

TKI D-Hydro voor Waterschap Rivierenland

Pilot overstromingsmodel Bommelerwaard

Waterschap Rivierenland



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

P935
oktober 2019

*Hydro*Logic

Inhoud

1	Inleiding.....	1
1.1	Aanleiding pilot overstromingsmodel Bommelerwaard	1
1.2	Leeswijzer	2
2	Aanpak pilot	3
2.1	Onderzoeksvragen	3
2.2	Modelanalyse	4
3	Resultaten pilot.....	6
3.1	Bepalende elementen in de Bommelerwaard	6
3.2	De invloed van bebouwd gebied (1 & 3)	9
3.3	De gevoeligheid voor bodemruwheid (2)	13
3.4	Modellering van watergangen (5)	18
3.5	Hoge lijnelementen en onderdoorgangen (7)	22
3.6	Gridcelgrootte (8)	26
3.6.1	Resultaten	26
3.6.2	Rekentijd	34
3.7	Gridverfijning (9)	35
3.8	Gridsoort (10)	39
3.9	Randvoorwaarden (11)	40
3.10	Bresgroei (12)	42
3.10.1	Locatie	43
3.10.2	Waterstandspunten	45
3.10.3	Tijdstip van bres	46
3.10.4	Zand/klei (parameters in de functie)	47
3.10.5	Gridcelgrootte gebied	48
3.11	Resultaten (13 &14)	49
4	Advies overstromingsmodellering	51
4.1	Hoogtemodel	51
4.2	Hoge lijnelementen	51
4.3	Onderdoorgangen	52
4.4	Watergangen	52
4.5	Bodemruwheid	53
4.6	Grid	53
4.7	Randvoorwaarden	54
4.8	Bresgroei	55
4.9	Resultaten van de overstromingsberekeningen	55
5	Conclusie pilot Bommelerwaard.....	56
5.1	Gebruik D-Hydro	56

5.2	Gegevens	56
5.3	Model	57
6	Referenties	58
Bijlage A	Plan van Aanpak - pilot Bommelerwaard	59
Bijlage B	Overzicht modelschematisaties pilot	60
Bijlage C	Rekentijden modellen.....	61

© 2019, 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 Inleiding

1.1 Aanleiding pilot overstromingsmodel Bommelerwaard

Op dit moment ontwikkelt Deltares D-HYDRO suite. Dit is een state-of-the-art software suite voor integrale watervraagstukken. De D-HYDRO Suite is de beoogd opvolger van onder meer SOBEK, dat bij vrijwel alle waterschappen in Nederland geldt als de huidige standaard voor software binnen het regionale waterbeheer.

De ontwikkeling van D-HYDRO Suite is volop gaande. Rijkswaterstaat zet de D-HYDRO Suite al in voor studies en vraagstukken met betrekking tot rivieren en estuaria. Er zijn echter aanvullende functionaliteiten benodigd voor een succesvolle toepassing binnen het regionale waterbeheer. Deze functionaliteiten zijn nog in ontwikkeling en vereisen een doorontwikkeling van de software. Om deze doorontwikkeling te versnellen heeft Deltares samen met waterschappen Rivierenland (WSRL) en De Dommel en adviesbureaus Hydro-Logic en HKV het TKI (Topconsortia voor Kennis en Innovatie) project¹. Binnen het TKI project is een aantal pilots uitgevoerd om de nieuwe functionaliteiten direct toe te passen en te beproeven in een (voor de waterschappen) relevante case. Deze pilots hebben als doel:

- De nieuwe technieken te valideren.
- De functionaliteiten te evalueren en mogelijk verbeterpunten te identificeren.
- Kennis en ervaring op te doen met de nieuwe technieken.
- Minimale eisen en wensen te toetsen en bepalen omtrent modelgebruik (data-import, modelopzet, GUI, postprocessing etc).

Waterschap Rivierenland heeft vanaf 2018 het beheer en de ontwikkeling van de overstromingsmodellen overgenomen van de provincie Gelderland en wil de komende jaren voor het hele beheergebied nieuwe overstromingsmodellen gaan maken met D-Hydro.

WSRL heeft met de Pilot Bommelerwaard als doel het opzetten van een overstromingsmodel met D-Hydro, opdat zowel de methodiek (van het modelleren) als de functionaliteit en kwaliteit van de software gaan voldoen aan de eisen en richtlijnen zoals deze worden beschreven in de Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties (Ref. 1). Het waterschap wil het model van de Bommelerwaard uiteindelijk gaan gebruiken voor advisering van de calamiteitenorganisatie en voor risicocommunicatie in het algemeen (o.a. ten behoeve van de EU-ROR).

¹ TKI projecten stimuleren de publiek-private samenwerkingsprojecten. In TKI projecten zoeken ondernemer en wetenschappers van de topsectoren naar manieren om vernieuwende producten en diensten op de markt te brengen.

Het doel van de pilot van Waterschap Rivierenland is tweeledig:

- Het testen van de nieuwe functionaliteiten van D-HYDRO, waaronder:
 - bresgroei functionaliteit;
 - modelleren van onderdoorgang;
 - verbeterde gridgeneratie en -verfijning;
 - het koppelen van een grid van het binnendijkse gebied met een riviergrid;
 - nabewerking van de verschillende soorten output
- De vervaardiging van een consistente aanpak voor de overstromingsmodellering met advies aangaande de gewenste modelkeuzen voor de nog te modelleren dijkringen.

1.2 Leeswijzer

In dit rapport zijn de resultaten van de pilot gegeven en is advies gegeven over de aanpak voor overstromingsmodellering voor waterschap Rivierenland.

In hoofdstuk 2 is de aanpak van de pilot beschreven, inclusief de onderzoeksvragen.

Hoofdstuk 3 behandelt de resultaten van de pilot per onderzoeksvraag. In hoofdstuk 4 is de synthese beschreven als advies voor het uitvoeren van overstromingssimulaties van de andere deelstroomgebieden. In hoofdstuk 5 zijn de conclusies van de pilot Bommelerwaard beschreven.

Daarnaast is een Technisch Achtergrondrapport beschikbaar waarin een technische inhoudelijke beschrijving is gegeven van:

1. de wijze waarop een D-HYDRO model wordt opgebouwd;
2. de wijze waarop bepaalde processen en onderdelen worden geschematiseerd in D-HYDRO;
3. welke input wordt gebruikt voor een overstromingsmodel;
4. op welke wijze output wordt gegenereerd en nabewerkt.

2 Aanpak pilot

Bij de start van de pilot zijn in een plan van aanpak in overleg met het waterschap de belangrijkste onderzoeksvragen gedefinieerd (zie Bijlage A) die relevant zijn voor de totstandkoming van een betrouwbaar overstromingsmodel van de Bommelerwaard.

Op basis van dit plan van aanpak is gevarieerd in verschillende aspecten van de model-schematisatie om de effecten van verschillende keuzes inzichtelijk te maken en beschikbare functionaliteiten te testen. Tijdens de pilot is onderzocht wat er nodig is voor een voldoende betrouwbare overstromingsberekening en welk effect verschillende keuzes hebben op de rekentijd.

2.1 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen uit het plan van aanpak zijn weergegeven in Tabel 1. De onderzoeksvragen zijn geordend op basis van het modelonderdeel waarop ze betrekking hebben.

In dit rapport zijn de onderzoeksvragen beantwoord aan de hand van resultaten van overstromingssimulaties. Onderzoeksvragen of delen van onderzoeksvragen die betrekking hebben op de technische mogelijkheden of de manier van bewerken van data staan uitgewerkt in het technisch achtergrondrapport. In Tabel 1 is aangegeven in welke rapporten de onderzoeksvragen worden beantwoord.

Tabel 1 Onderzoeksvragen uit Plan van Aanpak

Onder-deel	Nr.	Onderzoeksvraag	Antwoord
Hoogte-model (DEM)	1.	Wat is het verschil in resultaten bij het meenemen van de panden verhoogd in het landschap i.p.v. op vloerniveau (in verband met het juist meenemen van de ruwheid in het stedelijk gebied)?	Pilotrapport par. 3.2 en par. 4.1
	2.	Wat is de gevoeligheid van de ruwheden (2D) op de resultaten?	Pilotrapport par. 3.3 en par. 4.5
Bodemruwheid	3.	Welke ruwheid moet in stedelijk gebied worden toegepast als de panden uit het hoogtemodel zijn gehaald, om vergelijkbare resultaten te krijgen met de situatie waarin panden wel verhoogd in het hoogtemodel zijn opgenomen?	Pilotrapport par. 3.2
	4.	Is het mogelijk om te variëren in ruwheden voor vegetatie op basis van seizoen?	Technisch achtergrondrapport par. 3.1.3

Onder-deel	Nr.	Onderzoeksvraag	Antwoord
Watergangen, lijnelementen en onderdoorgangen	5.	Wat is het verschil in resultaten en rekentijd bij de verschillende manieren om watergangen mee te nemen? Wat is het verschil bij het meenemen van alleen A-watergangen, of meer watergangen?	Pilotrapport par. 3.4
	6.	Hoe kunnen lijnelementen, zoals wegen, spoorwegen en binnendijken, en onderdoorgangen worden geïdentificeerd en worden omgezet naar bruikbare modelbestanden?	Technisch achtergrondrapport par. 3.1.4 en 3.1.5
	7.	Hoe en bij welke modellen kunnen hoge elementen en onderdoorgangen het beste apart worden meegenomen en bij welke modellen is het genoeg om dit in het hoogtemodel mee te nemen? Wat zijn de aandachtspunten?	Pilotrapport par. 3.5 en par. 4.2
Grid	8.	Wat is het verschil in resultaten en rekentijd bij verschillende gridcelgroottes? Welke grids rekenen snel genoeg voor een model dat tijdens een calamiteit gebruikt kan worden? Wat is de gevoeligheid van het grid op de resultaten?	Pilotrapport par. 3.6 en par. 4.6
	9.	Wat zijn de belangrijke locaties om het grid te verfijnen en welke mate van verfijning is nodig?	Pilotrapport par. 3.7 en par. 4.6
	10.	Wat is het verschil in opbouw, gebruik en resultaten bij verschillende gridsoorten (driehoeken/vierkanten)?	Technisch achtergrondrapport par. 3.1.1 Pilotrapport par. 3.8
Model	11.	Hoe kunnen de randvoorwaarden op de buitenrand van het model het beste worden meegenomen?	Pilotrapport par 3.9 en par. 4.7
	12.	Wordt bresgroei op een goede manier meegenomen in het model? (zijn de processen en resultaten logisch? Sluiten de resultaten aan bij resultaten van eerdere berekeningen?) Wat is de gevoeligheid voor de bresgroeiparameters (+locatie)?	Pilotrapport par. 3.10 en par. 4.8
Resultaten	13.	Wat kan subgridding van waterdiepteresultaten betekenen bij de resultaten van een grof grid, in vergelijking met een fijn grid?	Pilotrapport par. 3.11
	14.	Welke resultaten zijn nodig, en op welke manier kunnen die uit de resultaatbestanden (netcdf-files) gehaald worden?	Pilotrapport par. 3.11 en par. 4.9 Technisch achtergrondrapport par. 3.3

2.2 Modelanalyse

Om de effecten van verschillende keuzes in de schematisatie van overstromingsmodellen te kunnen analyseren zijn -afhankelijk van de onderzoeksvraag- verschillende modellen vervaardigd.

Voor de onderzoeksvragen die betrekking hebben op de schematisatie van het gebied is gebruik gemaakt van modellen waarbij steeds hetzelfde bresdebiet op het model is gezet, opdat resultaten in het gebied vergelijkbaar zijn en niet afhankelijk van de bres(groei). Binnen het gebied zijn bijvoorbeeld gridresolutie, ruwheid en de manier van schematisatie van lijnelementen en onderdoorgangen gevarieerd. Voor de effecten van deze veranderingen

gen in schematisatie is gekeken naar de aankomsttijd, maximale waterdiepte, stroomsnelheid of schade en slachtoffers, op basis van relevantie voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag.

Voor de onderzoeksvragen die betrekking hebben op de bresgroei en de randvoorwaarden, is gebruik gemaakt van schematisaties waar het riviergrid en gebiedsgrid gekoppeld zijn, en waar de bresgroei door het model berekend wordt. Door bresgroei-parameters te variëren kunnen effecten hiervan geanalyseerd worden. Voor de vergelijking van schematisaties is gekeken naar bresbreedte en bresdebiet.

Een volledig overzicht van de gebruikte modellen is gegeven in Bijlage B.

3 Resultaten pilot

In dit hoofdstuk zijn per onderwerp de resultaten van de pilot en de antwoorden op de onderzoeksvraag weergegeven. Allereerst zijn de bepalende elementen in een overstromingsmodel toegelicht (3.1). Vervolgens zijn de effecten en gevoeligheden van deze bepalende elementen nader toegelicht, zoals de invloed en effecten van gridcelgrootte (3.2), de gevoeligheid voor bodemruwheid (3.3), de invloed van en effecten op bebouwd gebied (3.4), de invloed van het meenemen van het riviergrid (3.5) en de rekentijd (3.6). Op basis van dit onderzoek is vervolgens advies gegeven aangaande modelkeuzen voor de overstromingsmodellering (Hoofdstuk 4).

3.1 Bepalende elementen in de Bommelerwaard

Een aantal elementen en variabelen zijn bepalend voor het verloop van een overstroming (zie Fig. 1). In deze paragraaf is eerst een toelichting gegeven op deze elementen, en vervolgens worden deze bepalende elementen binnen de Bommelerwaard besproken om een algemeen beeld te krijgen van een inundatie van de Bommelerwaard.

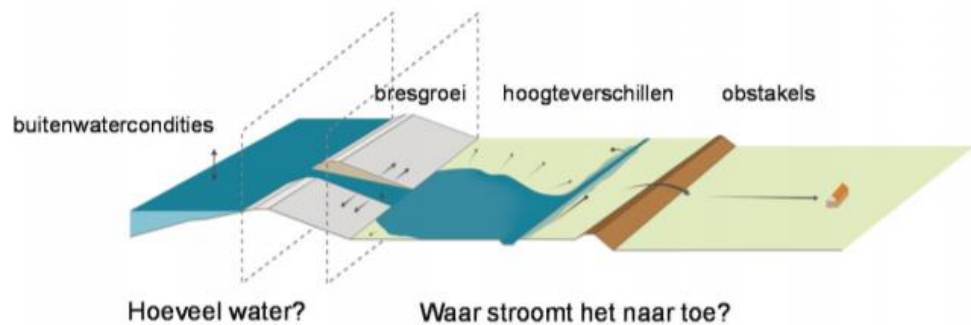


Fig. 1 Bepalende elementen voor een overstroming. (uit Leidraad Overstromingsmodellering, naar Klinsen, 2016).

Het hoogteverloop in een gebied is zeer bepalend voor de richting waarin het water stroomt, waarbij het hoogteverloop in een polder vanzelfsprekend anders is dan in hellend gebied. Maar ook in polders zijn er hoogteverschillen en stroomt het water naar de lagere delen in het gebied. Watergangen die iets lager liggen, zorgen voor een snellere verspreiding van het water door het gebied. In de Bommelerwaard betekent dit dat het water van de hogere delen in het oosten naar de lagere delen zal stromen (Fig. 3).

De hoeveelheid water die door de bres het gebied in stroomt, is bepalend voor het overstromingsverloop en -patroon. De meest nette manier om het bresdebiet te bepalen is om ook de rivier mee te nemen in de schematisatie en met een bresgroeiformule de bresbreedte te bepalen. Zodoende wordt ook het effect op de buitenwaterstand meegenomen (de rivierwaterstand zal immers dalen als gevolg van de bres). Voor de Bommelerwaard is daarom het rivierenmodel van de Maas gekoppeld aan het overstromingsmodel van de polder. Er is daarbij één breslocatie langs de Maas geschematiseerd.

Hoge lijnelementen, zoals verhoogde wegen en spoorlijnen, zijn erg bepalend voor het overstromingsverloop. Deze kunnen de inundatie vertragen en in vergelijking met het omliggende gebied kunnen tegen de lijnelementen aan grotere waterdieptes ontstaan. In de Bommelerwaard zijn de snelweg (A2), de spoorlijn (van Utrecht naar Den Bosch) en de Meidijk erg belangrijke hoge elementen.

Ook onderdoorgangen onder de hoge lijnelementen zijn zeer bepalend voor het overstromingsverloop en -patroon. Via een viaduct/tunnel/duiker stroomt water onder een hoog element door. De capaciteit van deze onderdoorgangen is erg bepalend voor het overstromingsverloop. In de Bommelerwaard zijn vooral de tunnels en duikers onder het spoor en de snelweg erg bepalend voor het overstromingsverloop.

Overstroming Bommelerwaard bij breslocatie Hoenzadriel

De Bommelerwaard kan overstroomd worden als gevolg van een bres langs de Maas of langs de Waal. In eerdere inundatiesommen is gebruik gemaakt van drie breslocaties (zie Fig. 2). In de pilot is aangesloten bij deze breslocaties om een vergelijking te kunnen maken met eerdere sommen.

Vanwege beschikbaarheid van het Maasmodel van Rijkswaterstaat is voor de pilot gebruik gemaakt van de breslocatie Hoenzadriel in het zuidoosten van het gebied.

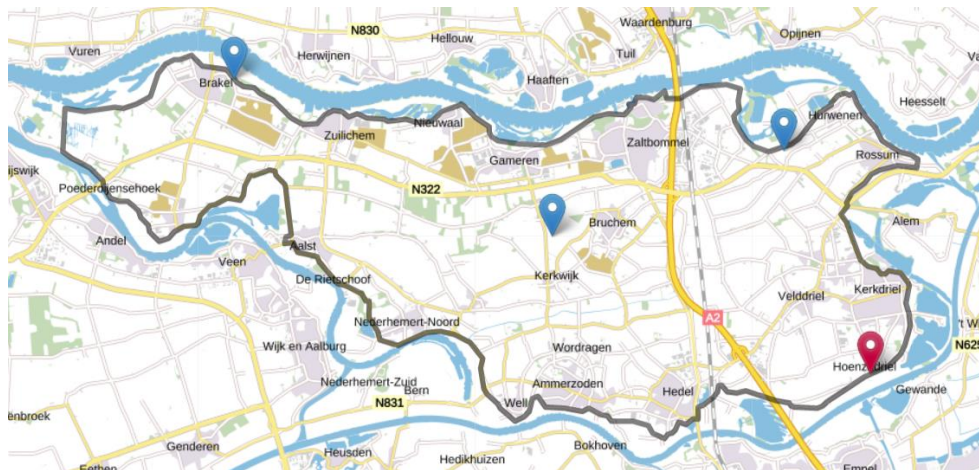


Fig. 2 Overzicht breslocaties uit LIWO. In rood Hoenzadriel.

In Fig. 3 is de hoogtekarte van de Bommelerwaard weergegeven. Hoenzadriel ligt in het hogergelegen gedeelte van de Bommelerwaard. Het water zal naar de lagergelegen gedeeltes in het westen stromen. Door het gebied liggen de A2 en de spoorlijn Utrecht - Den Bosch verhoogd in het landschap. De Meidijk zorgt voor een scheiding tussen het oostelijk en westelijk (Brakel) gedeelte. In Fig. 4 staan de belangrijke hoge lijnelementen en watergangen gemarkeerd.

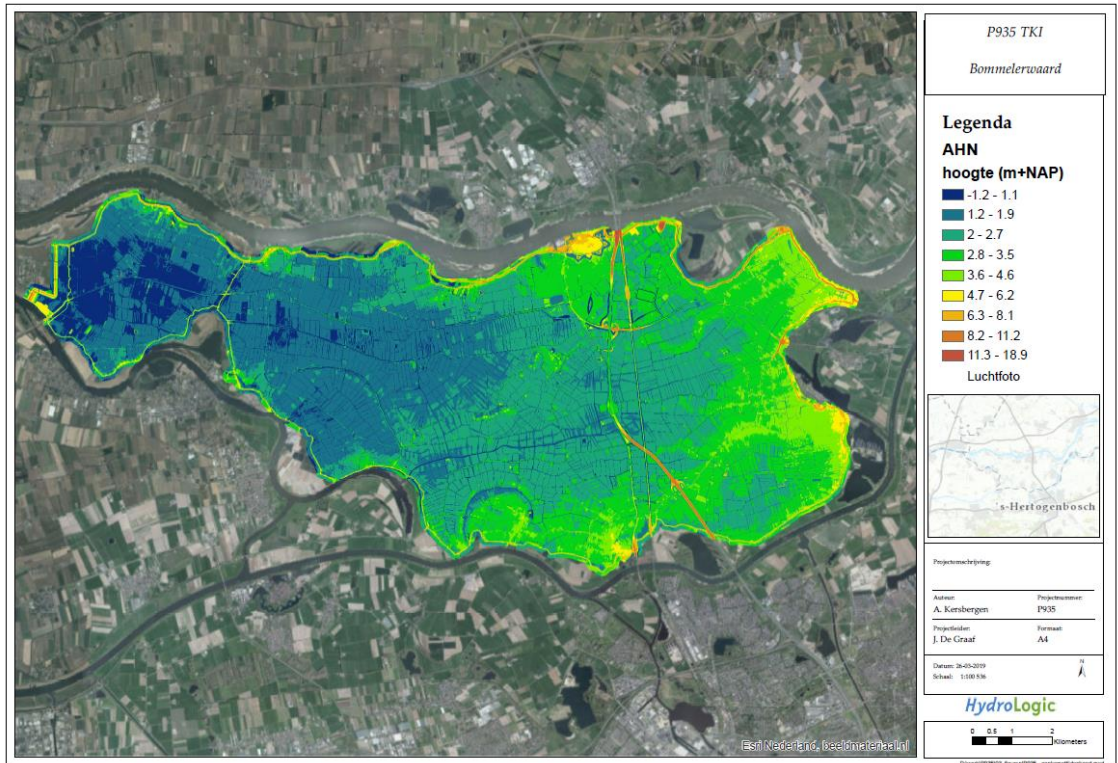


Fig. 3 Hoogtekaart Bommelerwaard

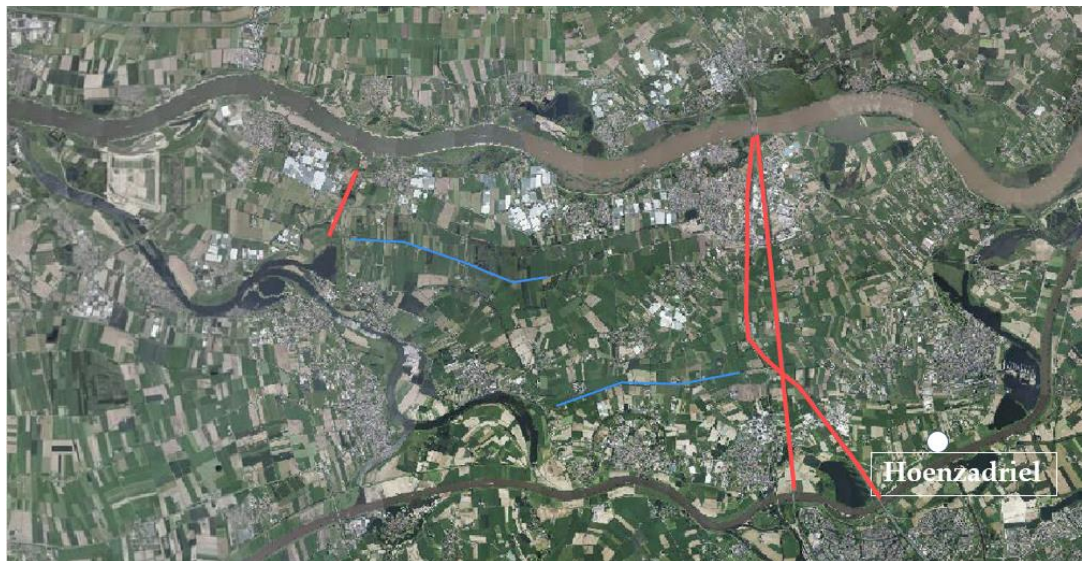


Fig. 4 Belangrijke hoge lijnelementen in rood, belangrijke (laaggelegen) waterlopen in blauw.

In Fig. 5 is het globale overstromingspatroon weergegeven voor de Bommelerwaard met een bres bij Hoenzadriel. De inundatie verspreidt zich naar het noorden. Het water wordt in eerste instantie tegengehouden door de spoorlijn en de snelweg. Er zijn echter een aantal onderdoorgangen (viaducten, tunnels en duikers) in deze verhoogde elementen gelegen, waardoor het water alsnog richting het westen stroomt. Wanneer het water ver genoeg stijgt zal het op een gegeven moment ook over de weg en de spoorlijn gaan stromen. Wanneer het water aan de westkant van de snelweg en de spoorlijn komt, stroomt het in

eerste instantie door de hoofdwetering (in oost-west richting tussen Kerkwijk en Ammerzoden), en het lagergelegen gebied daaromheen. Daarna verspreidt het zich in noordwestelijke richting. De Meidijk zorgt ervoor dat het water niet verder naar het westen stroomt.

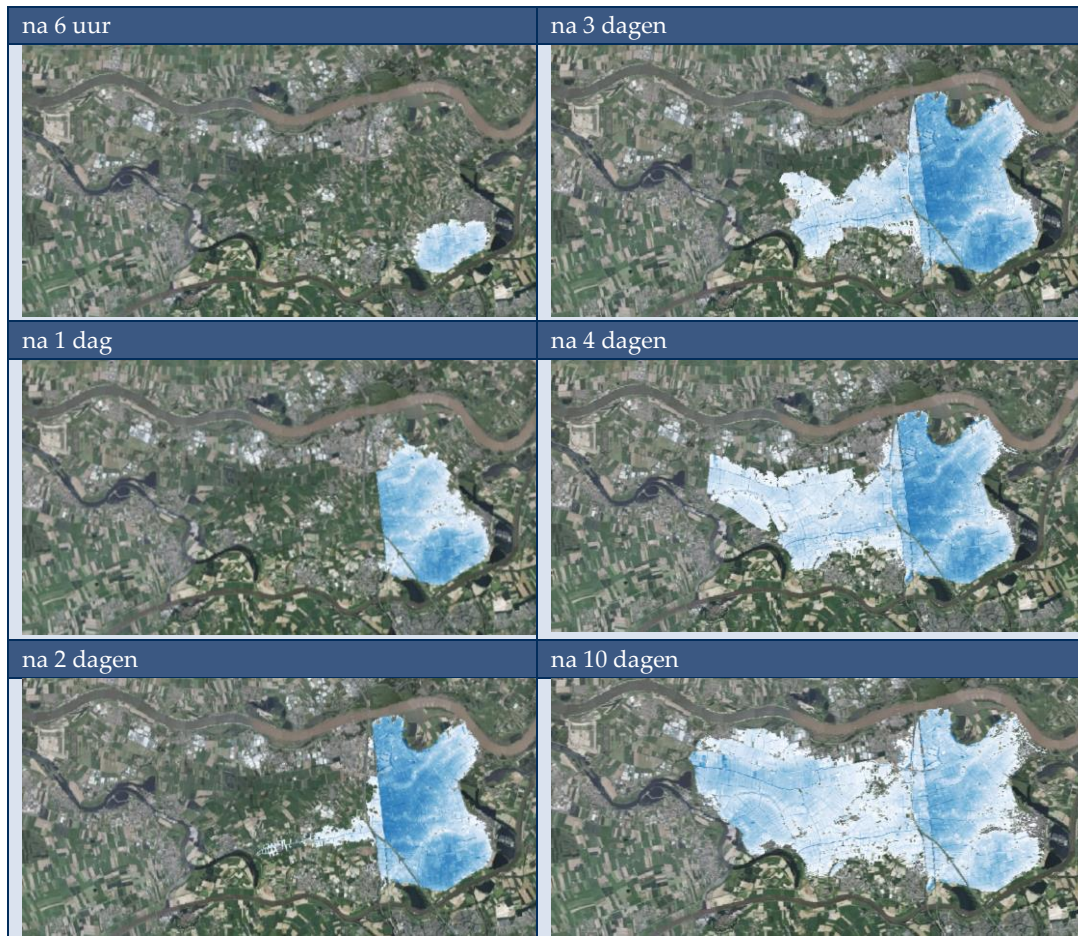


Fig. 5 Overstromingspatroon Bommelerwaard bij bres Hoenzadriel

3.2 De invloed van bebouwd gebied (1 & 3)

Het hoogtemodel vormt de basis van het overstromingsmodel en vormt de basis voor de stroming en waterstanden in het gebied. Bebouwing kan op twee manieren worden meegenomen in het overstromingsmodel:

- Met de hoogte op het maaiveldniveau (conform leidraad overstromingsmodellering). De extra weerstand door de gebouwen is gecompenseerd door middel van een hogere ruwheid voor het gehele bebouwd gebied (zowel straten als gebouwen hebben eenzelfde hoge ruwheid).
- Met de werkelijke hoogte (of in ieder geval een paar meter verhoogd). In dit geval kan er ook geen water in gebouwen staan, of door gebouwen stromen. De weerstand voor de stroming die de gebouwen geven wordt in dit geval in het hoogtemodel meegenomen. De ruwheid van straten is laag.

In de pilot zijn de verschillen onderzocht en is bepaald wat de effecten en consequenties zijn van beide manieren van modelleren om de voorkeursaanpak te bepalen. Er is ook onderzocht of de verhoogde ruwheid in bebouwd gebied zorgt voor een vergelijkbare weerstand als verhoogde gebouwen om te zien welke ruwheid in stedelijk gebied moet worden toegepast als de panden uit het hoogtemodel zijn gehaald, om vergelijkbare resultaten te krijgen met de situatie waarin panden wel verhoogd in het hoogtemodel zijn opgenomen.

Wanneer de stroomsnelheden van beide sommen worden geanalyseerd (Fig. 6), blijkt dat de stroomsnelheden met de gebouwen verhoogd in het hoogtemodel groter is dan wanneer de gebouwen op maaiveldhoogte zijn meegenomen. Dit wordt veroorzaakt door de lagere bodemruwheid en het kleinere doorstroomoppervlak (tussen de gebouwen door).

De verschillen tussen de stroomsnelheden kunnen oplopen tot 0.5-2 m/s (Fig. 7). Op andere locaties (tegen de snelweg aan) is de stroomsnelheid juist lager door het ophogen van de gebouwen. Er stroomt hier minder water omdat de verhoogde gebouwen het water tegenhouden. Omdat op deze specifieke locatie ook een viaduct is gelegen, is dit een belangrijke locatie in het model; de stroming op deze locatie is bepalend voor de hoeveelheid water die door de onderdoorgang stroomt.

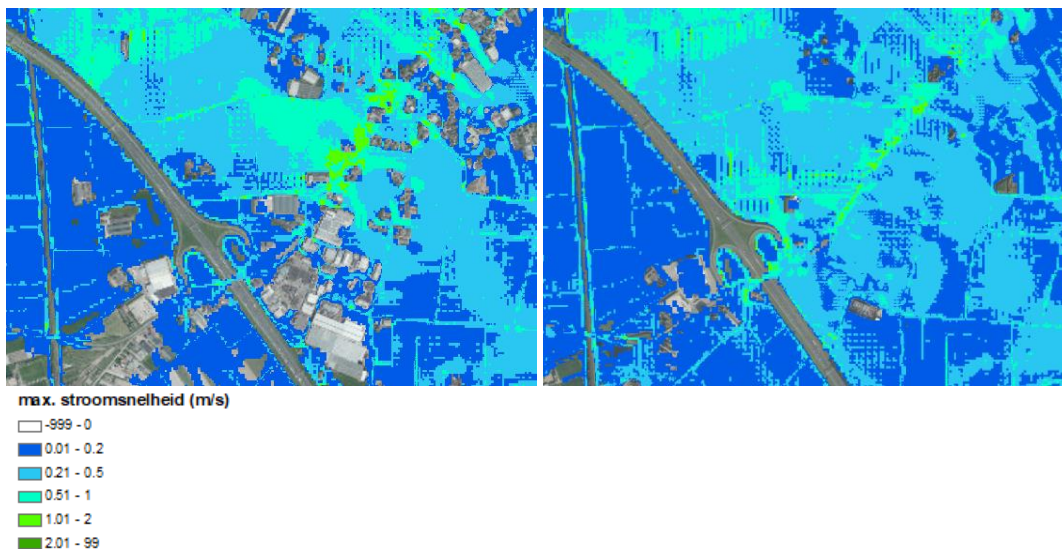


Fig. 6 Stroomsnelheden met gebouwen verhoogd (links) en gebouwen op maaiveldhoogte (rechts), detail.

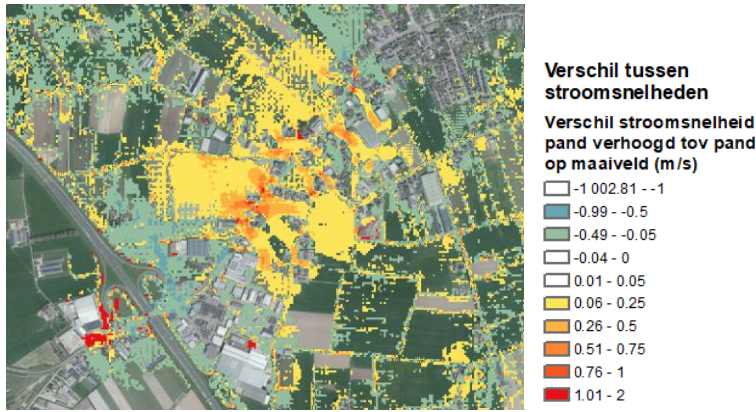


Fig. 7 Verskil in stroomsnelheden bij gebouwen verhoogd ten opzichte van gebouwen op maaiveld-hoogte

Wanneer een groter gebied wordt beschouwd (Fig. 8 en Fig. 9), zijn de verschillen in stroomsnelheden en de aankomsttijden minder opvallend. Dezelfde locaties met hoge stroomsnelheden lichten op in het gebied, en de aankomsttijden zijn, op een aantal uitzonderingen na, vrij vergelijkbaar. Doordat in het model waar de gebouwen op maaiveldshoogte zijn meegenomen, de ruwheid wel is verhoogd, ontstaan uiteindelijk dezelfde stromingspatronen en is het gebied dat de eerste dag inundeert vergelijkbaar met wanneer de gebouwen verhoogd zijn opgenomen.

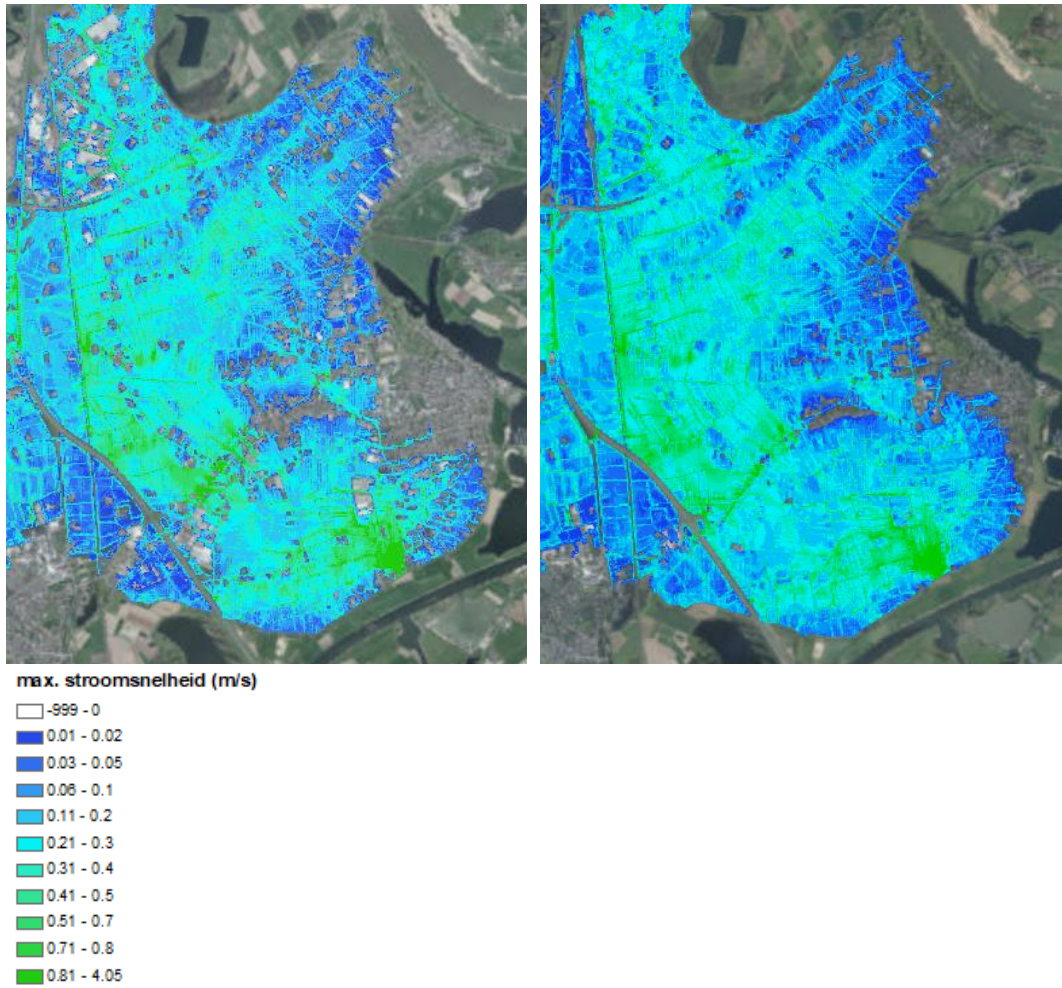


Fig. 8 Stroomsnelheden met gebouwen verhoogd (links) en gebouwen op maaiveldhoogte (rechts)

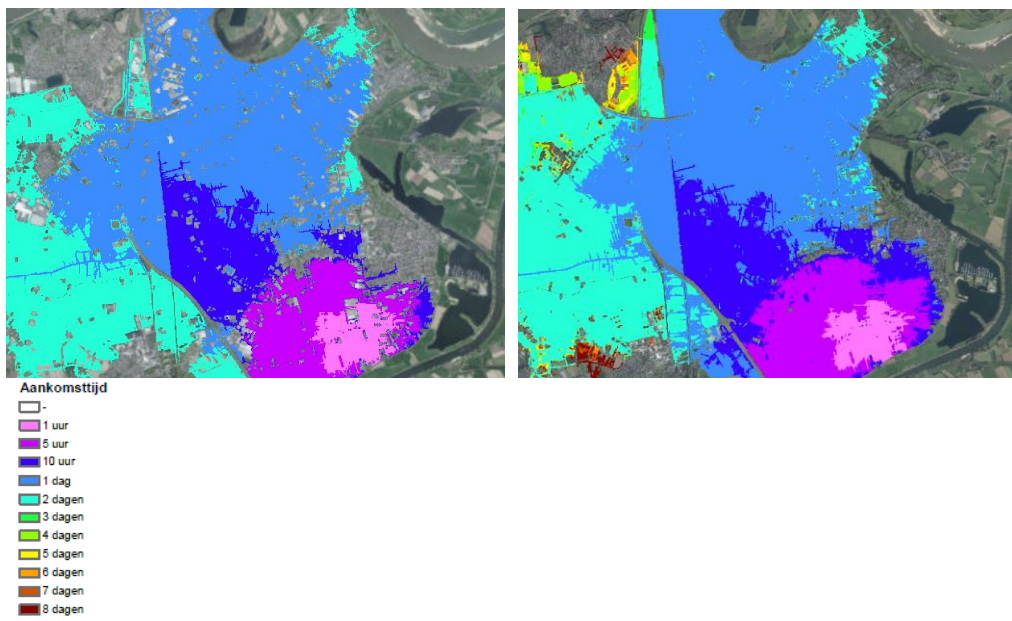


Fig. 9 Aankomsttijden met gebouwen verhoogd (links) en gebouwen op maaiveldhoogte (rechts)

Om bebouwing als verhoogd op te nemen in het AHN, en te zorgen dat er geen stroming door gebouwen plaats kan vinden, moet de gridcelgrootte ter plekke klein genoeg zijn om de verschillen tussen gebouw en tussenliggende straat te onderscheiden. In het model is daarom gekozen voor 5 m resolutie. Als gebouwen dicht bij elkaar liggen dan 5 m, kan het zijn dat de gebouwen in de interpolatie van de hoogte op het grid niet meer afzonderlijk zijn te onderscheiden in het model.

Als er geen waterdiepte is op de plek van een gebouw, worden met de Schade en Slachtoffermodule (zie par. 3.11) geen slachtoffers en geen schade aan de gebouwen berekend. Het verhoogd meenemen van gebouwen is dus een minder geschikte methode om te gebruiken voor deze berekeningen. Met extra nabewerking van de gegevens zou alsnog een waterdiepte op de plek van gebouwen kunnen worden berekend.

Het advies is om gebouwen niet mee te nemen in het hoogtemodel maar om stroming in bebouwd gebied te simuleren door hogere bodemruwheid (conform leidraad, Ref. 1). Dit sluit beter aan op de manier waarop schade en slachtoffers berekend worden, het zorgt ervoor dat er grover gerekend kan worden (er hoeft dan niet per se aan de grens van 5 m resolutie worden vastgehouden) en de resultaten zijn op gebiedsniveau vergelijkbaar met wanneer de gebouwen verhoogd zouden zijn. De ruwheidsverhoging die is meegenomen voor bebouwd gebied zorgt voor de stromingspatronen en aankomsttijden die overeen komen met de situatie wanneer gebouwen verhoogd zijn meegenomen.

3.3 De gevoeligheid voor bodemruwheid (2)

Bodemruwheid is bepalend om de stroming en verspreiding van het water in het gebied op zo betrouwbaar mogelijke wijze te kunnen simuleren. Op ruw oppervlak ondervindt het water meer weerstand dan over een glad oppervlak.

De bodemruwheid wordt als gebiedsdekkende data laag toegevoegd aan het model. Bodemruwheden kunnen uniform of ruimtelijk gedistribueerd worden meegenomen op basis van het LGN. In de pilot zijn beide manieren vergeleken, om hiermee de gevoeligheid van de bodemruwheid te bepalen.

Ruwheden zijn meegenomen als Nikuradse-waarden (naar voorbeeld uit Leidraad Overstromingsmodellering) in de White-Colebrook vergelijking. Voor de uniforme ruwheid is waarde 1 gekozen (hoger dan gras en akkerbouw, maar lager dan bos en glastuinbouw).

Tabel 2 voorbeelden van ruwheidswaarden (naar voorbeeld Leidraad Overstromingsmodellering, Ref. 1)

landgebruik (LGN)	Bodemruwheid (nikuradse)
Water	0.1
Gras	0.25
Akkerbouw	0.4
Bos	5
Glastuinbouw	5
Bebouwing	10

De vergelijking van de resultaten bij de uniforme ruwheid met de ruimtelijk variërende ruwheid laat een aantal verschillen zien. Bij de uniforme ruwheid wordt de stroomsnelheid niet bepaald door gebieden met lage ruwheid waar het water sneller kan stromen en gebieden met hoge ruwheid, waar het water minder snel stroomt. In de resulterende stroomsnelheden zijn minder gedetailleerdere patronen zichtbaar (zie Fig. 10 en Fig. 11) omdat het water minder gestuurd wordt door ruwere en gladdere ondergronden. De stroming wordt bij de uniforme ruwheid met name beïnvloed door de breslocatie, het hoogteverloop en de onderdoorgangen.

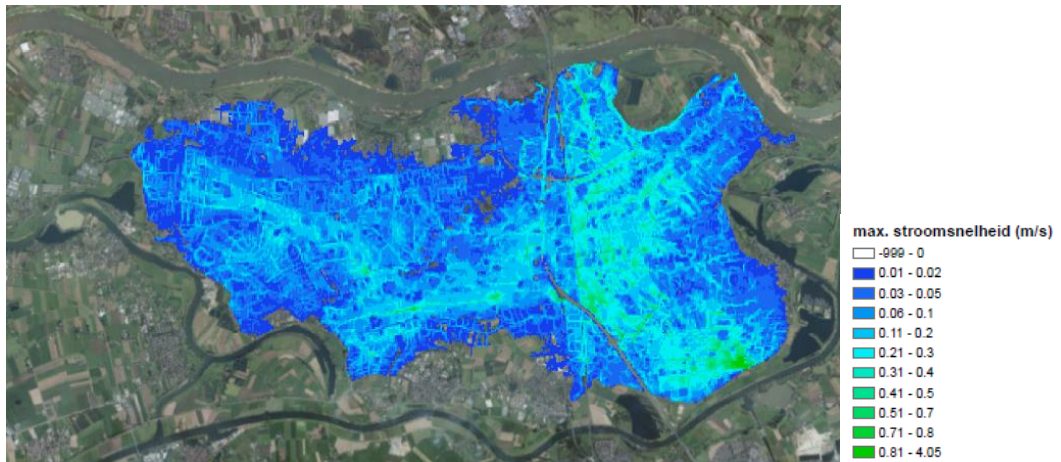


Fig. 10 Stroomsnelheden bij bodemruweden o.b.v. bodemgebruik (40 m grid)

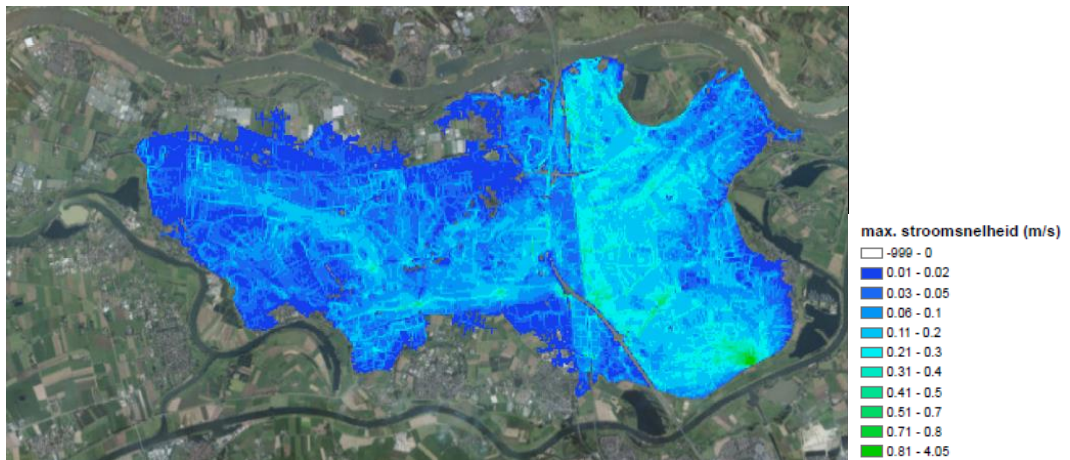


Fig. 11 Stroomsnelheden bij uniforme bodemruwheid (40 m grid)

Het verschil in stroming door het gebied zorgt voor kleine verschillen in debieten door onderdoorgangen (Fig. 12).

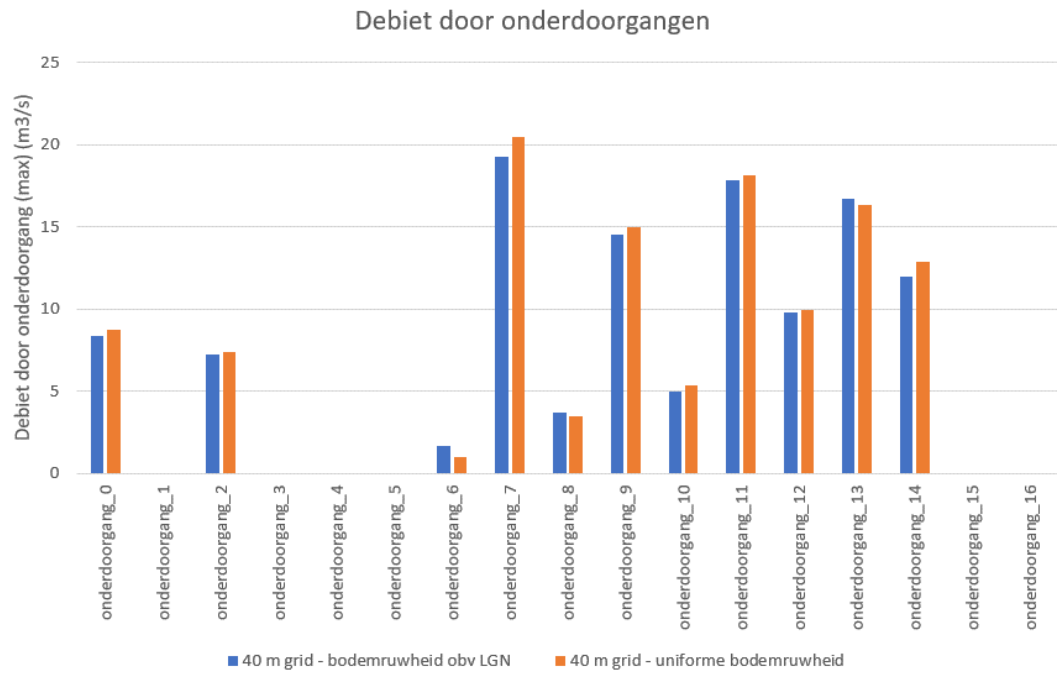


Fig. 12 Debiet door onderdoorgangen (maximaal) bij variërende ruwheid op basis van het LGN en uniforme ruwheid. De nummering van onderdoorgangen is weergegeven in Fig. 13.

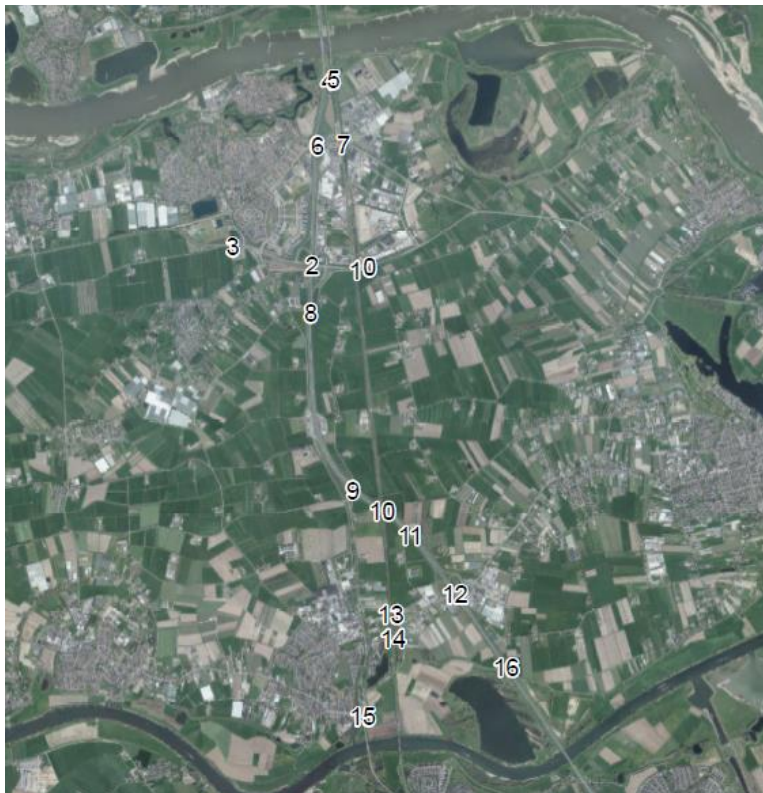


Fig. 13 Overzicht locaties onderdoorgangen met nummering.

De stroming door het gebied en door de onderdoorgangen zorgen voor kleine verschillen in waterdieptes, geïnundeerd areaal en aankomsttijden. In Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 en Fig. 17 is te zien dat er iets meer inundatie ontstaat aan de noordkant bij Zaltbommel, en dat het water zich aan de westkant minder snel verspreidt, en ook minder ver komt aan de noordrand bij het kassengebied. De maximale waterdieptes zijn vrijwel gelijk.

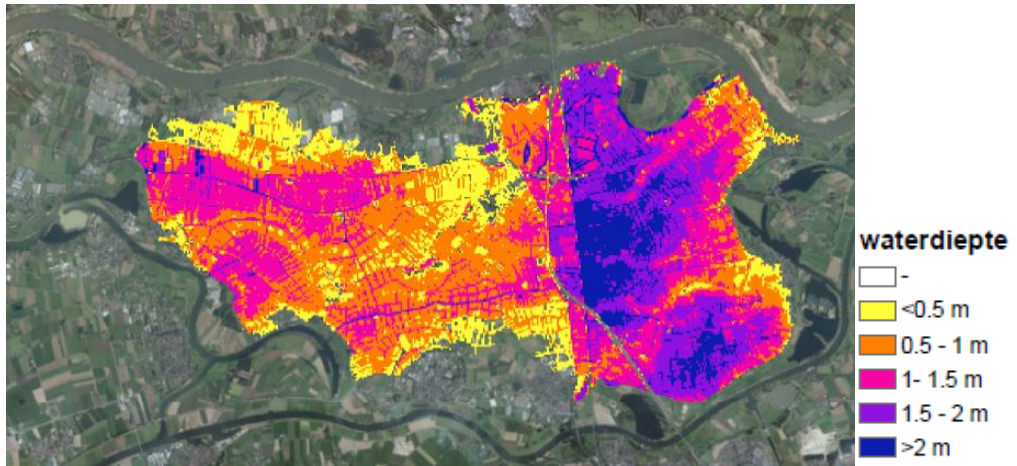


Fig. 14 Maximale waterdiepte bij bodemruwheden o.b.v. bodemgebruik (40 m grid)

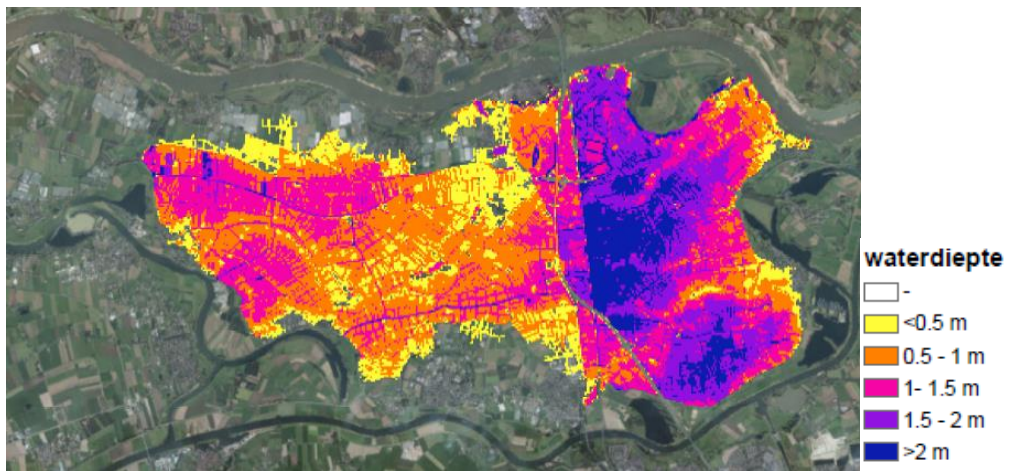


Fig. 15 Maximale waterdiepte bij uniforme bodemruwheid (40 m grid)

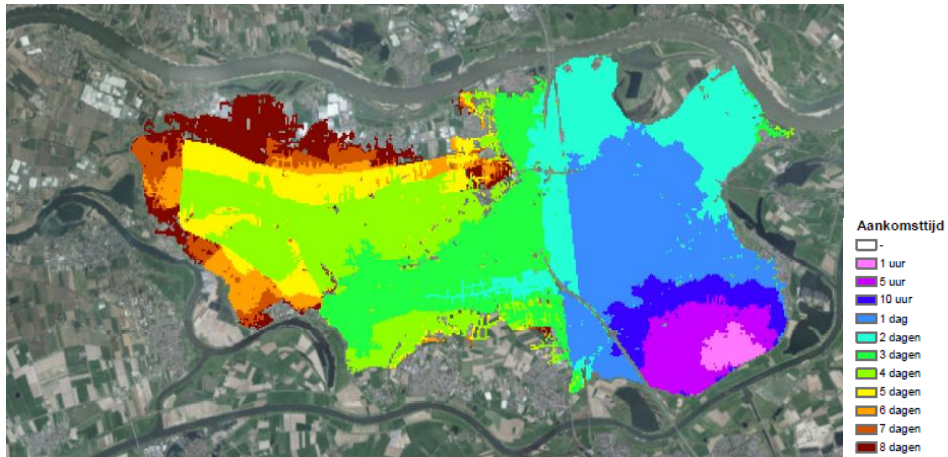


Fig. 16 Aankomsttijd bij bodemruwheden o.b.v. bodemgebruik (40 m grid)

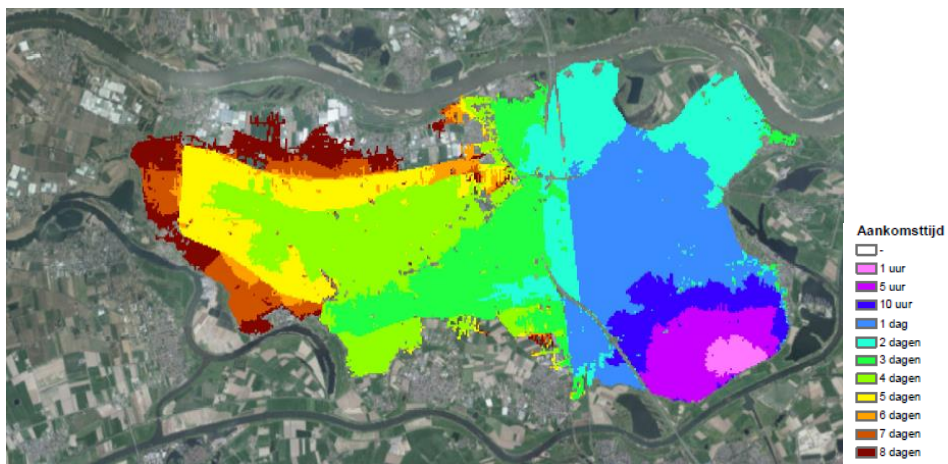


Fig. 17 Aankomsttijd bij uniforme bodemruwheid (40 m grid)

Doordat de stroming en de waterstanden op het moment na de bres verschillen met uniforme ruwheid ten opzichte van ruwheid op basis van landgebruik, heeft de ruwheid ook invloed op de bresgroei en het debiet door de bres. De waterstanden zijn met uniforme bodemruwheid lager, dus de bresbreedte wordt groter (zie ook par. 3.10). Het verschil in bresbreedte heeft in het geval van de gekozen breslocatie niet tot een ander bresdebiet geleid.

Uit de resultaten blijkt dat de bodemruwheid vooral de stromingspatronen beïnvloedt. Dit heeft niet geleid tot hele grote verschillen in inundatieoppervlak of waterdieptes, omdat hier het hoogtemodel en de hoge lijnelementen ook een grote rol in spelen, maar er wordt wel aanbevolen om onderscheid te maken tussen verschillende ruwheden bij verschillend landgebruik.

3.4 Modelling van watergangen (5)

Watergangen zorgen voor een snelle verspreiding van het water door het gebied, omdat ze dieper liggen ten opzichte van het maaiveld en omdat de ruwheid kleiner is.

In het model kunnen watergangen gemodelleerd worden in het hoogtemodel en het ruwhedengrid of als 1D watergangen. In de pilot zijn beide manieren toegepast en is een vergelijking gemaakt van de resultaten.

Gullies zijn overwogen om te gebruiken voor de modellering van de watergangen, maar blijken niet toepasbaar op grove grids (veel groter dan de breedte van een watergang) omdat ze de berging in het hoogtemodel mee nemen en deze afhankelijk is van de gridcelgrootte (zie voor details het technisch achtergrondrapport).

1D-watergangen liggen op het grid (zijn onafhankelijk van de grootte van de gridcellen) en zijn gekoppeld met het 2D-grid.

In de pilot is gebruik gemaakt van een versimpeld 1D netwerk om de A-watergangen in het gebied te modelleren. Om het 1D netwerk te vervaardigen is gebruik gemaakt van het lijnenbestand voor de locatie. Het profiel van de watergangen wordt bepaald door de bodemhoogte van de watergang (afgeleid van het peil) en een uniforme breedte van 1.5 meter. Er staan geen kunstwerken op de watergangen, hierdoor zal het water zich sneller kunnen verplaatsen dan in werkelijkheid. Het 1D netwerk van de A-watergangen is gekoppeld met het 100 m uniforme grid.

Met de 1D-watergangen verspreidt het water zich sneller over het gebied (Fig. 18 en Fig. 19). Vooral de stroming richting het westen gaat sneller. Er is te zien dat op een aantal plekken langs de watergang al snel inundaties ontstaan (op dag 1), maar dat het nog twee dagen duurt voordat deze inundatie zich verder verspreidt. Het uiteindelijke gebied dat inundeert, is groter wanneer het water via de 1D watergangen kan stromen, vooral aan de noordkant.

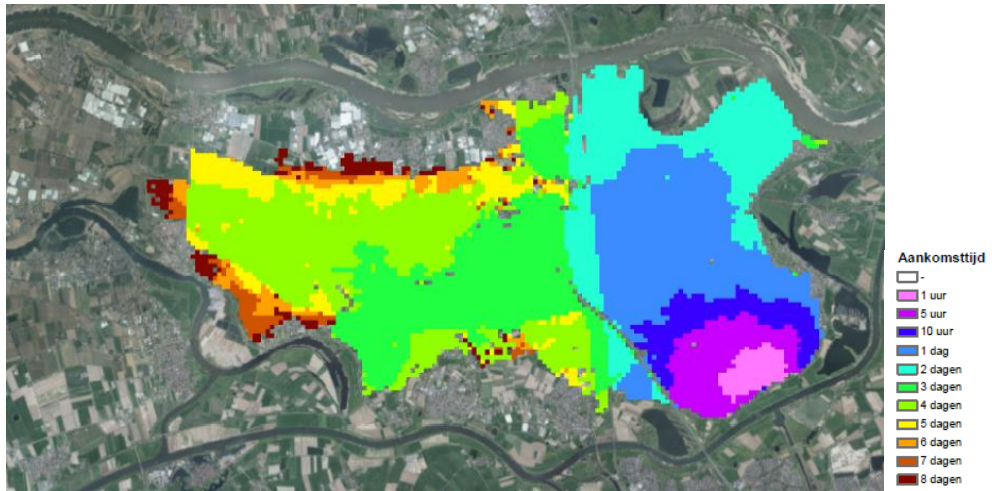


Fig. 18 Aankomsttijden 100 m grid.

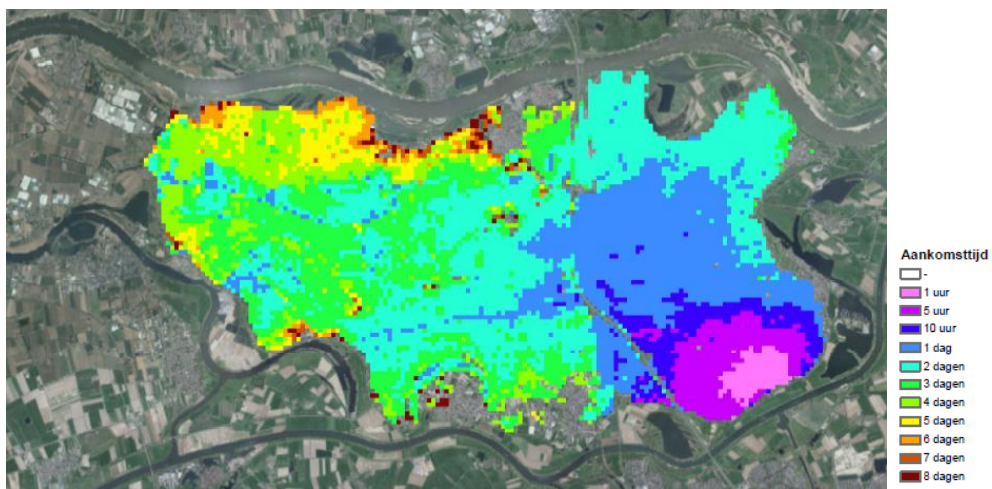


Fig. 19 Aankomsttijden 100 m grid met 1D watergangen.

De stroomsnelheden op het 2D-grid zijn minder hoog wanneer het 1D-netwerk wordt gebruikt voor de watergangen. Bij de bres en over hoge lijnelementen komen nog steeds hoge stroomsnelheden voor, maar in de rest van het gebied, en vooral het westelijk gedeelte, is te zien dat de maximale stroomsnelheden op het 2D-grid lager liggen dan wanneer er geen 1D-watergangen in het model zitten. De grote stroomsnelheden vinden plaats in de 1D-watergangen. Wanneer alleen met een 2D netwerk wordt gerekend, is deze grote stroomsnelheid ook op de locaties van de watergangen.

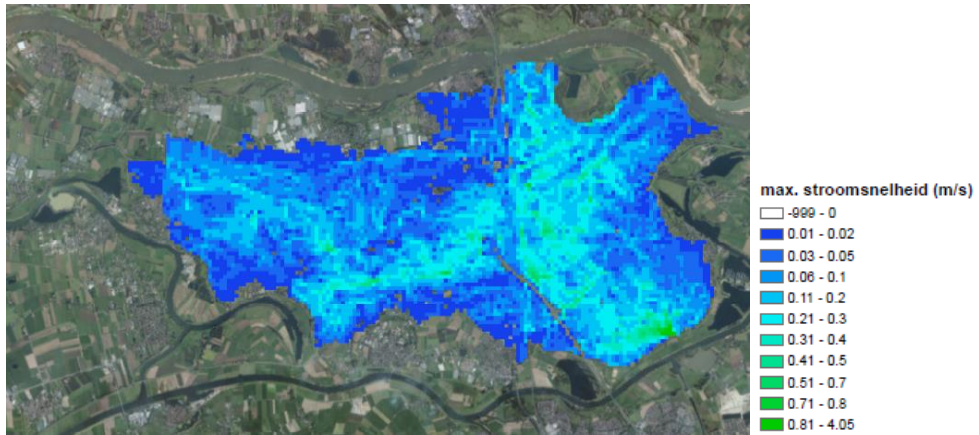


Fig. 20 Stroomsnelheden 100 m grid.

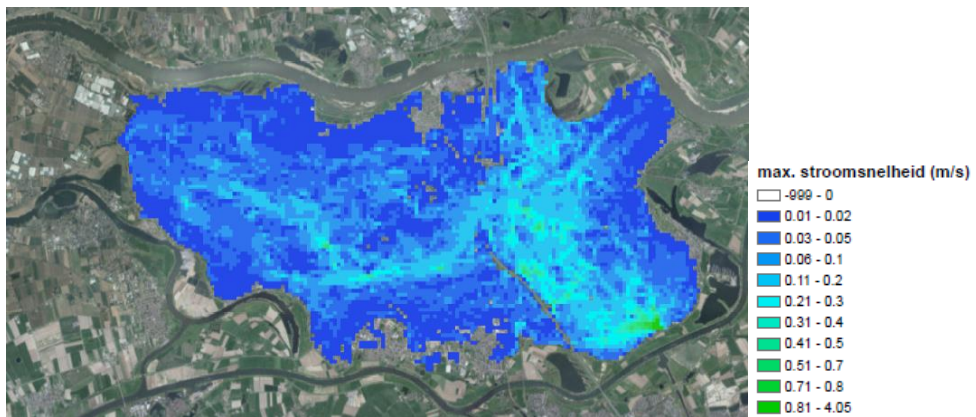


Fig. 21 Stroomsnelheden 100 m grid met 1D watergangen.

De onderdoorgangen

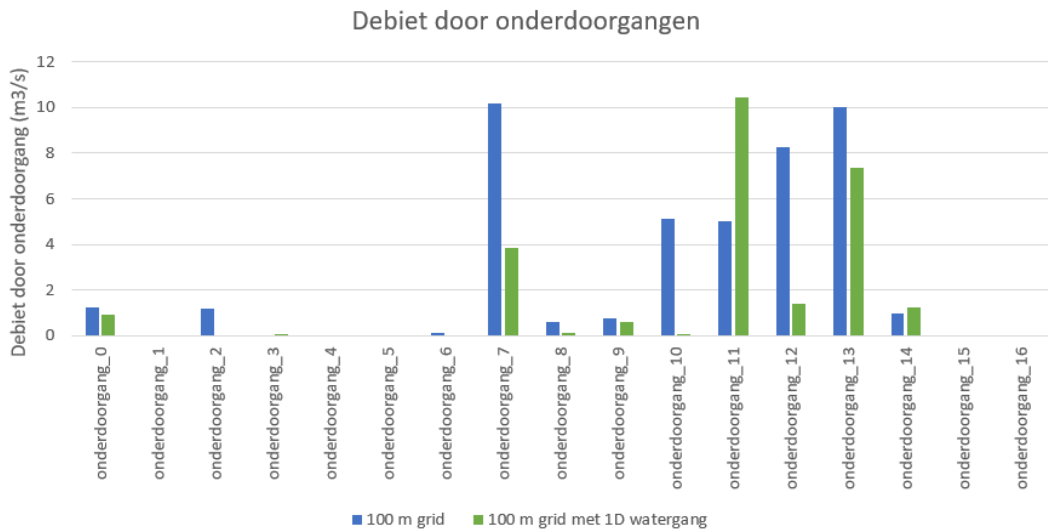


Fig. 22 Debiet door onderdoorgangen 100 m grid met en zonder 1D watergangen

In Fig. 23 en Fig. 24 zijn de maximale waterstanden weergegeven. Ook uit deze kaart blijkt dat meer water doorstroomt richting het westen. Het water wordt ook minder hoog opgestuwd achter de spoorlijn en de snelweg, omdat het sneller via de watergangen naar de westkant stroomt.

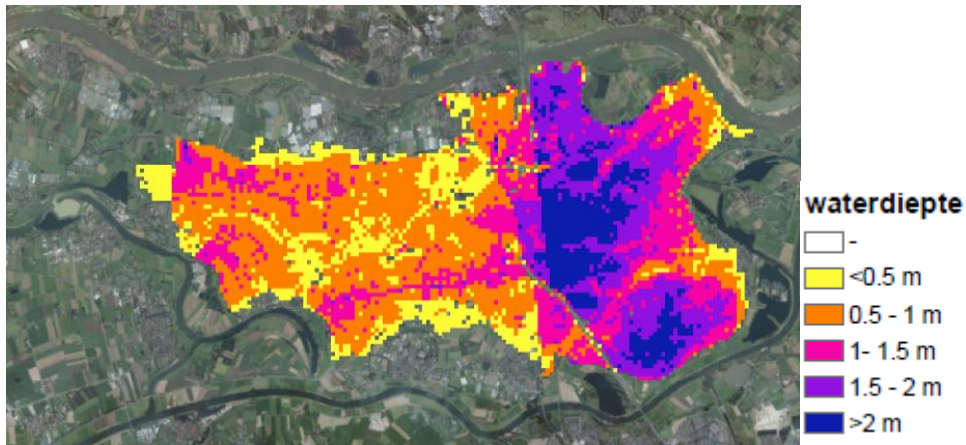


Fig. 23 Waterdiepte 100 m grid.

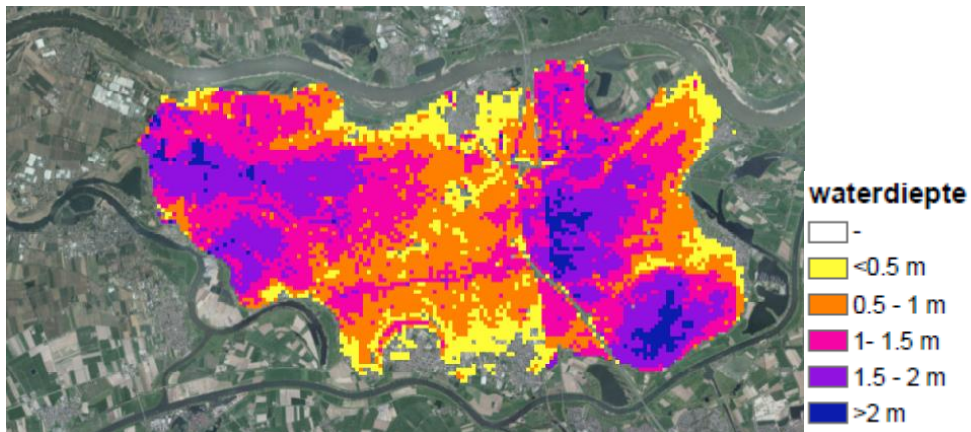


Fig. 24 Waterdiepte 100 m grid met 1D watergangen.

De rekentijd van het model neemt toe bij het toevoegen van het 1D-netwerk (van 6 minuten naar 1.1 uur), vooral door de afnemende rekentijdstep (zie par. 3.6.2) tijdens de berekening bij kleine afstand tussen 1D rekenpunten met hoge stroomsnelheden. Het 1D-netwerk kan geoptimaliseerd worden om dit soort knijpende flowlinks te vermijden, waarmee de rekentijd wordt verkleind.

De watergangen in het gebied kunnen een grote rol spelen in het versnellen van de inundatie. Met een 1D-schematisatie is dit het beste te modelleren, dus wordt aanbevolen om in ieder geval de belangrijkste watergangen toe te voegen als 1D-element in het model. Het is wel nodig om de juiste profielgegevens en versmallingen zoals stuwen en duikers mee te nemen. De verwachting is dat met de komende ontwikkelingen binnen D-Hydro het eenvoudiger wordt om goede 1D-schematisaties te maken.

3.5 Hoge lijnelementen en onderdoorgangen (7)

Hoge lijnelementen en onderdoorgangen hebben veel invloed op de het overstromingsverloop omdat ze water tijdelijk tegenhouden of juist op een specifiek punt via een onderdoorgang doorlaten.

Hoge lijnelementen kunnen worden meegenomen in het hoogtemodel en/of in apart als fixed weirs (zie technisch achtergrond). Onderdoorgangen kunnen in het hoogtemodel meegenomen worden of als 1D-elementen. De verschillende methodes en de combinaties van hoge lijnelementen en onderdoorgangen zijn in de pilot onderzocht en hier beschreven.

Illustratie van effecten hoge lijnelementen en onderdoorgangen

In Fig. 25 zijn modelresultaten van drie modelschematisaties weergegeven die het belang van lijnelementen en onderdoorgangen in deze overstromingssimulaties onderstrepen, omdat zonder deze elementen de inundatieresultaten er heel anders uit zien. De drie modelschematisaties verschillen in de wijze waarop (hoge) lijnelementen en onderdoorgangen zijn meegenomen en hebben dezelfde gridresolutie van 100 m.

- 1 De eerste som toont de maximale waterdiepte en de aankomsttijden bij een simulatie waar de hoge lijnelementen en de onderdoorgangen in zijn meegenomen.
- 2 In de tweede som is te zien wat er gebeurt als de onderdoorgangen niet in het model worden opgenomen. Het water stroomt nog wel over de snelweg en de spoorlijn, maar dit gebeurt alleen in het midden van het gebied en niet aan de noord- en de zuidkant waar bebouwd gebied is gelegen. Dit levert een groot verschil op in de schade en slachtoffers door de inundatie.
- 3 De derde som laat de resultaten zien van een model waarin de hoge elementen en onderdoorgangen niet zijn opgenomen. Het water stroomt veel sneller door naar de lage delen in het westen van het gebied, waardoor een veel groter gebied inundeert. Aan de oostkant is het geïnundeerd areaal veel minder groot ten opzichte van de sommen waarin de hoge lijnelementen wel zijn opgenomen.

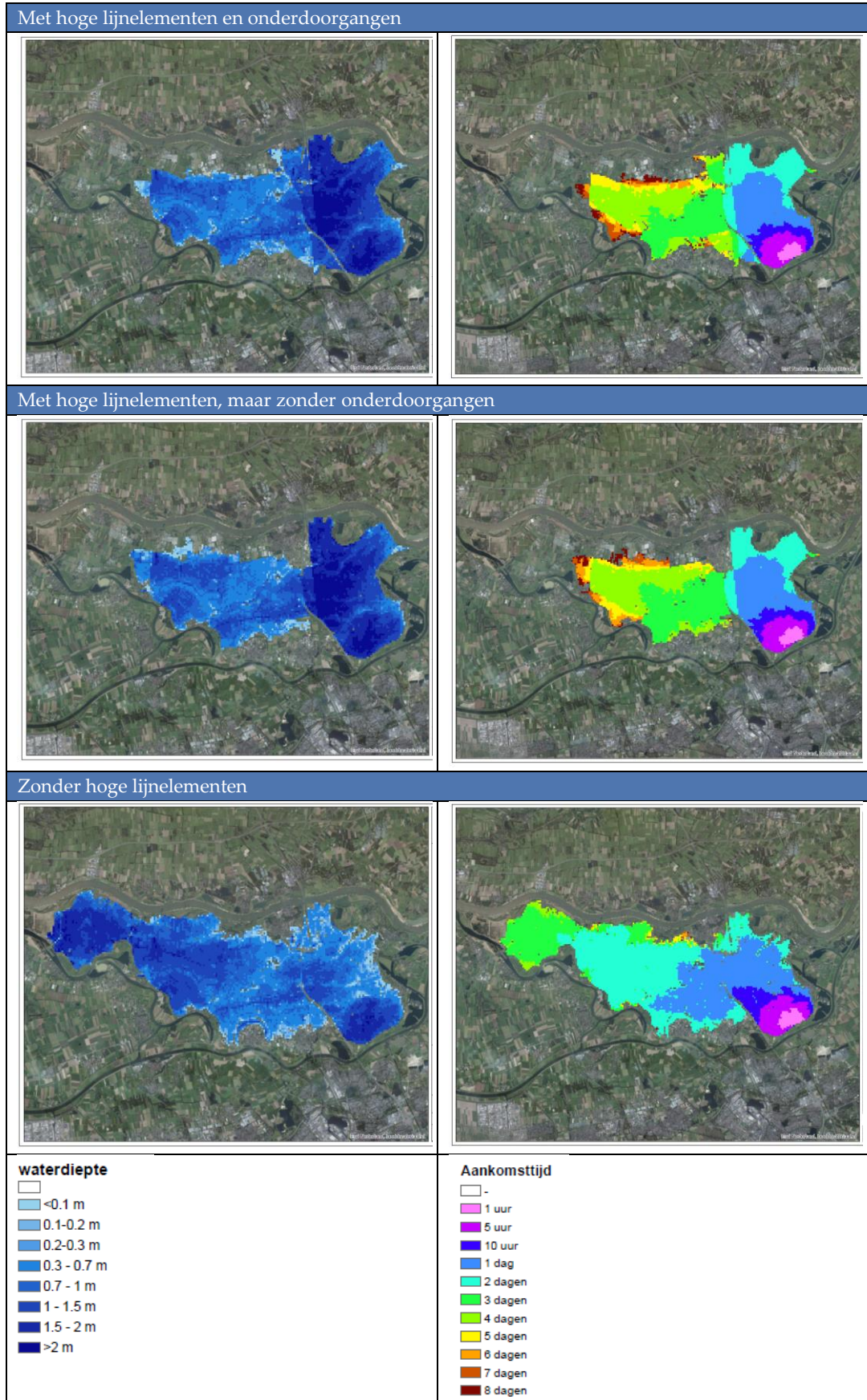


Fig. 25 Modelresultaten van 100 m grid ter illustratie van het belang van hoge lijnelementen en onderdoorgangen in schematisatie.

Hoge lijnelementen en onderdoorgangen apart schematiseren

In het hoogtemodel zijn de meeste hoge lijnelementen (zoals wegen en keringen) reeds aanwezig (zie Fig. 3). Onderdoorgangen zijn soms onvolledig, met onjuiste hoogte of helemaal niet in het AHN opgenomen. Er is een verfijning of correctie nodig om hier de juiste hoogte aan mee te geven.

Het is in D-Hydro mogelijk om de hoge lijnelementen en onderdoorgangen apart mee te nemen om, onafhankelijk van het hoogtemodel en de interpolatie op het grid, te waarborgen dat dit in de schematisatie wordt meegenomen.

- Lijnelementen worden met behulp van fixed weirs in het model gebracht (zie achtergrondrapport). De hoogte van de lijnelementen wordt dan nog een keer opgelegd op het grid om te waarborgen dat deze hoogte in het model zit.
- Wanneer hoge lijnelementen als fixed weir zijn geschematiseerd is het alleen mogelijk om deze te doorkruisen met 1D-onderdoorgangen (zie ook achtergrondrapport). Er worden een hoogte en een diameter opgelegd.

Hoge lijnelementen en onderdoorgangen alleen in hoogtemodel meenemen

Het is ook mogelijk om de hoge lijnelementen en onderdoorgangen alleen in het hoogtemodel mee te nemen. Hiervoor moeten de onderdoorgangen in het hoogtemodel worden aangebracht als vlakken (op bodemhoogte van de onderdoorgang). Een aandachtspunt hierbij is de interpolatie van het hoogtemodel op het grid. Bij grove gridcellen (>10 m), gaan deze details uit het hoogtemodel al snel verloren (zie ook Fig. 25, waar met 100 m gridcellen is gerekend). Ditzelfde geldt voor de onderdoorgangen in het hoogtemodel. Deze lage vlakken worden alleen goed op het modelgrid geïnterpoleerd als de gridcelgrootte ter plekke kleiner is dan de breedte van de onderdoorgang.

In Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28 en Fig. 29 zijn de resultaten weergegeven van een som met een fijn grid (5-10 m) waarbij de hoge lijnelementen en onderdoorgangen in het hoogtemodel zijn gestopt en niet apart zijn meegenomen, en van een som waarbij de hoge lijnelementen en onderdoorgangen wel apart zijn meegenomen als fixed weirs en 1D-elementen.

In de resultaten is te zien dat de verspreiding van het water in het model waarbij de lijnelementen en onderdoorgangen alleen in het hoogtemodel zijn opgenomen, veel sneller gaat dan in het model waar deze nog eens apart door middel van lijnelementen aan het model zijn opgelegd. Hoewel er een gridcelgrootte van 5 m is gebruikt bij de hoge lijnelementen en de onderdoorgangen, heeft dit niet hetzelfde resultaat als wanneer de lijnelementen en onderdoorgangen apart zijn opgenomen. Aan de resultaten van de eerste uren is te zien dat het water niet genoeg wordt tegengehouden door de wegen. Daarna stroomt het water veel sneller naar het westen. Dit zal ook komen doordat de lijnelementen minder goed zijn opgenomen, maar ook door de onderdoorgangen die allemaal een minimale breedte hebben van 5 m, en geen beperking hebben in de hoogte. De capaciteit van de onderdoorgangen is daarmee veel groter dan wanneer deze in 1D worden meegenomen.

Het advies is om de lijnelementen als fixed weirs en onderdoorgangen als 1D-element in de schematisatie mee te nemen omdat hiermee de meeste nauwkeurigheid wordt behaald en het resultaat minder afhankelijk is van de gridcelgrootte.

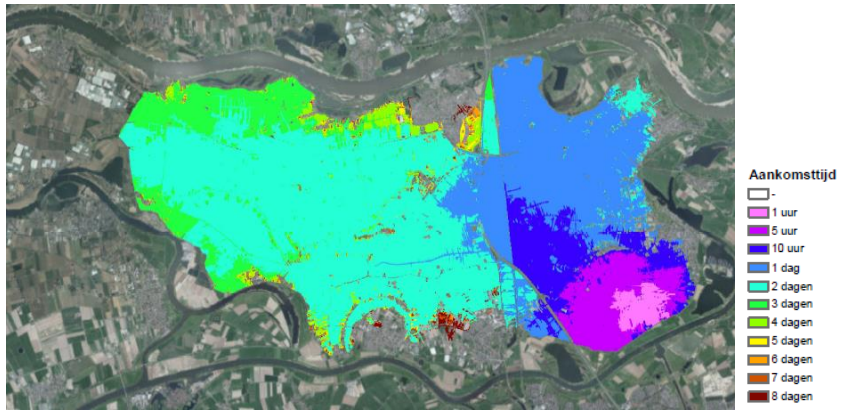


Fig. 26 Aankomsttijden (5 -10 m grid) zonder lijnelementen en onderdoorgangen apart.

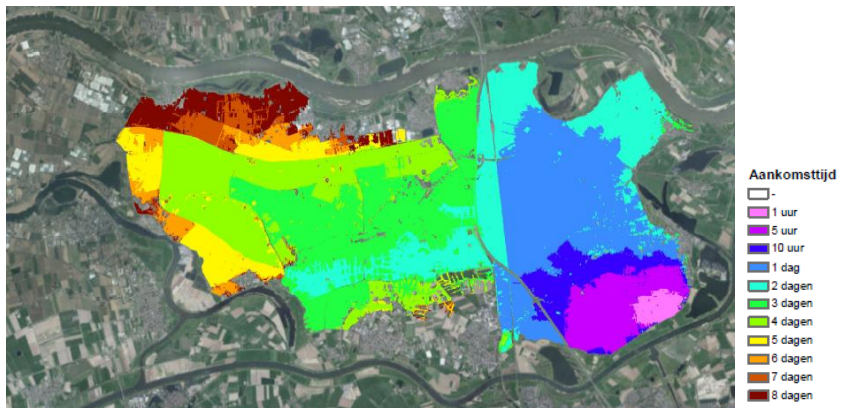


Fig. 27 Aankomsttijden (10-20 m grid) met lijnelementen en onderdoorgangen apart in fixed weirs en 1D-elementen.

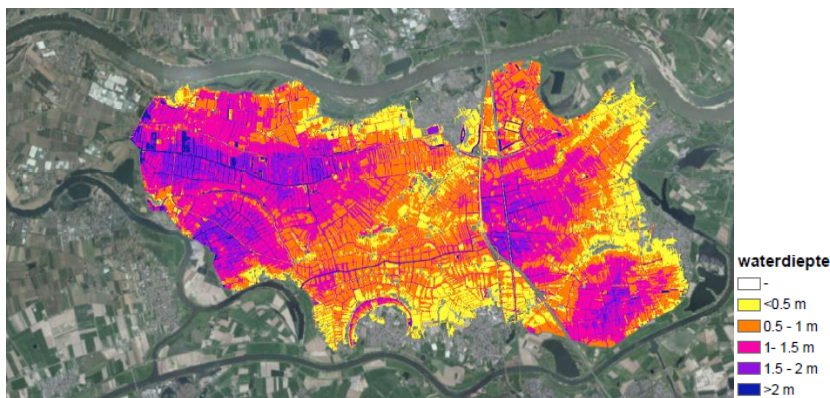


Fig. 28 Waterdiepte (5 -10 m grid) zonder lijnelementen en onderdoorgangen apart.

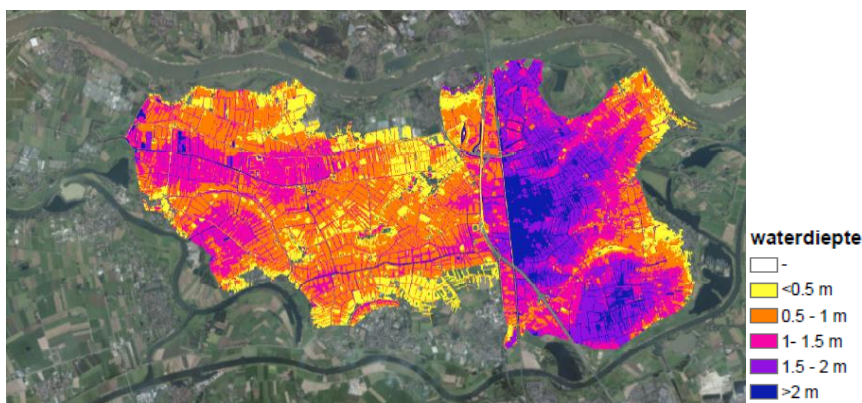


Fig. 29 Waterdiepte (10-20 m grid) met lijnelementen en onderdoorgangen apart in fixed weirs en 1D-elementen.

3.6 Gridcelgrootte (8)

De gridcelgrootte is een zeer bepalend element voor het model. Het bepaalt welke details in het model worden meegenomen (par. 3.6.1). De benodigde basisnauwkeurigheid van het model is afhankelijk van het gebied (dit hangt bijvoorbeeld af van grote verschillen in hoogte en landgebruik op korte afstand). Tevens is de gridcelgrootte bepalend voor de rekentijd (par. 3.6.2).

3.6.1 Resultaten

Voor een overstromingsmodel kunnen verschillende gridcelgroottes gekozen worden. De benodigde gridcelgrootte hangt af van de beoogde modeltoepassing. Zo zal de keuze voor de gridcelgrootte van een calamiteitenmodel mede afhangen van de rekentijd (het model moet in calamiteitsituaties immers snel rekenen).

In de pilot zijn verschillende gridcelgroottes gebruikt en zijn resultaten met elkaar vergeleken. Hiermee wordt in beeld gebracht welke verschillen er zijn in de resultaten ten opzichte van het meest gedetailleerde grid met 10-20 m gridcellen. De verschillen worden per onderwerp toegelicht:

- stroomsnelheden;
- debieten door onderdoorgangen;
- de omvang van de inundatie (welke gebieden inunderen wel en niet);
- aankomsttijden;

- waterdiepte.

Stroomsnelheden

Wanneer de stroomsnelheden bij een grid van 100 m cellen en 10-20 m cellen worden vergeleken (Fig. 30 en Fig. 31), is te zien dat er op hoofdlijnen hetzelfde patroon ontstaat met dezelfde orde-grootte stroomsnelheden. Er zijn hoge stroomsnelheden bij de bres, bij stroming over hoge wegen en bij de watergangen in het westelijk gedeelte van het gebied. In bebouwd gebied en aan de randen van het gebied zijn lage stroomsnelheden te zien.

Wanneer in detail wordt gekeken naar de resultaten, zijn in het fijnere grid gedetailleerdere patronen te zien, bijvoorbeeld van hoe het water over de weg heen stroomt (Fig. 32 en Fig. 33). Wanneer met een grotere gridcelgrootte wordt gerekend, vallen deze locatie-specifieke details weg.

Het belang van deze detaillering is afhankelijk van het doel van de overstromingssimulatie en de toepassing van de modelresultaten. Voor de berekening van slachtoffers speelt stroomsnelheid pas een rol wanneer deze hoger is dan 2 m/s, wat in de praktijk vooral bij de bres voorkomt.

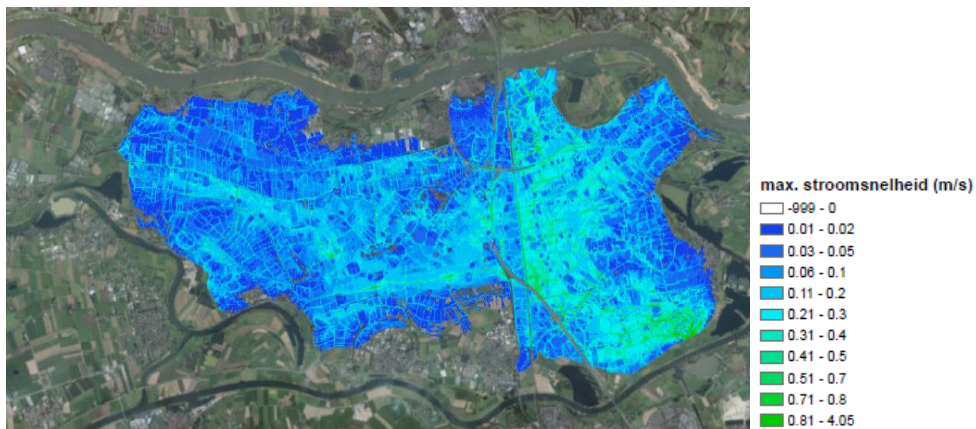


Fig. 30 Stroomsnelheden (10-20 m grid)

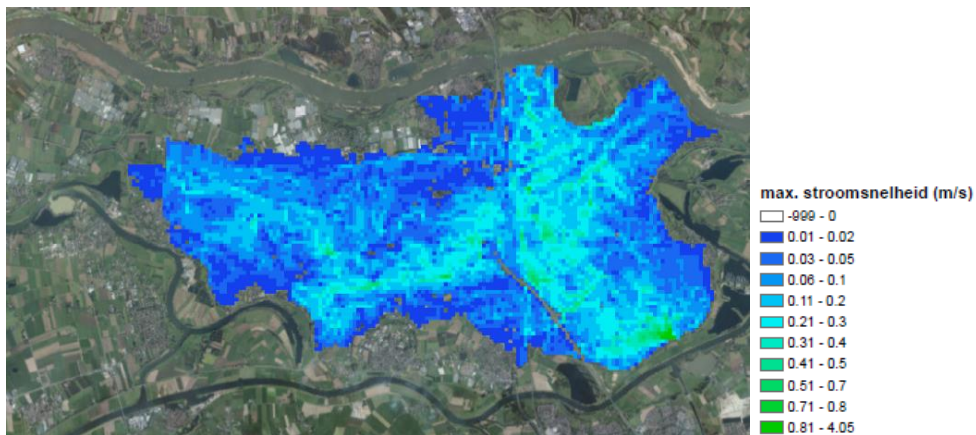


Fig. 31 Stroomsnelheden (100 m grid)

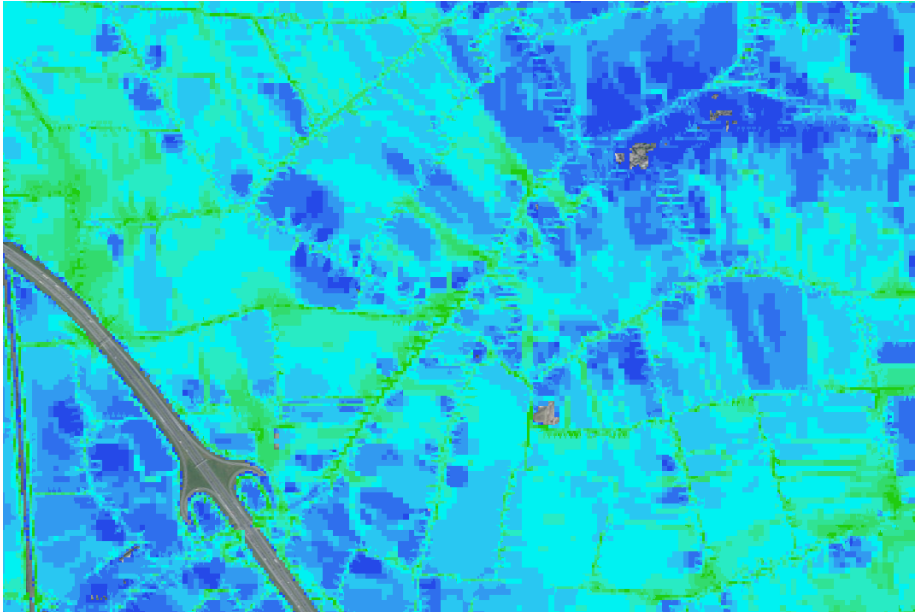


Fig. 32 Stroming door watergangen en over de verhoogde weg heen (10-20 m grid)

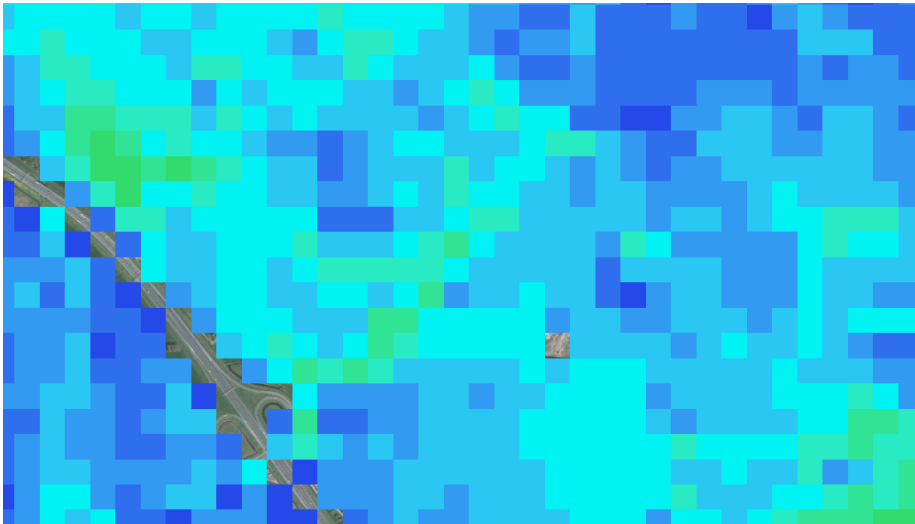


Fig. 33 Stroming (100 m grid)

Omvang van inundatie, waterdiepte en debiet door onderdoorgang

In de resulterende waterdieptes (Fig. 34 en Fig. 35) is globaal hetzelfde beeld te zien bij het fijne 10-20 m grid en het grove 100 m grid. De grootste waterdieptes komen voor in het zuidoosten bij de bres en in het oosten achter de snelweg en de spoorlijn. In het 10-20 m grid zijn meer details zichtbaar, zoals een grotere waterdiepte ter hoogte van watergangen en hooggelegen percelen die droog blijven.

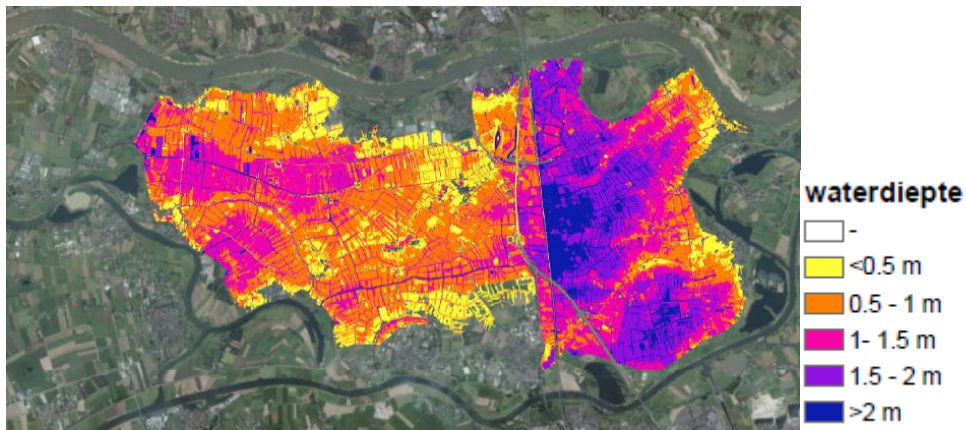


Fig. 34 Waterdiepte (10-20 m grid)

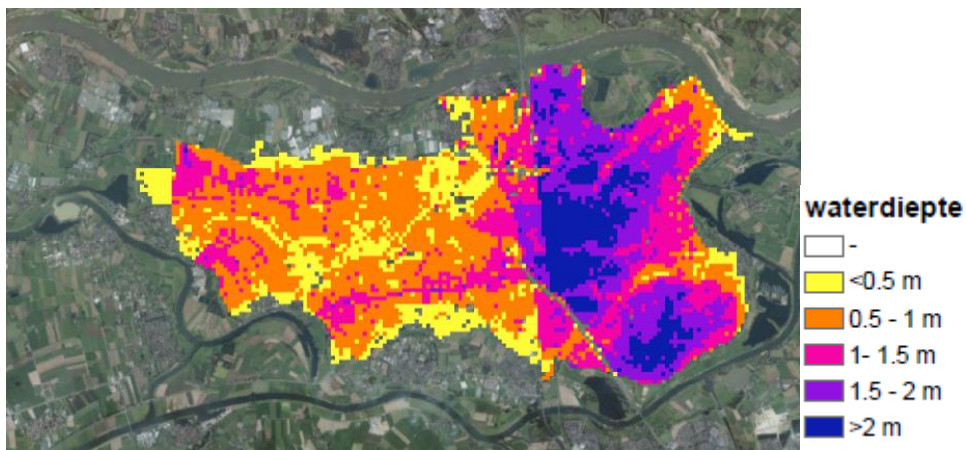


Fig. 35 Waterdiepte (100 m grid)

In de resultaten zijn ook een aantal verschillen te zien in de omvang van de inundatie. Bij het 100 m grid is bijvoorbeeld in het noorden een groter deel van Zaltbommel geïnundeerd en aan de zuidkant een gedeelte van Hedel. In het 10-20 m grid treedt meer inundatie op aan de noordwestkant van het gebied, bij Zuilichem en Nieuwaal.

De belangrijkste reden van deze verschillen is de manier waarop de onderdoorgangen in het model zijn geschematiseerd en de hoeveelheid water die door deze onderdoorgangen stroomt. In het 100 m grid gaat er over het algemeen minder debiet door de onderdoorgangen (zie Fig. 36), behalve bij onderdoorgang 7 (een onderdoorgang onder het spoor in Zaltbommel). Hierdoor stroomt er meer water naar Zaltbommel.

De verschillen tussen de onderdoorgangen komt doordat er is gewerkt met twee 1D-schematisaties, een langere voor de grove gridcellen (100 en 40 m) en een kortere (meer vergelijkbaar met de werkelijkheid) voor de fijnere gridcellen (10 en 20 m). Ook zijn er verschillen tussen de hoogtes van de 2D-cellen waar de 1D2D-koppelingen naar koppelen. Dit is erg bepalend voor de stroming door de onderdoorgang (zie technisch achtergrondrapport).

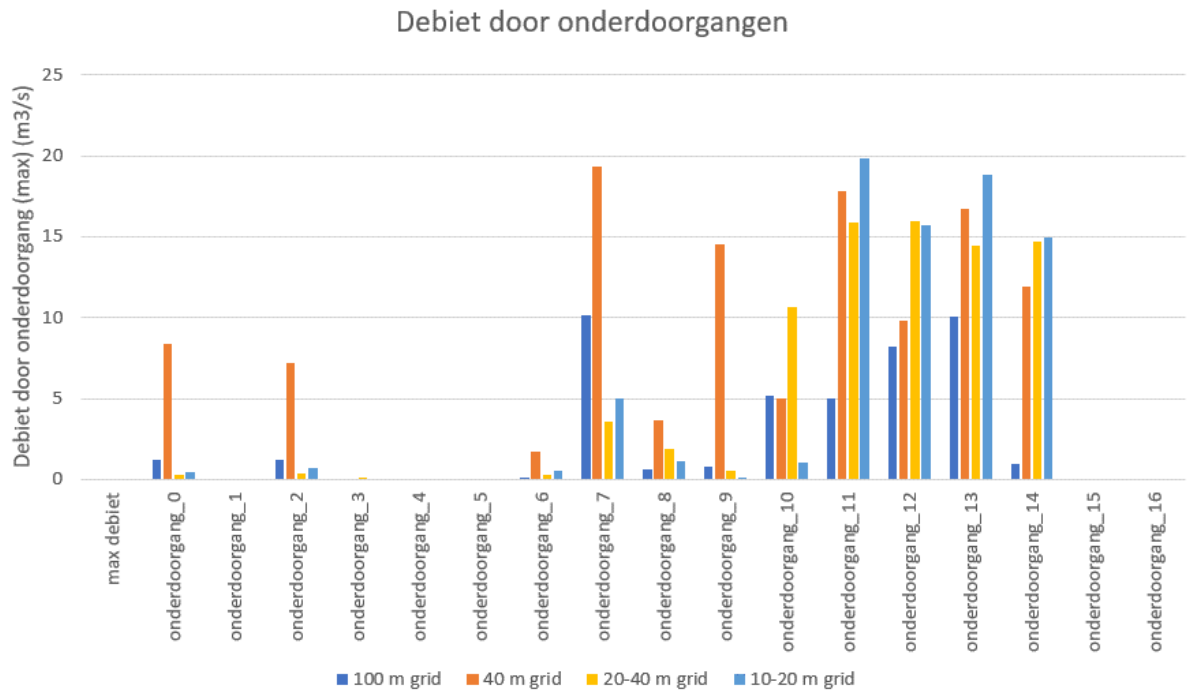


Fig. 36 Debiet door onderdoorgangen (maximaal) bij verschillende gridcelgroottes. De nummering van onderdoorgangen is weergegeven in Fig. 37.

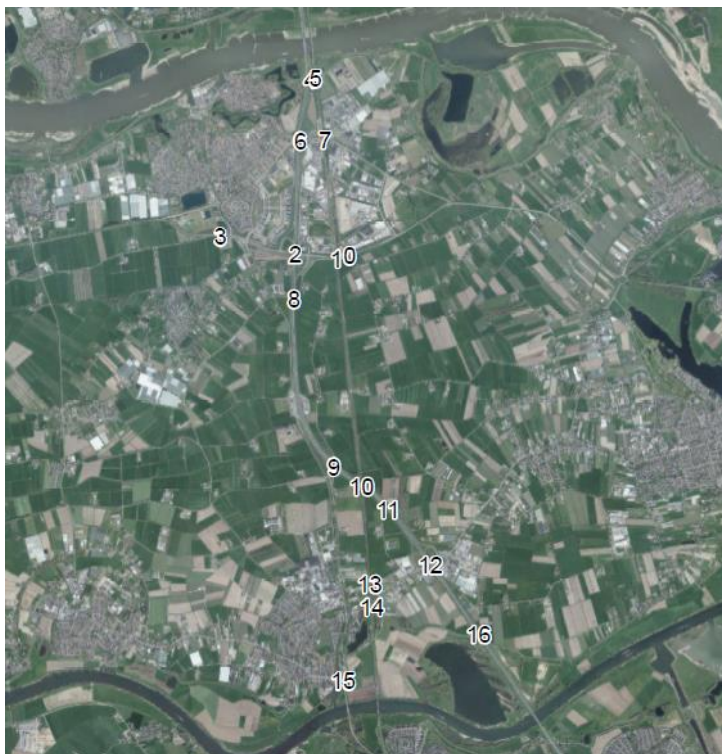


Fig. 37 Overzicht locaties onderdoorgangen met nummering.

In Fig. 38 zijn de verschillen in waterdiepte weergegeven. De waterdiepte aan de oostkant is groter in het 100 m grid, omdat het water er langer over doet om naar de westkant te stromen. In het model met het 10-20 m grid, stroomt meer water door de onderdoorgangen waardoor de waterdiepte achter de snelweg en de spoorlijn kleiner is, en de inundatie zich

in het westen van het gebied meer heeft verspreid en grotere verschillen in de inundatiediepte ontstaan.

De grootste verschillen zijn ontstaan door de verschillen in stroming door de onderdoorgangen. De verwachting is dat als de schematisatie van de onderdoorgangen ten opzichte van de hoogte in het grid meer overeen komt, de verschillen kleiner zullen zijn.

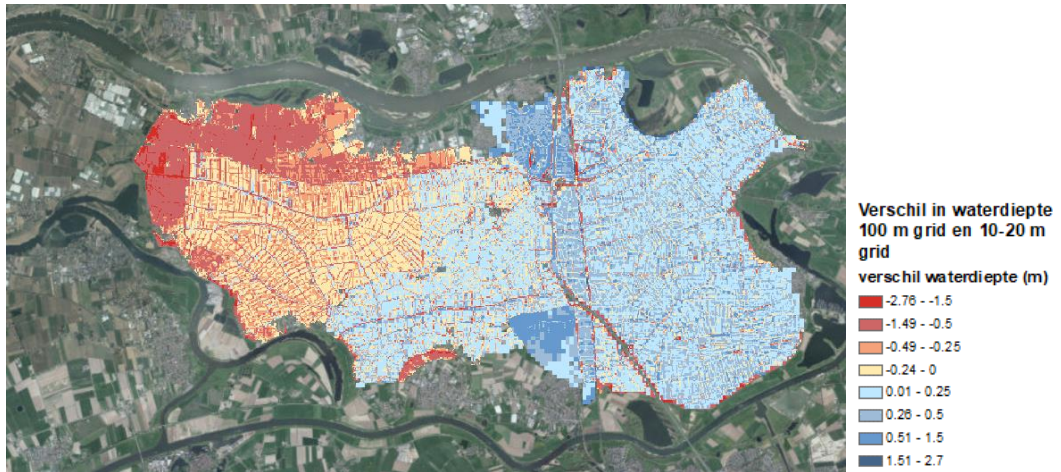


Fig. 38 Verschil in waterdiepte tussen 100 m grid en 10-20 m grid. Aan de oostkant is de inundatie dieper bij het 100 m grid, in delen van Zaltbommel en Hedel is dit dieper omdat er bij het 10-20 m grid geen inundatie is. Aan de westkant is de inundatie dieper bij het 10-20 m grid, en zijn er delen die bij het 100 m grid niet inunderen. De meeste verschillen blijven binnen de 25 cm.

Aankomsttijd

In Fig. 39 en Fig. 40 zijn de aankomsttijden van de inundatie weergegeven voor de 10-20 m en 100 m gridresoluties. De eerste 10 uur zijn de aankomsttijden vergelijkbaar, daarna ontstaan verschillen die hun oorzaak hebben in de verschillende onderdoorgangen. In het 10-20 m grid stroomt het water door de onderdoorgangen eerder richting het westen, waarna het zich verder in het gebied verspreid.

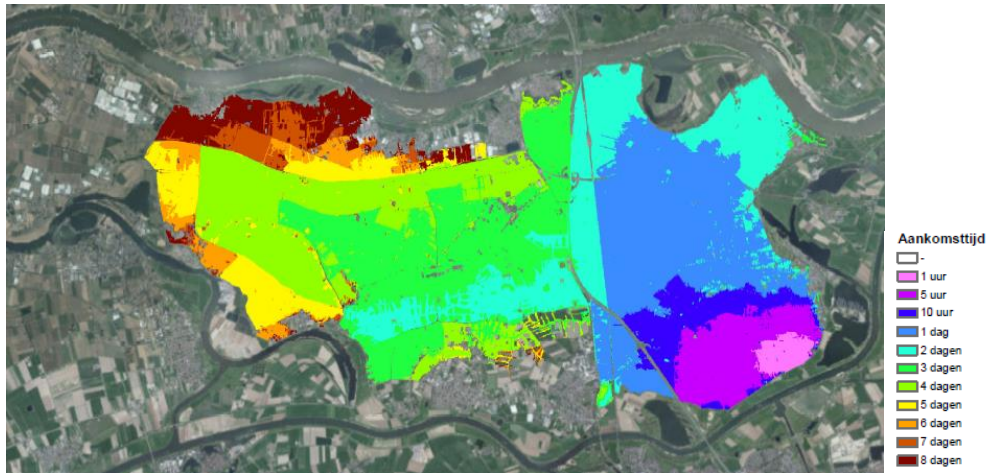


Fig. 39 Aankomsttijden 10-20 m grid

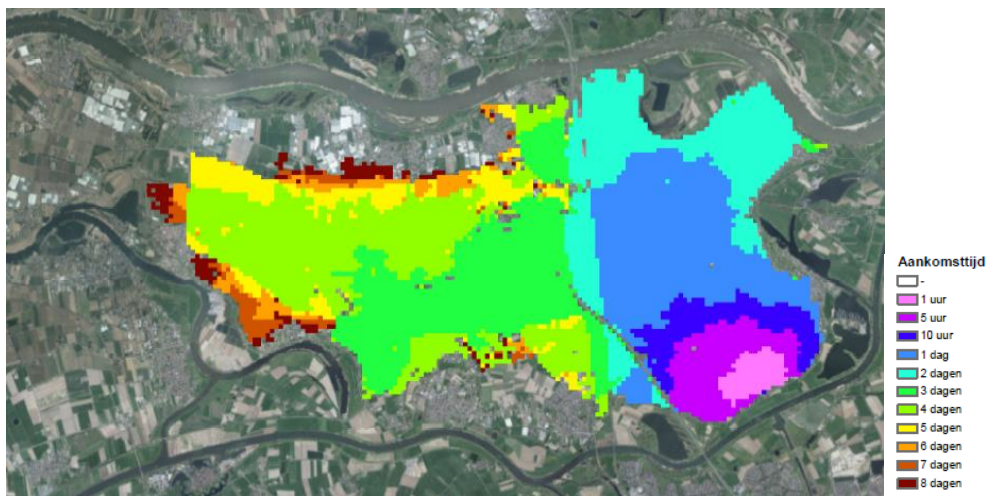


Fig. 40 Aankomsttijden 100 m grid.

In Fig. 41 zijn de verschillen weergegeven in aankomsttijden van het 100 m grid in vergelijking met het 10-20 m grid. Hierin is te zien dat de verspreiding van het water in het 10-20 m grid sneller is dan in het 100 m grid (waarin het water over het algemeen iets later aankomt dan in het 10-20 m grid). Op dit moment zijn de resultaten nog wel heel afhankelijk van bijvoorbeeld de schematisatie van onderdoorgangen, en komen niet alle verschillen alleen door de verschillende gridcelgrootte. Wanneer de onderdoorgangen in beide modellen met de juiste 1D2D-koppeling meegenomen zijn, kan een verschilkaart als dit meer inzicht bieden in de verschillen tussen grof en fijn rekenen.

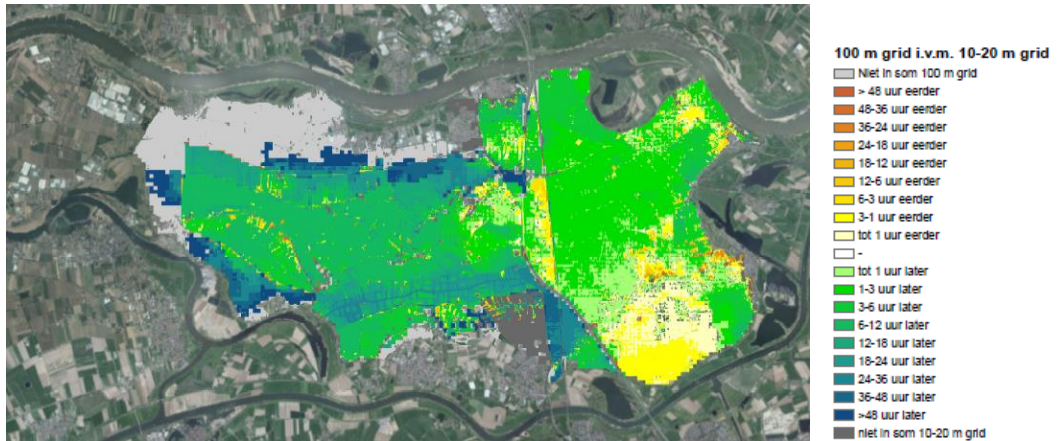


Fig. 41 Verschil aankomsttijden 100 m grid ten opzichte van 10-20 m grid.

Schade en slachtoffers

Bovenstaande verschillen in waterdieptes, stroomsnelheden en omvang van de inundatie zorgen voor verschillen in schade en slachtoffers zoals weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Resultaten schade en slachtoffers verschillende grids.

	Totale schade	Totaal slachtoffers (zonder evacuatie)	Totaal getroffen
100 m grid	€ 2.027.532.787	39	21.608
40 m grid	€ 2.058.408.382	38	22.951
20-40 m grid	€ 1.680.531.052	23	16.249
10-20 m grid	€ 1.844.111.717	24	20.771

Wanneer wordt gekeken naar de ruimtelijke verspreiding van de totaalschade is te zien dat de meeste schade optreedt in het stedelijk gebied, op wegen en bij industrie.

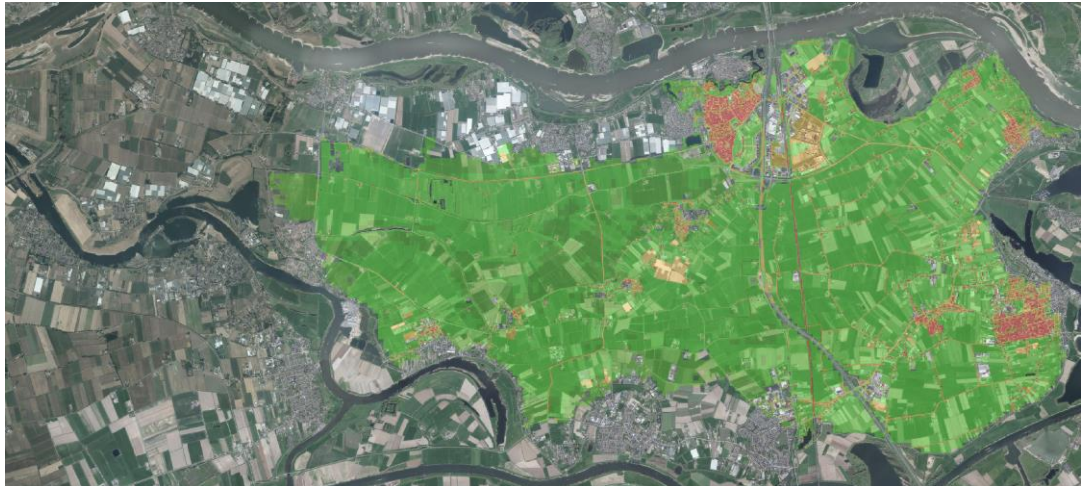


Fig. 42 Totaalschade 100 m grid

In Fig. 43 is ruimtelijk weergegeven waar de verschillen in totaalschade optreden. De grootste verschillen worden veroorzaakt door het al dan niet inunderen van hoogwaardig landgebruik (stedelijk gebied, kassen, etc). Een deel van het verschil in schade tussen het 100 m grid en het 10-20 m grid wordt veroorzaakt doordat in het 100 m grid model een groter areaal in het stedelijke gebied van Zaltbommel inundeert. Maar de inundatiediepte

in het stedelijk gebied is ook groter bij de som met het 100 m grid. Aan de (noord)westkant van het gebied is er meer schade in het 10-20 m grid, omdat daar een aantal kassen inunde- ren. De verschillen in inundatie van deze kostbare gebieden lijken vooral te maken hebben met de verschillen in stroming door de onderdoorgangen.

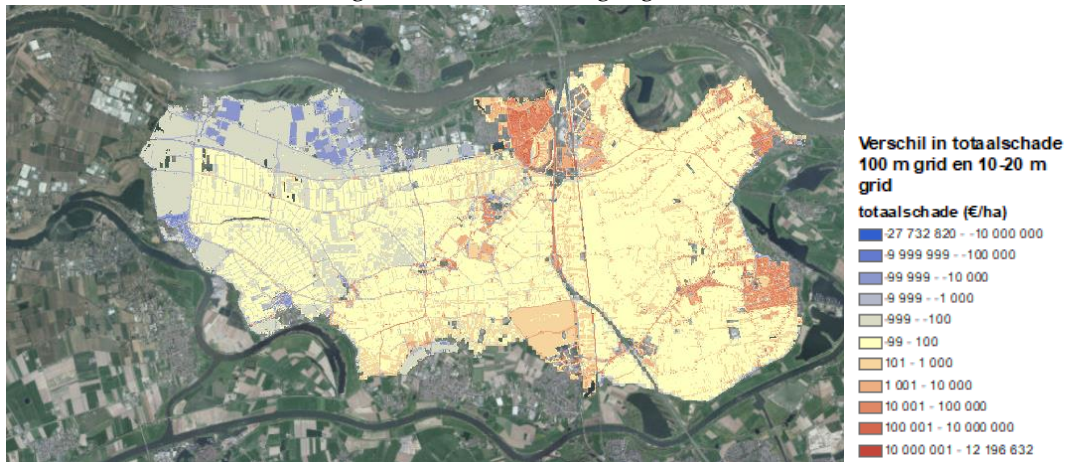


Fig. 43 Verschil in totaalschade 100 m grid en 10-20 m grid. Bij oranje-rood is er meer schade in het 100 m grid, in groen-blauw is er meer schade in het 10-20 m grid.

3.6.2 Rekentijd

De keuze voor de gridcelgrootte hangt mede af van de gewenste of vereiste rekentijd. Voor een calamiteitenmodel is bijvoorbeeld een snel rekenend model gewenst.

De reketijden van verschillende modellen zijn geanalyseerd om een beeld te krijgen van de reketijden van het overstromingsmodel en de belangrijke factoren hierin om een advies te kunnen geven over de modelkeuzes.

De rekentijd is afhankelijk van drie aspecten:

- Het aantal cellen in het model (dit is van invloed op het geheugen van de rekencomputer dat in iedere stap wordt gebruikt).
- De simulatieperiode (hoe lang er wordt doorgerekend bijvoorbeeld 1 dag of 10 dagen).
- De tijdstap waarmee gerekend wordt. Een maximale tijdstap wordt opgegeven bij het model, maar als er cellen zijn met grote stroomsnelheden op een kleine flowlink verkleint D-Hydro de tijdstap. Onder andere de gridcelgrootte, de hoogteverschillen in het model en de ruwheid zijn bepalend voor de mate waarin D-Hydro de tijdstap al dan niet moet verkleinen.

Daarnaast zijn de gebruikte rekencores bepalend voor de rekensnelheid. Het aantal cores speelt vooral een rol bij het paralleliseren van sommen.

Binnen het overstromingsmodel zijn o.a. de volgende aspecten bepalend voor rekentijd:

- De grootte van de kleinste gridcel in het model. De kleinste gridcelresolutie waarmee is gerekend in de pilot Bommelerwaard bedraagt 5 m. Deze gridcellen zorgden voor tijdstapverkleining. Vooral de cellen dicht bij de bres en bij onderdoorgangen, waar hoge stroomsnelheden voorkomen, spelen hierin een rol. Bij het gebruik van een kleinere gridresolutie zijn bovendien meer cellen in het model aanwezig waarmee wordt gerekend, waardoor ook de rekentijd toeneemt.
- Tijdsperiode van de simulatie. Voor een overstroming is het nodig om een aantal dagen door te rekenen, omdat de hoogwatergolf op de rivier enkele dagen aanhoudt. Als

de rivier ook in het model zit en in de simulatie wordt meegenomen, is bovendien rekentijd benodigd voor het inrekenen van de rivierstroming en -waterstanden. Daarnaast is het nodig de simulatie na de hoogwatergolf nog iets langer te laten rekenen, om te zorgen dat de inundatie in het gebied een evenwicht bereikt. Hierbij kan er echter wel op andere plekken (bijvoorbeeld bij de bres) droogval voorkomen, omdat het water terug stroomt de rivier in. Hier neemt de tijdstapgrootte af en de rekentijd toe. Ter illustratie van relatieve verschillen van rekentijden (voor een model zonder riviergrid, en 10 dagen simulatietijd):

- Het model met 100 x 100 m rekencellen zonder riviergrid rekt bijna 10 dagen uit in 6 minuten.
- Met een 20-40 m grid, zonder riviergrid, komt de rekentijd uit op 9 uur.
- Met een 10-20 m grid, zonder riviergrid, komt de rekentijd uit op 78 uur.
- Met een 5-10 m grid komt de rekentijd uit op 13 dagen, waarbij vooral de droogval op het eind voor een flinke vertraging zorgde. Deze vertraging zou met veranderingen aan de parameter minimale flooding threshold wellicht kunnen verminderen.

Een overzicht van alle rekentijden staan weergegeven in Bijlage C.

In de gebruikte grids is naar verwachting nog wel enige optimalisatie mogelijk, bijvoorbeeld in de grootte en ligging van de cellen bij de bres en bij onderdoorgangen, waar hoge stroomsnelheden voorkomen. Daarnaast kunnen berekeningen geparalleliseerd worden, dit is nog niet getest in deze pilot. Parallellisatie in D-Hydro is typisch 60-80% efficiënt; het betekent bijvoorbeeld dat er over 32 cores twintig keer zo snel gerekend kan worden. Het is nu nog niet mogelijk om 1D te paralleliseren (Ref. 2).

3.7 Gridverfijning (9)

In het 2D-grid kan gekozen worden voor een uniform grid waarbij alle cellen even groot zijn, of voor een grid waar lokaal gridverfijning is toegepast. Verfijning is een manier om het grid grof te maken op locaties waar dat kan (gebieden met weinig variatie in hoogte en of landgebruik), en fijner op locaties waar dat nodig is, omdat daar belangrijke bepalende elementen zijn gelegen (zoals onderdoorgangen, hoge lijnelementen, watergangen, bebouwd gebied etc.). Het voordeel hiervan is dat de rekentijd kan worden verkleind met behoud van de betrouwbaarheid van de resultaten.

In de pilot is gekeken naar de verschillen tussen resultaten van grids met en zonder verfijning.

Met een raster waarin de verschillende zones van verfijning zijn aangegeven, is het eenvoudig om dit grid op te bouwen (zie technisch achtergronddocument).

In de modellen is verfijnd bij hoge lijnelementen, onderdoorgangen en A-Watergangen. Dit zijn bepalende elementen in de overstromingssimulaties, en door hier het grid te verfijnen kunnen meer details uit het hoogtemodel en de bodemruwheden worden meegenomen.

De stroomsnelheidspatronen zijn bij een grid met verfijning vergelijkbaar met een grid zonder verfijning (zie Fig. 44 en Fig. 45). Wanneer echter in detail wordt gekeken naar de resultaten (Fig. 46), zijn er wel verschillen te zien, en is te zien dat door te verfijnen bij de

hoge lijnelementen, onderdoorgangen en A-watergangen juist de locaties met hoge stroomsnelheden gedetailleerder te zien zijn.

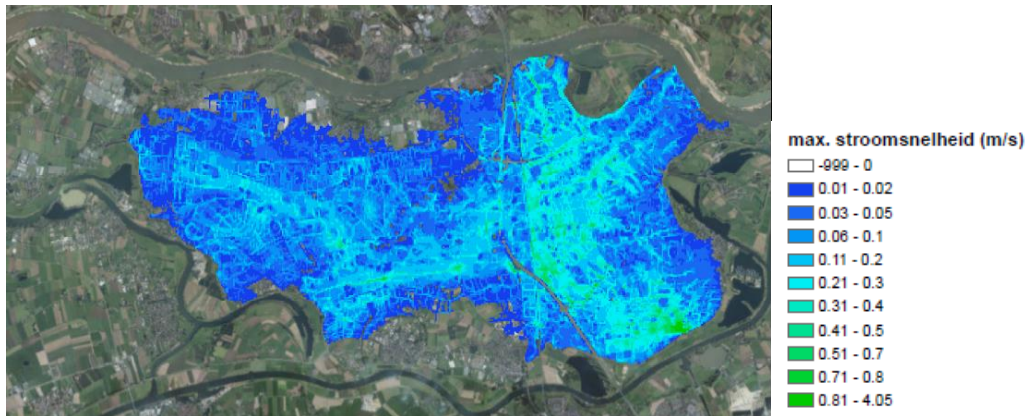


Fig. 44 Maximale stroomsnelheid bij 40 m grid zonder verfijning.

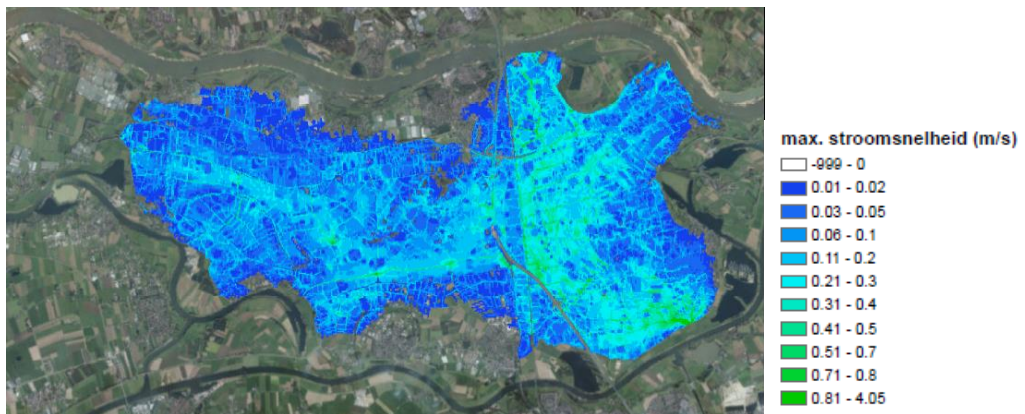


Fig. 45 Maximale stroomsnelheid bij 20-40 m grid met verfijning bij hoge lijnelementen, onderdoorgangen en A-watergangen.

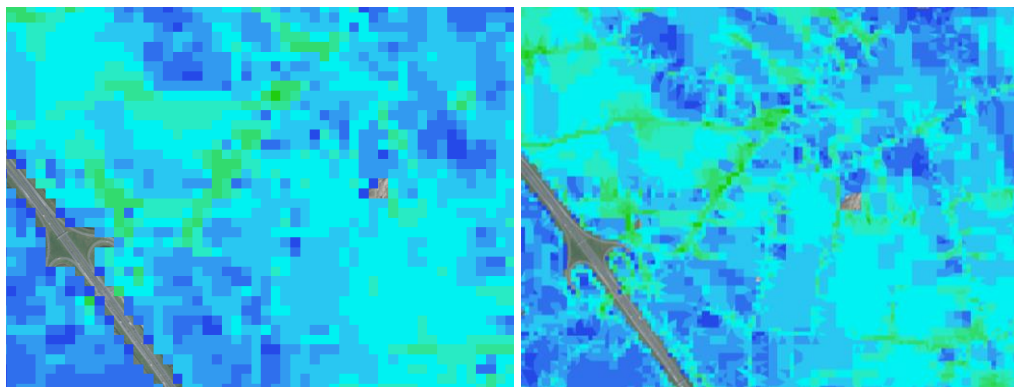


Fig. 46 Detail maximale stroomsnelheid, links zonder verfijning en rechts met verfijning.

In de aankomsttijden en het geïnundeerd areaal zijn een aantal verschillen te zien (Fig. 47 t/m Fig. 50). Het geïnundeerd gebied verschilt vooral aan de westkant van de snelweg, dit heeft ook te maken met het debiet door de onderdoorgangen (Fig. 51). Er zijn weinig verschillen tussen maximale waterdieptes. Het 20-40 m grid inundeert sneller, terwijl er minder water door de onderdoorgangen gaat over het algemeen. Er is snellere stroming mogelijk door verfijning bij wegen en watergangen.

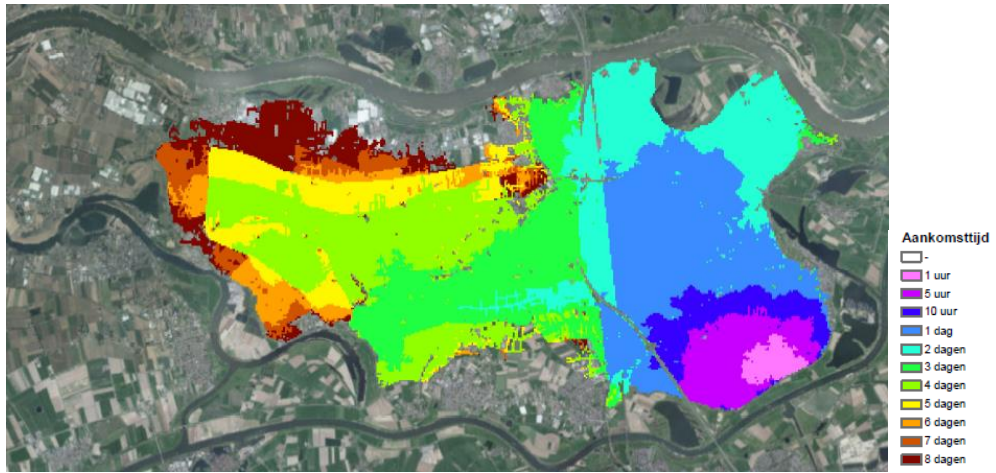


Fig. 47 Aankomsttijden bij 40 m grid zonder verfijning

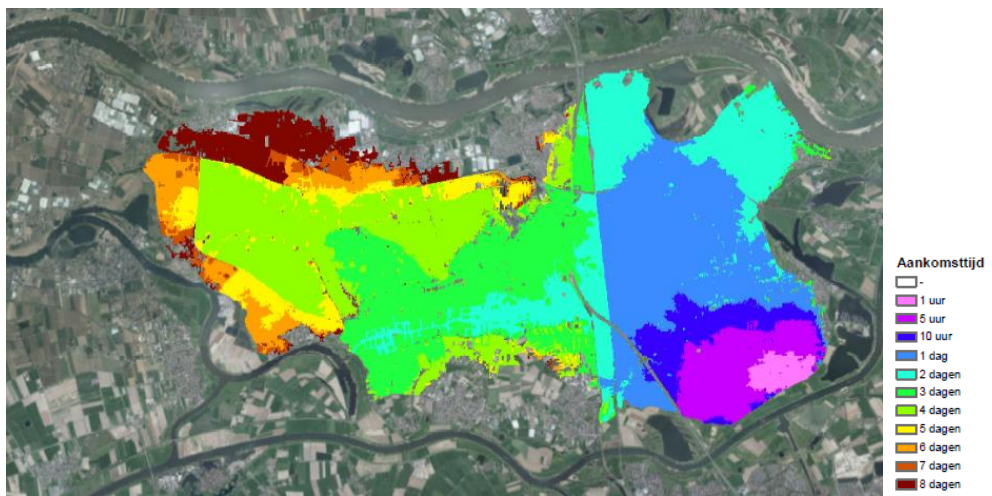


Fig. 48 Aankomsttijden bij 20-40 m grid met verfijning bij hoge lijnelementen, onderdoorgangen en A-watgangen.

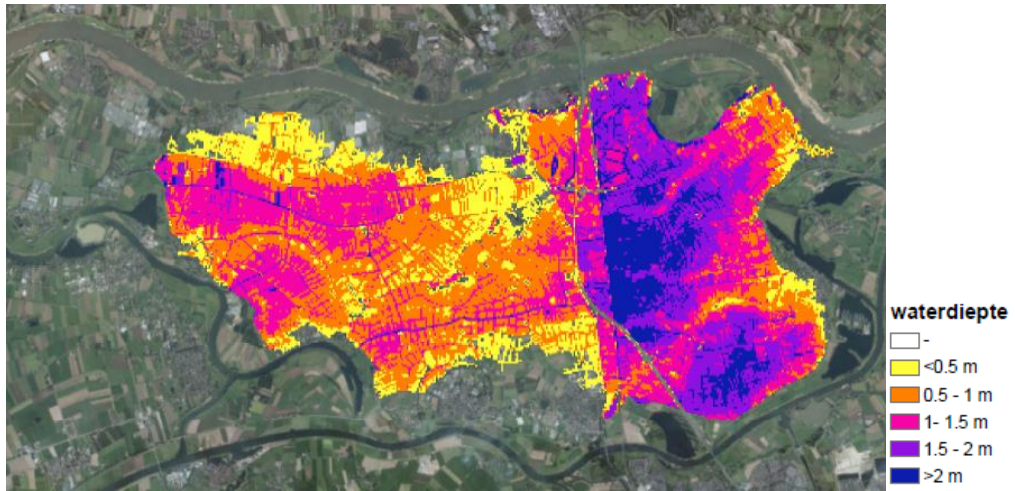


Fig. 49 Waterdieptes bij 40 m grid zonder verfijning.

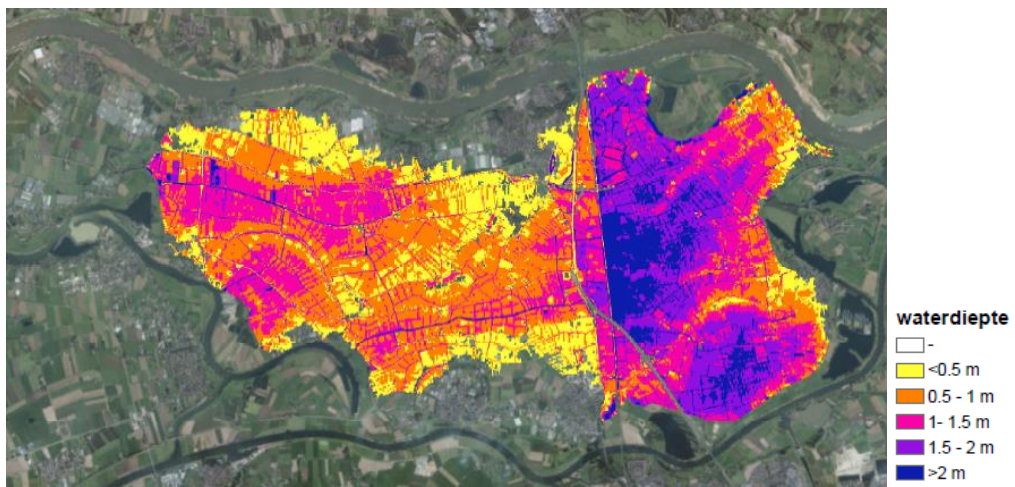


Fig. 50 Waterdieptes bij 20-40 m grid met verfijning bij hoge lijnelementen, onderdoorgangen en A-watertgangen.

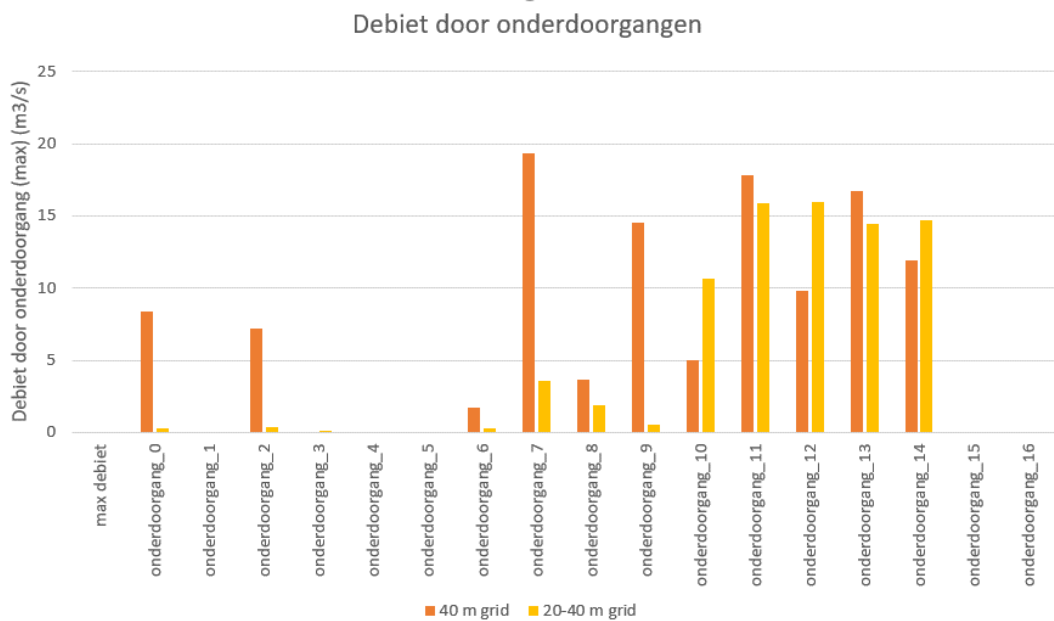


Fig. 51 Debiet door onderdoorgangen bij 40 m grid zonder verfijning en 20-40 m grid met verfijning bij hoge lijnelementen, onderdoorgangen en A-watertgangen.

Er wordt aanbevolen om ook bij de bres (tot orde grootte 1 km ervandaan) te verfijnen. Bij de bres is orthogonaliteit erg belangrijk, door de hoge stroomsnelheden die hier optreden. Met verfijning met driehoeken tussen grovere en fijnere cellen, kunnen driehoeken in een verkeerde hoek ten opzichte van de stromingsrichting liggen waardoor de rekenstap door D-Hydro wordt verkleind. De gridcelgrootte van de kleinste cel is afhankelijk van het gewenste detailniveau en de beoogde rekentijd.

3.8 Gridsoort (10)

Ook wat betreft de gridsoort kan een keuze gemaakt worden. Met een cartesisch grid (vierkante gridcellen) worden verschillende formaten vierkante cellen aan elkaar gekoppeld met driehoekige cellen. Deze wijze van gridopbouw wordt veelvuldig gebruikt binnen de overstromingsmodellering en is ook binnen het voorliggende TKI project gebruikt.

Andere mogelijkheden voor gridopbouw in D-Hydro zijn de vervaardiging van een curvilineair grid of een grid dat uitsluitend uit driehoeken bestaat.

Een curvilineair grid wordt veel gebruikt voor het modelleren van rivieren omdat de gridcellen precies in de stromingsrichting gelegd kunnen worden. Omdat bij een overstromingsmodel de stroming niet in één richting is, maar het water zich in allerlei richtingen door het gebied verspreidt, is dit soort grid niet toepasbaar. Een curvilineair grid is geschikt als je van tevoren weet in welke richting het water gaat stromen. Bij een overstromingsmodel is dit vooraf onbekend, en hangt het bovendien sterk af van de precieze breslocatie, waardoor dit type grid niet geschikt is voor overstromingsmodellering.

Een driehoekig grid is net als een vierkant grid geschikt voor stroming vanuit alle richtingen, al kunnen vervormde driehoeken soms zorgen voor korte flowlinks die de rekentijd vergroten.

Omdat in het overstromingsmodel gebruik wordt gemaakt van verhoogde gridcelwanden (fixed weirs), is in de resultaten een kartelpatroon te zien (vooral goed zichtbaar bij grove gridcellen, zie Fig. 52). Met driehoeken is het mogelijk om deze uit te lijnen op de verhoogde lijnelementen, zodat er hier een gladdere lijn ontstaat (Fig. 53).

Bij het maken van een grid moet goed gelet worden op kleine flowlinks en orthogonaliteit van het grid, om de berekeningen vlot te laten verlopen (zie voor details het technisch achtergrondrapport).

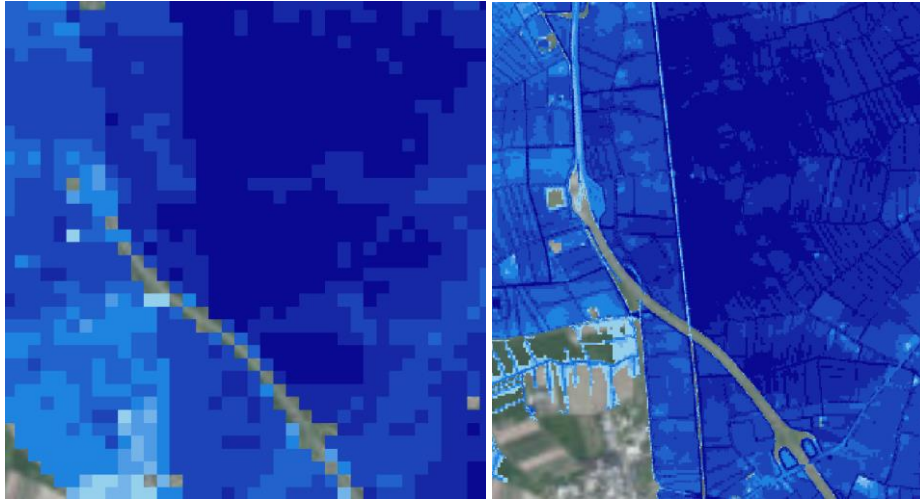


Fig. 52 Waterdieptes bij verschillende gridcelgroottes (cartesisch - links 100 m grid, rechts 10-20 m grid).

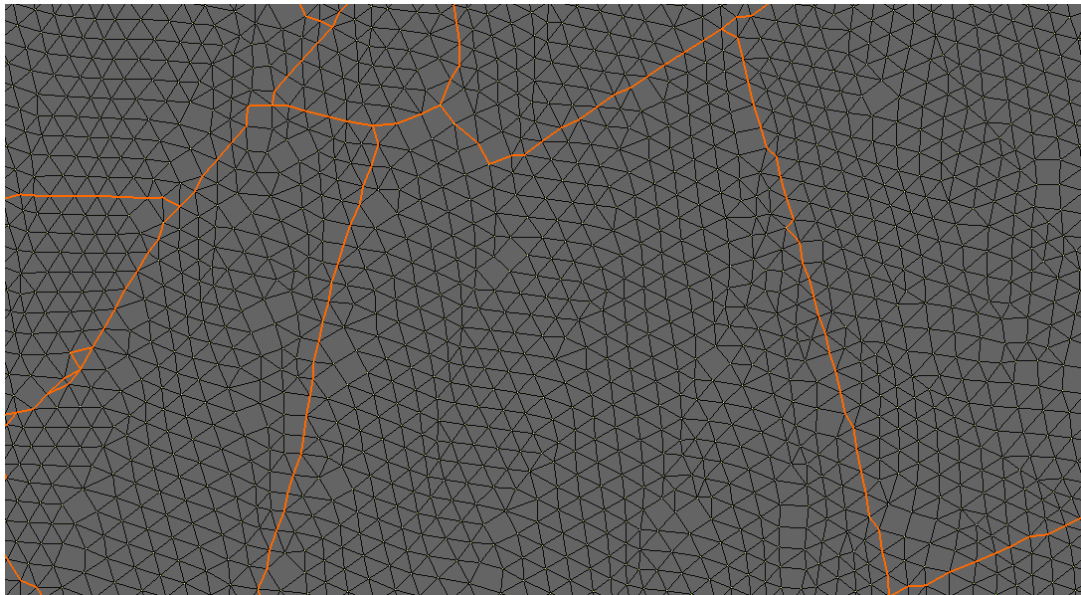


Fig. 53 Een driehoekig grid uitgelijnd op de hoge lijnelementen (oranje lijnen).

3.9 Randvoorwaarden (11)

Om een realistische overstromingsberekening uit te kunnen voeren, dienen realistische randvoorwaarden aan het model te worden opgelegd. De hydraulische randvoorwaarden zijn (tezamen met de kenmerken van de bres) bepalend voor de hoeveelheid water die het gebied in kan stromen na een dijkdoorbraak.

De hydraulische randvoorwaarden kunnen op verschillende manieren worden meegenomen in het model. Binnen de pilot Bommelerwaard is gebruik gemaakt van twee verschillende soorten:

- De rivier in 2D-schematisatie (model van Rijkswaterstaat) met aan de bovenrand een afvoergolf, en aan de benedenrand een Q-h-relatie. De bres wordt op de piek van de afvoergolf gesimuleerd. In Fig. 54 is een voorbeeld weergegeven van een gekoppeld rivier- en gebiedsgrid.

- Alleen een schematisatie van het gebied (de Bommelerwaard) en op een rand een vooraf opgelegd verloop van het bresdebiet.



Fig. 54 Voorbeeld van gekoppeld riviergrid (curvilineair) met een cartesisch grid van het gebied. De bres wordt gesimuleerd op het gekoppelde gedeelte.

Indien buitenwaterstanden ook onder invloed staan van wind en zeewaterstanden, moet het resulterende waterstandsverloop worden meegenomen als randvoorwaarde. Er zijn dan meerdere scenario's mogelijk met het samenvallen van hoge afvoer op de rivier, en een benedenwaterstandsopzet door storm en zee (zie ook leidraad overstromingsmodellering, Ref. 1).

Het is belangrijk om de randvoorwaarden tijdsafhankelijk op te nemen, omdat niet alleen de afvoer- en waterstandspiek van belang zijn, maar ook het waterstands- en afvoerverloop.

In

Tabel 4 staat voor verschillende aspecten weergegeven wat de consequenties zijn van modellen waarbij het riviergrid meegesimuleerd wordt, en modellen die alleen bestaan uit het gebiedsgrid.

Tabel 4 Verschillen tussen een som waarbij riviergrid is mee gemodelleerd en een som waarbij alleen het gebied is gemodelleerd.

Riviergrid en gebiedsgrid	Alleen gebiedsgrid
Randvoorwaarden op rivier	Randvoorwaarde op het gebiedsgrid
Debiet door bres wordt bepaald door het waterstands- en afvoerverloop in de rivier. Verminderd debiet door daling van rivierwaterstand door bres wordt meegenomen (zie Fig. 55).	Debiet door bres moet vooraf worden afgeleid (bv. op basis van andere sommen of een 1D model).
Riviergrid RWS benodigd, waarna de grids handmatig worden gekoppeld	Alleen een gebiedsgrid benodigd dat grotendeels automatisch wordt gegenereerd.
Bres kan alleen gesimuleerd worden op locatie waar grids zijn gekoppeld	Bresdebiet kan overal op het gebied gezet worden.
Grotere rekentijd door groter grid en inrekenperiode benodigd	Kortere rekentijd door kleiner grid en geen inrekenperiode benodigd.

Het meesimuleren van het riviergrid met afvoergolf en Q-h-relatie zorgt ervoor dat het effect van waterstands daling op de rivier doordat er een bres is ontstaan wordt meegenomen en mede het bresdebiet bepaalt (zie Fig. 55). Met het simuleren van het riviergrid is het nodig om het model een tijdje te laten inrekenen, om de juiste waterstanden en stroming in de rivier te krijgen, voordat de bres plaatsvindt.

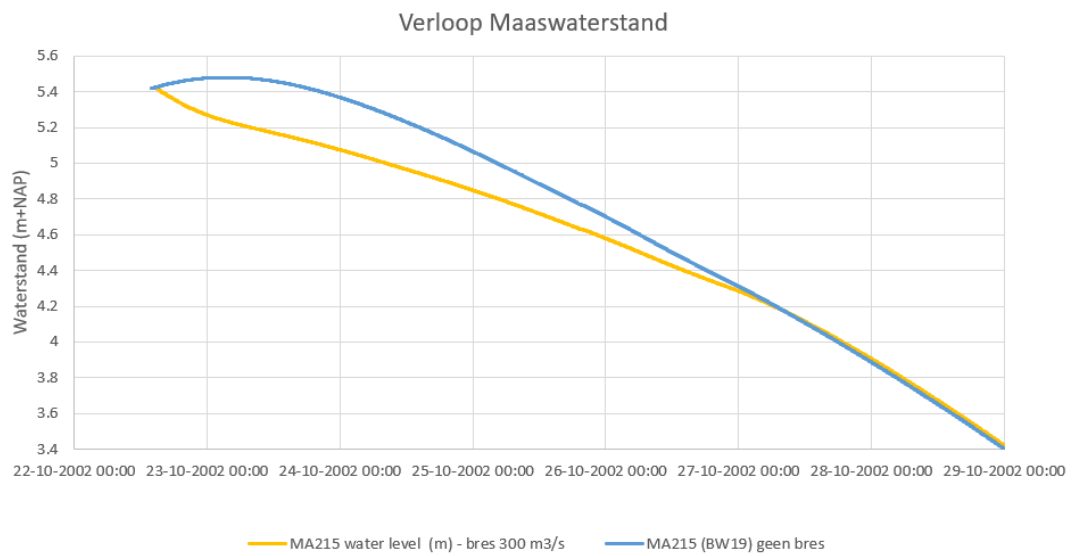


Fig. 55 Verloop waterstand op de Maas nabij de breslocatie. Wanneer er een bres is, daalt de waterstand op de rivier, ten opzichte van de situatie wanneer er geen bres zou zijn.

3.10 Bresgroei (12)

De kenmerken van de bres en de bresgroei zijn bepalend voor de hoeveelheid water die het gebied instroomt. Simulatie van de bresgroei is mogelijk wanneer het buitenwater (de rivier) wordt meegenomen in de schematisatie.

Er zijn een aantal variabelen die de bresbreedte en het bresdebiet bepalen. Deze zijn in de volgende paragrafen toegelicht. Er is bij deze gevoeligheidsberekeningen alleen gekeken

naar resulterende bresbreedte en bresdebiet, en niet naar de gevolgen hiervan in het gebied.

- de locatie van de bres;
- de waterstanden boven- en benedenstrooms van de bres;
- het tijdstip van de bres ten opzichte van het verloop van de buitenwaterstand;
- de keuze van parameters in de bresgroeiformule voor zand of klei;
- de gridcelgrootte in het gebied.

Er is gebruik gemaakt van de bresgroeifunctie van Verheij-van Der Knaap. Deze formule staat beschreven in het technisch achtergrondrapport. In de formule is de bresgroei afhankelijk van het waterstandsverschil over de bres. Tevens wordt er een kritische stroomsnelheid opgegeven (afhankelijk van de grondsoort). Wanneer de stroomsnelheid hieronder komt, stopt de bresgroei.

Tijdens de pilot is ook gebruik gemaakt van de bresbreedte zoals deze in de vorige overstromingssimulatie is gebruikt (met FLS), om een vergelijking te kunnen maken met deze oude sommen.

3.10.1 Locatie

Met twee sommen is onderzocht in welke mate de locaties van de bres bepalend zijn voor de bresgroei en het debiet door de bres.

In Fig. 56 zijn de locaties voor bresgroei weergegeven. Er zijn punten opgegeven voor het begin van de bres (een punt op een kering), de bovenstroomse waterstand (op de as van de rivier) en de benedenstroomse waterstand (achter de bres).



Fig. 56 breslocaties 1 en 3, inclusief locaties van de waterstandspunten.

Hoewel de breslocatie niet veel verschilt (ca. 300 m), is er wel een verschil in de bresgroei (zie Fig. 57). Dit is te verklaren door het verschil in verval over de bres (Fig. 58). Bij locatie 1 stijgt de waterstand in het gebied veel sneller dan bij locatie 3. Daardoor is het hoogteverschil tussen boven- en benedenwaterstand kleiner, en groeit de bres minder hard. Het verschil in uiteindelijke bresbreedte bedraagt 37 m. Dit verschil in bresbreedte leidt overigens

nauwelijks tot een verschil in het debiet door de bres (Fig. 59). Dit komt omdat stromingspatronen ook nog een rol spelen bij de instroom van water door de bres, en niet alleen het waterstandsverschil (zie Fig. 60 voor de stroomsnelheden bij de bres). Ook al is het verschil in de locaties beperkt, dit kan toch gevolgen hebben voor de bresgroei en het uiteindelijke bresdebiet. Hoe dit precies uitwerkt, is op voorhand niet in te schatten. Met gevoeligheidsberekeningen is het mogelijk om een bandbreedte van de bresbreedtes en bresdebieten te bepalen opdat de meest geschikte keuze wordt gemaakt.

Er is een groot verschil tussen de bresbreedte die in deze modellen is berekend en de eerder gebruikte FLS bres (Fig. 57). Deze bresgroei is waarschijnlijk berekend op basis van een maximaal waterstandsverschil vanuit een 1D-model en is vervolgens opgelegd in de FLS som.

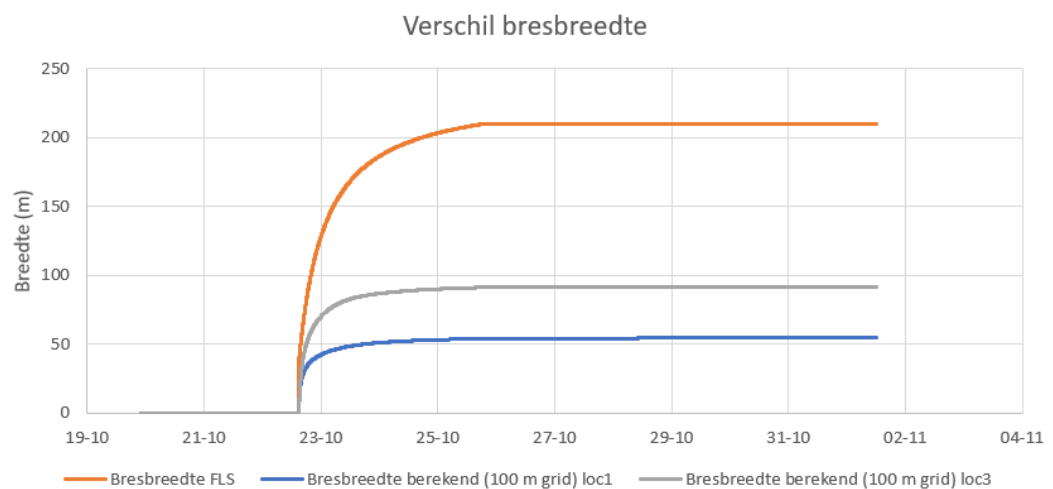


Fig. 57 Verloop bresbreedte bij verschillende locaties (berekend), samen met de bres uit de oude FLS-som.

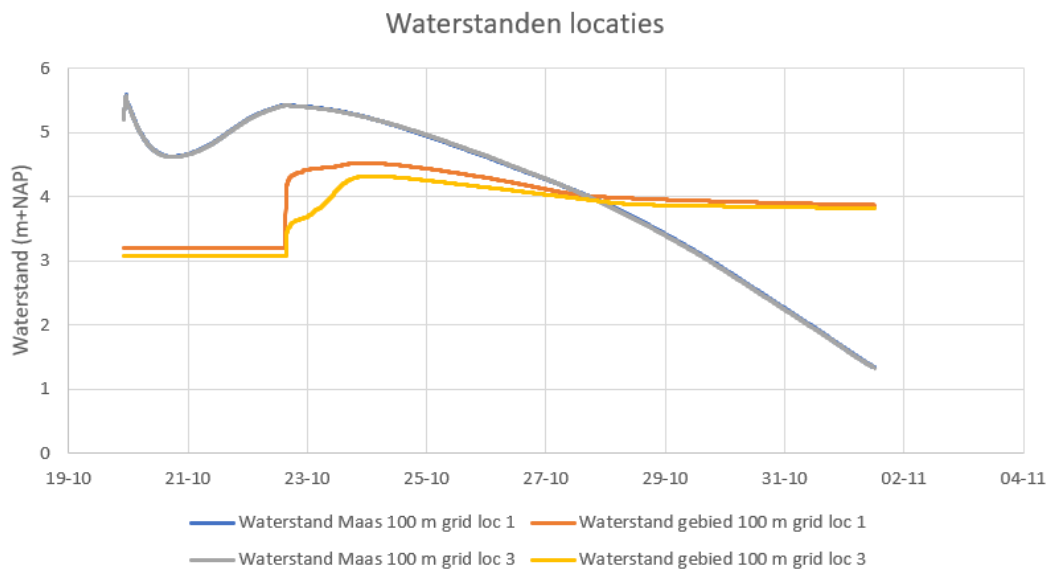


Fig. 58 Waterstanden boven- en benedenstrooms van de bres op de verschillende locaties.

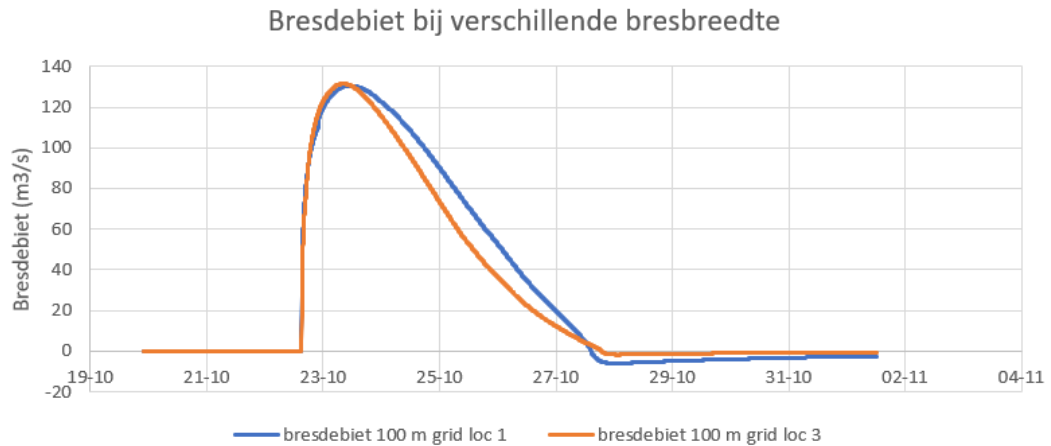


Fig. 59 Bresdebiet bij de verschillende locaties.

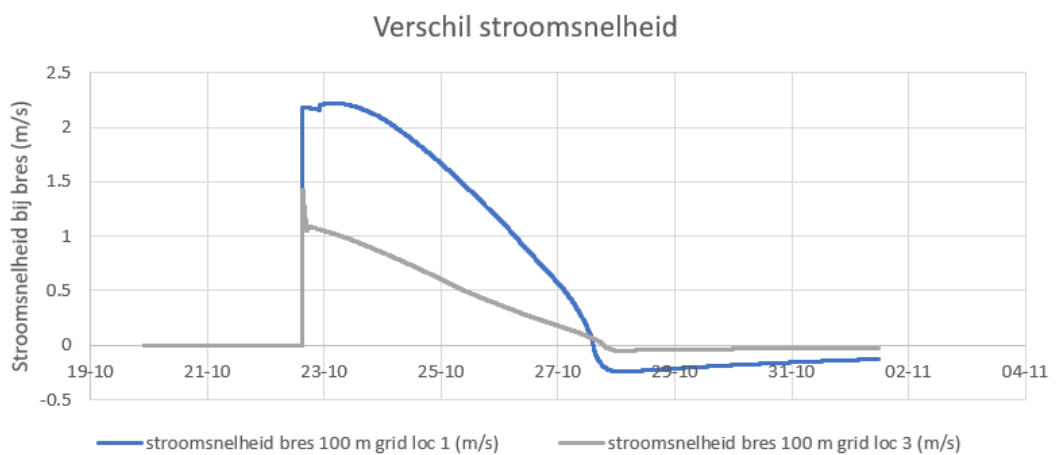


Fig. 60 Stroomsnelheden door de bres bij de verschillende locaties.

3.10.2 Waterstandspunten

De bresgroei is afhankelijk van het waterstandsverschil over de bres. Standaard worden in D-Hydro hiervoor de gemiddelde waterstanden aan beide kanten van de breslijn gebruikt (de eerste gridcel naast de breslijn). Bij kleine gridcellen zal het verschil tussen boven- en benedenstroomse waterstand kleiner zijn dan bij grote gridcellen (omdat de verschillen in waterstand tussen verschillende cellen kleiner zijn). Om het waterstandsverschil minder afhankelijk te maken van gridcelgrootte, kunnen de locaties voor waterstanden ook handmatig worden opgegeven.

Het wordt aanbevolen om zelf de punten op te geven. In de pilot zijn de locaties handmatig opgegeven en is voor de analyses telkens van dezelfde punten uitgegaan.

In Fig. 61 is te zien wat voor verschil in bresbreedte dit kan opleveren (11 m). In Fig. 62 zijn de waterstanden voor beide bresgroeberekeningen weergegeven.

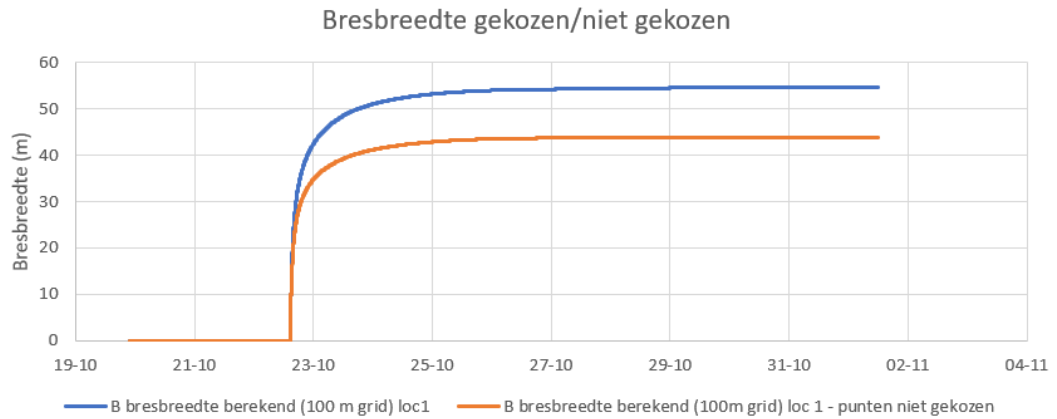


Fig. 61 Verloop bresbreedte bij bresgroeiformule met gekozen of niet gekozen waterstandspunten. Bij de bres zijn de gridcellen ca. 30 m lang.

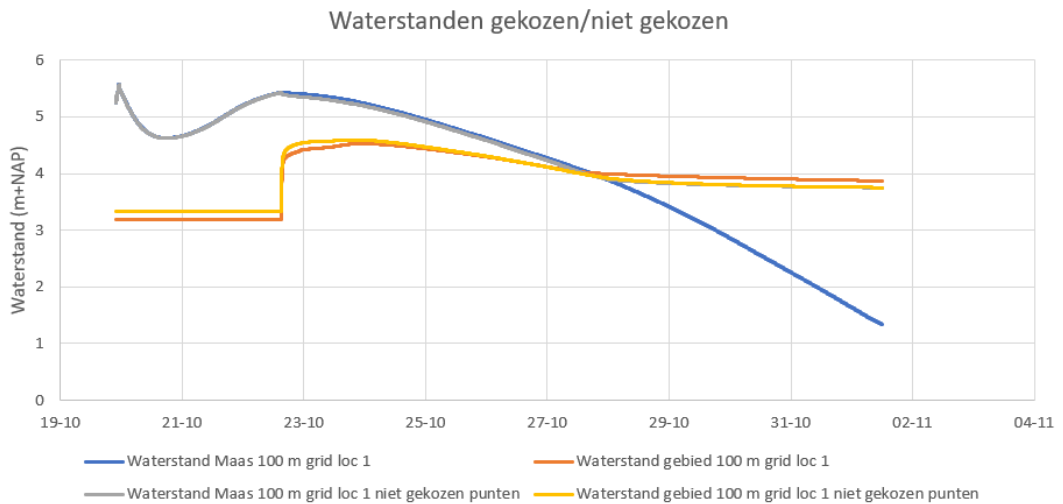


Fig. 62 Waterstanden boven- en benedenstrooms van de bres op de gekozen punten of gemiddeld langs de bres bij niet gekozen punten. Bij de bres zijn de gridcellen ca. 30 m lang.

3.10.3 Tijdstip van bres

De Leidraad Overstromingssimulaties (Ref. 1) beveelt aan de bres op de piek van de bres te simuleren, omdat hiermee de worstcase wordt berekend.

Voor de pilot zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd waarbij de start van de bres 12 uur eerder of later is gesimuleerd.

Zoals in Fig. 63 en Fig. 64 is te zien, zijn de uiteindelijke bresbreedtes hetzelfde. Het bresdebiet is lager als de bres na de piek in de afvoergolf wordt gesimuleerd.

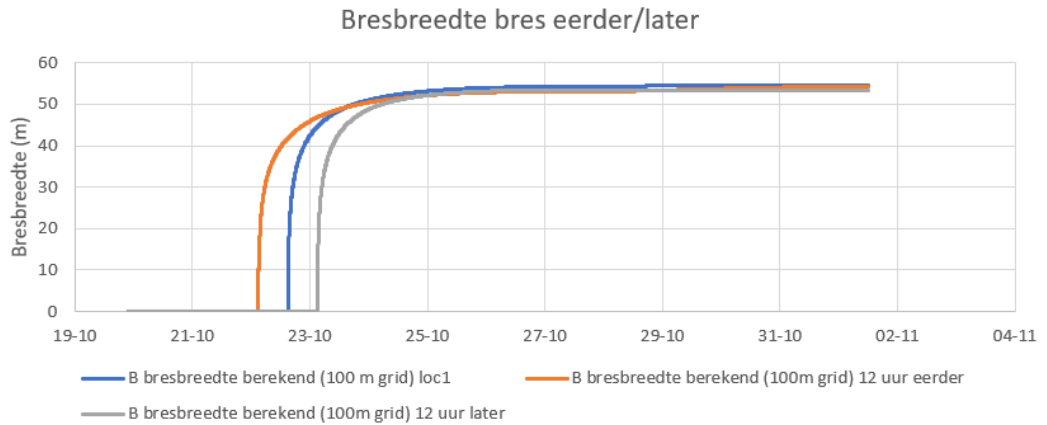


Fig. 63 Verloop bresbreedte bij verschillende brestijdstippen.

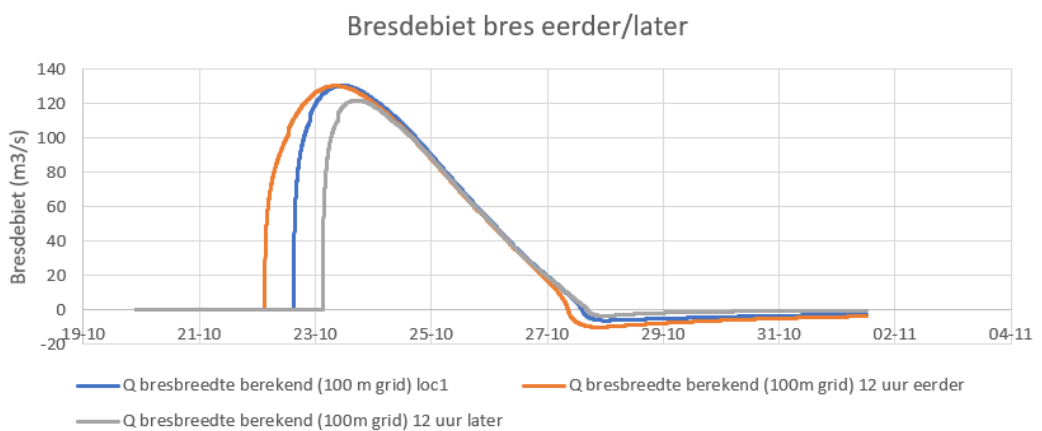


Fig. 64 Verloop bresdebiet bij verschillende brestijdstippen.

3.10.4 Zand/klei (parameters in de functie)

In de bresgroeifunctie van Verheij-Van der Knaap zitten twee constanten die afhankelijk zijn van de grondsoort van de dijk. In de analyses is uitgegaan van een zanddijk. Wanneer de parameters voor klei worden gekozen, wordt de bres kleiner (Fig. 65).

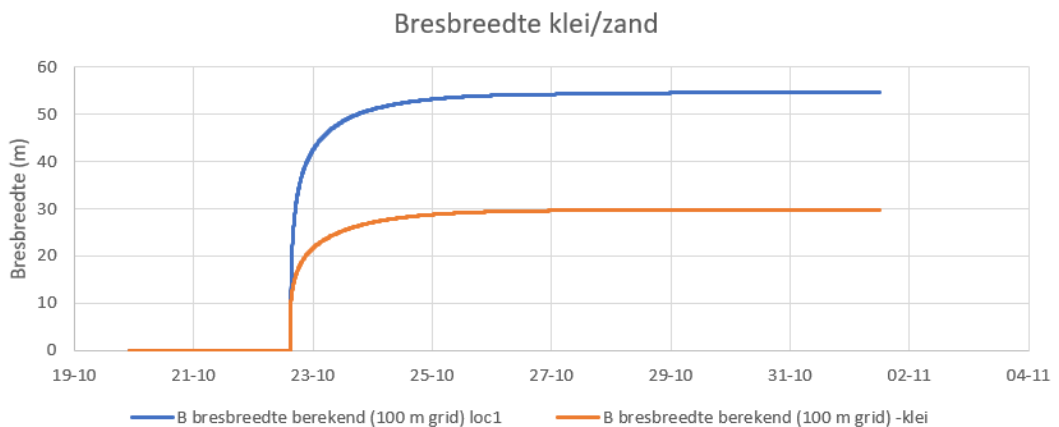


Fig. 65 Verloop bresbreedte bij parameters Verheij-Van der Knaap formule voor zand en klei.

3.10.5 Gridcelgrootte gebied

Omdat de verspreiding van het water in het gebied net iets verschilt bij de toepassing van een andere gridcelgrootte, zal de gridcelgrootte ook invloed hebben op de waterstand in het gebied en daarmee de bresgroei.

Er is gerekend met een grid van 100 m en van 40 m. In het gebied rond de bres (en ook op het punt in het gebied waarmee de bresgroei wordt berekend), is het grid voor beiden gelijk, omdat de bres plaatsvindt op het koppelstuk tussen riviergrid en gebiedsgrid (zie technisch achtergrondrapport).

Het verschil tussen de uiteindelijke bresbreedte (Fig. 66) wordt veroorzaakt door de verschillen in waterstanden (Fig. 68). Deze waterstandsverschillen komen door de algehele verschillen in stroming in het gebied. Het verschil in bresdebiet (Fig. 67) komt door verschillen in stroomsnelheid door de bres.

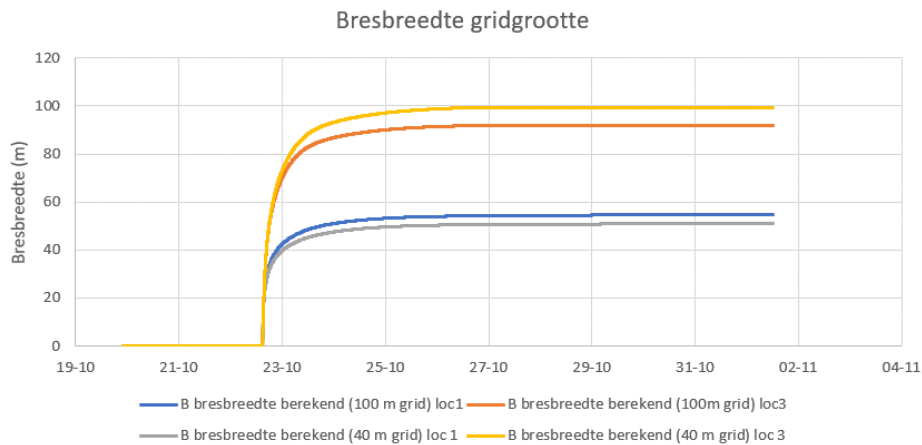


Fig. 66 Verloop bresbreedte bij verschillende gridcelgrootte en breslocatie.

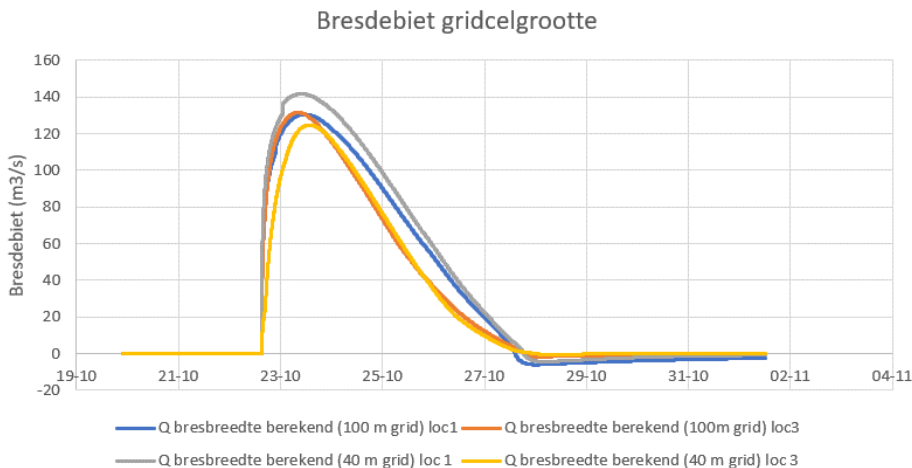


Fig. 67 Verloop bresdebiet bij verschillende gridcelgrootte en breslocatie.

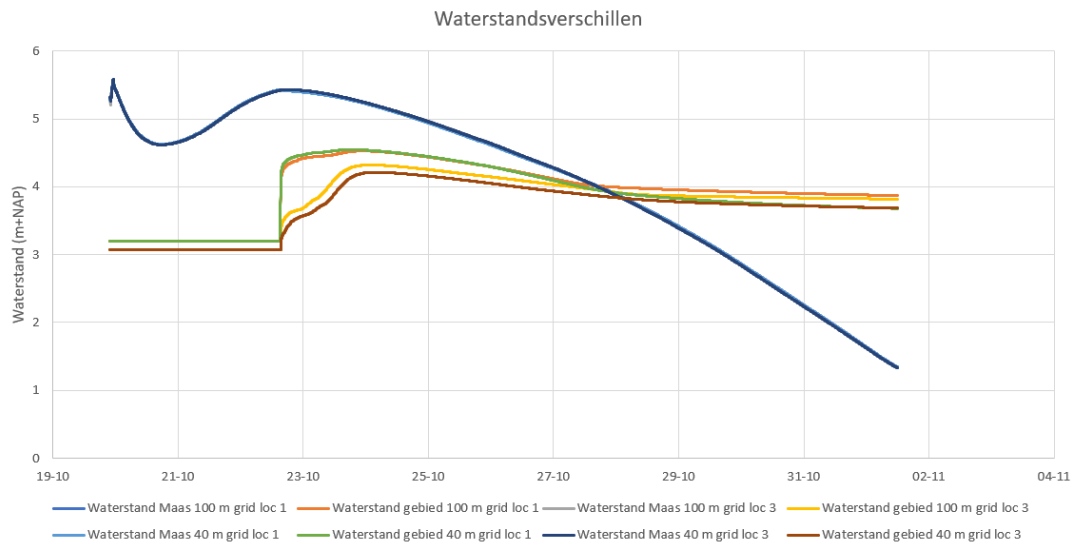


Fig. 68 Verloop waterstanden bij verschillende gridcelgrootte en breslocatie.

3.11 Resultaten (13 & 14)

Onderzocht is welke resultaten nodig zijn voor de analyses van overstromingssimulaties en op welke wijze deze ontsloten kunnen worden. Daarbij is onderzocht of het zogenaamde 'subgridsen' (het in de nabewerking verder detailleren van de resultaten) meerwaarde heeft voor de betrouwbaarheid van de analyses.

Modelresultaten

Met overstromingsmodellen worden de mogelijke gevolgen van overstromingen (in het geval van de Bommelerwaard vanuit de rivier) in beeld gebracht. De gevolgen zijn uit te drukken in waterdieptes, stroomsnelheden, overstromingsverloop en aankomsttijden die tezamen bepalend zijn voor het aantal slachtoffers en overstromingsschade.

Om schade en slachtoffers te bepalen heeft Rijkswaterstaat de Schade en Slachtoffermodule (SSM), waarin met de resultaten van een overstromingssimulatie, en schade- en slachtofferformules de resultaten per scenario kunnen worden bepaald.

Voor overstromingssimulaties zijn de volgende parameters van belang:

- Waterdiepte (in SSM gebruikt voor schadeberekening)
- Stroomsnelheid (in SSM gebruikt voor slachtofferberekening)
- Stijgsnelheid (hoe snel stijgt de waterstand van 2 cm tot 1.5 m, in SSM gebruikt voor slachtofferberekening)
- Aankomsttijd (geeft een indicatie van de evacuatiemogelijkheden, en mogelijkheden om maatregelen toe te passen).
- Het verloop van bresgroei en bresdebiët (hoeveel water komt er het gebied in).
- Het verloop van de waterstand of debieten op bepaalde punten, bijvoorbeeld achter de bres of bij onderdoorgangen.

In de Leidraad Overstromingssimulaties wordt onderscheid gemaakt tussen resultaten voor:

- Gevarenkaarten voor de ROR, met de focus op maximale waterdiepte, gekoppeld aan rivierwaterstanden met verschillende overschrijdingskansen.
- Crisismanagement met de focus op het verloop in de tijd, waarbij de simulatie moet aansluiten bij de actuele situatie
- Risico-informatie met de focus op schade en slachtoffers

Er zijn verschillende visualisatiemogelijkheden voor de resultaten van de overstromingssimulaties.

- kaarten met de maximale waarden voor waterdiepte en stroomsnelheden. Deze geven een beeld van de gehele overstroming.
- kaarten met de situatie na een bepaalde tijd (1 uur, 5 uur, 1 dag na de bres). Deze kaarten geven een beeld op een bepaalde tijdstap
- kaart met de aankomsttijden. Dit geeft een beeld van het verloop van de overstroming.
- filmpjes geven ook een indruk van het proces en het tijdsverloop van een overstroming, en kunnen in zowel 2D als 3D gemaakt worden.
- kaarten en informatie over schade en slachtoffers.

Er zijn vier outputbestanden die D-Hydro kan leveren (his-file, map-file, classmap-file en fourier-file), waaruit alle bovenstaande visualisaties kunnen worden gemaakt. Deze staan beschreven in de technische achtergrondrapportage.

Voor het nabewerken en visualiseren van de output van D-Hydro kan gebruik worden gemaakt van DFX en Crayfish voor netcdf-bestanden en met python scripts om bewerkingen te doen zoals het berekenen van de aankomsttijd en het omzetten naar rasterbestanden (zie ook technische achtergrondrapportage). Ook is het mogelijk om in de Deltashell resultaten te visualiseren.

Subgridding

Er is een mogelijkheid om subgridding te gebruiken voor de overstromingsresultaten. Dit is een techniek die waterstandsresultaten op een gridcel met grote resolutie, vertaald naar waterstanden op een kleinere resolutie, met gebruik van een gedetailleerd hoogtemodel. Op deze manier kunnen lokale hoogteverschillen, die wegvallen bij het rekenen op grote resolutie, weer teruggebracht worden in de resultaten. De verwachte toegevoegde waarde hierbij voor overstromingssimulaties is echter laag, omdat het niet de extra onzekerheden van een grof model wegneemt. De verschillen tussen een grof en een fijn grid zitten ook nog in de locaties die wel of niet inunderen, en niet in het detailniveau van subgridding.

4 Advies overstromingsmodellering

Tijdens de pilot Bommelerwaard is met D-Hydro succesvol een overstromingsmodel van de Bommelerwaard vervaardigd. Tijdens de bouw van het model zijn diverse functionaliteiten van D-Hydro getest en zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd omtrent diverse modelkeuzen. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste bevindingen en aanbevelingen per modelonderdeel samengevat.

4.1 Hoogtemodel

Het AHN vormt een goede basis voor het hoogtemodel. Geadviseerd wordt om gebouwen niet op te nemen in het hoogtemodel, maar om stroming in bebouwd gebied te simuleren door hogere bodemruwheid. Dit sluit beter aan op de manier waarop schade en slachtoffers berekend worden, het zorgt ervoor dat er grover gerekend kan worden (er hoeft dan niet per se aan de grens van 5 m resolutie worden vastgehouden) en de resultaten zijn op gebiedsniveau vergelijkbaar met wanneer de gebouwen verhoogd zouden zijn. De ruwheidsverhoging die is meegenomen voor bebouwd gebied zorgt voor de stromingspatronen en aankomsttijden die overeenkomen met de situatie wanneer gebouwen verhoogd zijn meegenomen.

Om een bres te kunnen simuleren moet de betreffende kering uit het hoogtemodel worden verwijderd. Op die locatie moet het hoogtemodel vervolgens geïnterpoleerd worden met waarden die overeenkomen met de hoogte van de uiterwaard en de hoogte achter de kering.

4.2 Hoge lijnelementen

Hoge lijnelementen (zoals keringen, wegen en spoorwegen) zijn zeer bepalend voor het overstromingspatroon en -verloop. Om deze op betrouwbare wijze in het model op te nemen, wordt aanbevolen om de hoge lijnelementen als fixed weirs in het model brengen.

Daarbij wordt aanbevolen om gridverfijning toe te passen bij de hoge lijnelementen. Door op deze locaties te verfijnen, wordt de berging rondom deze lijnelementen beter meegenomen dan wanneer er grote gridcellen worden gebruikt, want bij grote gridcellen is de hoogte van het lijnelement niet meer terug te zien in de bodemhoogte.

Bij een vierkant grid kunnen fixed weirs als een gekartelde lijn in de resultaten te zien zijn, maar dit effect wordt kleiner bij een kleinere gridcelgrootte. Eventueel kunnen de cellen uitgelijnd worden op de fixed weirs, wanneer gebruik wordt gemaakt van driehoeken.

4.3 Onderdoorgangen

Aanbevolen wordt om de onderdoorgangen zoals viaducten, tunnels en belangrijke duikers als 1D-elementen in het model op te nemen. Zodoende kan het water modelmatig onder de hoge elementen (die als fixed weirs zijn geschematiseerd) doorstromen. De 1D modellering biedt bovendien de mogelijkheid om onderdoorgangen afmetingen mee te geven die bepalend zijn voor de hydraulische capaciteit. Zo kan rekening worden gehouden met de werkelijke breedtes en hoogtes van onderdoorgangen die nogal kunnen variëren (zo is de hydraulische capaciteit van een fietstunnel beduidend kleiner dan die van een viaduct onder een snelweg).

Let wel dat bij het modelleren van onderdoorgangen moet worden gecontroleerd of de 1D2D-koppeling goed in het model wordt meegenomen:

- Controle van het 1D-element dat het hoge lijnelement goed kruist; deze mag niet in één cel liggen, maar dient tenminste twee cellen te kruisen.
- Controle van het maaiveldniveau van de 2D-cel waarmee gekoppeld wordt, dit mag niet te hoog liggen. Als er gekoppeld wordt met een 2D-cel die te hoog is, werkt de onderdoorgang pas als er water over de hooggelegen cel stroomt.

Aanbevolen wordt om ook bij onderdoorgangen gridverfijning toe te passen, wat al deels ondervangen is door de gridverfijning bij hoge lijnelementen, maar rond de instroompunten van de onderdoorgangen nog extra kan worden toegevoegd.

Met D-Hydro kunnen cross-secties geschematiseerd worden op het 1D- en of 2D-netwerk. Door cross-secties te schematiseren op de (belangrijke) onderdoorgangen, wordt waardevolle informatie verkregen over de hoeveelheid water die door onderdoorgangen stroomt, wat waardevol is voor het inzicht in de systeemwerking (welke onderdoorgangen zijn met name bepalend voor het overstromingsverloop) en daarmee mogelijke maatregelen zoals het dichtzetten van bepaalde onderdoorgangen.

4.4 Watergangen

Watergangen in het gebied zorgen voor een versnelde afvoer van het water, vooral als ze in de stromingsrichting van het overstromingsverloop liggen.

Aanbevolen wordt om de grotere watervlakken met een lagere ruwheid mee te nemen in de bodemruwheid (conform voorbeeldtabel in de Leidraad Overstromingsmodellering). Ook wordt aanbevolen om het grid te verfijnen bij watergangen om deze ruwheden en het bodemverloop nabij watergangen zo precies mogelijk mee te nemen. De bodemhoogte ter plekke van de watergang kan op waterhoogteniveau worden geïnterpoleerd. Door de gridcelgrootte zal er interpolatie plaatsvinden met de maaiveldhoogtes eromheen.

De aanbeveling is om de watergangen waarvan wordt ingeschat dat deze een belangrijke rol spelen in de afvoer van het water en daarmee voor een versnelde verspreiding door het

gebied zorgen in 1D te modelleren, waarbij informatie over profielen en kunstwerken worden meegenomen. Het is zinvol te onderzoeken of (delen van) de basismodellen van het waterschap hiervoor gebruikt kunnen worden.

Wanneer watergangen in 1D zijn opgenomen is het niet meer belangrijk om de watergangen met een hoogte op waterlijn en met een lage ruwheid in de 2D-schematisatie mee te nemen. Er kan voor worden gekozen om het 2D-netwerk helemaal weg te halen op deze locaties, maar dit is alleen een optie met een fijn grid. Als de 2D-schematisatie blijft liggen onder de 1D-schematisatie moet er rekening worden gehouden met dubbelingen van bijvoorbeeld berging (afhankelijk van gridcelgrootte).

4.5 Bodemruwheid

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de bodemruwheid de stromingspatronen beïnvloed. Dit heeft in de pilot niet geleid tot hele grote verschillen in inundatieoppervlak of waterdieptes, maar er wordt wel aanbevolen om onderscheid te maken tussen verschillende ruwheden bij verschillend landgebruik. Dit kan op basis van het LGN of openbare databronnen en de omrekeningstabel zoals die in de Leidraad Overstromingsmodellering is opgenomen.

De ruwheid in bebouwd gebied moet hoog zijn (conform Leidraad Overstromingsmodellering), omdat de gebouwen en andere obstakels in bebouwd gebied, niet in het hoogtemodel zijn opgenomen (zie aanbeveling hoogtemodel).

4.6 Grid

Het grid is bepalend voor de rekentijd en het detailniveau van de resultaten. Eisen die aan de rekentijd en het detailniveau worden gesteld zijn afhankelijk van de modeltoepassing. Zo stellen calamiteitenmodellen andere eisen aan rekentijd dan modellen die voor strategische analyse worden gebruikt.

Voor zo betrouwbaar mogelijke resultaten wordt aanbevolen om voor scenario-berekeningen te rekenen met zo klein mogelijke gridcellen. Per gebied zal een gevoeligheidsanalyse gemaakt moeten worden welke gridcelgrootte nog voor acceptabele rekestijden zorgt. Bij de pilot Bommelerwaard bleken gridcellen van 5 m (en de driehoeken die gebruikt worden voor de verfijning) voor zeer grote, onwerkbaar rekestijden te zorgen als gevolg van locaties met grote stroomsnelheden (zoals bij de bres, en bij onderdoorgangen) en enkele droogvallende cellen. Grids met cellen van 20 meter bleken tijdens de pilot Bommelerwaard goed werkbaar. Aanbevolen wordt om ook voor andere overstromingsgebieden in eerste instantie van deze resolutie uit te gaan en op basis van de eerste analyses te bepalen welke gridresolutie nodig en werkbaar is.

Uit de pilot is gebleken dat ook de kwaliteit van de resultaten, de verschillende processen die te zien zijn in overstromingssimulaties, op hoofdlijnen ook bij het gebruik van grotere gridcellen nog te zien waren. Wanneer de hoge lijnelementen, de onderdoorgangen en de

watergangen goed zijn geschematiseerd, zullen de verschillen tussen inundatieoppervlak, debiet door onderdoorgang en maximale waterdiepte kleiner zijn.

Er wordt aanbevolen om te rekenen met een cartesisch grid (vierkante cellen). Dit rekent effectief en is geschikt voor een model waar niet van tevoren bekend van is in welke richting de stroming plaatsvindt (zoals de overstromingsmodellen die het waterschap voornemens is te gaan vervaardigen). Een driehoekig grid is mogelijk ook geschikt, maar deze is niet voldoende onderzocht binnen deze pilot.

Een driehoekig grid heeft als voordeel dat het makkelijker uit te lijnen is. Wel geldt dat er dan meer cellen nodig zijn bij een zelfde resolutie (breedte vierkante cel vs. basis gelijkzijdige driehoek) en zijn de flow links bij driehoeken korter dan bij vierkanten (bij gelijk aantal cellen), wat mogelijk kleinere tijdstappen oplevert.

Er wordt aanbevolen om het grid te verfijnen bij hoge lijnelementen, onderdoorgangen, watergangen en bij de bres, om hier meer detail mee te kunnen nemen. Er moet voorkomen worden dat er driehoeken liggen in het gebied vlak achter de bres. Als de driehoeken niet goed in de stromingsrichting liggen kunnen deze cellen voor kortere tijdstappen en daarmee hogere rekestijden zorgen.

Na het vervaardigen van het grid moet uit een aantal testberekeningen blijken of er nog tijdstapknijpende cellen in het netwerk zitten. Deze kunnen dan handmatig worden aangepast.

4.7 Randvoorwaarden

Voor scenarioberekeningen wordt aanbevolen om de rivier mee te nemen in de modelschematisatie. Wanneer deze door RWS beschikbaar worden gesteld, kan het D-Hydro grid en de Baseline schematisatie gebruikt worden. Ook een 1D-model kan hiervoor worden gebruikt (met een bres tussen 1D en 2D (dit is momenteel nog niet mogelijk) of tussen 2D en 2D). Wanneer er geen model beschikbaar is, kan met het gebiedsgrid ook een stuk van de uiterwaard en de rivier meegenomen worden. Door de rivier mee te schematiseren kan de bresgroei gesimuleerd worden en hiermee het debiet door de bres. Wanneer op de modelranden een bovenstrooms debiet en een benedenstroomse randvoorwaarde worden gezet, wordt ook de daling van de rivierwaterstand door het breken van de dijk meegenomen. Dit is de meest nauwkeurige benadering.

Voor andere sommen zoals calamiteitenberekeningen en gevoeligheidsberekeningen kan het verloop van het debiet door de bres op de rand van het gebied worden gezet zonder de rivier of de bresgroei te simuleren. Dit heeft als voordeel dat het model sneller rekent en er geen koppeling gemaakt hoeft te worden tussen het riviergrid en het gebiedsgrid. Het verloop van het bresdebiet kan uit scenarioberekeningen worden afgeleid. Let wel dat het bresdebiet zeer bepalend is voor het uiteindelijke overstromingsverloop en -patroon en deze met zorg moet worden afgeleid.

Vanuit de Leidraad overstromingsmodellering wordt aangeraden om een aantal scenario's voor de buitenwaterstand door te rekenen, bijvoorbeeld voor afvoeren met een herhalings-tijd van 1/100, 1/1000 en 1/10000 jaar. Ook kan als gevoeligheidsberekening de golfvorm worden veranderd. Voor het benedenrivierengebied moet ook rekening worden gehouden met zeewaterstanden (windopzet) en het al dan niet falen van de Maeslantkering. Bij de Helpdesk Water zijn modelresultaten van dit soort scenario's op te vragen, maar hier zal alleen voor een aantal scenario's informatie beschikbaar zijn (op raaien die relevant zijn voor het overstromingsmodel). Voor de Maas was bijvoorbeeld wel informatie beschikbaar voor het scenario met 4000 m³/s bij Borgharen.

4.8 Bresgroei

In de pilot is gebruik gemaakt van de Verheij-van der Knaap formule voor bresgroei. Dit is op dit moment de best beschikbare methode. Aanbevolen wordt om per breslocatie een aantal gevoeligheidsanalyses uit te voeren voor de locatie van de start van de bres (100-500 m afwijking), de bresgroeiparameters, en het tijdstip van de bres. Hierdoor kan een gevoel verkregen worden voor gevoeligheden aangaande de bresbreedte en het bresdebiet. Binnen de pilot is dit voor breslocatie Hoenzadriel al uitgevoerd.

Er wordt aanbevolen om te werken met gekozen waterstandspunten. Hiermee zijn de eventuele afhankelijkheden van grid of verloop van de uiterwaard weggenomen. Waterstanden boven- en benedenstrooms zijn de drijvende krachten voor de bresgroei.

4.9 Resultaten van de overstromingsberekeningen

Goed kaartmateriaal is cruciaal om de scenario's te bestuderen en met elkaar te kunnen vergelijken. De waterdieptekaart, stroomsnelhedenkaart en de aankomsttijdenkaart zorgen voor een vrij compleet overzicht. Voor het nabewerken en visualiseren van de output van D-Hydro kan gebruik worden gemaakt van DFX en Crayfish voor netcdf-bestanden en met python scripts om bewerkingen te doen zoals het berekenen van de aankomsttijd en het omzetten naar rasterbestanden.

Ter communicatie zijn filmpjes van de inundatie een handig hulpmiddel. Deze bieden een goed beeld van het verloop van de inundatie.

Het wordt aangeraden om vanuit D-Hydro de fou-file (maximale waarden), de his-file (voor grafieken) en de classmap-file te gebruiken. De map-file biedt meer detail dan de classmap-file, maar voor de doeleinden waarvoor de classmap gebruikt wordt (aankomsttijden en filmpjes) is het detailniveau van de classmap-file groot genoeg. Het scheelt veel in bestandsgrootte. Voor de waterdiepteklassen moeten in ieder geval 0.02 m en 1.5 m worden meegenomen, om de stijgsnelheid te kunnen bepalen.

5 Conclusie pilot Bommelerwaard

5.1 Gebruik D-Hydro

Tijdens de pilot Bommelerwaard is met D-Hydro succesvol een overstromingsmodel van de Bommelerwaard vervaardigd. Geconcludeerd wordt dat de belangrijkste functies voor overstromingsmodellering beschikbaar zijn in D-Hydro. Omdat de ontwikkeling van de Deltashell iets achterloopt bij de ontwikkelingen van het rekenhart, is in deze pilot alleen gebruik gemaakt van de ontwikkel-interface van D-Hydro. De verwachting is dat op korte termijn het waterschap ook via de Deltashell gebruik kan maken van de benodigde functionaliteiten.

De komende tijd zullen (o.a. in het kader van TKI II) de 1D functionaliteiten doorontwikkeld worden (zowel wat modellering alsook visualisatie van resultaten betreft). Daarmee komen ook functionaliteiten zoals kunstwerken en sturing beschikbaar die van belang zijn voor wanneer watergangen in 1D worden meegenomen in de overstromingsmodellen.

5.2 Gegevens

Het verzamelen en bewerken van alle modelinput is een relatief omvangrijk proces binnen de overstromings simulaties. Om een overstromingsmodel te vervaardigen, zijn o.a. de volgende gegevens benodigd:

- Het AHN voor het hoogtemodel en de hoogte van lijnelementen en onderdoorgangen
- Panden uit het BAG voor het hoogtemodel
- Het landgebruik van LGN voor de ruwheden
- Top10NL of OpenStreetMaps voor ligging van wegen en spoorwegen, bebouwde kom en onderdoorgangen.
- BGT of OpenStreetMaps voor ligging geluidswallen (niet gebruikt in deze pilot).
- Ligging van keringen van het waterschap
- Waterlijnen van het waterschap

Deze gegevens zijn openbaar beschikbaar en/of bij het waterschap aanwezig. Voor de meeste modelonderdelen zijn er beperkte bewerkingen nodig om de gevraagde inputbestanden te vervaardigen (bijvoorbeeld het omzetten van het LGN naar een ruwhedengrid of het meegeven van een hoogte aan de hoge lijnelementen). De bewerkingen kunnen met behulp van scripts worden uitgevoerd. Voor hoge lijnelementen en onderdoorgangen is het nodig om de dataset handmatig op volledigheid te controleren, omdat de databronnen niet altijd correct of compleet zijn.

De inventarisatie van onderdoorgangen en de omzetting naar de juiste modelinput vergen het meeste werk. De ligging van tunnels en viaducten kan op open data worden gebaseerd en bij het waterschap is de ligging van duikers bekend. Voor de juiste modelinput moeten

deze nog worden omgezet naar een lijn met de juiste lengte en moet de juiste breedte worden gehaald uit de luchtfoto of de vlakken van tunnels en viaducten. De hoogteligging van de onderdoorgangen kan worden gebaseerd op het AHN, maar omdat het gaat om locaties die niet altijd helemaal goed in het AHN zitten, is het van belang dit goed te controleren. Van de meeste duikers is breedte en hoogteligging bekend.

5.3 Model

Wanneer de bestanden eenmaal zijn vervaardigd, kunnen deze in veel verschillende grids worden toegepast.

Het vervaardigen van het grid gaat snel met automatische gridgeneratie, het is hierin ook mogelijk om gridverfijning toe te passen op basis van een verfijningsraster. Ook 1D is eenvoudig toe te voegen vanuit lijnbestanden en 1D2D-koppelingen zijn automatisch te genereren. Daarna zijn er nog enkele handmatige stappen nodig zoals:

- koppelen met een riviergrid;
- controle op korte flowlinks en herorthogonalisatie;
- het controleren van 1D2D-koppelingen;
- het verbeteren van het netwerk door rekenstapknijpende cellen te bewerken of verwijderen.

De bres en de bresgroeiparameters zijn eenvoudig aan te passen, net als andere randvoorwaarden op de rivier. Wanneer in het opbouwen van de bestanden (het verwijderen van de kering uit het AHN en de koppeling tussen riviergrid en gebiedgrid) rekening is gehouden met meerdere breslocaties, kan dit worden gedaan met steeds dezelfde schematisatie.

Uit een overstromingsmodel komt veel informatie, en het is belangrijk om de resultaten op een manier te bewerken dat de informatie gemakkelijk gedeeld kan worden. Resultaten kunnen worden bekeken in de interface, met visualisatietools als DFX en Crayfish en kunnen worden nabewerkt naar raster-files die in ArcGIS kunnen worden bekeken.

Met betrekking tot rekentijd zijn er testsommen nodig per gebied om te bepalen welke gridcelgrootte de benodigde betrouwbaarheid geeft binnen haalbare rekentijd. Naar aanleiding van deze pilot is de verwachting dat wanneer alle belangrijke elementen goed in de schematisatie zijn opgenomen (hoge lijnen, watergangen en onderdoorgangen), met een grover grid op hoofdlijnen hetzelfde resultaat kan worden behaald als met een fijner grid. Het globale beeld is ook te verkrijgen met een grof grid. Als gedetailleerdere informatie gewenst is, is het nodig om fijnere gridcellen te gebruiken voor de berekening.

6 Referenties

- Ref. 1. Deltares (2018), Leidraad voor het maken van overstromingssimulaties
- Ref. 2. Deltares (2019), terugkoppeling TKI1-overleg 26 september 2019.

Bijlage A Plan van Aanpak - pilot Bommelerwaard

Bijlage B Overzicht modelschematisaties pilot

Tabel 5 Overzicht gebruikte modelschematisaties voor de pilot Bommelerwaard

Omschrijving	Model	Kenmerken
Variatie in het gebied (zonder riviergrid, opgelegd debiet op het model)	5-10 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen in hoogtemodel
	5-10 m grid met panden	Panden opgehoogd in hoogtemodel en aangepaste ruwheden in bebouwd gebied. Lijnelementen en onderdoorgangen in hoogtemodel
	5-40 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	10-20 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	20-40 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	40 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid zonder lijnelementen	Lijnelementen en onderdoorgangen in het hoogtemodel
	100 m grid zonder onderdoorgangen	Lijnelementen apart, geen 1D-onderdoorgangen
	100 m grid met gullies	Lijnelementen en onderdoorgangen apart, watergangenbestand als gullies
	100 m grid met 1D-watergangen	Lijnelementen en onderdoorgangen apart, watergangen als 1D-element met uniforme breedte
Variatie bres (met riviergrid)	100 m grid met FLS-bres	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid met bresgroei (gekozen punten)	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid met bresgroei klei i.p.v. zand	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid met bresgroei andere locatie	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid met bresgroei (niet gekozen punten)	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	40 m grid met FLS-bres	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	40 m grid met bresgroei (gekozen punten)	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	40 m grid met bresgroei andere locatie	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid met bresgroei 12 uur eerder	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
	100 m grid met bresgroei 12 uur later	Lijnelementen en onderdoorgangen apart
Delft Software-dagen model	10-80 m grid	Lijnelementen en onderdoorgangen in hoogtemodel

Bijlage C Rekentijden modellen

Tabel 6 Overzicht reketijden van de verschillende modellen

model	aantal gridcellen (flownodes)	kleinste cel	tijdstap-gemiddeld (s)	simulatie-periode (h)	reken-tijd (h)	gemid-delde reken-tijd per 24 h (h)	server/laptop
5-10 m grid zonder rivier	2003581	5	0.6	237	312	31.6	server
5-10 m grid met panden zonder rivier	2003581	5	0.33	24	30	30	server
5-40 m grid zonder rivier		5	0.31	204	116	13.6	server
10-20 m grid zonder rivier	547123	10	0.82	237	78	7.9	server
20-40 m grid zonder rivier	186508	20	3.9	237	8	0.8	laptop
20-40 m grid zonder rivier	186508	20	3.9	237	4.6	0.5	server
40 m grid zonder rivier	67991	40	8	237	1.7	0.2	laptop
100 m grid zonder rivier	10672	100	29.7	237	0.1	0.01	laptop
100 m grid met rivier	60593	100	10.72	302	2	0.2	laptop
40 m grid met rivier	116189	40	10.5	302	3.9	0.3	laptop
alleen riviergrid met 40 m grid zonder bres	116189	40	10.8	302	1.7	0.1	laptop