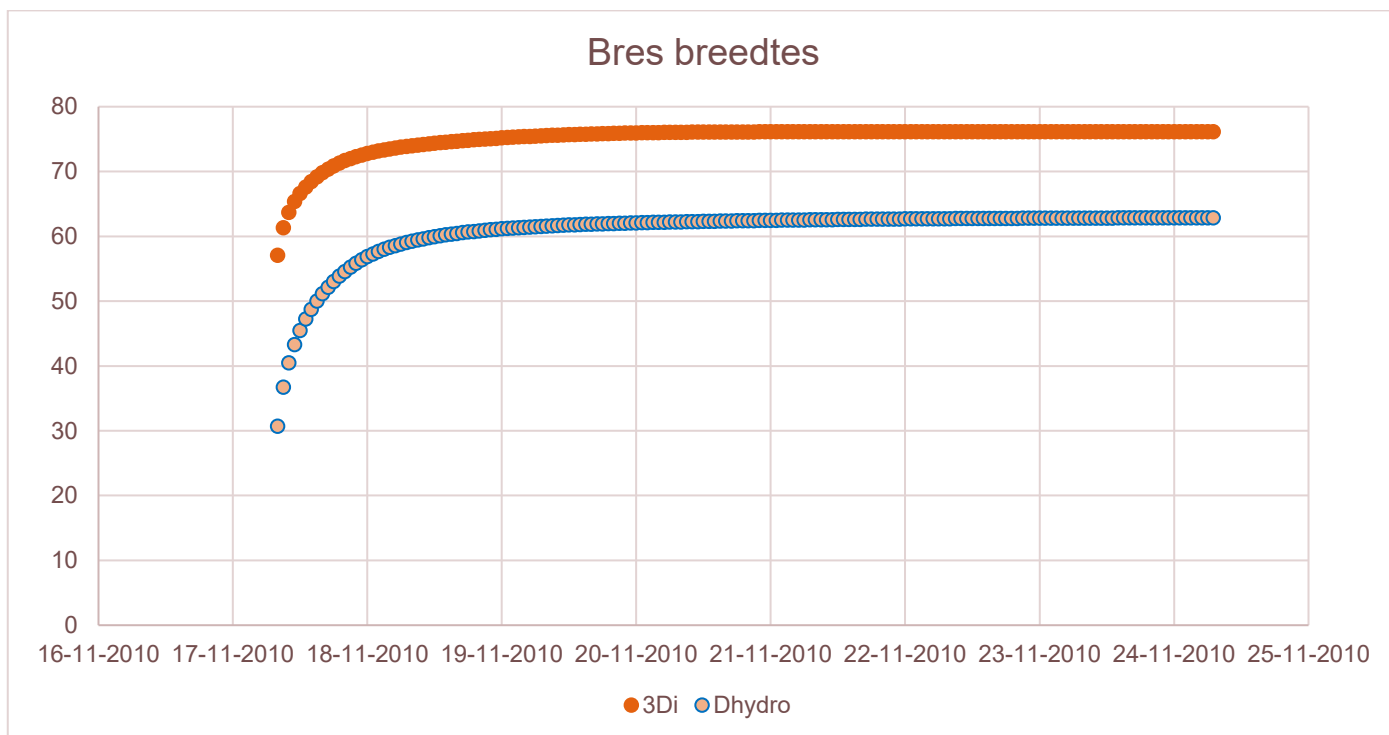
Onderstaande grafieken geven een vergelijking tussen 3Di en D-Hydro voor de bresdebieten, waterstanden en bresbreedtes.



Figuur 4 Bresdebeten D-Hydro en 3Di.



Figuur 5 Waterstand van de ontvangende cel en 100 meter van de bres. Let op: locaties van de 100m punten komen niet precies overeen in D-Hydro en 3Di.



Figuur 6 Bres breedtes gedurende de simulatie.

De D-HYDRO simulatie en 3Di-simulatie geven vergelijkbare debietpieken. Hierna is het verloop van het debiet anders. 3Di blijft langer een hoog debiet aanhouden waar D-HYDRO juist inzakt. De laatste paar dagen van de simulatie wordt het debiet van 3Di ook negatief terwijl D-Hydro positief blijft. Het beeld van het debiet komt overeen met het beeld van de waterstand van de ontvangen cel. In D-HYDRO wordt de maximale waterstand achter de bres snel bereikt, terwijl in 3Di de waterstand na enkele dagen bij de bres nog steeds toeneemt.

In combinatie met de waterstanden verder van de bres is te zien dat in 3Di minder “weerstand” in het systeem aanwezig is, waardoor water makkelijker over het achterland wordt verspreid. De sneller verplaatsing in het systeem zien we ook terug in de aankomsttijden en de verdere verspreiding van het water door de hele dijkkring. Dit wordt grotendeels veroorzaakt door het subgrid, waardoor water makkelijker via “deels” geïndundeerde cellen verplaatst kan worden. In D-Hydro wordt hierbij de weerstand mogelijk overschat, maar in 3Di kunnen er op celniveau lekkages ontstaan, waardoor de weerstand mogelijk wordt onderschat.

De bresbreedte in 3Di is groter in D- HYDRO. De bresinstellingen en formulering zijn hetzelfde (20 meter initieel, zand etc.). De grotere bresbreedte komt mogelijk doordat de eerste uren van de overstroming de waterstandsgradiënt in 3Di veel groter is. D- HYDRO gaat hierbij uit van de gemiddelde maaiveldhoogte in een cel die ongeveer 100m achter de bres ligt. 3Di gebruikt de cel direct achter de bres, maar door het subgrid gebruikt de minimale “maaiveldhoogte” in deze cel als initiële waterstand (droge initialisatie). Het gaat hierbij deels om watergangen die nog gevuld moeten worden met water. Hierdoor groeit de breedte van de bres relatief snel in 3Di. Na de eerste dag wordt het bresdebiet maar beperkt bepaald door de bres zelf en meer door de afvoercapaciteit van het achterland. Hierdoor groeien de bresdebieten van 3Di en D-HYDRO snel naar elkaar. Pas later in de simulatie wordt het effect van de spuiwerker bij het gemaal zichtbaar. Hierdoor wordt in 3Di het debiet na 5 dagen negatief, terwijl er in D-HYDRO nog steeds water via de bres naar binnen blijft stromen.

3.1.3 Waterbalans en rekentijd

Het totale instroomvolume is in het 1D2D basisscenario 38 miljoen m³. Hiervoor blijft er 28,4 miljoen m³ over aan het eind de berekening. Het overige infiltreert in de bodem. De infiltratiehoeveelheid in D-HYDRO is vergelijkbaar. Het volume dat aan het eind van de berekening nog in het model achter blijft is wel veel lager. Dit komt doordat de spuiwerkers bij het gemaal niet in 3Di zijn geschematiseerd.

Term	3Di	D-Hydro
Cumulatief bresdebiet	38.053.904	41.834.490
2D initieel	720.697	
2D einde	28.475.841	
1D initieel	581.745	
1D einde	815.305	
Infiltratie	4.173.222	

Figuur 7 Waterbalans in aantal m3.

De rekentijd van het model was 1 uur en 37 minuten (1D2D) voor de T100 bres. Voor D-HYDRO (40x40m) was dat iets meer dan 3 uur. Inclusief de schematisatietijd voor de bres zelf (ca. 15-30 minuten) kan met 3Di ad-hoc een realistisch overstromingsbeeld worden gegenereerd. Dit overstromingsbeeld is, door de mogelijkheid van live rekenen, ook al in te zien voordat de simulatie is afgerond na 3 dagen (ca. 11 minuten rekenen) verandert het overstromingsbeeld weinig meer.

Gedurende het onderzoek bleek dat tijdstap grootte ook een rol speelde in de breedte van de bres. De huidige simulaties zijn gedaan met een maximale rekentijdstap van 20 seconden. In voorgaande simulaties is de tijdstapresolutie ook wel eens verlaagd naar 5 minuten. Dit zorgde voor een verschil in piekdebiet van ongeveer 60%. Dit geeft aan dat het bresdebiet ook sterk gevoelig voor deze instelling. De simulaties in deze studie zijn gedaan met de kleinere tijdstap, waardoor het referentiemodel niet voldoet aan de eis (binnen één uur rekenen). Wij verwachten dat met optimalisatie dit wel te bereiken is, dit is een punt om verder uit te zoeken buiten dit onderzoek.

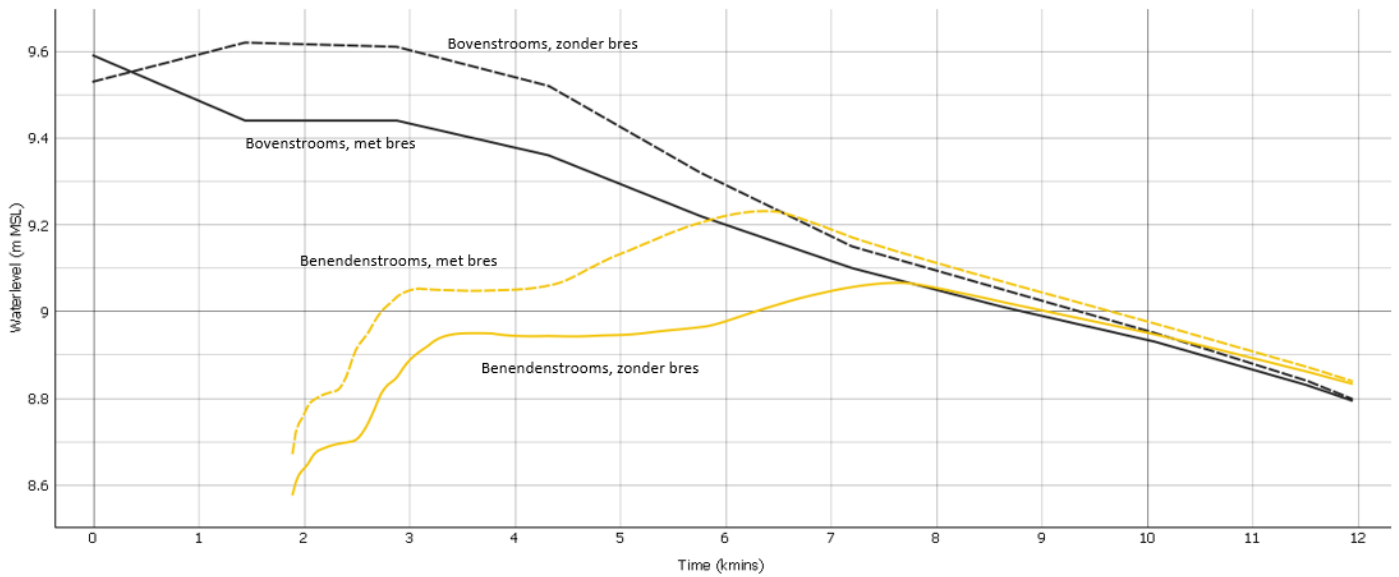
In de eerste rekenronde met een grovere tijdstap gaf het model vergelijkbare overstromingspatronen (maar niet debieten) binnen één uur. Hoewel het referentiemodel niet voldoet aan de 1-uur eis, achten wij het zeer waarschijnlijk dat het mogelijk is om een adequaat model op te stellen en te optimaliseren om binnen één uur adequaat nauwkeurige resultaten te geven.

3.2 Scenario 1: Bresdebiet als randvoorwaarde

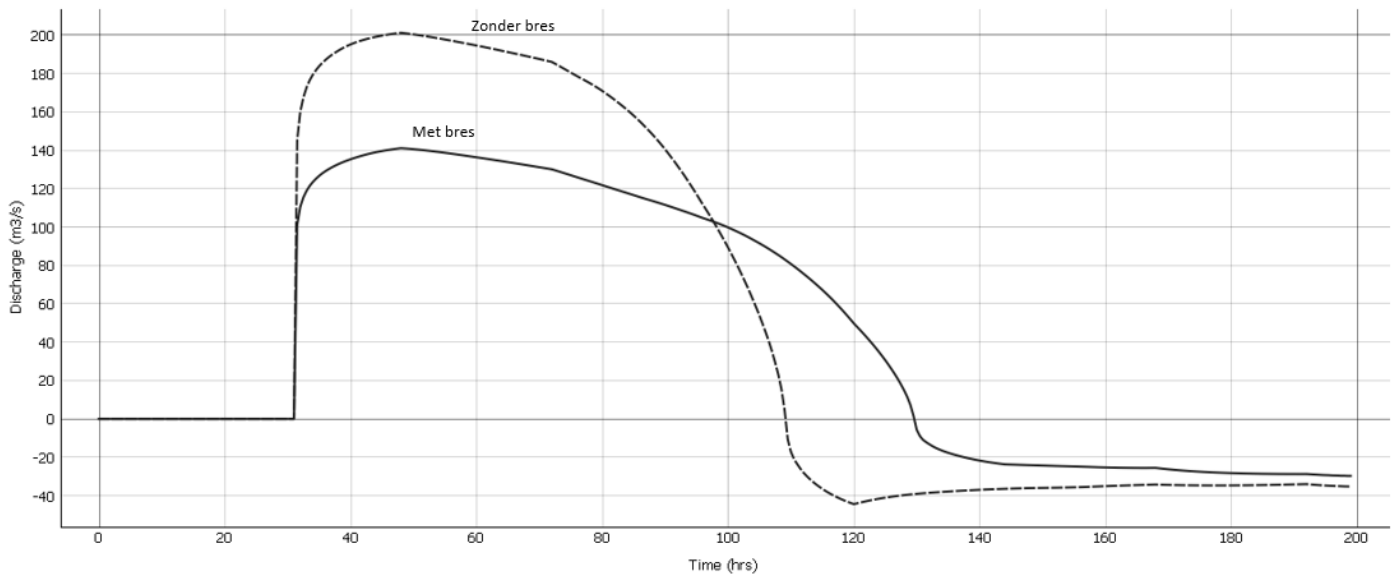
Bij de eerste verkennende berekeningen vonden we een significant verschil in bresdebieten. Om de overstromingspatronen te vergelijken was besloten om een scenario te berekenen met bresdebieten als randvoorwaarden. Doordat een fout in de parameters voor de bres was hersteld kwamen de debieten echter nagenoeg overeen (ca. 7% verschil). Dit scenario is daarom niet opnieuw doorgerekend, omdat het antwoord op de onderzoeksvragen ook uit de toelichting in 3.1.1 gevonden kan worden.

3.3 Buitenwaterstanden D-HYDRO

Voor deze studie viel het schematiseren van het Rijntakkenmodel buiten de scope; daarom is een tijdreeksinput voor de buitenwaterstanden vereist. Hiervoor waren twee opties: de waterstandsreeks uit D-HYDRO mét bres en zonder bres. Simulatie met de tijdreeks uit de "zonder-bres" reeks leidt sowieso tot een overschatting, omdat ongeacht hoeveel water door de bres stroomt, de waterstanden buitendijks niet dalen. Tegelijkertijd leidt de eerste optie "met-bres" tot realistischere waarden, maar vindt er nog steeds geen terugkoppeling plaats tussen de bresgroei van 3Di en die van D-HYDRO. **Voor daadwerkelijke toepassing als calamiteitenmodel** maakt dit niet uit, omdat er een andere oplossing voor de input gevonden moet worden (bv. Rijntakkenmodel). In het kader van kenniswerving is besloten om met dit scenario inzicht te krijgen in het effect.



Figuur 8 Waterstanden in 3Di voor de met- en zonder-bres buitenwaterstanden uit D-Hydro (T100).



Figuur 9 Bresdebieten in 3Di voor de met- en zonder-bres buitenwaterstanden in D-Hydro (T100).

Figuren 8 en 9 onderschrijven de hypothese dat de buitenwaterstanden een significant effect hebben op de debieten. In het referentiemodel is de "met-bres" reeks gebruikt. Ca. 15 cm verschil in waterstand tijdens de piek leidt daar tot ca. 40% extra piekdebiet. Dit is ook te zien in de waterbalans (Figuur 10).

Term	3Di IJssel met bres 2D 80m	3Di IJssel zonder bres 2D 80m
Cumulatief bresdebiet	37.713.563	44.542.530
2D initieel	720.523	720.523
2D einde	28.394.915	29.543.965
1D initieel	489.341	486.309
1D einde	449.952	450.212
Infiltratie	4.173.222	4.650.838

Figuur 10 Waterbalans voor de met- en zonder-bres buitenwaterstanden (T100).

3.4 Scenario 3: 1D2D vs. 2D

Een van de hoofdvragen in deze studie is de meerwaarde van een 1D2D model ten opzichte van een puur 2D model. Voor een overstroming is 2D-stroming dominant, maar 1D elementen (watergangen) hebben effect op het overstromingspatroon ("snelwegfunctie" en onderdoorgangen). In D-HYDRO is besloten 1D wél op te nemen doordat de grovere rekencellen (40m) de watergangen platslaan, en onderdoorgangen ook in 1D zijn opgenomen.

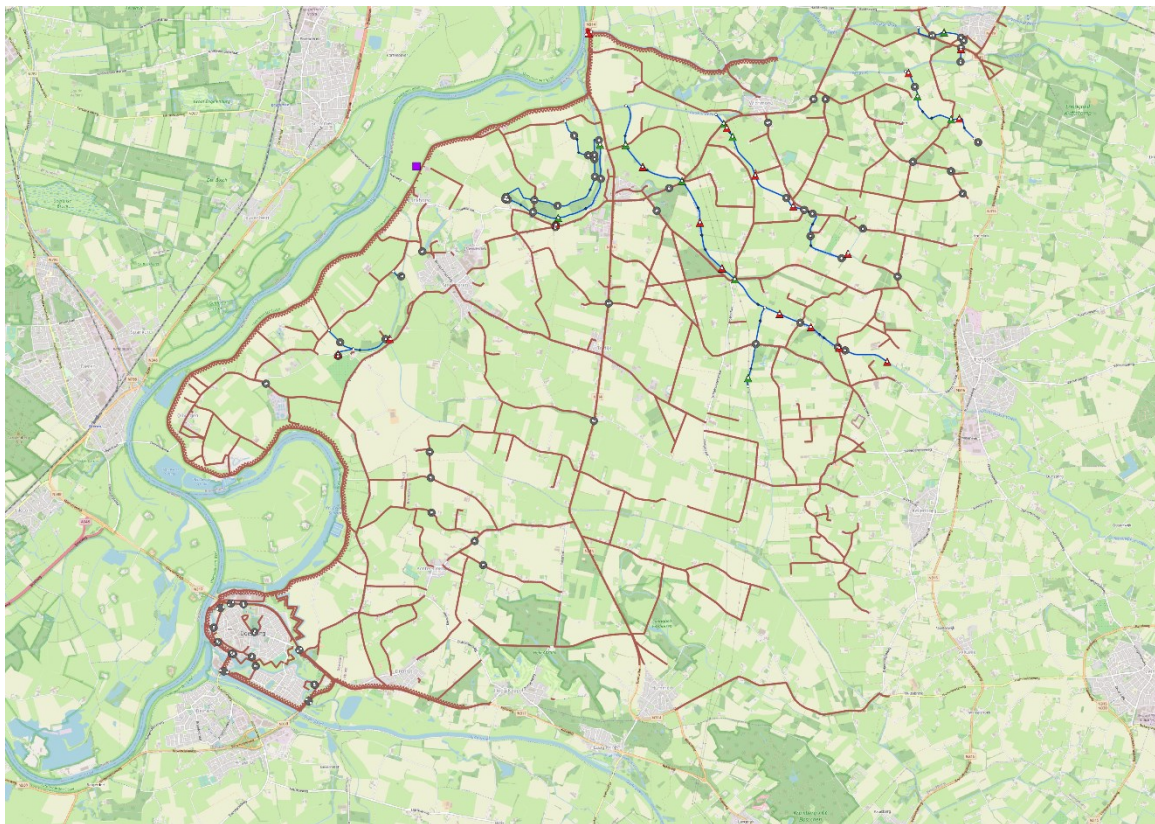
Voor 3Di is de hypothese dat 1D minder toevoegt, omdat de subgrid al tot op zekere hoogte doorstroming mogelijk maakt door de laaggelegen pixels (subgridcellen) bij watergangen. Daarnaast vergt de 1D(2D) schematisatie in 3Di enige moeite, dus ook om praktische redenen is het interessant om deze weg te laten.

3.4.1 Schematisatie

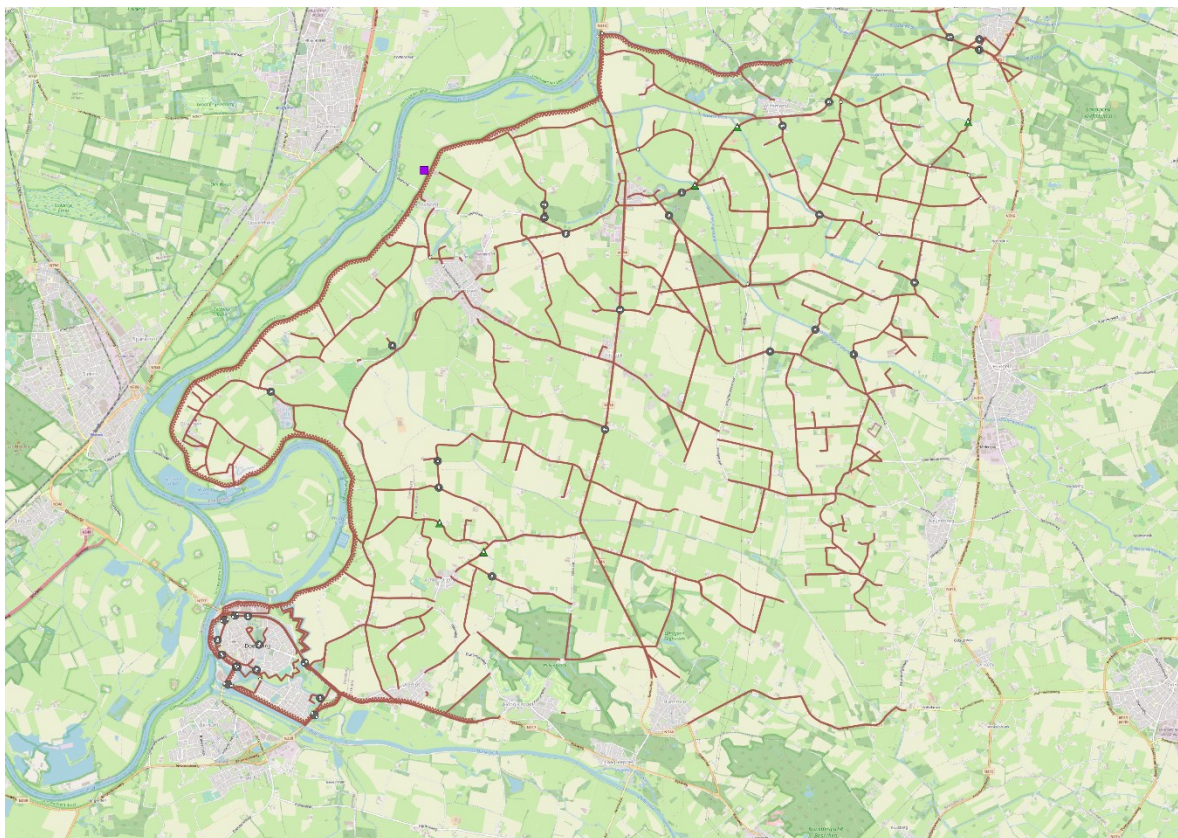
Het 2D model is opgesteld door de 1D-watergangen uit het 1D2D model te verwijderen. Kunstwerken zoals onderdoorgangen, stuwen en gemalen blijven in 1D geschematiseerd. In 3Di zijn een aantal stappen genomen om op te schonen:

- Watergangen werden eenvoudig verwijderd.
- Kunstwerken die niet op obstacles lagen zijn ook verwijderd.
- Kunstwerken die wel op obstacles lagen zijn 'connected' gemaakt.
- Overgebleven kunstwerken zijn gecontroleerd op een goede verbinding met het 2D. Hierbij is het belangrijk dat de koppeling aan de juiste cel zit (bv. niet met beide uiteinden aan dezelfde kant van het obstacle) zodat de juiste functionaliteit is geschematiseerd.

In Figuur 11 en Figuur 12 zijn de schematisaties van het 1D2D en het 2D model weergegeven. De kunstwerken en obstacles blijven behouden, enkel de 1D-watergangen zijn verwijderd.



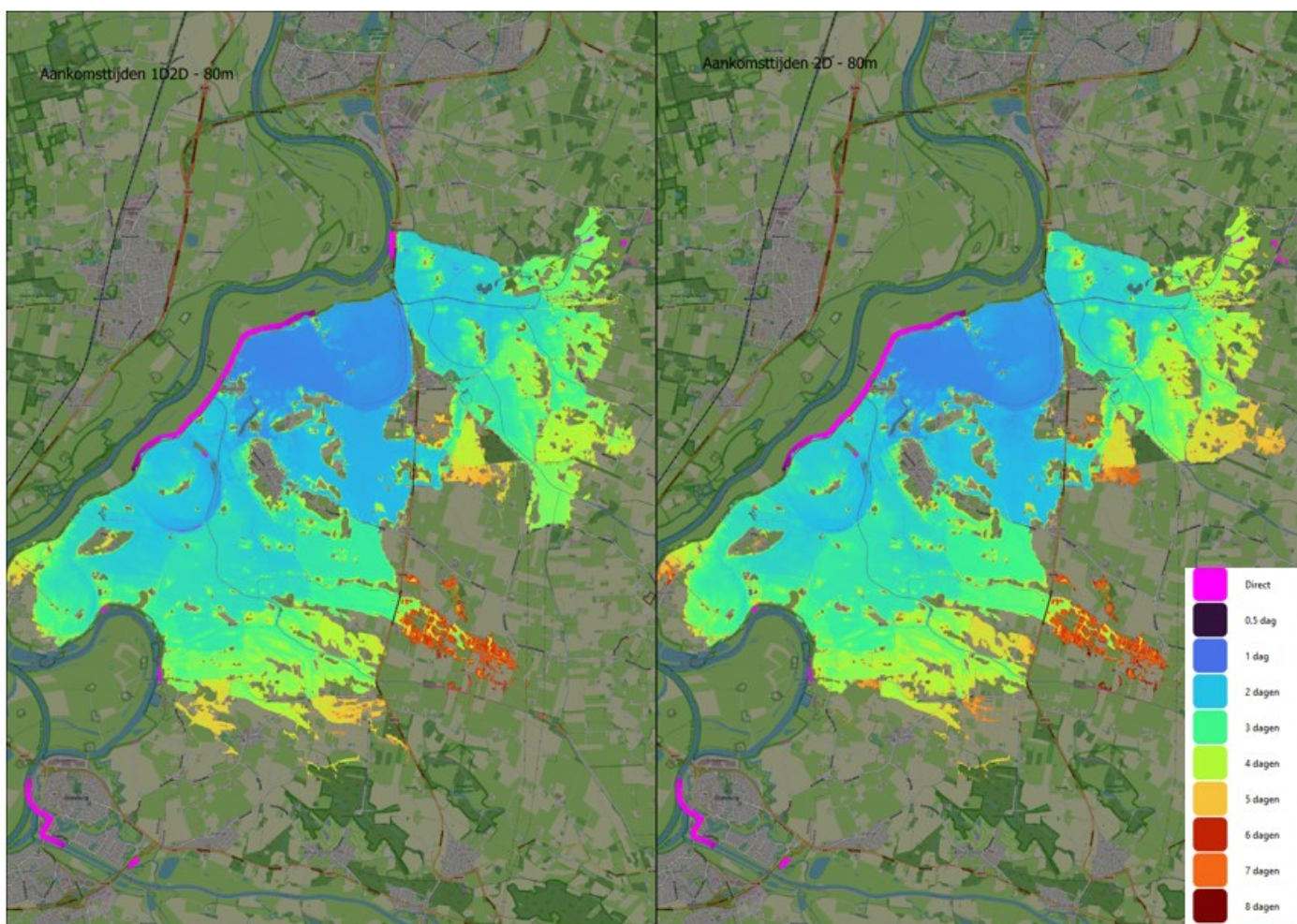
Figuur 11 Schematisatie 1D2D model.



Figuur 12 Schematisatie 2D model.

3.4.2 Resultaten

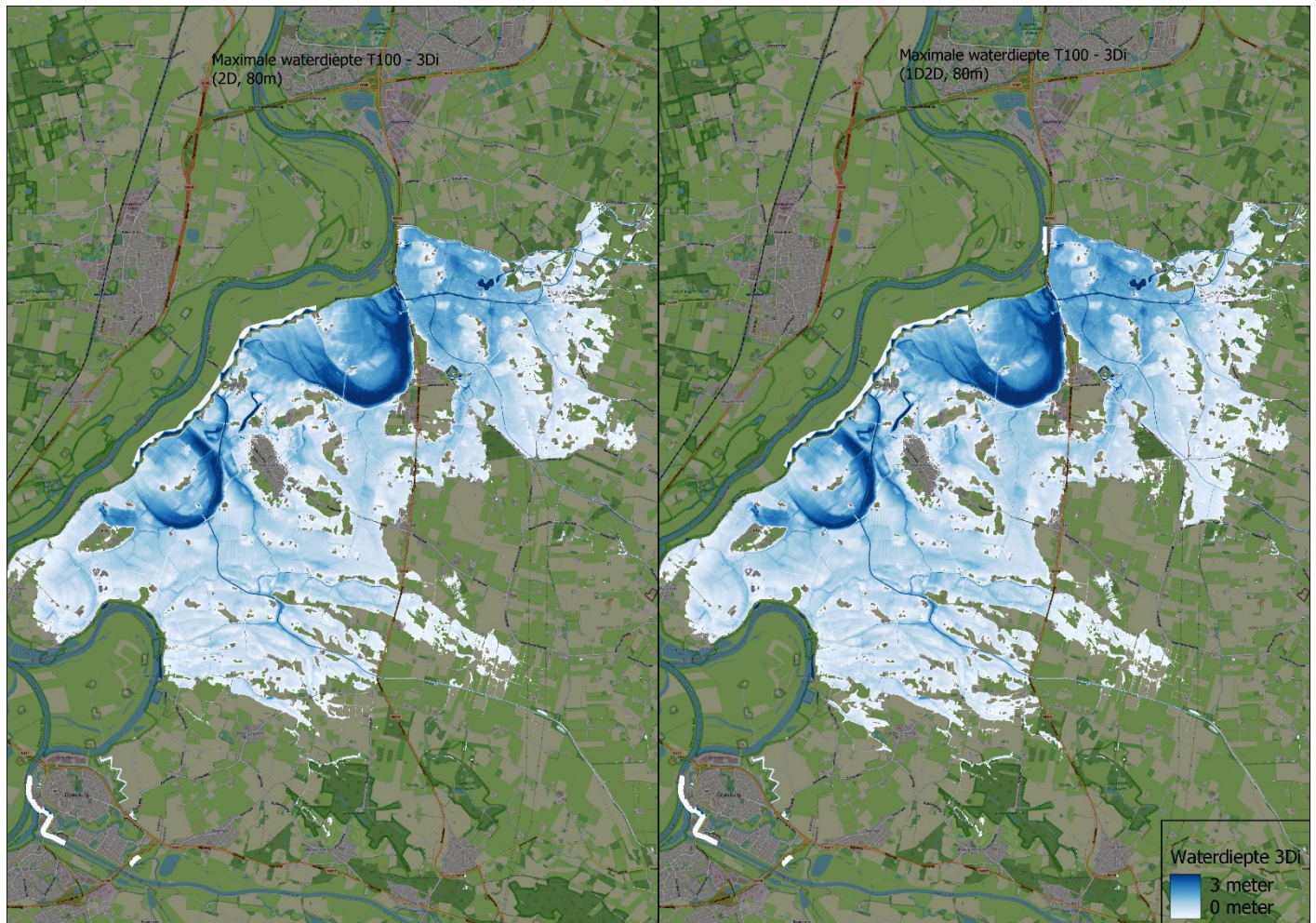
Wat betreft rekentijd geeft het verwijderen van 1D een versnelling van 1 uur en 46 minuten naar 1 uur en 37 minuten simulatietijd. Verder bespaart een 2D model (in een "blanco situatie") ook schematisatietijd, omdat de watergangen (en 1D2D verbindingen) niet worden geschematiseerd. In deze situatie was het 1D model er al (importeren van SOBEK), dus voor dit project bleek dit minder relevant.



Figuur 13 Aankomsttijden 1D2D (links) en 2D (rechts) 3Di model.

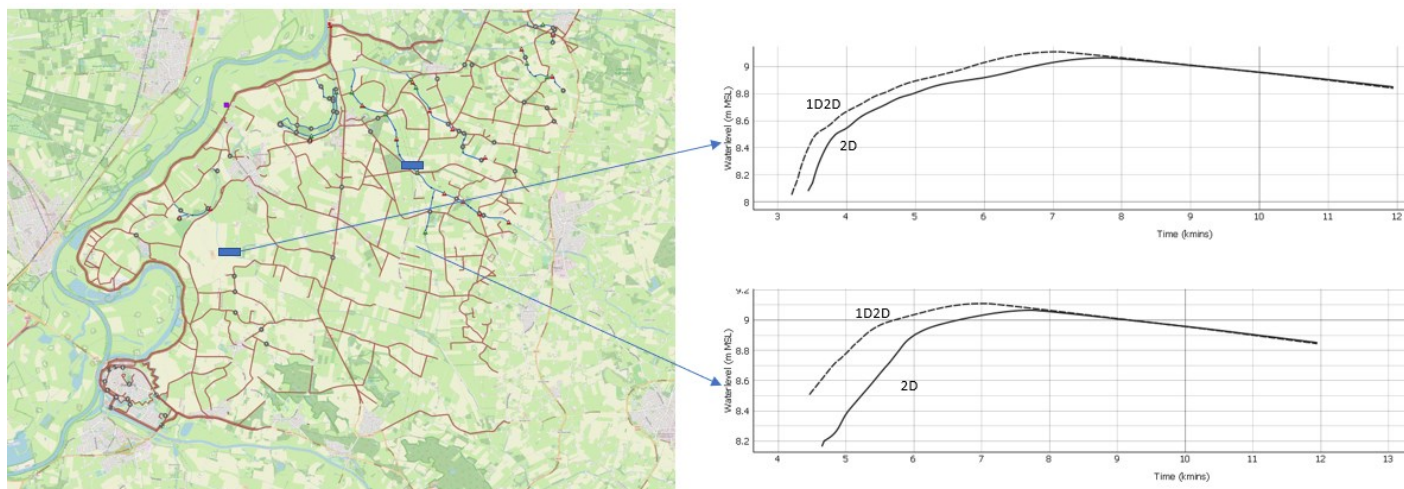
De aankomsttijden van beide simulaties zijn erg vergelijkbaar: het weglaten van de 1D watergangen heeft weinig effect. Lokaal zijn er wel verschillen. Het 2D model heeft iets hogere aankomsttijden in gebieden die via een smalle doorgang zijn verbonden met de rest van het geïnundeerde gebied. Dit verschil is klein, maar wel zichtbaar (zie ook Figuur 15 voor twee locaties).

Het grootste verschil is zichtbaar bij de 1D watergang aan de oostzijde van het model. Daar treedt wel inundatie op in het 1D2D model, maar niet in het 2D model. De 1D-schematisatie draagt hier vermoedelijk bij aan een nauwkeuriger resultaat ("snelweg voor verspreiding"), waar deze in 2D wordt geblokkeerd. Aan de andere kant is er in het 1D2D model een overschatting van de afvoercapaciteit, doordat de 1D watergangen niet uit het grid zijn verwijderd.



Figuur 14 Maximale waterdiepten voor 2D (links) en 1D2D (rechts).

Ondanks de kleine verschillen lijken de 1D2D en de 2D modellen sterk op elkaar. Dat geeft een interessante afweging voor toekomstige calamiteitenmodellen in een vergelijkbaar gebied. Enerzijds kan het kiezen voor een 2D-schematisatie leiden tot een lagere rekentijd en minder schematisatietijd met redelijk behoud van de resultaten. Anderzijds kan met een goed opgebouwd 1D2D model nauwkeuriger de afvoercapaciteit naar het achterland gesimuleerd worden, in het bijzonder rondom lokale laagtes en doorgangen. Hierbij moeten zowel in het 1D2D model als het 2D model alle duikers en bruggen netjes opgenomen worden om lokale inundaties en doorgangen onder hoge lijnvormige elementen goed te simuleren. Hierbij zijn de watergangen zelf maar beperkt van belang, mede door het subgrid van 3Di.



Figuur 15 Waterstanden op twee locaties.

3.5 Scenario 4: Gridresolutie

Om inzicht te geven in het verband tussen detailniveau en rekensnelheid is een fijnere rekenresolutie (vergelijkbaar met D-HYDRO) gebruikt. Hierbij is de basis rekencelgrootte naar 40m gebracht (i.p.v. 80m). Bij deze aanpassing zijn een aantal stappen genomen:

- De grid grootte wordt aangepast naar 40x40 meter.
- Kunstwerken zijn weer aangepast naar het nieuwe grid.

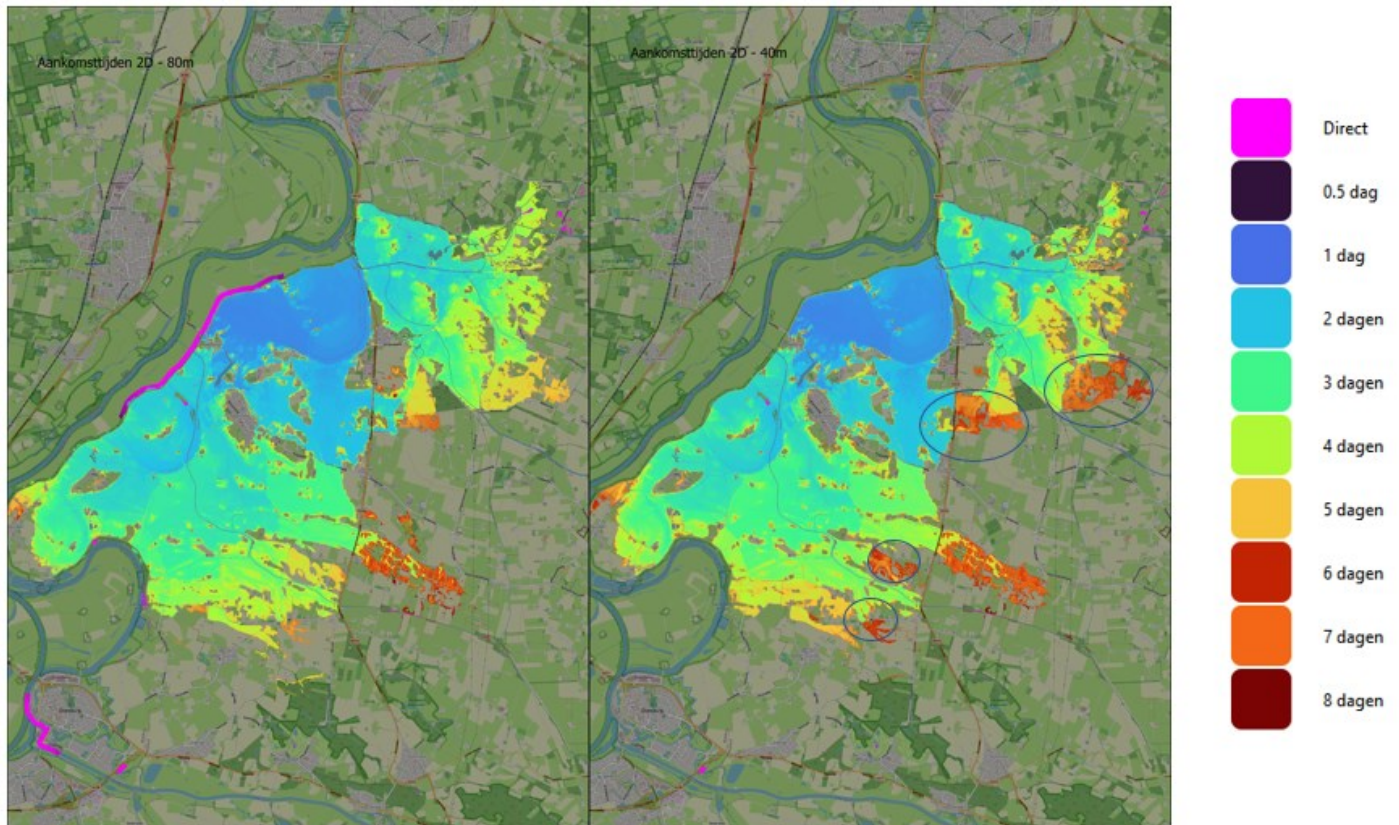
3.5.1 Resultaten

De rekestijd van het 1D2D referentiemodel was 1 uur en 46 minuten. Het verfijnde 40m model kostte 7 uur om door te rekenen. Dit is een factor 4 hoger, wat overeenkomt met de verwachting (4x zoveel rekencellen) In een eerdere simulatie was de toename echter hoger (factor 8). De reden hiervoor is dat de rekestijd afhangt van 1) het aantal actieve (geïndundeerde) cellen en 2) de rekenstap die toegepast kan worden. Bij de eerdere berekening was een relatief grote rekenstap gekozen, die bij het verfijnde model voor instabiliteit zorgde. Hierdoor wordt in 3Di automatisch de tijdstap verkleind waardoor de rekestijd sneller toeneemt. In de latere berekeningen is in verband met het correct berekenen van het bresdebiet een kleinere maximale tijdstap gekozen, waardoor de tijdstap in het verfijnde model niet verkleind hoefde te worden.

Uit de waterbalans zien we dat de verfijning leidt tot een lager instroomdebiet, maar dat de nettoverschillen vrij klein zijn.

Term	3Di 80m 2D	3Di 40m 2D
Cumulatief bresdebiet	37.713.563	34.703.326
2D initieel	720.523	585.896
2D einde	28.394.915	28.264.795
1D initieel	489.341	489.340
1D einde	449.952	449.977
Infiltratie	4.173.222	3.841.796

Figuur 16 Waterbalans van de 80m en 40m simulaties.



Figuur 17 Aankomsttijdenkaart van het 80m en 40m model met verschillen.

Op enkele locaties leidt de verfijning tot hogere aankomsttijden aan de randen van het overstromingsgebied. Hoe verder weg van de bres, hoe hoger de aankomsttijd. Daarnaast zijn de droogvallende delen (gaten) in het overstroomde gebied in het 40m model iets groter. Hiervoor zijn er twee vermoedelijke verklaringen:

- In het 40m grid is het rekenrooster minder "platgeslagen". Daarmee neemt de weerstand toe. Per rekencel zijn ook minder subgridcellen, dus de kans dat er een 1 pixel langs de rand zit waar water naar een volgende cel kan stromen neemt af. De kans op lekkage neemt daardoor ook af. Het gevolg is dat water meer "opstuwt" rondom de bres.
- Er is een lager bresdebiet (ca. 8%). Dit komt doordat er in het 40x40 model de waterstand achter de bres wat hoger wordt (kan minder snel wegstromen en zit effectief dichter bij de bres). Hierdoor duurt het ook langer voordat specifieke hoger gelegen gebieden inunderen.

4 Verdieping

In dit hoofdstuk benoemen wij overige bevindingen of aandachtspunten die wij WRIJ mee willen geven.

4.1 Gebruiksgemak en leercurve

Qua gebruiksgemak levert 3Di een aantal handige functionaliteiten. Voor sommen waar enkel data wordt ingeladen maakt de Modeller Interface het vrij eenvoudig om een som te draaien. Ook de Lizard-interface maakt het makkelijk om de resultaten in te zien en snel uit te laden in heldere visualisaties (bv. grafieken). De API maakt het mogelijk om (met enige programmeerkennis) sommen aan te zetten of handelingen te automatiseren.

Daar staat tegenover dat het bewerken van een hoogtemodel veel GIS-kennis vraagt. Daarmee kan de complexiteit van de modelschematisatie snel toenemen. Een leek maakt dan eerder fouten (die bv. leiden tot lekkage), zonder dat deze duidelijk zichtbaar worden. Schematisatie van bressen kostte ook veel werk, maar inmiddels is dit versimpeld.

Al met al is 3Di voor eenvoudige sommen vergelijkbaar met D-HYDRO en iets lastiger dan Tygron. Als de hydroloog meer detail of betrouwbaarheid wil is het wel nodig om voldoende GIS-kennis te hebben en de achterliggende rekenmethodiek van 3Di te snappen om tot een juiste schematisatie te komen. In onze ervaring heeft 3Di een redelijk steile leercurve en is de invoer foutgevoelig. Deze complexiteit heeft wel als voordeel dat een ervaren modelleur complexe aanpassingen snel kan doorvoeren (snel en efficiënt in gebruik), en dat je met 3Di zowel 1D als 2D kunt schematiseren (meer dan bv. met Tygron).

Voor de toepassing als calamiteitenmodel is het relevant om te kijken naar het gebruiksgemak in de koude en in de warme fase. Met de juiste voorbereiding biedt de 3Di LiveSite alle benodigde functionaliteiten voor in de warme fase. De 3Di LiveSite is laagdrempelig en wordt over het algemeen als gebruiksvriendelijk en intuïtief ervaren.

Vorbereidingen die in de koude fase kunnen worden getroffen zijn:

- Het schematiseren van het buitenwater langs de hele lengte van de relevante keringen. Dit kan door het Rijntakkenmodel in 1D toe te voegen, of door op regelmatige afstand (bijvoorbeeld elke 500 meter) een 'bak' met randvoorwaarde toe te voegen zoals voor deze studie is gedaan.
- Het toevoegen van breslocaties langs de hele lengte van de relevante keringen.
- Het klaarzetten van simulation templates met daarin voor elke herhalingstijd de tijdseries van de buitenwaterstanden (randvoorwaarden).
- Het toepassen van een gestructureerd naamgevingssysteem voor de schematisaties, simulation templates, en bressen, zodat alles tijdens een calamiteit makkelijk te vinden is.

4.2 Beheer en onderhoud

Doordat 3Di Cloud-based is, wordt elk model op de laatste versie van de software gedraaid. Eventuele bugfixes of versnellings zijn daarmee automatisch doorgevoerd. Daar staat tegenover dat na een update altijd een controle nodig is [1] of het model nog werkt en [2] of de resultaten vergelijkbaar zijn.

Een ander voordeel is dat AHN- en landgebruik eenvoudig bijgewerkt kunnen worden, zodat actualisaties met nieuwe (publieke) datasets snel doorgevoerd worden. De overige hoogtes die gebaseerd zijn op het AHN (waaronder levies) moeten wel apart bijgewerkt worden.

De schematisaties en modellen worden automatisch in de cloud opgeslagen en zijn voor alle gebruikers van het waterschap en haar opdrachtnemers beschikbaar (of beschikbaar te maken). Alle eerdere revisies van alle schematisaties blijven ook beschikbaar. Bij elke nieuwe revisie wordt in een zogeheten *commit message* beschreven wat de wijzigingen zijn ten opzichte van de vorige revisie. Op de managementpagina's (<https://management.3di.live>) heb je hier een volledig overzicht van. Je kan daar schematisaties en modellen opzoeken, hernoemen of verwijderen, inzien welke simulaties er zijn gedaan, resultaten downloaden, en een overzicht krijgen van de gebruikte en nog beschikbare rekenuren.

Voor het gebruik van de 3Di livesite is geen andere software nodig dan een standaard webbrowser. Hierdoor kan iedereen die de juiste inloggegevens heeft simulaties aanzetten en volgen. Ook voor het gebruik van de 3Di Modeller Interface is weinig bijzonders nodig: omdat de zware berekeningen in de cloud worden gedaan, is er geen bijzondere hardware nodig (zoals extra snelle processors, grafische kaart of groot geheugen).

De 3Di Modeller Interface (QGIS-interface) is gratis te downloaden en te gebruiken, dus iedereen kan dit installeren en (met inloggegevens), schematisaties downloaden, aanpassen, uploaden, berekeningen starten, resultaten downloaden en analyseren.

4.3 Resultaatverschillen 3Di, Tygron en D-HYDRO

Deze studie richtte zich op 3Di, maar wel met een doorkijk naar Tygron en D-HYDRO. In onderstaande secties benoemen wij de meest relevante verschillen en observaties.

4.3.1 Tygron

De grote kracht van Tygron, het "brute-force" berekenen van een overstroming, leidt tot mooie visualisaties. In de verkenningsstudie is aangetoond dat het overstromingspatroon ook vergelijkbaar is met D-HYDRO, al kon dit niet nauwkeurig geverifieerd worden vanwege de verschillende bresdebieten.

Qua detail en rekentijd is Tygron erg sterk: waar 3Di rekt met een 80x80 grid met 40x40 verfijningen, kan Tygron met een vergelijkbare rekentijd op een 5x5 grid rekenen. Andere comparatieve voordelen zijn het relatief lage instapniveau voor nieuwe gebruikers en de mooie visualisaties die vrijwel direct (zonder post-processing) gedeeld kunnen worden. Indien het waterschap wil inzetten op scripting en automatisatie biedt Tygron ook een handig pakket om via de API "achterlangs" geautomatiseerde post-processing uit te voeren om de gewenste data en figuren te krijgen. Tygron komt al snel als een "black-box" over (modeller weet niet precies wat er gebeurt), al is in meerdere studies bewezen dat Tygron nauwkeurig overstromingen kan simuleren.

3Di biedt echter een stuk meer opties voor de hydroloog om het model te schematiseren. Voor 1D zijn er verschillende mogelijkheden om een 1D2D model op te bouwen. In Tygron is dit "in principe" mogelijk, maar de 1D functionaliteit laat in huidige vorm nog te wensen over (of vraagt veel handmatige verbeteringen). Verder is 3Di een stuk transparanter: de hydroloog stelt zelf de schematisatie op en weet welk effect bepaalde functies hebben op de modelsimulatie. Daarmee neemt het vertrouwen in de berekening ook toe. Tot slot is het door de 1D functionaliteit in 3Di ook mogelijk om het Rijntakkenmodel op te nemen in het model. Voor een uiteindelijk cascademodel of calamiteitenmodel kan dan het Rijntakkenmodel gebruikt worden (in plaats van een handmatige reeks als randvoorwaarde).

4.3.2 D-HYDRO

D-HYDRO vraagt een leercurve, zeker als de hydroloog nog geen ervaring heeft (met SOBEK2). Daar staat tegenover dat voor overstromingsmodellering D-HYDRO een stuk meer functionaliteiten biedt. De flexible mesh is weliswaar niet nodig, maar 1D en 1D2D schematisatie kan erg efficiënt. Een ander praktisch voordeel is het "uitkleden" van het D-HYDRO beleidsmodel tot calamiteitenmodel. Daarmee hoeft geen nieuw model opgesteld te worden, maar kan het state-of-the-art model worden gebruikt en geoptimaliseerd tot de gewenste rekentijd is bereikt. Tot slot lijkt het erop dat D-HYDRO "de nieuwe standaard" wordt in Nederland (vergelijkbaar met wat SOBEK2 is). Verschillende waterschappen geven daarmee aan de voorkeur te geven voor één pakket (1D, 1D2D, 2D en eventueel zelfs in de toekomst waterkwaliteitsmodellering) in plaats van verschillende pakketten te moeten leren en onderhouden.

3Di ligt een stuk dichterbij D-HYDRO dan bij Tygron. Wat met D-HYDRO kan, kan op basis van deze studie ook in 3Di (en dat is niet het geval voor Tygron). Het subgrid lijkt een duidelijke winst (en geeft mooiere visualisaties). Verder zijn er in 3Di meer handmatige stappen nodig voor bijvoorbeeld 1D2D modellering of het (handmatig) oplossen van lekkages. N&S heeft aangegeven dat voor verschillende van deze zaken ook tools beschikbaar zijn. Rekentijden in 3Di zijn lager, met name omdat je door de subgrids grotere rekencellen kan kiezen zonder kwaliteitsverlies, en vermoedelijk kan het model nog verder worden geoptimaliseerd.

4.4 Kosten

De kosten voor het gebruik van 3Di staan gepubliceerd op <https://3diwatermanagement.com/pricing/>.

Een basislicentie kost € 4.250 exclusief btw per jaar. Daar valt onder:

- Volledige ondersteuning door de servicedesk.
- Ongelimeerd aantal gebruikers.
- 250 rekenuren per jaar.
- Toegang tot de 3Di Modeller Interface tools.
- Toegang tot alle mogelijkheden van het 3Di rekenhart (grondwater, overland flow, riolering, etc).

Naast de basislicentie is er ook een abonnement nodig voor de opslag van modellen en de LiveSite. De opties (Live Site, API, unlimited calculation hours, scenario datawarehouse) geven een totaalsom van **€ 24.980 exclusief btw per jaar**. Voor de modeldatabank gelden anno 2023 de prijzen:

1-5 models	2.295
6-15 models	5.695
16-30 models	11.350
31-60 models	16.950
61-120 models	22.650
120 + models	contact us

Figuur 18 Prijzen 3Di.

Meer informatie over de prijsopbouw van 3Di is te vinden op de genoemde website.

4.5 Overige bevindingen en aandachtspunten

Tot slot willen wij nog overige bevindingen delen in het kader van deze studie:

- 3Di is sterk in de nabewerking en distributie van modelresultaten. Voor de hydroloog is dit prettig om snel tot bruikbare visualisaties te komen na een modelrun (en hier vervolgens mee verder te gaan).
- De Cloud-based werking is zowel een voordeel als een nadeel. Enerzijds is de versie altijd up-to-date en kan je vanaf elke PC werken met de nieuwste modelversies. Daar staat tegenover dat er minder controle is op de rekenomgeving. In het verleden kwam het bijvoorbeeld voor dat een automatische update juist fouten introduceerde: dan kan je niet met een oudere versie werken.
- De livesite is een goede toevoeging: het maakt het mogelijk om direct te zien wat je aan het doen bent, en maakt het mogelijk om live resultaten te delen. Bij een eventuele calamiteit kan zo bijvoorbeeld snel (nog vóór het einde v/d model run) het overstromingsverloop van de eerste uren zichtbaar worden.
- In ons project kostte het enige tijd/moeite om de accounts in te richten. Het kostte meerdere dagen om een account te koppelen en deze te laten werken, en later om ook de Lizard-functionaliteiten toegevoegd te krijgen.

5 Conclusies, discussie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk geven wij een overzicht over onze conclusies en aanbevelingen in relatie tot 3Di in vergelijking met Tygron en D-HYDRO, in de context van toepassing als ad-hoc calamiteitenmodel (met doorkijk naar andere toepassingen).

Disclaimer: dit onderzoek betrof een verkenning naar de toepassing van 3Di als ad-hoc calamiteitenmodel. Hier is in korte tijd een model opgezet en zijn een aantal vingeroefeningen (scenario's). Daarmee is het lastig om harde conclusies te trekken. Om transparant te blijven splitsen wij dit hoofdstuk op in 3 delen: de conclusies (zo feitelijk mogelijk, o.b.v. bevindingen), discussie (adviserend, ook o.b.v. onze ervaringen) en aanbevelingen.

5.1 Conclusies

In deze studie was de hoofdvraag: *hoe verhoudt 3Di zich als ad-hoc calamiteitenmodel voor een overstroming bij Dijkkring 49 ten opzichte van Tygron en D-HYDRO?* De belangrijkste bevinding is positief: **3Di is op basis van de genoemde criteria geschikt als ad-hoc calamiteitenmodel voor dijkkring 49.** Omdat 3Di gevoelig blijkt voor de rekentijdsstap is extra optimalisatie nodig om de rekentijd van het referentiemodel onder één uur te brengen (nu 1u en 46 minuten). *In de discussie gaan we hier verder op in.*

In deze verkenningsstudie is een 1D2D referentiemodel in 3Di opgesteld (0,5x0,5 subgrid, met een rekengrid variërend van 40x40m tot 80x80m). De rekentijd is hiermee vergelijkbaar aan Tygron's 4x4m model, namelijk de mogelijkheid om binnen één uur een bres in te tekenen en door te rekenen (ca. 20 min schematisatie, ca. 19 min simulatie bij het 80x80m grid). In Tabel 3 geven wij per onderzoeksvraag de bevindingen uit deze studie. Voor de doorkijk naar toepassing als beleidsmodel en overige aandachtspunten, zie Paragraaf 5.2.

Tabel 3 Conclusies verkenningsstudie 3Di.

Onderzoeksdoel	Bevindingen
Afweging detail en rekensnelheid	Een fijnmaziger model leidde tot een langere rekentijd; een verfijning van 80x80 naar 40x40 leidde in dit geval tot 8x de rekentijd, zonder significant effect op het overstromingspatroon. Een rekengrid die voldoet aan het "1u criterium" simuleert in 3Di dus plausibele resultaten. Een fijnmaziger model leidde ook tot kortere aankomsttijden.
Verschillen tussen 3Di, Tygron en D-HYDRO	Het overstromingspatroon in 3Di was erg vergelijkbaar met Tygron en D-HYDRO. 3Di lijkt lokale gebiedskenmerken nauwkeuriger mee te nemen (droogvallende lokale hoogten), en water verspreidt zich in 3Di sneller naar het achterland. De bresbreedte verschilt wel, vermoedelijk doordat deze snel groeit (3Di neemt de minimale pixels in de ontvangende rekencel, waardoor de initiële waterstand erg laag is).
1D2D en 2D	Voor toepassing als ad-hoc calamiteitenmodel lijkt er zeer beperkte meerwaarde voor 1D-watgangen (wel voor kunstwerken) voor vergelijkbare gebieden als Dijkkring 49.
Kosten 3Di	Een basislicentie kost € 4.250 exclusief btw per jaar exclusief dataopslag, LiveSite en Lizard. Meer uitgebreidere licenties komen op ca. € 30.000 exclusief btw per jaar.
Gebruiksgemak	Op veel punten is 3Di sterk verbeterd. De interface een stuk gebruiksvriendelijker geworden, mede door het invoeren van de nieuwe interface. Hierdoor kan het model lokaal gevalideerd worden. Door het online rekenen blijft het nog wel meer tijd kosten voor een berekening gevalideerd is en is aangezet. De online functionaliteit heeft wel unieke voordelen. Zo kan men tijdens een berekening (live) de resultaten inzien en aanpassingen doorvoeren. Visueel lijkt 3Di hierdoor veel op Tygron, maar wel met meer aanpassingsmogelijkheden en een 1D schematisatie. Daar staat tegenover dat we ook tijdens deze studie tegen een aantal problemen opliepen, waar externe ondersteuning van N&S nodig was om deze op te lossen.
Beheer- en onderhoud van 3Di modellen	Modellen zijn opgeslagen in de Cloud. Offline functionaliteit is niet mogelijk (en staat niet op de planning). De Cloud heeft voordelen (bv. geen specifieke hardware nodig, kan via elke PC modelleren), maar ook nadelen (extra controle na modelupdate of de modellen nog werken).

5.2 Discussie

Op basis van deze studie lijkt 3Di erg geschikt als modeltool om ad-hoc calamiteiten door te rekenen en te vertalen naar bruikbare resultaten voor de crisis. Qua nauwkeurigheid en rekensnelheid levert het ad-hoc model vergelijkbare (of betere) resultaten als Tygron en D-HYDRO. De meerwaarde van het subgrid blijkt uit de hogere nauwkeurigheid en de realistischere visualisaties (geen lokale hoogtes die nat zijn). Onderstaand geven wij onze **eigen visie op de drie modeltools voor ad-hoc calamiteitenmodellering** (op basis van de studies, maar ook eigen ervaring), met de kanttekening dat **alle modeltools hiervoor geschikt zijn**.

5.2.1 Tygron

Hoewel Tygron veel opties biedt (ook via de API) denken wij dat de grootste kracht ligt in het **“quick and dirty”** modelleren van overstromingen; vooral voor een snelle scan of het genereren van krachtige visualisaties. In korte tijd levert Tygron prachtige visualisaties, en ook met beperkte ervaring kan al snel een goede overstromingssimulatie worden gedraaid. Nieuwe (GIS) data wordt makkelijk ingeladen en opnieuw doorgerekend. Ook biedt het kansen voor scripting en tooling (via de API) om veel te automatiseren. Verder ontwikkelt Tygron zich razendsnel: functionaliteiten die nu ontbreken volgen misschien nog in de toekomst.

De belangrijkste valkuil van Tygron is wat ons betreft het risico op “black-box” berekeningen. Door de automatische schematisatie is het lastig voor de hydroloog om exact te weten wat berekend wordt, en waar fouten zijn. Het risico op fouten door lekkage of 1D-onderdoorgangen die niet goed werken is daarmee hoger. Verder biedt Tygron nu nog een beperktere functionaliteit voor de “ervaren hydroloog” ten opzichte van 3Di en D-HYDRO (bv. 1D-schematisatieopties).

5.2.2 D-HYDRO

Als Arcadis zien wij D-HYDRO als **“de standaard”** tool voor hydrologische en hydraulische berekeningen in NL, welke vooral geschikt is voor beleidsmodellering, maar ook kansen biedt voor ad-hoc calamiteitenmodellen. Hier zijn een aantal redenen voor, waaronder de sterk uitgebreide functionaliteit, brede toepasbaarheid met één tool, en het feit dat veel waterschappen al ervaring hebben met SOBEK2, waarmee D-HYDRO makkelijker is om op te pakken. Wij adviseren onze klanten vanaf dit jaar dan ook om hun SOBEK2 modellen om te zetten naar D-HYDRO, omdat wij deze zien als meest geschikte opvolger.

Specifiek voor (ad-hoc) calamiteitenmodellering lijkt ons 3Di of Tygron meer geschikt dan D-HYDRO. In D-HYDRO gaat veel tijd zitten in het opstellen van een geschikte basisschematisatie; anders dan 3Di en Tygron is het niet makkelijk om snel publieke data in te laden of een test-run te doen. Er gaat meer tijd zitten in pre- en post-processing. Het is een pakket dat veel kan, maar ook veel tijd kost. Een reden om wél voor D-HYDRO te kiezen, is als er al een bestaand D-HYDRO beleidsmodel is, of als er vanuit praktische overwegingen de wens bestaat om zoveel mogelijk met één pakket te werken.

5.2.3 3Di

3Di zien wij als **uitstekende tool voor 2D-overstromingsberekeningen**. Het pakket biedt een brede set functionaliteiten die relevant zijn voor overstromingsberekeningen (bv. subgrid), en geeft de ervaren hydroloog de middelen om een hoogwaardig model op te stellen. De nieuwe Modeller Interface biedt nuttige en gebruiksvriendelijke middelen om live tijdens de berekening resultaten in te zien, met Lizard post-processing worden deze direct omgezet in communicatiemiddelen.

Wat ons betreft is de grootste valkuil van 3Di de afhankelijkheid (o.a. door de Cloud-based functionaliteit). We komen in onze ervaring vaker problemen tegen die wij niet zelf als hydroloog op kunnen lossen, en externe hulp van N&S nodig is om verder te komen. Verder is de leercurve ten opzichte van de andere modeltools wat steiler.

5.3 Aanbevelingen

In deze korte verkenning kunnen wij geen definitief antwoord geven op elke vraag, en uit onze bevindingen volgen ook weer nieuwe vragen. Onderstaand doen wij enkele voorstellen voor eventuele vervolg (stage)onderzoeken of toekomstig gebruik van 3Di.

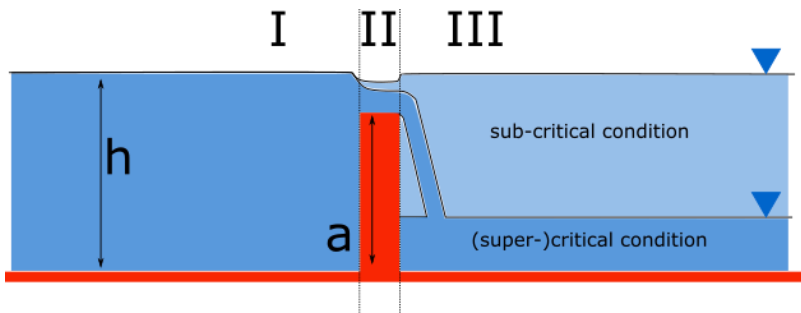
- **D-HYDRO bressimulatie.** Tijdens onze studie kwamen we erachter dat het lastig is om D-Hydro te vinden hoe het bresdebiet exact wordt berekend. Het is goed om dit aan Deltares terug te koppelen (bv. updaten manual).
- **3Di rektijdsstap.** Tijdens de tweede rekenronde bleek dat het bresdebiet in 3Di erg gevoelig is voor de rektijdsstap. Het verschil in maximale tijdsstap resulteert in een verschil in het piekdebiet van 60%. Om deze reden is gekozen voor een kleinere tijdsstap, waardoor de rektijd sterk toenam. Wij verwachten dat dit verbeterd kan worden, waardoor 3Di ook realistische bresbreedtes (en daaraan gekoppelde bresdebieten) kan geven binnen één uur. Wij adviseren dit verder met N&S te verkennen.
- **Betrek Nelen & Schuurmans bij de opleiding.** Vanwege de steilere leercurve en de soms onduidelijke errors helpt het enorm als iemand met 3Di ervaring in sneltreinvaart de opleiding ondersteunt. Hiervoor zijn ook goed georganiseerde cursussen beschikbaar.
- **Voer een gevoeligheidsanalyse uit bij overstromingsberekeningen.** Het is weliswaar een open deur, maar de verschillende studies laten zien dat, debieten sterk kunnen verschillen als gevolg van gevoeligheden in de manier van schematiseren van een bres. Als dit correct wordt gedaan zijn er nog restverschillen. Om deze onzekerheid te verminderen, zijn handmatige controles van de berekening en een gevoeligheidsanalyse waardevolle middelen.

6 Referenties

Volp, N. D., Van Prooijen, B. C., & Stelling, G. S. (2013). A finite volume approach for shallow water flow accounting for high-resolution bathymetry and roughness data. *Water Resources Research*, 49(7), 4126-4135.

Bijlage I: Narekening van het piekbresdebiet

Hoe 3Di het debiet door de bres berekent, laten we hier zien door de waarden die gelden op het moment van de debietpiek (176.000 seconden na het begin van de simulatie) in te vullen in de door 3Di gebruikte vergelijkingen. 3Di gebruikt voor de berekening van het debiet door een bres een lange overlaatformulering. Figuur 19 geeft de belangrijkste variabelen en de drie stromingsdomeinen weer die worden gebruikt in de vergelijkingen die 3Di hierbij gebruikt volgen.



Figuur 19 Betekenis van de variabelen h en a en de stromingsdomeinen gebruikt in de overlaatformuleringen van 3Di.

In het geval van een bres geldt, wanneer het water vanuit de rivier de dijkkring instroomt:

- h_I buitenwaterstand (bovenstrooms, 1D)
- h_{II} waterstand op de bres
- h_{III} binnenwaterstand (benedenstrooms, 2D)
- a 'kruinhoogte' van de bres, d.w.z., $exchange_level - breach_depth$

Welke vergelijking van toepassing is, hangt af van of de stroming sub- of (super)kritisch is. De stroming is (super)kritisch als het waterstandsverschil groter is dan een derde van de waterdiepte op de kruin:

$$(h_I - h_{III}) > \frac{1}{3}(h_I - a)$$

Op het moment dat het piekdebiet wordt bereikt, geldt:

$$\begin{aligned} h_I &= 9,437 \\ h_{III} &= 8,501 \\ a &= 11,124 - 2,824 = 8,300 \\ 9,437 - 8,501 &= 0,936 \\ \frac{1}{3} * (9,437 - 8,300) &= 0,379 \\ 0,936 &> 0,379 \end{aligned}$$

Er is dus sprake van (super)kritische stroming. Daarvoor is de volgende vergelijking van toepassing:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2g(h_I - a)}{3(1 - \gamma L)}}$$

Waarin:

- v_{II} stroomsnelheid door de bres
- g valversnelling
- γ wrijvingsverliesterm
- L lengte van de overlaat

Voor g wordt 9,81 m/s² gebruikt; voor L wordt voor bressen de vaste waarde van 30 m gebruikt, representatief voor de meeste dijken. Wrijvingsverliesterm γ wordt als volgt berekend:

$$\gamma = c_f/R$$

$$c_f = g/C^2$$

$$R = A/P$$

$$A = C_Q W d_{II}$$

$$P = W + 2h_{II}$$

$$d_{II} = \max\left(\frac{2}{3}(h_I - a), (h_{III} - a)\right)$$

Waarbij

c_f	frictiecoëfficiënt (Chezy), heeft bij bressen de vaste waarde 50
R	hydraulische straal
A	doorstroomoppervlak
P	natte omtrek
C_Q	debietcoëfficiënt (discharge coëfficiënt)
W	bresbreedte
d_{II}	stromingdiepte op de bres

Als we hierin de waarden invullen die gelden op het moment van het piekdebiet, krijgen we:

$$d_{II} = \max\left(\frac{2}{3}(9,4371 - 8,300), (8,501 - 8,300)\right) = 0,758$$

$$W = 33,297$$

$$P = 33,297 + 2 \times 0,758 = 34,813$$

$$C_Q = 1$$

$$A = 1 \times 33,297 \times 0,758 = 25,241$$

$$R = 25,241 / 34,813 = 0,725$$

$$c_f = 9,81/50^2 = 0,003924$$

$$\gamma = 0,003924 / 0,725 = 0,005412023$$

Hiermee kan stroomsnelheid v_{II} worden berekend:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2g(h_I - a)}{3(1 - \gamma L)}} = \sqrt{\frac{2 \times 9,81(9,437 - 8,3)}{3(1 - 0,005412023 \times 30)}} = 2,529 \text{ m/s}$$

En ook het debiet Q :

$$Q = vA = 2,529 \times 25,241 = 63,85 \text{ m}^3/\text{s}$$

Wat nagenoeg overeenkomt met het piekdebiet van 63,78 m³/s dat in de 3Di simulatie wordt berekend.

Colofon

OVERSTROMINGSSTUDIE 3DI - DIJKRING 49

KLANT

Waterschap Rijn en IJssel

AUTEUR

Thijs Lieverse

ONZE REFERENTIE

NUH4W2YKTU6D-1095747686-278:1.0

DATUM

18 april 2023

STATUS

Concept

Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende ontwerp- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij helpen onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Wij zijn met 36.000 mensen actief die in ruim zeventig landen meer dan €4,2 miljard aan omzet genereren. Wij helpen UN-Habitat met onze mensen, die kennis en expertise leveren om de moeilijke leefomstandigheden te verbeteren in gebieden die lijden onder de gevolgen van klimaatverandering.

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 56825
1040 AV Amsterdam
Nederland

T +31 (0)88 4261 261

Arcadis. Improving quality of life

Volg ons op



[arcadis-nederland](https://www.arcadis-nederland.nl)



[arcadis.nl](https://www.arcadis.nl)



[ArcadisNetherlands](https://www.ArcadisNetherlands.com)